

**Przewarstwienia klastyczne i popiół w węglu brunatnym
eksploatowanym w okolicach Konina, Polska środkowa**

(rozprawa doktorska)

Clastic interbeddings and ash within lignite mined in the Konin vicinity, central Poland
(PhD thesis)

Lilianna Chomiak

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geologii

Rozprawa doktorska (w postaci 4 publikacji) przedstawiona Radzie Naukowej dyscypliny
nauki o Ziemi i środowisku na stopień doktorski na Wydziale Nauk Geograficznych i
Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Sierpień, 2021



Spis zawartości

1. Abstrakt	3
2. Abstract	6
3. Deklaracja	9
4. Podziękowania	10
5. Zestaw wybranych publikacji	11
5.1. Pierwsza publikacja	12
5.2. Druga publikacja	26
5.3. Trzecia publikacja	36
5.4. Czwarta publikacja	49
6. Wnioski	66
7. Conclusions	67
8. Oświadczenia współautorów	68

1. Abstrakt

Moja rozprawa doktorska, przedstawiona Radzie Naukowej dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku na stopień doktorski na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza) składa się z czterech wybranych publikacji. Mój udział w ich przygotowaniu mieści się w przedziale 35–100%, co zostało poświadczone przez współautorów (oświadczenia współautorów). Dwie publikacje (pierwsza i druga) poświęcone są osadom klastycznym, które tworzą przewarstwienia w pokładzie węglowym. Natomiast dwie kolejne publikacje (trzecia i czwarta) obejmują badania popiołu występującego w węglu. Tak się składa, że w okolicach Konina eksploatowany jest aktualnie (lata 2015–2021, czas realizacji badań) wyłącznie 1. środkowopolski pokład węgla brunatnego. Jego eksploatacja odbywa się w trzech odkrywkach: Józwin IIB, Drzewce i Tomisławice. Ważną część badań stanowiły prace terenowe, w tym sedimentologiczne. Ponadto, z każdej odkrywki pobrano liczne próbki zarówno z osadów klastycznych, jak i z pokładu węglowego. Posłużyły one do następujących badań laboratoryjnych: uziarnienia klastyków, zawartości popiołu w węglu i określenia składu chemicznego popiołu, tj. składu pierwiastkowego i tlenkowego.

W wyniku działalności Kopalni Węgla Brunatnego Konin (KWB Konin) w latach 2015–2016, między dwoma ławami węgla, odsłonięte zostały osady klastyczne w odkrywce Tomisławice. Miały one kształt soczewy o długości ok. 500 m i miąższości do 1,8 m, z warstwą węgla do 20 cm w części północnej odsłonięcia. Składały się one z głównie drobnoziarnistych i dobrze wysortowanych piasków, z wyjątkiem osadów znajdujących się w stropowej oraz spągowej części, które były wzbogacone w materię organiczną. Na podstawie analizy sedimentologicznej tych osadów klastycznych (tj. ich architektury i cech teksturalno-strukturalnych) zaproponowano model ich powstania. Osady te powstały, najprawdopodobniej w wyniku dwóch powodzi, na terenie zalewowym środkowomioceńskiej rzeki meandrującej lub anastomozującej. Po przerwaniu wału brzegowego przez wody powodziowe osady piaszczyste, pochodzące głównie z koryta rzeki oraz wałów brzegowych były deponowane na obszarze torfowiska w postaci stożków krewasowych. W efekcie, w pokładzie węgla brunatnego z odkrywki Tomisławice występują przewarstwienia klastyczne, co uniemożliwiało wykorzystanie znacznej jego części do celów energetycznych – zbyt wiele popiołu. Warto też dodać, że wspomniane osady klastyczne są pierwszymi opisanymi z miocenu węglonośnego Polski (pierwsza publikacja).

W latach 2018–2000, w pokładzie węgla w tej samej odkrywce (Tomisławice), odsłaniała się rozległa ($>1,5 \text{ km}^2$) i gruba (do 0,8 m) warstwa iłó. Najprawdopodobniej, te drobnoziarniste osady powstały w wyniku długotrwałej sedymentacji w jeziorze, które istniało na obszarze środkowomiocenijskiego torfowiska. Występowanie tych iłó w pokładzie węgla znacznie obniża jakość surowca wykorzystywanego do produkcji energii elektrycznej, gdyż obecnie węgiel brunatny w odkrywce Tomisławice wydobywa się razem z iłami. W skrajnym przypadku, gdy maksymalna miąższość warstwy iłó wynosi 0,8 m, zawartość popiołu w całym pokładzie węgla może zwiększyć się nawet dwukrotnie. Jest to bardzo niekorzystne dla środowiska naturalnego. Dlatego zalecane byłoby selektywne wydobywanie węgla brunatnego, czyli bez iłó, co niestety nie jest praktykowane ze względów technologicznych i finansowych (druga publikacja).

Oprócz przewarstwień klastycznych widocznych makroskopowo pokład węgla zawiera też substancję mineralną w postaci popiołu, który powstaje w wyniku spalania węgla. Popiół jest szkodliwy zarówno dla środowiska, jak i obniża wartość opałową węgla brunatnego. Dlatego, przebadano zawartość popiołu dla 266 próbek węgla eksploatowanego w odkrywkach: Drzewce, Tomisławice i Józwin IIB. Badania przeprowadzono zgodnie z międzynarodowymi standardami (norma ISO 1171). Najpierw próbki spalono w temperaturze 850°C , a następnie określono zawartość popiołu w stanie suchym (A^d). Badany pierwszy środkowopolski pokład węgla brunatnego charakteryzuje się zmiennym rozkładem popiołu zarówno w wybranych profilach pionowych, jak i wzdłuż ścian węglowych, a także pomiędzy wspomnianymi trzema odkrywkami. Zawartość popiołu w poszczególnych próbkach waha się od 6,5 do 69,8% wag., natomiast jego wartość średnia w poszczególnych odkrywkowych waha się od 9,7 do 17,6% wag. Znaczne wzbogacenie w popiół niektórych partii pokładu węgla zinterpretowano jako konsekwencję powodzi występujących na środkowomiocenijskim torfowisku lub efekt wytrącania chemicznego (np. węglan wapnia). Dobrze rozpoznanie rozkładu substancji mineralnej (popiołu) w węglu pozwoliłoby na jego selektywną eksploatację, a przez to na lepszą ochronę środowiska. Po prostu, mniej popiołu w węglu oznacza mniejsze zanieczyszczenie atmosfery i mniej popiołu na składowiskach (trzecia publikacja).

Nie tylko ilość, ale również jakość popiołu zawartego w spalonym węglu ma znaczenie dla środowiska naturalnego o czym wspomniano wyżej. Dlatego uśrednione próbki z trzech profili pokładu węglowego, pochodzące z obecnie funkcjonujących odkrywek zarządzanych przez KWB Konin, zostały poddane badaniom chemicznym w Centralnym Laboratorium Pomiarowo-Badawczym Sp. z o.o. w Jastrzębiu Zdroju (polska). Zbadany

został ich skład chemiczny (tlenki i pierwiastki śladowe) według normy ASTM D6349-13. Dominującymi tlenkami w przebadanych popiołach są SiO_2 i CaO , a wśród pierwiastków śladowych w przeważającej ilościach są to Ba, Sr, Cu. Najważniejszym pierwiastkiem szkodliwym, który pojawia się w analizowanych popiołach jest Pb. Wyższe od średnich wartości klarków w badanych popiołach ma tylko kilka pierwiastków, takich jak: Ba, Cu, Pb i Sb. Uzyskane wyniki dowodzą, że analizowane popioły są równie niebezpieczne dla środowiska naturalnego jak odpady z innych węgli brunatnych wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej. Pomimo pewnych różnic między odkrywkami węgla brunatnego ich popioły mają podobny skład chemiczny tak tlenków, jak i poszczególnych pierwiastków. Popioły te można określić jako popioły węglanowe ze względu na wysoką zawartość CaO . Ta wyższa (~30% wag.) zawartość CaCO_3 jest pozytywnym składnikiem, gdyż uczestniczy w procesie tzw. naturalnego odsiarczania (czwarta publikacja).

2. Abstract

My PhD thesis, submitted to the Scientific Council of the study of the Earth and the environment in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Geographic and Geological Sciences (Adam Mickiewicz University), consists of four selected publications. My participation in their preparation is in the range of 35–100%, which was confirmed by the co-authors (statements of the co-authors). Two publications (the first and the second) are devoted to clastic sediments that form interbeds in the lignite seam. On the other hand, two subsequent publications (the third and the fourth) include studies of ash present within lignite. It just so happens that in the vicinity of Konin, only the first Mid-Polish lignite seam is currently exploited (2015–2021, research period). It is mined from three opencasts: Józwin IIB, Drzewce and Tomisławice. An important part of the research was fieldwork, including sedimentological studies. Moreover, numerous samples were taken from each opencast, both from clastic sediments and from the lignite seam. They were used for the following laboratory tests: grain-size analysis, ash content within lignite and determination of the chemical composition of the ash, that is, its elemental and oxide composition.

As a result of mining activity of the Konin Lignite Mine (KWB Konin) in 2015–2016, between two lignite benches, siliciclastic sediments were uncovered in the Tomisławice opencast. They were lens-shaped, about 500 m long and up to 1.8 m thick, with a lignite layer up to 20 cm in the northern part of the exposure. They consisted mainly of fine-grained and well-sorted sands, with the exception of sediments in the top and basal parts, which were enriched with organic matter. Based on the sedimentological analysis of these clastic sediments (i.e., their architecture and textural and structural features), a model of their formation was proposed. These sediments were formed, most probably as a result of two floods, in the floodplain area of a meandering or anastomosing river in the Middle Miocene. After the natural levee breaching by flood waters, sandy sediments, originating mainly from the river bed and levees, were deposited in the mire area in the form of crevasse splays. In effect, in the lignite seam from the Tomisławice opencast there are clastic interbeds, which made it impossible to use its significant part for electricity production – too much ash. It is also worth noting that the above-mentioned clastic sediments are the first to be described from the Miocene of Poland (first publication).

In the years 2018–2020, in the lignite seam in the same opencast (Tomisławice), an extensive ($>1.5 \text{ km}^2$) and thick (up to 0.8 m) layer of clay was exposed. Most likely, these

fine-grained sediments were formed as a result of long-term deposition in the lake, which existed in the area of the mid-Miocene mire. The presence of these clays in the lignite seam significantly reduces the quality of the raw material used for electricity production, as currently lignite in the Tomisławice opencast is mined together with the clays. In the extreme case, when the maximum thickness of the clay layer is up to 0.8 m, the ash content in the entire lignite seam may increase even twice. This is very harmful to the environment. Therefore, selective extraction of lignite, i.e. without clay, would be recommended. Unfortunately, this is not practiced for technological and financial reasons (second publication).

In addition to macroscopically visible clastic layers, the lignite seam also contains a mineral matter in the form of ash, which is formed as a result of lignite combustion. Ash is harmful both to the environment and reduces the calorific value of lignite. Therefore, ash content was tested for 266 lignite samples mined in the opencasts: Drzewce, Tomisławice and Józwin IIB. The analyses were carried out in accordance with international standards (ISO 1171). First, the samples were burnt at the temperature of 850 °C, and then the ash content on the dry basis was determined (A^d). The examined first Mid-Polish lignite seam is characterized by a variable ash distribution both in the selected vertical profiles and along the lignite walls, and also between the above-mentioned three opencasts. The ash content in individual samples ranges from 6.5 to 69.8 wt.%, while its average value for individual opencasts is from 9.7 to 17.6 wt.%. Significant enrichment in ash of some parts of the lignite seam was interpreted as a consequence of floods occurring in the middle Miocene mire or the effect of chemical precipitation (e.g., calcium carbonate). A good diagnosis of the mineral substance (ash) spatial distribution in lignite would allow its selective exploitation, and thus better protection of the environment. Simply put, less ash in coal means less pollution to the atmosphere and less ash in landfills (third publication).

Not only the quantity, but also the quality of the ash contained in the combusted lignite is important for the environment, as mentioned above. Hence, the averaged samples from three vertical lignite seam profiles, coming from the currently operating opencasts managed by Konin Lignite Mine, were subjected to chemical tests at the Central Measuring and Research Laboratory in Jastrzębie-Zdrój (Poland). Their chemical composition (oxides and trace elements) was tested according to the ASTM D6349-13 standard. The dominant oxides in the tested ashes are SiO₂ and CaO, and among the trace elements in the predominant amounts they are Ba, Sr, Cu. The most important harmful element that appears in the analyzed ashes is Pb. Only a few elements, such as Ba, Cu, Pb and Sb, have higher

than average values of the clarks in the tested ashes. The obtained results prove that the analyzed ash is as hazardous to the natural environment as waste from other lignite coals used for the production of electricity. Despite some differences between the lignite opencasts, their ashes have a similar chemical composition for oxides and concentrations of individual elements. These ashes can be described as carbonate ones due to increased content CaO. On the other hand, this high CaCO₃ content (~30 wt.%) is a positive component as it participates in the so-called natural desulfurization (fourth publication).

3. Deklaracja

Ja, Lilianna Chomiak, deklaruje, że zestaw czterech publikacji przedstawiony w postępowaniu na stopień doktorski wykonałam sama (2 publikacje – mój udział 100%) lub we współautorstwie (2 publikacje – mój udział 35 i 60%). Oszacowany udział współautorów tych publikacji został potwierdzony przez nich odpowiednimi, dołączonymi oświadczeniami – rozdz. 8).

Ponadto deklaruje, że żadnej ze wspomnianych publikacji nie przedstawiałam w jakimkolwiek postępowaniu awansowym. Prawdziwość tych słów potwierdzam własnoręcznym podpisem.

.....

4. Podziękowania

Serdeczne podziękowania kieruję do mojego promotora prof. UAM dra hab. Marka Widery, którego pomoc i wsparcie było kluczowym elementem podczas powstawania tej pracy doktorskiej. Dziękuję także za poświęcony mi czas na konsultacjach, pomoc w przygotowaniach do konferencji naukowych i organizacji stażów krajowych jak i zagranicznych.

Chciałabym także podziękować pracownikom Kopalni Węgla Brunatnego Konin, w szczególności Sławomirowi Kaczkowskiemu, Krzysztofowi Komorowskiemu za pomoc podczas prac terenowych oraz Mariuszowi Działmarze za udostępnienie archiwum, zezwolenie na staż i badania.

Pragnę bardzo podziękować moim wspaniałym rodzicom Cecylii i Romanowi Chomiakom, dzięki którym miałam możliwość kształcić się oraz zdobywać cenną wiedzę, którzy stale mnie wspierali i mobilizowali przez cały czas trwania studiów.

Dziękuję również Pawłowi Urbankowi za wyrozumiałość, wsparcie i cierpliwość, które są dla mnie bardzo cenne.

5. Zestaw wybranych publikacji

Do oceny na stopień doktorski przedstawiam zestaw czterech następujących publikacji:

- 1) **Chomiak L.**, 2020a. Crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin, central Poland: architecture, sedimentology and depositional model. **Geologos**, 26, 1: 25–37.
- 2) **Chomiak L.**, Urbański P., Widera M., 2020. Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice k. Konina w środkowej Polsce. **Przegląd Geologiczny**, 68, 6, 526–534.
- 3) **Chomiak L.**, 2020b. Variation of lignite ash in vertical and horizontal sections of mining walls in the Konin Lignite Mine, central Poland. **Geology, Geophysics and Environment**, 46, 1, 17–28.
- 4) **Chomiak L.**, Widera M., 2020. A comparative study of the oxide and elemental composition of ash from lignite burned at various temperatures – Konin Lignite Mine, central Poland. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management**, 36, 4, 145–160.

5.1. Pierwsza publikacja

Chomiak L., 2020a. Crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin, central Poland: architecture, sedimentology and depositional model. **Geologos**, 26, 1: 25–37. (mój udział: 100%)

Crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin, central Poland: architecture, sedimentology and depositional model

Lilianna Chomiak

Institute of Geology, Adam Mickiewicz University, 12 Krygowski Street, 61-680 Poznań, Poland;
e-mail: lilcho@amu.edu.pl

Abstract

The present article focuses predominantly on sandy deposits that occur within the Middle Miocene lignite seam at the Tomisławice opencast mine, owned by the Konin Lignite Mine. As a result of mining activity, these siliciclastics were available for direct observation in 2015–2016. They are situated between two lignite benches over a distance of ~500 m in the lower part and ~200 m in the higher part of the exploitation levels. The maximum thickness of these sandy sediments, of a lenticular structure in a S–N cross section, is up to 1.8 m. With the exception of a thin lignite intercalation, these siliciclastics comprise mainly by fine-grained and well-sorted sands, and only their basal and top layers are enriched with silt particles and organic matter. Based on a detailed analysis of the sediments studied (i.e., their architecture and textural-structural features), I present a discussion of their genesis and then propose a model of their formation. These siliciclastics most likely formed during at least two flood events in the overbank area of a Middle Miocene meandering or anastomosing river. Following breaching of the natural river levee, the sandy particles (derived mainly from the main river channel and levees) were deposited on the mire (backswamp) surface in the form of crevasse splays. After each flooding event, vegetation developed on the top of these siliciclastics; hence, two crevasse-splay bodies (here referred to as the older and younger) came into existence. As a result, the first Mid-Polish lignite seam at the Tomisławice opencast mine is currently divided in two by relatively thick siliciclastics, which prevents a significant portion of this seam from being used for industrial purposes.

Key words: backswamp area, facies analysis, siliciclastic deposition, Neogene

1. Introduction

Crevasse splays are commonly found in the valleys of both meandering and anastomosing rivers (Smith et al., 1989; Makaske, 2001; Zieliński, 2014). They are created by the breaching of natural levees that extend along the river banks during the initial phase of flooding (e.g., Bristow et al., 1999; Farrell, 2001). Crevasse-splay bodies can vary significantly in size, their maximum thickness usually being be-

tween 2.5 and 6.0 metres in the proximal part (i.e., in close proximity to the levee), while their length and width may even exceed 2 kilometres (Smith et al., 1989; Mjøs et al., 1993; Boggs, 2012).

Deposits of crevasse splays are well known from around the world, including lignite/coal areas, both in the rock record and from modern sedimentary environments (e.g., Horne et al., 1978; Zwoliński, 1985; Kasiński, 1986; Fielding, 1986; Kurowski, 1999; Pérez-Arlucea & Smith, 1999; Słomka et al.,

2000; Szponar, 2000; Davies-Vollum & Kraus, 2001; Gębica & Sokołowski, 2001; Farrell, 2001; Stouthamer, 2001; Kordowski et al., 2014; Burns et al., 2017). In Polish geological literature, however, numerous crevasse-splay deposits are interpreted mainly on the basis of data from boreholes that penetrate the coal-bearing Carboniferous succession (e.g., Gradziński et al., 1995, 2005; Kędzior, 2001, 2016; Doktor, 2007).

In Poland, crevasse-splay sediments in the rock record are available for direct observation only at four exposures. The first of these is the Brynów brickyard, in the city of Katowice, where standing trunks of horsetails (*Calamites*) have been documented within sandy clay deposits of Late Carboniferous (Westphalian A) age. These strata were interpreted by Brzyski et al. (1976) as typical of crevasse splays which were formed by several depositional cycles. The second outcrop, located at Sołtyków, in the vicinity of the city of Skarżysko Kamienna (northern part of the Holy Cross Mountains), includes sandy lithosomes within muddy silt deposits of Early Jurassic age. These sandy bodies were also recognised as deposits that represent fossil crevasse splays (Pieńkowski, 2004). The Tomisławice opencast mine is the third site to expose a crevasse splay in Poland; it was accessible in 2015 and 2016, and actually the first one to be discovered within Miocene lignite-bearing strata (Widera et al., 2017). These crevasse-splay sedi-

ments were one of the subjects covered in my Master's thesis; the current research revolves around them as well. It is worth adding here that in 2018 a new crevasse splay was exposed in the nearby Józwin IIB opencast mine (Fig. 1). These deposits and deformational structures are currently being investigated and results obtained have been published and discussed in separate papers (Chomiak et al., 2019a, b; Van Loon, 2019).

In the present paper, only the crevasse-splay strata from the Tomisławice opencast mine are characterised, as these were the first to be described directly from the entire Miocene sequence in Poland. Some sedimentological issues that are in need of clarification have not yet been analysed. Therefore, the main aims of the present study are threefold: 1) to explain briefly the differences in cross-sectional shape of the crevasse-splay bodies; 2) to describe and interpret facies that represent the crevasse-splay deposits examined and 3) to propose, for the first time, a depositional model that comprises the formation stages of the two superimposed crevasse splays.

2. Study area

2.1. Location

The crevasse-splay deposits examined are situated in the southern part of the Tomisławice lignite opencast mine, which is ~30 km north of the city of Konin in central Poland (Fig. 1). The siliciclastics studied occur between two lignite benches on the lower exploitation level and between sands that are below the lignite seam and remains of the upper lignite bench or Quaternary deposits on the upper overburden level (compare Figs. 2–4 and 5).

2.2. Geology and lithostratigraphy

The research area is in the eastern part of the Mogilno-Łódź Basin, above the southeastern slope of a deeply rooted salt structure, the so-called 'Gopło Anticline' (Dadlez et al., 2000). According to the subdivision of Poland into tectonic units, the territory of the Tomisławice opencast mine is located in the Szczecin-Miechów Synclinorium and, more precisely, in the eastern part of the Mogilno-Łódź Segment (Żelaźniewicz et al., 2011).

The Mesozoic top in the study area comprises marls of Late Cretaceous age (Fig. 2; Dadlez et al., 2000). The Cenozoic succession starts with Pale-

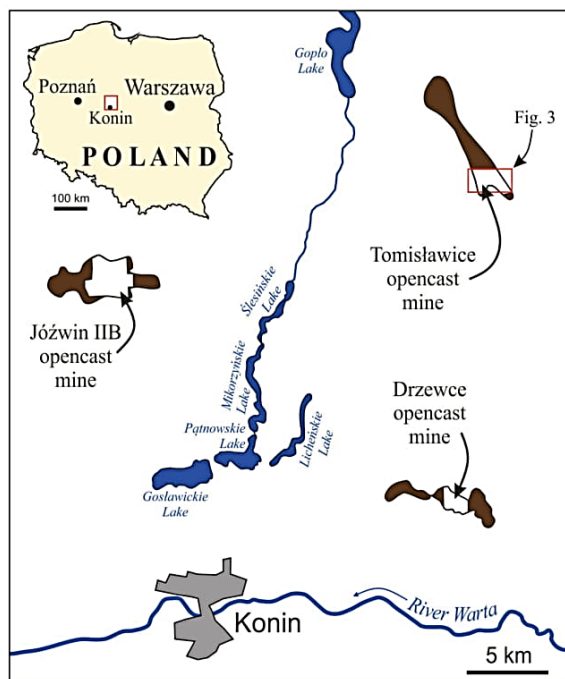


Fig. 1. Location map of the study area

ogene strata, most likely of Early Oligocene age, which locally fill a shallow tectonic depression. Deposits formed at that time comprise greenish glauconitic sands of marine origin (Widera & Kita, 2007).

After Late Oligocene uplift and erosion in central Poland, Neogene deposition commenced. This is dominated by fluvial sediments, interbedded with carbonaceous/coaly layers. Thus, the Neogene in the area of the 'Tomisławice' deposit starts with a 12-m-thick layer of sands, often enriched with organics, which belong to the Koźmin Formation of Early-Middle Miocene age. Overlying is the Poznań Formation (Middle Miocene to earliest Pliocene), which terminates the Neogene succession in this part of Poland. The Poznań Formation is di-

vided into two members, i.e., the older, Grey Clay Member, and the younger, Wielkopolska Member (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło, 1997). The former unit includes the first Mid-Polish lignite seam (Kasiński & Słodkowska, 2016), which reaches an average thickness of ~6.5 m in the study area; the latter member, comprising the so-called 'Poznań Clays', is preserved only locally in residual form (Fig. 2; see Widera 2016a, 2017).

The Neogene deposits described above are capped by Quaternary strata which vary in thickness between 35 and 60 metres in the area of the Tomisławice opencast mine. These Quaternary deposits consist mainly of glacial tills, gravels and sands as well as fluvioglacial gravels, sands and muds (Fig. 2; see Widera et al., 2017).

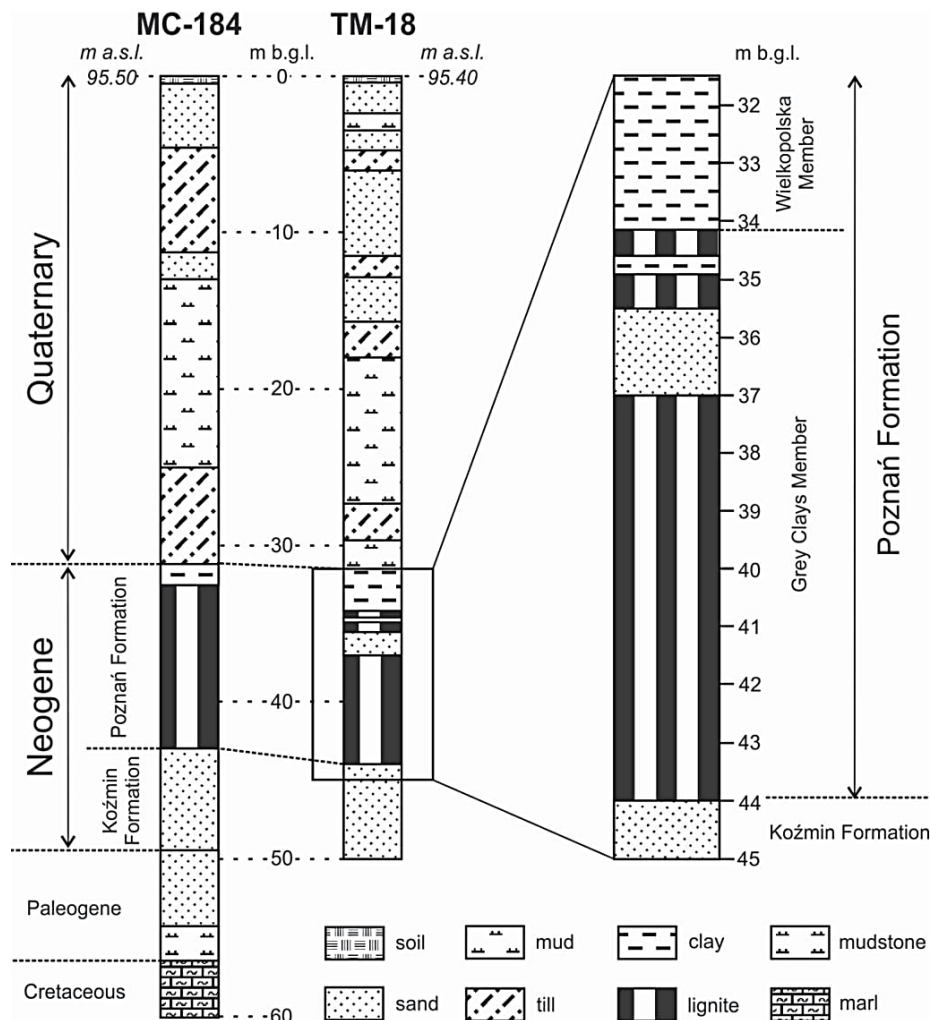


Fig. 2. Compilation of boreholes MC-184 and TM-18 in the area of the 'Tomisławice' lignite deposit, depicting the lithostratigraphy of the Cenozoic succession and the position of the crevasse splay(s) examined within the first Mid-Polish lignite seam. For the location of boreholes, reference is made to Figure 3

3. Material and methods

3.1. Field data

The results of the present study are based mainly on field observations carried out in the southern part

of the Tomisławice lignite opencast mine (Fig. 3) in the autumn of 2015. The sandy deposits analysed were visible over a distance of ~500 m between two lignite benches on the lower exploitation level. The summarised thickness of these siliciclastics reached a maximum of 1.4 metres (Fig. 4A). However, they

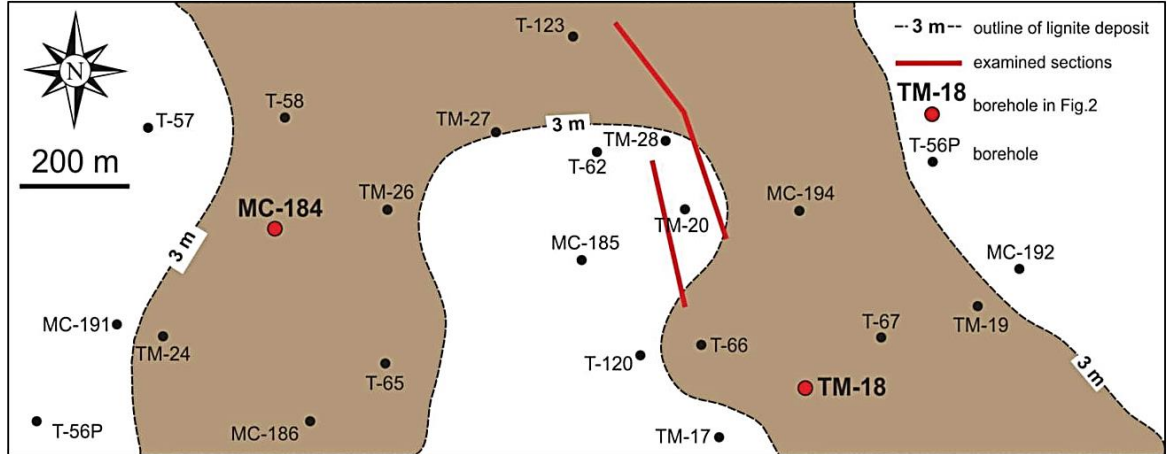


Fig. 3. Documentation map of the southern part of the 'Tomisławice' lignite deposit, showing location of lignite and overburden faces with crevasse-splay interbeddings boreholes MC-184 and TM-18 (compare Fig. 2) examined in more detail. For location of the area covered by this map see Figure 1

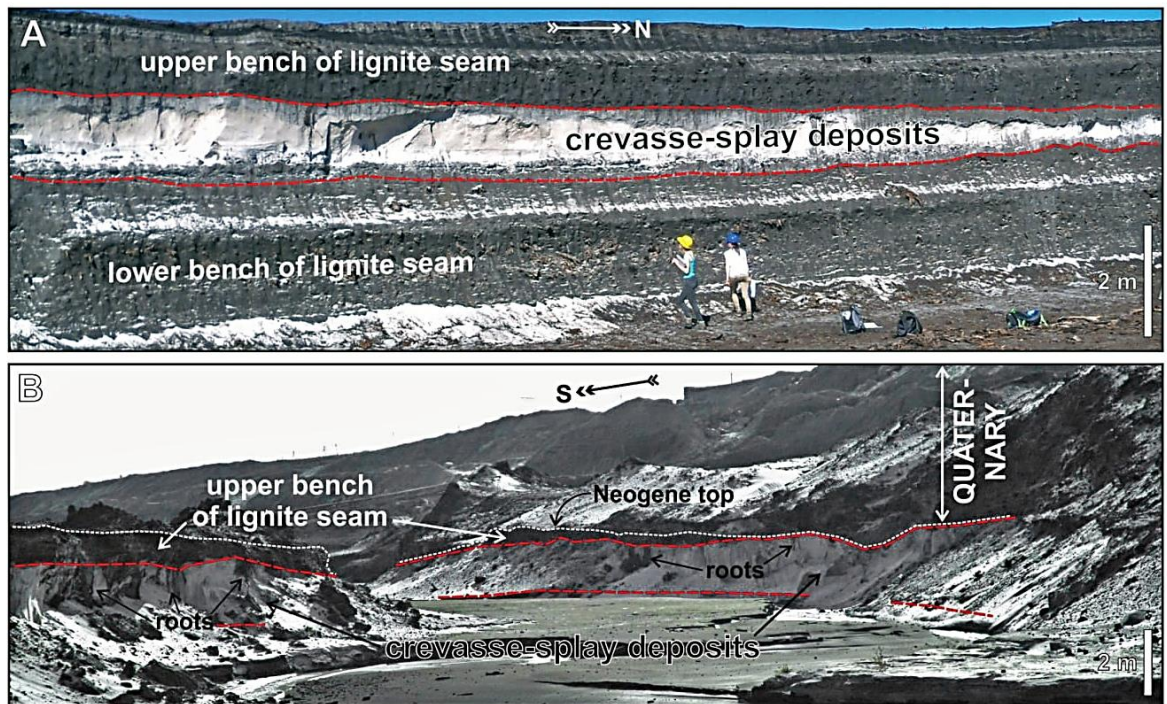


Fig. 4. Broad view of the crevasse-splay deposits within the First Mid-Polish lignite seam outcropping at the Tomisławice mine

A – distal part of the crevasse splay; B – proximal part of the crevasse splay. For location of the area covered by this map see Figure 3

outcropped over a distance of ~200 m, with a maximum total thickness of 1.8 m on the upper overburden level (Fig. 4B). The height of the mine faces examined ranged from 2 to 6 metres and extended over a length of between 200 and 500 metres in a north-south direction and over more than 100 m in an east-west direction (Fig. 3). Furthermore, during fieldwork, 50 samples of sands, silty sands and coaly sands were collected for laboratory analysis.

3.2. Geological mapping

In order to characterise the architecture of the crevasse-splay bodies (dimensions, shape, etc.), the lig-

nite and overburden faces were mapped. Data from boreholes MC-184 and TM-18 were also used to describe the geology, including the lithostratigraphical subdivision, of the study area (compare Figs. 2 and 3). All the necessary data were obtained from the archives of the Konin Lignite Mine.

3.3. Facies analysis

During fieldwork, firstly the facies within the crevasse-splay bodies were distinguished. Subsequently, these facies were described using the facies codes of Miall (1977), Rust (1978) and Zielinski (1995, 2014). The lithotype code proposed

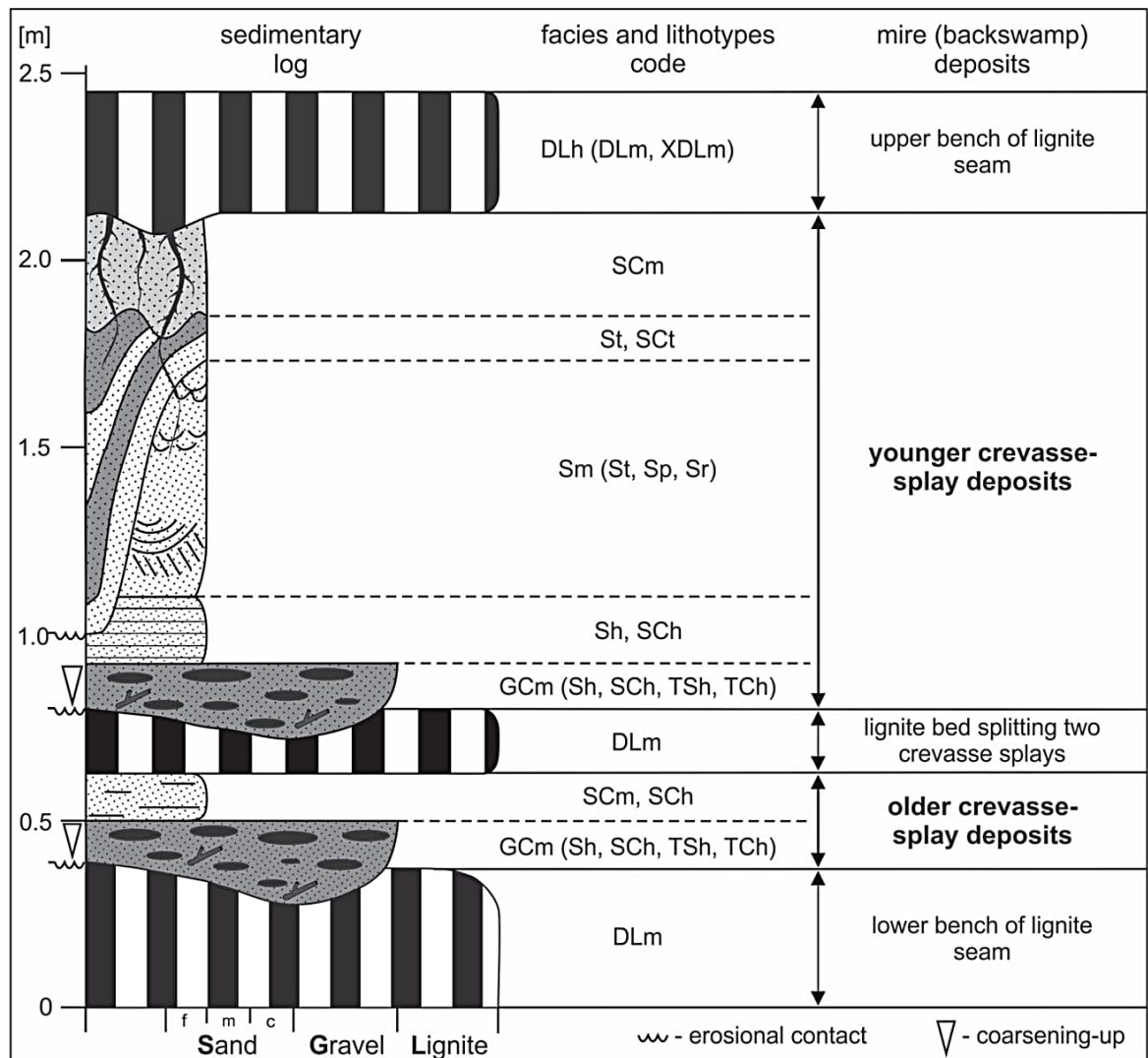


Fig. 5. Idealised sedimentary log of two superimposed crevasse-splay deposits situated between benches of the lignite seam at the Tomislawice opencast mine. For description of facies and lithotype codes see Table 1

Table 1. Codification of crevasse-splay facies (after Miall, 1977; Rust, 1978; Zieliński, 1995, 2014) and lignite lithotypes (after Widera, 2012, 2016b) used in the present paper; secondary facies are shown in brackets

Crevasse-splay facies	
Code	Description
GcM, (GCh)	massive coaly, carbonaceous gravel (horizontally stratified coaly gravel)
Sh, (SCh)	horizontally laminated sand, (horizontally laminated sand with coaly strings)
Sm, (St, Sp, Sr)	massive sand, (trough, planar and ripple cross-laminated sand)
St, SCt	trough cross-stratified sand and coaly sand
SCm	massive coaly sand
Lignite lithotypes	
Code	Description
DLm	detritic lignite with a massive structure
DLh, (DLm, XDLm)	horizontally stratified detritic lignite, (massive detritic and xylodetritic lignite)

by Widera (2012, 2016b; see Table 1; Figs. 5 and 6) was then applied to lignite. First of all, 25 samples were analysed for their organic matter content, using a 30% hydrogen peroxide solution to dissolve organic matter. Finally, all 50 samples were sieved in order to determine the grain size of the deposits examined.

3.4. Depositional model

A depositional model was created to fulfil one of the main goals of the present research; this covers the formation of both the older and younger crevasse-splay bodies within the first Mid-Polish lignite seam at the Tomislawice opencast mine (Fig. 7).

4. Results

4.1. Cross-sectional shape of the crevasse-splay body

The crevasse-splay body, which actually comprises two superimposed splays, is of a lenticular shape

at both the lower exploitation and the upper overburden levels. However, their shapes differ significantly in a north-south cross section, at these levels (compare Figs. 3 and 4). In the former, the top of the lens is nearly flat, while its base is concave up (Fig. 4A), while in the latter, the lens shape mirrors the one described above, i.e., its top is convex up and its base flat (Fig. 4B).

4.2. Interpretation of the cross-sectional shape of the crevasse splay body

Differences in the shape of the crevasse-splay bodies examined were observed along two cross-sectional lines; these can be explained by variable compaction of the underlying lignite and sands. The compaction ratio for the first Mid-Polish lignite seam is ~2.0 (Widera, 2015), whereas sands can be considered as being almost non-compactable in comparison with lignite. Thus, where sands follow directly on lignite (i.e., originally on peat), the base of the crevasse-splay body is strongly concave up due to peat/lignite compaction (Fig. 4A). In contrast, the initial shape of the crevasse-splay body is preserved when its substratum consists of non-compactable sands, i.e., the convex-up top remains preserved (Fig. 4B; see Widera, 2016a; Widera et al., 2017).

4.3. Description of the crevasse-splay facies

A detailed facies analysis has been made of the sandy sediments and, more locally, of the sandy-organic strata, at five sites along both sections studied (Figs. 3 and 4). As a result, six primary and numerous secondary facies have been distinguished within the crevasse-splay facies associations (Table 1; Figs. 5 and 6).

The first main facies (GcM) forms the basis of the sedimentary succession of both the older and younger crevasse-splay bodies (Fig. 5). It is composed largely of massive, occasionally crudely stratified, gravel-sized components that consist of sandy-silty particles with an organic admixture. Within this facies, in some parts of the exposure, other fine-grained sands, horizontally stratified secondary facies can be distinguished: Sh, SCh, TSh and TCh. Moreover, fossilised wood fragments (xyrites) and compacted fragments of turf with rootlets are also easily visible within this facies (Fig. 6).

Horizontally stratified sands (Sh), which are locally enriched in organic matter, create the secondary facies SCh (Figs. 5 and 6). These deposits consist of fine-grained, well-sorted sands. Their mean grain

size is ~0.16 mm; the organic content is in the range of 0.1 to 0.45 wt%.

In some places of predominantly massive sands (Sm) traces of small-scale stratification are visible in the form of trough, planar and ripple cross-laminated sand, i.e., facies Sp, St and Sr (Figs. 5 and 6). These sandy deposits are well and very well sorted, with a mean grain size between 0.14 and 0.17 mm. In the sands described, organic content is negligible or (as in most of the laboratory tested samples) even lacking (Fig. 6).

The next facies consists of trough, cross-stratified sands (St) and coaly sands (SCt) at a large scale, i.e., the set thickness attains up to 0.6–0.7 m (Figs. 5 and 6). These sediments fill the erosional channel that cuts facies Sh and Sm, and is covered by the next facies, SCm (Table 1). The dip of the layers is 15 to 25° towards ENE.

The uppermost facies (SCm), just below the upper bench of lignite, is also distinguished in the lower crevasse splay (Figs. 4A, 5 and 6). It is made up of coaly sands with a massive structure that are poorly

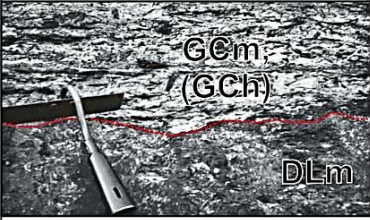
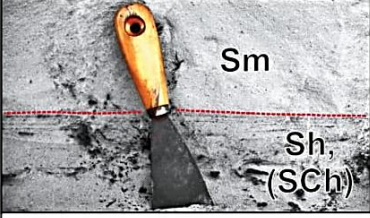
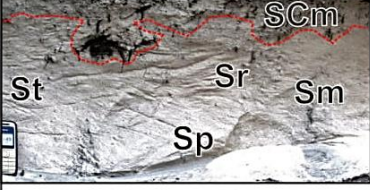
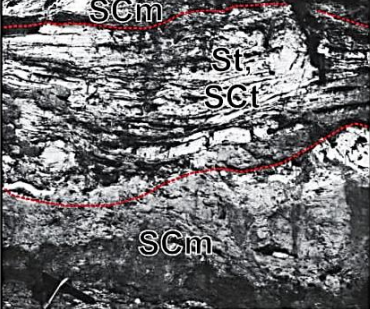

	Code	Description	Interpretation
	GCm, (GCh)	discontinuous layers of massive to horizontal coaly gravel-sized clasts; 10-50 cm long; gravel rip-up clasts enriched in organic particles; matrix-supported by coaly sand; very poorly sorted; base is always sharp and erosional; this facies is underlain by detritic lignite of lower bench of lignite seam	erosion of channel levees or proximal parts of the backswamp; redeposition by high energy slurry flows in the backswamp (overbank) area
	Sh, (SCh)	continuous layers of horizontally laminated fine sand; 10-20 cm thick; strings of horizontally laminated coaly sand	sheet flow in middle and distal parts of the crevasse splay; upper-stage plane bed; supercritical flow
	Sm, (Sr, St, Sr)	mainly massive structure with crude visible lithofacies (St, Sr, Sp) at small-scale; very well sorted; mineral-organic aggregates of plant roots; slightly fining-upward trend; both gradational and erosional bases; up to 1 m thick	migration of bedforms - ripples (Sr), 2-D dunes (Sp); 3-D dunes (St); upper part of lower flow regime; middle to distal parts of the crevasse splay
	St, (SCt)	dominant trough cross-stratification at large-scale; regularly interbedded both lithofacies (St, SCt); evidently erosional base; up to 0.6 m thick	crevasse distributary channel fills; tractional deposition; varying flow energy; resedimentation of organic matter; middle part of the crevasse splay
	SCm	mainly massive structure; abundant well-preserved roots; poorly to very well sorted; gradational base; up to 0.5 m thick	pedogenesis; strong bioturbation by roots of herbaceous vegetation; massive; all parts of the crevasse splay

Fig. 6. Compilation of characteristic features of crevasse-splay facies studied with brief environmental interpretations; compare with Table 1 and Figure 5

to very well sorted. Moreover, this facies is enriched in organic matter content, ranging from 0.03 to 12.20 wt%. Its characteristic feature is the presence of roots of bushes and trees, often also penetrating the underlying facies (Figs. 5 and 6).

The last primary facies comprises only massive sands (Sm); this was exposed exclusively on the upper overburden level at the Tomisławice lignite opencast (compare Figs. 3 and 4B). These siliciclastics are very well sorted and fining upwards, fine-grained sands with a mean grain size from 0.14 to 0.17 mm.

4.4. Interpretation of crevasse-splay facies

Facies GCm is the most important for my interpretation of its sedimentary environment, regardless of the fact that it occupies a small part of both crevasse-splay bodies examined. Its typical features, i.e., the massive structure with horizontally arranged fragments of xylites and fossilised turf at the top, allow them to be interpreted as the result of a mudflow (Carter, 1975; Lowe & Guy, 2000). Most likely, the above-mentioned plant fragments (xylites and turf) were derived from the channel levee and/or the proximal zone of the overbank area (backswamp) during the initial phase of each flood (e.g., Fielding, 1986; Farrell, 2001; Gębica & Sokołowski, 2001; Widera, 2016a; Widera et al., 2017).

The next facies (Sh) is characterised by horizontal stratification over the entire length of the exposure. This may indicate that sedimentation occurred as a continuous layer over the entire surface of the crevasse splay. Hence, facies Sh could have formed under conditions of the upper plane bed as a sheet-flow (Gradziński et al., 1976; Mjøs et al., 1993; Zieliński, 2014; Burns et al., 2017; Chomiak et al., 2019a).

The interpretation of facies Sm is difficult, because the sands are very well sorted and do not reveal lamination underlined by organic matter. Therefore, most likely this facies can be attributed to sudden deposition from a hyperconcentrated flow (Nemec, 2009). However, in some places small-scale structures (Sp, Sr, St) are visible (Fig. 6). This clearly indicates low energy and slow water flow, which resulted in the formation of small-scale bedforms (e.g., ripples) in the distal parts of the crevasse splay (Bristow et al., 1999; Zieliński, 2014; Burns et al., 2017). Facies Sm, on the upper exploitation level (compare Figs. 4b and 6), can be similarly interpreted. This is proved by the common massiveness of all crevasse-splay deposits in their proximal part. However, occasionally documented traces of

trough cross-stratification provide evidence of a channelised flow, typical of the migration of large-scale bedforms such as 3-D dunes (Gradziński et al., 1976; Bristow et al., 1999).

Facies St and SCt is a record of infill of the distributary channel that existed on the surface of the crevasse splay studied (Fig. 6). The symmetrical stratification within the channel is typical of a gradually decreasing flow velocity of the water, while the alternating occurrence of facies St and SCt points to rhythmic changes in flow competence (Gradziński et al., 1976; Widera, 2016a; Widera et al., 2017). Thus, facies St formed under conditions of higher flow energy and facies SCt formed when the energy of the flow was relatively lower (Fig. 6).

The uppermost facies, SCm, can be distinguished on the lower exploitation level and formed under similar conditions as Sm (Fig. 6). In contrast to the white colour of facies Sm, the grey colour of facies SCm comes from the roots of the vegetation, of which the overlying lignite bench was formed. The presence of well-preserved roots proves that the water level was close to the depositional surface. Under these conditions, the crevasse splay body was covered predominantly by herbaceous and bushy vegetation, which later turned into detritic and xylodetritic lignite (Kwiecińska & Wagner, 1997; Markič & Sachsenhofer, 1997; Widera, 2012, 2016b).

4.5. Depositional model of the succession studied

The depositional processes in the overbank area (floodplain, backswamp) are not constant in time and space. In short-term cycles, shorter periods or stages can be distinguished, corresponding to subsequent phases of deposition (Zwoliński, 1985; Pérez-Arlucea & Smith, 1999; Zieliński, 2014). Similarly, six phases in the formation of the crevasse-splay bodies, which appear in superposition at the Tomisławice opencast mine, are proposed here (Fig. 7), as follows:

4.5.1. Phase 1

Clastic deposition was restricted to the river channel during the first phase, i.e., prior to the first flood. At that time, peat-forming vegetation developed intensively in the overbank area, creating a backswamp (Fig. 7A, B).

4.5.2. Phase 2

During the first flood, the natural levee was breached. At this time the river water, which carried

the clastic load from the main channel and the levee, spilled onto the surface of the mire (backswamp) (Fig. 7C, D).

4.5.3. Phase 3

When the water level dropped, clastic sediments in the form of an older crevasse-splay lobe, appeared

in the backswamp area in close proximity to the main river channel (Fig. 7E, F). Their thickness, as observed in the field, did not exceed 0.5 metres.

4.5.4. Phase 4

Following the formation of the older crevasse-splay body, there was a period without floods, the rock

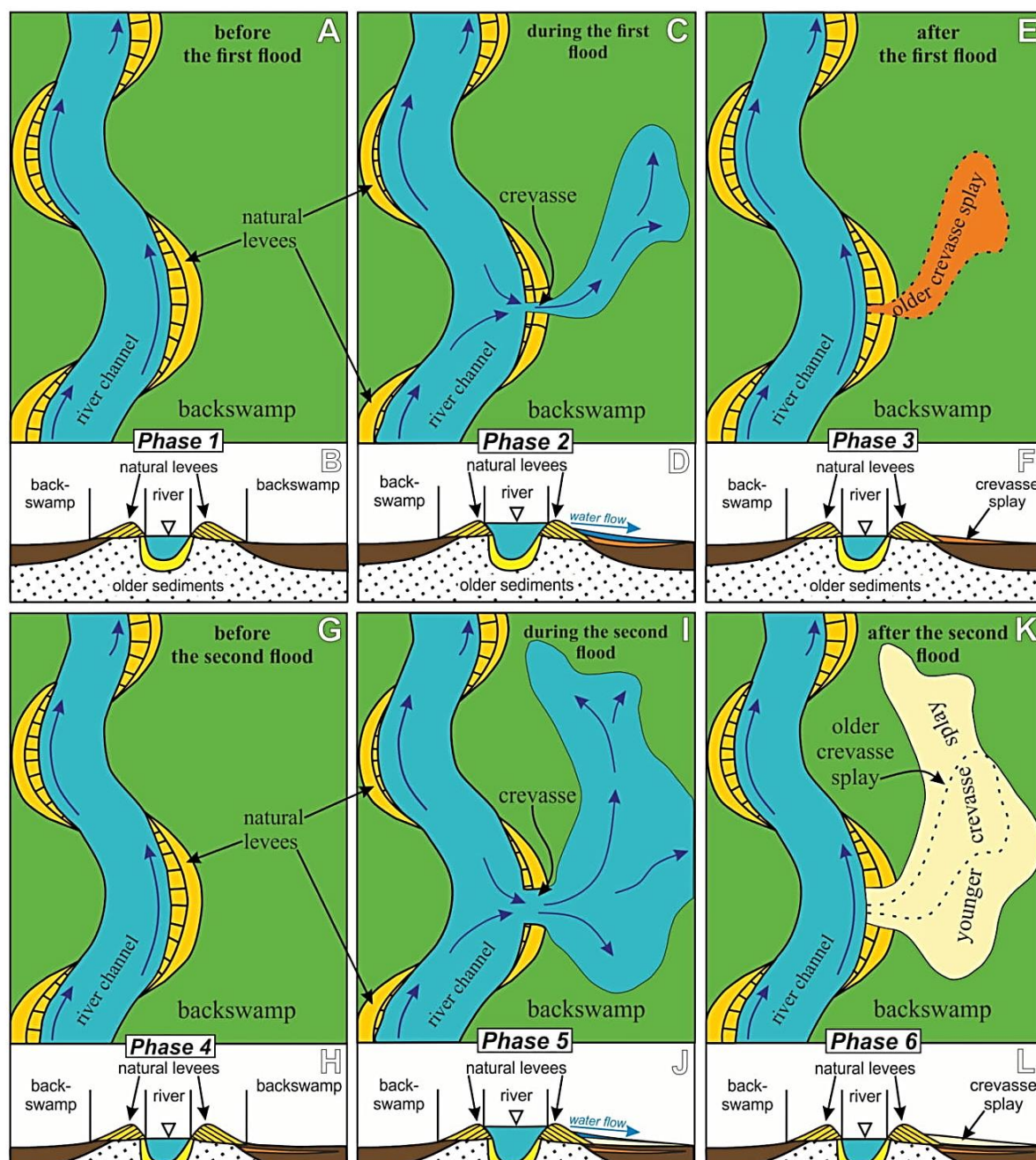


Fig. 7. Conceptual model depicting phases in the formation of the crevasse splays and accompanying peat transformation into lignite

A, C, E, G, I, K – plan views; B, D, F, H, J, L – cross-sectional views. For other explanations see text

record of which would be clastic interbedding within the lignite seam. In other words, a relatively long period of mire development at the top of the above-mentioned splay started (Fig. 7G, H). As a result, approximately 0.2 metres of lignite formed, separating both crevasse-splay bodies studied.

4.5.5. Phase 5

This phase corresponds to the next flood. Firstly, the natural levee was breached after which river water spilled onto the surface of the backswamp through the crevasse (Fig. 7I, J). Thus, the development of the mire in the overbank area was interrupted for some time, when the younger crevasse splay formed.

4.5.6. Phase 6

The last phase (following the second flood) in crevasse splay formation can be combined with a lowering of the levels of river water and groundwater in the overbank area. The siliciclastic deposits of the younger crevasse splay were exposed in close proximity to the main river channel (Fig. 7K, L). Phase 6 is a repetition of phase 3 outlined above (compare Fig. 7E, F and K, L). Subsequently, peat vegetation covered the surface of the younger crevasse splay. In this way, a new layer of peat was formed, which was then transformed into an upper bench of lignite (compare Figs. 4 and 5).

5. Discussion

Direct observation and investigation of crevasse-splay deposits in the rock record are very rare, not only in Poland, but also worldwide. Therefore, exposures of crevasse splays from the relatively large opencast mine have proved very valuable. However, at least three issues, not discussed so far, are still debatable. These concern mainly the rate of flooding as well as the accumulation time of crevasse-splay siliciclastics and of the thin lignite layers separating them.

It appears that the upper crevasse-splay body records a large flood, i.e., larger than the one accountable for the lower body. This is supported by the fact that the most diagnostic facies GCm (silty sands with gravel-sized xylites and turf; secondary facies: Sh, SCh, TSh, TCh) occurs only in the basal parts of these two bodies (see Fig. 5). Moreover, the upper crevasse-splay represents a more complete sedimentary profile, indicating a weakening flow energy from the mudflow (facies SCm), through the sheetflow (facies Sh and SCh), to the channelised flow at various scales (facies St, SCt, Sp and Sr). De-

posits discussed are characteristic of a single, catastrophic flood for at least two reasons. First, none of the main facies mentioned above is repeated in the sedimentary section (compare Figs. 5 and 6). Secondly, the thickness of the crevasse-splay deposits examined exceeds the 0.5 metres typical of a catastrophic flood (e.g., Gębica & Sokołowski, 2001; Makaske, 2001; Zieliński, 2014).

The duration of crevasse splay deposition may vary widely. Simply put, it depends on the duration of the flood, specifically on the time of outflow of channel water (which carries a mineral load) into the overbank (backswamp) area. In the case of present-day, individual, short or long-lived floods, it can be counted in hours, days or even weeks (Zwoliński, 1985; Gębica & Sokołowski, 2001). Of course, floods recorded in modern times can recur and intervals between them can be from tens to hundreds of years (Smith et al., 1989; Pérez-Arlucea & Smith, 1999; Farrell, 2001; Stouthamer, 2001; Kordowski et al., 2014).

Taking into account field data, the question arises as to how much time was involved in deposition of the lignite layer which separates the older and younger crevasse-splay bodies. The maximum thickness of this lignite bed reaches about 0.2 metres. In the literature it has been indicated that the approximately 100 metres of the Main Seam in the Lower Rhine Graben (Germany) accumulated for ~6 million years, i.e., one metre of lignite per 60 thousand years (Zagwijn & Hager, 1987). Obviously, this Main Seam here is more compacted than the first Mid-Polish lignite seam at the Tomisławice opencast mine. The average compaction ratio for the deposits mentioned is ~3.0 and ~2.0, respectively (compare Widera, 2015). Thus, the 0.2 metres of lignite interbedding could have formed over a period of about 8,000 years ($60,000 \times 0.2 \times 2/3 = 8,000$). However, this result should be considered an estimate because both the base and top of the lignite layer in the study area cannot be dated precisely.

Borehole data from the 'Tomisławice' lignite deposit provide information on relatively thick layers of mineral matter within the lignite seam. These may indicate the presence of other crevasse splays in the study area. Unfortunately, during fieldwork these deposits were not observed (lack of exposure).

At the present time, the formation of crevasse splays is often associated with sudden and catastrophic destruction of flood protection measures. The deposition of such forms covers both the natural river sediments and those coming from those artificial constructions (e.g., Gębica & Sokołowski, 2001). Therefore, differences in deposition dynamics should be taken into account when comparing contemporary and ancient crevasse splays.

6. Conclusions

The current research determines the sedimentological characteristics of crevasse splays exposed within all lignite-bearing successions in Poland. The major conclusions drawn here can be briefly summarised as follows:

- Two superimposed crevasse-splay bodies were revealed at the Tomislawice opencast mine (Konin Lignite Mine; central Poland) during mining activity. These bodies divided the lignite seam of Middle Miocene age in two.
- The crevasse splays are lenticular in shape and mirror imaged, on the exploitation and overburden levels. This significant difference is explained by varying compaction of the underlying, strongly compactible lignites and almost non-compactible sands.
- Facies analysis shows that the siliciclastic deposits studied are typical of a crevasse splay, which accumulated in close proximity to the river channel, i.e., in the overbank (backswamp) area. The sediments are well-sorted, fine-grained sands, locally with an organic admixture. Massive and horizontal structures are commonest, while crudely stratified and gravel-sized clasts are the most characteristic facies within the crevasse-splay deposits studied.
- A depositional model of crevasse splays formation is proposed. It includes six phases that correspond to the creation of both splays (older and younger) and the thin layer of lignite separating them, i.e., before, during and after two floods. Most likely, the break in clastic sedimentation, recorded in peat accumulation, lasted for a few thousand years.
- The results presented here may be useful for mining activity, particularly at the stage of mapping the extent of exploitation of the lignite seam. Therefore, a better knowledge of the mechanisms of deposition of the siliciclastic beds within the lignite seams (crevasse splays) is highly desirable.

Acknowledgements

I wish to thank the reviewers for their remarks and comments that have improved the final version of the present paper. Prof. Marek Widera (Institute of Geology, Poznań) is appreciated for his encouragement and help in preparing the manuscript. This paper was funded by the National Science Centre of Poland, research project no. 2017/27/B/ST10/00001.

References

- Boggs, S. Jr., 2012. *Principles of Sedimentation and Stratigraphy*. Prentice Hall, New Jersey, 218 pp.
- Bristow, C.S., Skelly, R.L. & Ethridge, F.G., 1999. Crevasse splays from the rapidly aggrading, sand-bed, braided Niobrara River, Nebraska: Effect of base-level rise. *Sedimentology* 46, 1029–1047.
- Brzyski, B., Gradziński, R. & Krzanowska, R., 1976. Stojące pnie kalamitów w odsłonięciu cegielni Brynów i warunki ich pogrzebania [Standing trunks of calamites in the exposure Brynów brickyard and conditions for their burial]. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego* 64, 159–182.
- Burns, C., Mountney, N.P., Hodgson, D.M. & Colombero, L., 2017. Anatomy and dimensions of fluvial crevasse-splay deposits: Examples from the Cretaceous Castlegate Sandstone and Neslen Formation, Utah, U.S.A. *Sedimentary Geology* 351, 21–35.
- Carter, R.M., 1975. A discussion and classification of subaqueous mass-transport with particular application to grain-flow, slurry-flow and fluxoturbidites. *Earth-Science Reviews* 11, 145–177.
- Chomiak, L., Wachocki, R., Maciaszek, P., Widera, M. & Zieliński, T., 2019a. Seismically deformed the crevasse-splay microdelta deposits – an example from Mid-Miocene of Poland. *Geological Quarterly* 63, 162–177.
- Chomiak L., Wachocki R., Maciaszek P., Widera M. & Zieliński T., 2019b. Seismically-induced soft-sediment deformation in crevasse-splay microdelta deposits (Middle Miocene, central Poland) – reply. *Geological Quarterly* 63, 429–433.
- Dadlez, R., Marek, S. & Pokorski, J., 2000. *Mapa Geologiczna Polski bez kenozoiku w skali 1:1000000* [Geological map of Poland without Cenozoic deposits, scale 1:1000000]. Polish Geological Institute, Warszawa.
- Davies-Vollum, K.S. & Kraus, M.J., 2001. A relationship between alluvial backswamps and avulsion cycles: an example from the Willwood Formation of the Bighorn Basin, Wyoming. *Sedimentary Geology* 140, 235–245.
- Doktor, M., 2007. Conditions of accumulation and sedimentary architecture of the upper Westphalian Cracow Sandstone Series (Upper Silesia Coal Basin, Poland). *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 77, 219–268.
- Farrell, K.M., 2001. Geomorphology, facies architecture, and high-resolution, non-marine sequence stratigraphy in avulsion deposits, Cumberland Marshes, Saskatchewan. *Sedimentary Geology* 139, 93–150.
- Fielding, C.R., 1986. Fluvial channel and overbank deposits from the Westphalian of the Durham coalfield, NE England. *Sedimentology* 33, 119–140.
- Gębica, P. & Sokołowski, T., 2001. Sedimentological interpretation of crevasse splays formed during the extreme 1997 flood in the upper Vistula river valley (South Poland). *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 71, 53–62.
- Gradziński, R., Doktor, M. & Kędzior, A., 2005. Sedymentacja osadów węglonośnej sukcesji Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: kierunki badań i aktualny stan

- wiedzy [Sedimentation of the coal-bearing succession in the Upper Silesia Coal Basin: research trends and the current state of knowledge]. *Przegląd Geologiczny* 53, 734–741.
- Gradziński, R., Doktor, M. & Słomka, T., 1995. Depositional environments of the coal-bearing Cracow Sandstone Series (upper Westphalian), Upper Silesia, Poland. *Studia Geologica Polonica* 108, 149–170.
- Gradziński, R., Kostecka, A., Radomski, A. & Unrug, R., 1976. *Sedymentologia [Sedimentology]*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, 614 pp.
- Horne, J.C., Ferm, J.C., Caruccio, F.T. & Baganz, B.P., 1978. Depositional models in Coal Exploration and Mine Planning in Appalachian Region. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 62, 2379–2411.
- Kasiński, J.R., 1986. Sedimentary models of small lignite deposits: examples from the Polish Neogene. *Przegląd Geologiczny* 34, 189–197.
- Kasiński, J.R. & Słodkowska, B., 2016. Factors controlling Cenozoic anthracogenesis in the Polish Lowlands. *Geological Quarterly* 60, 959–974.
- Kędzior, A., 2001. Identification of fluvial-channel tracts based on thickness analysis: Zabrze Beds (Namurian B) in the Main Anticline and Bytom-Dąbrowa Trough of Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 71, 21–34.
- Kędzior, A., 2016. Reconstruction of an early Pennsylvanian fluvial system based on geometry of sandstone bodies and coal seams: the Zabrze Beds of the Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 86, 437–472.
- Kordowski, J., Gamrat, W., Gierszewski, P., Kubiak-Wójcicka, K., Szmańda, J.B., Tyszkowski, S. & Solarczyk, A., 2014. Zapis procesów sedymentacji fluwialnej i biogenicznej w osadach dna Doliny Dolnej Wisły [Record of fluvial and biogenic sedimentation processes in sediments of the Lower Vistula Valley floor]. *Landform Analysis* 25, 77–93.
- Kurowski, L., 1999. Formy akumulacji piasku na równi zalewowej Odry między Kozłem a ujściem Kłodnicy [Sand accumulation forms on the flood plain of the Odra river between Kozle city and mouth of the Kłodnica river (SW Poland)]. *Przegląd Geologiczny* 47, 194–198.
- Kwiecińska, B. & Wagner, M., 1997. *Typizacja cech jakościowych węgla brunatnego z krajowych złóż według kryteriów petrograficznych i chemiczno-technologicznych dla celów dokumentacji geologicznej złóż oraz obsługi kopalń [Classification of qualitative features of brown coal from Polish deposits according to petrographical, chemical and technological criteria]*. Wydawnictwo Centrum PPGSMiE Polskiej Akademii Nauk, Kraków, 87 pp.
- Lowe, D.R. & Guy, M., 2000. Slurry flow deposits in the Britannia Formation (lower Cretaceous) North Sea: a new perspective on the turbidity current and debris flow problem. *Sedimentology* 47, 31–70.
- Makaske, B., 2001. Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth-Science Reviews* 53, 149–196.
- Markič, M. & Sachsenhofer, R.F., 1997. Petrographic composition and depositional environments of the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia). *International Journal of Coal Geology* 33, 229–254.
- Miall, A.D., 1977. A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews* 13, 1–62.
- Mjøs, R., Walderhaug, O. & Prestholm, E., 1993. Crevasse Splay Sandstone Geometries in the Middle Jurassic Ravenscar Group of Yorkshire, UK. [In:] M.C. Marzo & C. Puigdefábregas (Eds): *Alluvial Sedimentation*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 17, John Wiley and Sons, Oxford, 184 pp.
- Nemec, W., 2009. *What is a hyperconcentrated flow?* [In:] Lecture Abstracts, 27th IAS Annual Meeting, Alghero, Italy, p. 293.
- Pérez-Arlucea, M. & Smith, N.D., 1999. Depositional patterns following the 1870s avulsion of the Saskatchewan River (Cumberland Marshes). *Journal of Sedimentary Research* 69, 62–73.
- Pieńkowski, G., 2004. Sołtyków, Poland – an unique palaeoecological record of the Early Jurassic continental deposits (in Polish with English summary). *Volumina Jurassica* 2, 1–16.
- Piwocki, M. & Ziemińska-Tworzydło, M., 1997. Neogene of the Polish Lowlands – lithostratigraphy and pollen-spore zones. *Geological Quarterly* 41, 21–40.
- Rust, B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems. [In:] A.D. Miall (Ed.): *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 5, pp. 187–198.
- Słomka, T., Doktor, M., Wagner, M. & Matl, K., 2000. Sedimentological study of Miocene alluvial fans in the Bełchatów lignite deposit. [In:] T. Słomka & M. Wagner (Eds): *Petrological studies and sedimentological conditions of select lithologic series in Miocene from Bełchatów lignite deposit, Poland*. *Prace Geologiczne PAN* 147, pp. 21–46.
- Smith, N.D., Cross, T.A., Dufficy, J.P. & Clough, S.R., 1989. Anatomy of an avulsion. *Sedimentology* 36, 1–23.
- Stouthamer, E., 2001. Sedimentary products of avulsion in the Holocene Rhine–Meuse Delta, The Netherlands. *Sedimentary Geology* 145, 73–92.
- Szponar, A., 2000. Osady pozakorytowe Odry powstałe w czasie powodzi w 1997 r. [Overbank deposits of Odra river during the 1997 flood]. *Przegląd Geologiczny* 48, 176–181.
- Van Loon, A.J., 2019. Seismically-induced soft-sediment deformation in crevasse-splay microdelta deposits (Middle Miocene, central Poland): comment. *Geological Quarterly* 63, 424–428.
- Widera, M., 2012. Macroscopic lithotype characterisation of the 1st Middle Polish (1st Lusatian) Lignite Seam in the Miocene of central Poland. *Geologos* 18, 1–11.
- Widera, M., 2015. Compaction of lignite: a review of methods and results. *Acta Geologica Polonica* 65, 367–368.
- Widera, M., 2016a. Depositional environments of overbank sedimentation in the lignite-bearing Grey Clays Member: New evidence from Middle Miocene deposits of central Poland. *Sedimentary Geology* 335, 150–165.
- Widera, M., 2016b. An overview of lithotype associations forming the exploited lignite seams in Poland. *Geologos* 22, 213–225.

- Widera, M., 2017. Sedimentary breccia formed atop a Miocene crevasse-splay succession in central Poland. *Sedimentary Geology* 360, 96–104.
- Widera, M. & Kita, A., 2007. Paleogene marginal marine sedimentation in central-western Poland. *Geological Quarterly* 51, 79–90.
- Widera, M., Chomiak, L., Gradecki, D. & Wachocki, R., 2017. Osady glifu krewasowego z miocenu Polski środkowej w okolicach Konina [Crevasse splay deposits from the Miocene of central Poland near Konin]. *Przegląd Geologiczny* 65, 251–258.
- Zagwijn, W.H. & Hager, H., 1987. Correlations of continental and marine Neogene deposits in the south-eastern Netherlands and the Lower Rhine District. *Mededelingen van de werkgroep voor tertiaire en kwartaire geologie* 24, 59–78.
- Zieliński, T., 1995. Kod litofacjalny i litogenetyczny – konstrukcja i zastosowanie [Lithofacies and lithogenetic code – construction and application] [In:] E. Mycielska-Dowgiałło & J. Rutkowski (Eds): *Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników* [Investigation of Quaternary deposits. Results of some methods and interpretations]. Warsaw University Press, Warsaw, 220–235.
- Zieliński, T., 2014. *Sedymentologia. Osady rzek i jezior* [Sedimentology. River and lake deposits]. Adam Mickiewicz University Press, Poznań, 594 pp.
- Zwoliński, Z., 1985. Sedimentation of vertical accretion deposits within the Parsęta River floodplain. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią* 35A, 205–238 (in Polish).
- Żelaźniewicz, A., Aleksandrowski, P., Buła, Z., Karnkowski, P.H., Konon, A., Ślęczka, A., Żaba, J. & Żytko, K., 2011. *Regionalizacja tektoniczna Polski* [Tectonic regionalization of Poland]. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław, 60 pp.

Manuscript received 28 August 2019

Revision accepted 13 January 2020

5.2. Druga publikacja

Chomiak L., Urbański P., Widera M., 2020. Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice k. Konina w środkowej Polsce. **Przegląd Geologiczny**, 68, 6, 526–534. (mój udział: 35%)

Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomislawice k. Konina w środkowej Polsce

Lilianna Chomiak¹, Paweł Urbański², Marek Widera¹



L. Chomiak



P. Urbański



M. Widera

Architecture and origin of clays within the upper part of lignites of the Poznań Formation (Middle Miocene) – the Tomislawice lignite opencast mine near Konin, central Poland. *Prz. Geol.*, 68: 526–534; doi: 10.7306/2020.19

A b s t r a c t. In the Tomislawice opencast mine, owned by the Konin Lignite Mine, a relatively widespread (>1.5 km²) and thick (up to 80 cm) layer of clay occurs within the first mid-Polish lignite seam. These fine-grained sediments are interpreted as deposited in a long-lasting lake that existed in the mid-Miocene backswamp area. Due to the exploitation of this seam for electricity production, interbeddings of clastic sediments significantly reduce the quality of lignite. Currently, lignite is mined together with the

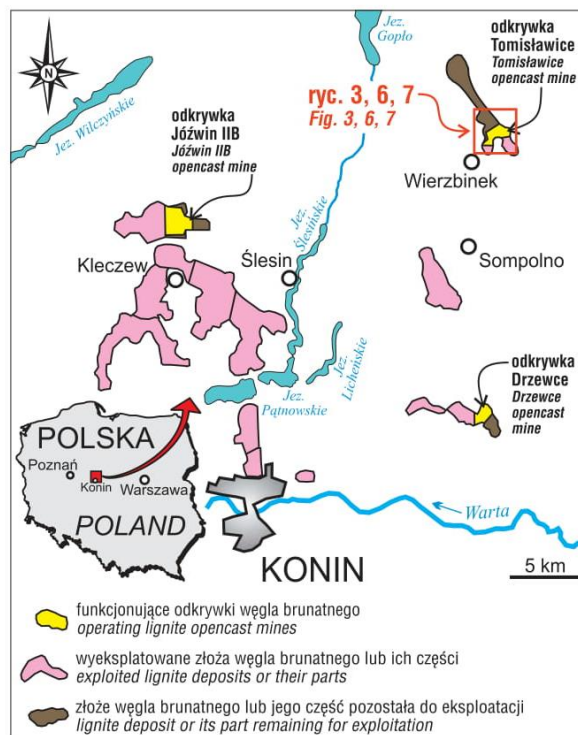
clays in the Tomislawice opencast mine. Such procedure in extreme cases, where the maximum thickness of the clay layer is up to 80 cm, increases/may increase the ash content of the entire lignite seam almost twice. Therefore, selective lignite mining would be recommended, i.e. without clays, which unfortunately is not practiced due to technological and financial reasons.

Keywords: clastic sediments, palaeolake, first mid-Polish lignite seam, ash content, Miocene of Poland

W Polsce z węgla brunatnego wciąż produkuje się ok. 30–35% energii elektrycznej (Kasztelewicz i in., 2018). Jest on wydobywany przez pięć kopalń, w dziewięciu odkrywkach, w tym w trzech należących do Pątnów–Adamów–Konin Kopalnia Węgla Brunatnego Konin Spółka Akcyjna (PAK KWB Konin S.A.) (Mazurek, Tymiański, 2019). Jedną z nich, a jednocześnie najmłodszą, jest odkrywka Tomislawice, gdzie eksploatację węgla rozpoczęto w 2011 r. (ryc. 1).

Obszar złoża Tomislawice, oprócz występowania środkowomiocenijskiego pokładu węgla brunatnego, jest także bardzo interesujący pod względem poznawczym. W wyniku robót górniczych w latach 2015–2017 w pokładzie węglowym zostały odkryte osady piaszczyste o względnie dużej miąższości (do 1,8 m) i rozprzestrzenieniu lateralnym (300–500 m). Było to pierwsze w Polsce odsłonięcie w obrębie miocenu węglonośnego osadów stożka (glifu) krewasowego (Widera, 2016a; Widera i in., 2017; Chomiak, 2020a). Ponadto w ich stropie udokumentowano unikatową dla formacji węglonośnych brekcję sedymentacyjną, która powstała najprawdopodobniej w wyniku spływu kohezynego laminowanych osadów wałów brzegowych miocenijskiej rzeki na jej obszar pozakorytowy, tj. na torfowisko (Widera, 2017).

W tym samym czasie (2015–2017) w tzw. górnej ławie pokładu węglowego stwierdzono występowanie cienkich warstw (do 20 cm) ilów i pyłów węglistych (Widera i in., 2017). Dopiero w następnych latach, tj. 2018–2019, wraz z postępem robót górniczych, w tym zmiany kierunku eksploatacji z SSE–NNW na NNE–SSW, w pokładzie węgla brunatnego zostały odsłonięte wspomniane osady ilasto-pylaste w trzech wymiarach. Tworzyły one ciągłą warstwę na długości co najmniej kilkuset metrów, a ich grubość sięgała kilkudziesięciu centymetrów.



Ryc. 1. Mapa lokalizacyjna obszaru badań na tle środkowomiocenijskich złóż węgla brunatnego i odkrywek w rejonie konińskim (wg Widery i in., 2017; Chomiak, 2020a, zmienione)
Fig. 1. Location map of the study area against the background of lignite deposits and opencast mines in the Konin region (after Widera et al., 2017; Chomiak, 2020a, modified)

¹ Instytut Geologii UAM, ul. B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; lilcho@amu.edu.pl; widera@amu.edu.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; pawel.urban-ski@pgi.gov.pl

Przewarstwienia tak drobnoklastycznych osadów, w dokumentacji geologicznej zwanych łąkami (Kozula, 1999), są znane z wielu obszarów węglonośnych różnego wieku zarówno z zagranicznych (np. Horne i in., 1978; McCabe, 1984; Diessel i in., 2000; Lv i in., 2016; Erkoyn i in., 2017; Matys Grygar i in., 2017), jak i z polskich złóż węgla kamiennego i brunatnego (np. Kasiński, 1986, 1989; Mastalerz, 1992; Doktor, 2007; Widera, 2016a; Widera i in., 2017; Chomiak, 2020a). Ich depozycję można obserwować także w niewielkich zbiornikach wodnych na pozakorytowych torfowiskach współczesnych rzek (np. Gradziński i in., 2000; Morozova, Smith, 2000; Bos i in., 2009).

Podstawowym celem badań jest wykartowanie zasięgu warstwy łąków w obrębie pokładu węglowego odsłaniających się w odkrywcę Tomisławice oraz ich charakterystyka miąższościowo-litologiczna. Takie podejście badawcze umożliwi poznanie architektury stratygraficznej i genezy wspomnianej warstwy osadów drobnoklastycznych. Zostanie także przedyskutowany wpływ łąków poddanych badaniom na popielność całego eksploatowanego dla celów energetycznych pokładu węgla brunatnego.

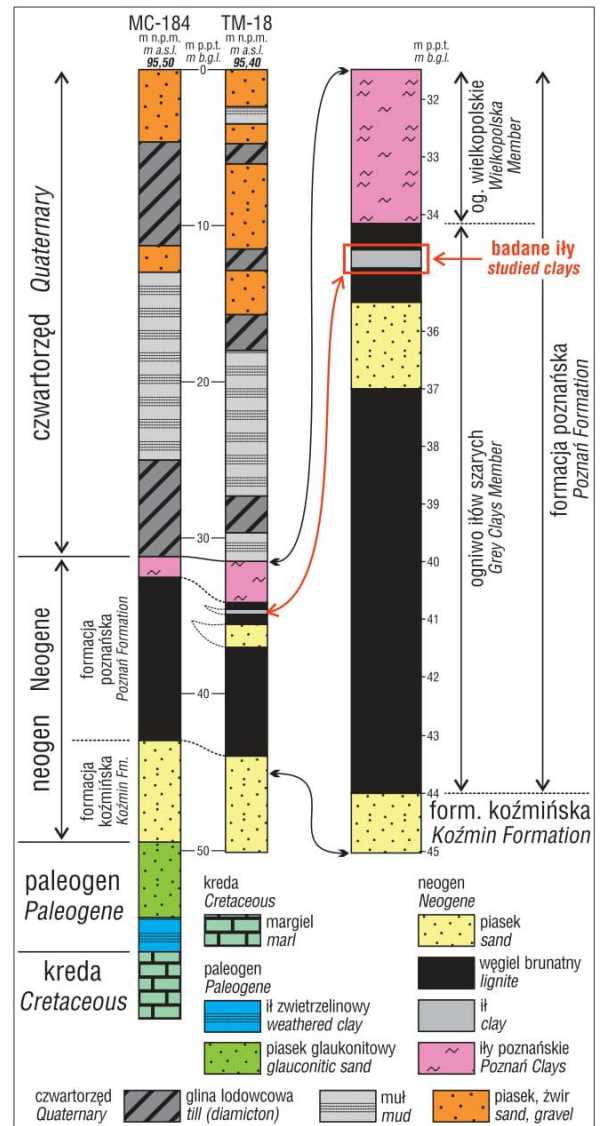
SZKIC GEOLOGICZNY

Obszar złoża węgla brunatnego Tomisławice znajduje się we wschodniej części niecki mogileńsko-lódzkiej, nad północno-wschodnim skłonem struktury solnej zwanej antyklina Gopła (Dadlez i in., 2000). Według podziału tektonicznego Polski teren objęty badaniami jest zlokalizowany w synklinorium szczecińsko-miechowskim, a dokładniej we wschodniej części segmentu mogileńsko-lódzkiego (Żelazniewicz i in., 2011).

Strop mezozoiku na omawianym obszarze jest zbudowany głównie z późnokredowych margli (ryc. 2; Dadlez i in., 2000). Profil kenozoiku rozpoczynają ilaste zwietrzliny skał kredowych, które lokalnie wypełniają depresje tektoniczne występujące w stropie mezozoiku. Na nich zalegają piaski glaukonitowe o zielonym odcieniu, powstałe w strefie nerytycznej wczesnooligocenowego morza epikontynentalnego (ryc. 2; Widera, Kita, 2007; Widera i in., 2017).

Na obszarze złoża Tomisławice neogen rozpoczyna się ciągłą warstwą piasków o miąższości do 20 m, często wzbogaconych w substancję organiczną. Osady te należą do formacji koźmińskiej, powstałej we wczesnym/środkowym miocenie (ryc. 2). Neogen w tej części Polski kończą zalegające wyżej osady formacji poznańskiej, obejmującej przedział czasowy od środkowego miocenu po wczesny pliocen. Formacja poznańska tradycyjnie dzieli się na dwa ogniwa – starsze łąków szarych (ogniwo środkowopolskie) i młodsze wielkopolskie (ryc. 2; Piwocki, Ziemińska-Tworzydło, 1997; Widera, 2007).

Ogniwo łąków szarych składa się z pierwszego środkowopolskiego pokładu węgla brunatnego, którego miąższość na obszarze złoża Tomisławice wynosi średnio 6,9 m (Kozula, 2001). Ponadto do tego ogniwa należą tzw. łąki szare, zalegające lokalnie w stropie ww. pokładu węglowego. Natomiast ogniwo wielkopolskie jest zbudowane głównie z łąków poznańskich (łąki zielone i łąki płomieniste). Jednakże ze względu na erozję i egzarację plejstocenową występują one w formie reliktywnej (Widera i in., 2017; Chomiak, 2020a).



Ryc. 2. Litostratygrafia kenozoiku na obszarze złoża węgla brunatnego Tomisławice (wg Chomiak, 2020a, zmienione). Lokalizacja otworów MC-184 i TM-18 na rycinie 3

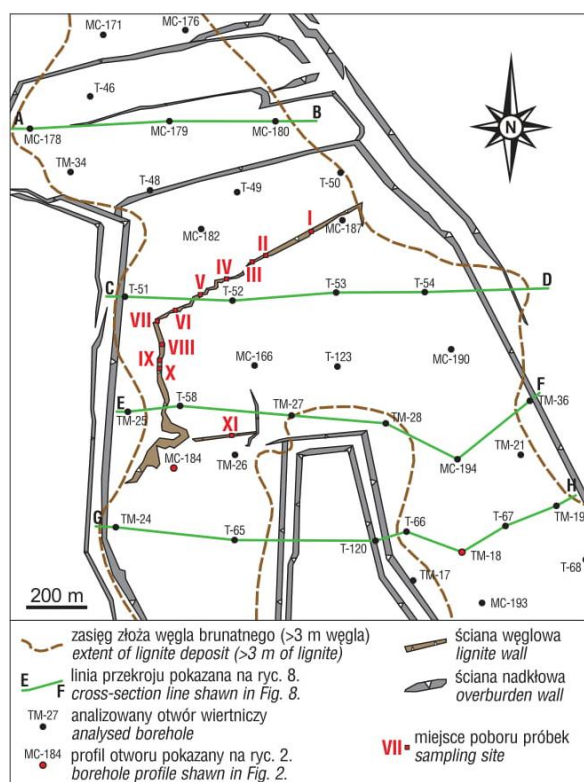
Fig. 2. Cenozoic lithostratigraphy in the area of the Tomisławice lignite deposit (after Chomiak, 2020a, modified). For location of boreholes MC-184 and TM-18 see Fig. 3

Neogen jest przykryty przez osady czwartorzędowe, których miąższość na obszarze badań waha się od 35 do 60 m. Czwartorzęd często zalega wprost na stropie pokładu węgla brunatnego. Na obszarze badań osady czwartorzędowe są reprezentowane głównie przez gliny lodowcowe, żwiry i piaski o genezie fluwioglacjalnej oraz fluwioglacjalno-zastoiskowe muły (ryc. 2; Widera i in., 2017).

METODYKA BADAŃ

Badania terenowe i archiwalne, stanowiące podstawową część prezentowanych wyników, przeprowadzono w sezonie wiosenno-letnim 2019 r. Prace w odkrywcę Tomisławice (ryc. 1) objęły kartowanie przewarstwienia łąków w ścianach węglowych, pobór próbek do badań laboratoryjnych i dokumentację fotograficzną. Ciągłą warstwą łąków udoku-

mentowano łącznie na dystansie ok. 1 km, gdzie w 11 miejscach pobrano z nich 35 próbek (ryc. 3). Miąższość badanych ilów wynosi od kilkunastu do 40 cm i występują one na wysokości do 3 m od stropu pokładu węglowego (ryc. 4, 5). W terenie określono makroskopowo facje ilów oraz litotypy niżej i wyżej zalegającego węgla brunatnego. W celu uproszczenia ich opisu użyto odpowiednio kodu litofacjalnego i litotypowego (tab. 1; ryc. 5; Widera, 2016b; Widera i in., 2019).



Ryc. 3. Mapa dokumentacyjna obszaru odkrywki Tomislawice (czerwiec 2019) z lokalizacją otworów wiertniczych, miejsc poboru próbek i przekrojów geologicznych analizowanych w tej pracy

Fig. 3. Documentation map of the Tomislawice opencast mine (June 2019) with location of boreholes, sampling sites and cross-sections analysed in this paper

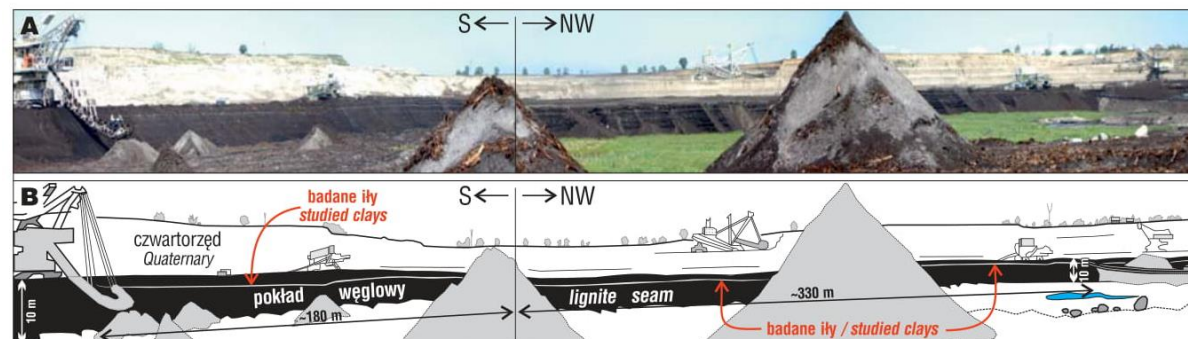
W archiwum geologicznym PAK KWB Konin S.A. kwerendzie poddano 38 kart otworów wiertniczych z obszaru południowej i środkowej części złoża Tomislawice (por. ryc. 1 i 3 oraz tab. 2). W większości z nich stwierdzono badane ropy międzywęglowe. Dlatego uzyskane dane otworowe posłużyły do wykonania: mapy miąższościowej ilów (ryc. 6), mapy strukturalnej spągu ilów (ryc. 7) oraz czterech równoleżnikowych, uproszczonych przekrojów geologicznych, uwzględniających przede wszystkim pokład węgla i występujące w nim ropy, a także piaski (ryc. 3, 8).

Podczas prac laboratoryjnych 35 próbek (profile, miejsca I–XI na ryc. 3 i 9) poddano analizie uziarnienia metodą areometryczną. W ten sposób określono zawartość frakcji ilowej, pyłowej i piaskowej w analizowanych próbkach, a następnie osad nazwano zgodnie z klasyfikacją Sheparda (1954). W przypadku mieszaniny ww. frakcji w ilości co najmniej 20% wag. każda (piasek-pył-il wg Sheparda, 1954) użyto w tej pracy nazwy muł (ryc. 9). Dodatkowo trzy próbki ilów (profil, miejsce XI na ryc. 3 i 9) poddano badaniom na zawartość organiki. W tym celu próbki te, różniące się wyraźnie makroskopowo ze względu na zawartość detrytus roślinnego, spalono w temp. 850°C. Wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły na bardziej precyzyjne określenie nazwy badanych osadów drobnoklastycznych (ryc. 9). Wreszcie wykonano odpowiednie proste obliczenia, mające na celu określenie wpływu przewarstwienia ilastego na popielność całego, obecnie eksploatowanego w odkrywce Tomislawice, pokładu węgla brunatnego.

WYNIKI BADAŃ

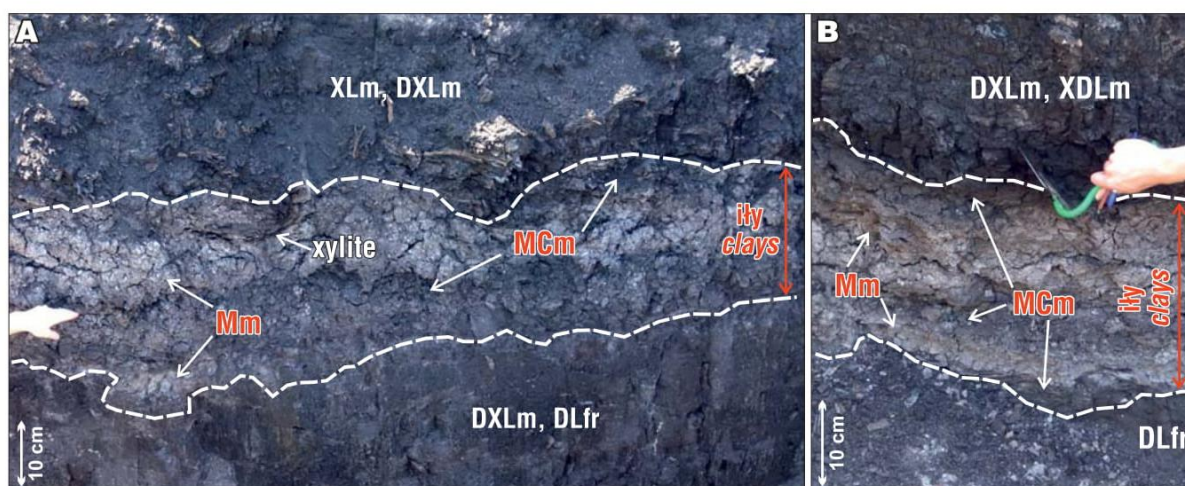
Poddane badaniom ropy są widoczne makroskopowo w odkrywce Tomislawice, pomimo ich niewielkiej miąższości (25–40 cm) i niezbyt dużego kontrastu barwnego. Ropy mają barwę jasnoszarą, szarą, po czarnej (ryc. 5A) lub jasnobrązową (ryc. 5B), natomiast węgiel – ciemnobrązową i czarną (ryc. 4, 5). Udokumentowana rozciągłość ciągłej warstwy ilastej wynosi odpowiednio na ścianach o orientacji: E–W – ok. 200 m, S–N – ok. 180 m i SW–NE – ok. 600 m (por. ryc. 3, 4, 6 i 7).

Opisywane ropy nie są jednorodne teksturalnie. Oprócz wspomnianego już urozmaicenia barwnego, spowodowanego domieszką pyłu węglowego (detrytus roślinnego), różnią się one też wielkością ziarna. Stosując podstawowe



Ryc. 4. Panoramiczny widok osadów drobnoklastycznych w obrębie pierwszego środkowopolskiego pokładu węglowego (środkowy miocen) w odkrywce Tomislawice, czerwiec 2019. A – zestawienie fotografii; B – szkic przedstawiający szczegóły z ryciny 4A

Fig. 4. Panoramic view of the fine-grained clastics within the first mid-Polish lignite seam in the Tomislawice opencast mine, June 2019. A – compilation of photographs; B – line drawing depicting details shown in Fig. 4A



Ryc. 5. Widok badanych osadów drobnoziarnistych między warstwami węgla brunatnego w odkrywce Tomisławice, czerwiec 2019. Objasnienia kodu facjalnego i litotypowego w tabeli 1

Fig. 5. View of the studied fine-grained sediments between lignite beds in the Tomisławice opencast mine, June 2019. For explanation of facies and lithotypes codes see Table 1

Tab. 1. Makroskopowa kodyfikacja drobnoziarnistych facji klastycznych (wg Widery i in., 2019) i litotypów węgla brunatnego (wg Widery, 2016b) wykorzystana w tej pracy

Table 1. Macroscopic codification of fine-grained clastic facies (after Widera et al., 2019) and lignite lithotypes (after Widera, 2016b) used in this paper

Facje drobnoklastyczne <i>Fine-grained clastic facies</i>	
Kod / Code	Opis / Description
Mm	muł masywny <i>mud with a massive structure</i>
MCm	muł węglisty, masywny <i>coaly (carbonaceous) mud with a massive structure</i>
Litotypy węgla brunatnego <i>Lignite lithotypes</i>	
Kod / Code	Opis / Description
DLfr	węgiel brunatny detrytowy, splekany <i>detrital lignite with a fractured structure</i>
XDLm	węgiel brunatny ksylodetrytowy, masywny <i>xylodetrititic lignite with a massive structure</i>
DXLm	węgiel brunatny detroksylitowy, masywny <i>detroxylitic lignite with a massive structure</i>
XLm	węgiel brunatny ksylitowy, masywny <i>xylitic lignite with a massive structure</i>

metody terenowe (w tym organoleptyczne), w większości przypadków oprócz frakcji iłowej stwierdzono także frakcję pyłową oraz ziarna piasku. Dlatego makroskopowo badane osady nazwano mułami i mułami węglistymi o strukturze masywnej (ryc. 5; tab. 1). Warto dodać, że w omawianych iłach występują zarówno silnie spłaszczone fragmenty roślinności zielnej (najprawdopodobniej szuwarowej), o szerokości do 2 cm i grubości do 2–3 mm, jak i uwęglone fragmenty roślinności drzewiastej o wielkości powyżej 1 cm, tj. ksylity (ryc. 5A).

Zasięg badanych iłów nawiązuje w dużym przybliżeniu do rozprzestrzenienia objętej badaniami części złoża Tomisławice (ryc. 6, 7). Iły zajmują powierzchnię >1,5 km², a ich rozciągłość w kierunku SSE–NNW, czyli zgodnym z orientacją złoża węgla brunatnego, wynosi ponad 2,2 km.

Natomiast w najszerszym miejscu, tj. w środkowej części badanego obszaru, omawiana warstwa iłów ma szerokość ok. 1,2 km (ryc. 6, 7).

Mięszość iłów w obrębie pokładu węglowego mieści się w przedziale 0–80 cm (ryc. 6; tab. 2). Ich najgrubsze wystąpienia są/były zlokalizowane w SE już wyeksploatowanej części złoża – 50 cm w otw. TM-21 i MC-190 – oraz w przewidzianej do wydobycia NE części złoża – 80 cm, otw. MC-180 (ryc. 6). Na terenie objętym badaniami, w dostępnym do bezpośrednich obserwacji w czasie prac terenowych, mięszość iłów wynosi 20–40 cm (por. ryc. 4–6).

Kształt warstwy iłów dobrze obrazuje mapa strukturalna ich powierzchni spągowej (strop jest współkształtny do spągu) oraz przekroje geologiczne (ryc. 7, 8). W obu przypadkach wyraźnie widać, że deniwelacje spągu i stropu analizowanej warstwy przekraczają 8 m. W najniższym miejscu (otw. T-54) iły zalegają na rzędnych poniżej 56 m n.p.m., a na ich obrzeżach (np. otw. TM-34) wznoszą się na wysokość powyżej 64 m n.p.m. (ryc. 7). Warto zauważyć, że obniżenia warstwy iłów pokrywają się z miejscami ich największych mięszości. Z drugiej strony, ułożenie warstwy iłów nie zawsze jest współkształtne do spągu i/lub stropu pokładu węglowego, w którym występują (por. ryc. 6–8).

Według danych z dokumentacji geologicznej średnia zawartość popiołu w stanie suchym (A^d) dla całego złoża Tomisławice wynosi 22,4% (Kozuła, 2001). W tym przypadku próbki były pobierane bruzdowo z rdzeni otworów wiertniczych, włączając przerosty mineralne do 30 cm grubości. Natomiast wyniki A^d uzyskane dla 86 próbek pobieranych punktowo, bezpośrednio ze ścian węglowych w odkrywce wzdłuż całego pokładu, wynoszą średnio 15,9% (Chomiak, 2020b). Należy zauważyć, że w ostatnim przypadku nie pobierano próbek z makroskopowo stwierdzonych przerostów mineralnych, w tym z badanych iłów.

INTERPRETACJA WYNIKÓW I DYSKUSJA

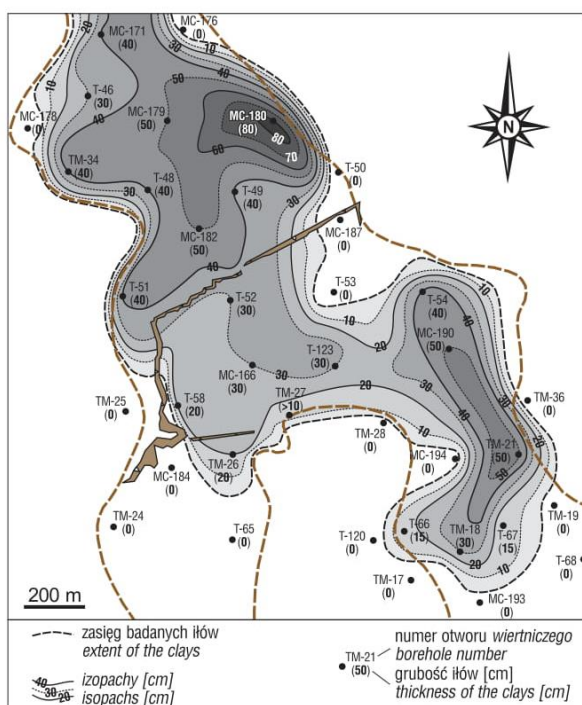
Wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły sprecyzować nazwy osadów drobnoklastycznych, które w dokumentacjach geologicznych są zwane po prostu iłami (Kozuła, 1999, 2001), a w terenie określono je jako muły i muły

Tab. 2. Parametry pokładu węglowego oraz przewarstwień ilastych i piaszczystych w analizowanych otworach wiertniczych z obszaru złoża węgla brunatnego Tomisławicze**Table 2.** Parameters of the lignite seam, as well as clayey and sandy interbeddings, in the Tomisławicze lignite deposit from the analysed boreholes

Numer otworu Borehole No.	Rzędna otworu [m n.p.m.] Borehole elevation [m a.s.l.]	Rzędna spągu i stropu węgla brunatnego [m n.p.m.] Elevation of lignite base and top [m a.s.l.]	Rzędna spągu i stropu iłów i/lub piasków [m n.p.m.] Elevation of clays and/or sands* base and top [m a.s.l.]	Miaższość ilów i/lub piasków [m] Thickness of clays and/or sands* [m]
MC-171	96,25	51,05–61,95	60,05–60,45 54,25–56,05* 56,45–58,05*	0,4 1,8* 1,6*
MC-176	100,61	47,11–59,11	–	0,0
T-46	95,89	52,89–61,89	60,39–60,69	0,3
MC-178	98,11	61,51–67,71	– 65,11–66,61*	0,0 1,5*
MC-179	101,67	47,67–58,07	56,17–56,67 48,67–49,67*	0,5 1,0*
MC-180	99,23	47,23–57,43	56,23–57,03 48,73–49,73*	0,8 1,0*
TM-34	95,38	61,68–66,88	63,98–64,38	0,4
T-48	95,87	58,57–65,07	63,67–64,07	0,4
T-49	97,75	49,05–59,95	57,65–58,05	0,4
T-50	99,12	52,12–57,12	–	0,0
MC-182	97,33	54,33–63,33	61,53–62,03	0,5
MC-187	97,61	51,51–61,91	– 55,81–58,41*	0,0 2,6*
T-51	94,79	56,79–64,99	62,99–63,39	0,4
T-52	96,05	48,85–57,15 51,85–59,25	51,45–51,85 57,15–57,55	0,4 0,4
T-53	96,22	47,22–58,22	–	0,0
T-54	96,64	47,54–57,44	55,04–55,44	0,4
MC-166	96,11	48,31–59,11	56,61–56,91	0,3
T-123	95,48	57,38–63,88	62,18–62,48	0,3
MC-190	95,25	49,55–60,75	57,35–57,85	0,5
TM-25	95,70	56,50–58,80	–	0,0
T-58	95,73	51,73–62,73	60,23–60,43	0,2
TM-27	95,65	62,85–65,85	65,75–>65,85	>0,1
TM-28	95,90	66,00–66,20	–	0,0
TM-36	96,01	63,01–66,41	– 64,01–65,91*	0,0 1,9*
MC-184	95,46	51,46–62,96	–	0,0
TM-26	98,76	59,26–66,06	63,26–63,56	0,3
MC-194	95,84	50,74–61,34	–	0,0
TM-21	95,71	55,21–62,31	60,41–60,91	0,5
TM-24	97,30	61,60–66,30	–	0,0
T-65	98,66	57,86–63,66	–	0,0
T-120	96,09	56,69–66,39	– 57,09–66,09*	0,0 9,0*
T-66	95,50	54,30–62,50	60,00–60,15	0,15
T-67	95,54	51,54–60,84	59,09–59,24	0,15
TM-19	96,08	57,08–63,58	–	0,0
TM-18	95,37	51,37–61,27	60,47–60,77 58,37–59,87*	0,3 1,5*
TM-17	96,08	–	–	0,0
MC-193	96,38	57,88–65,68	– 61,98–65,48*	0,0 3,5*
T-68	95,58	51,58–61,68	–	0,0

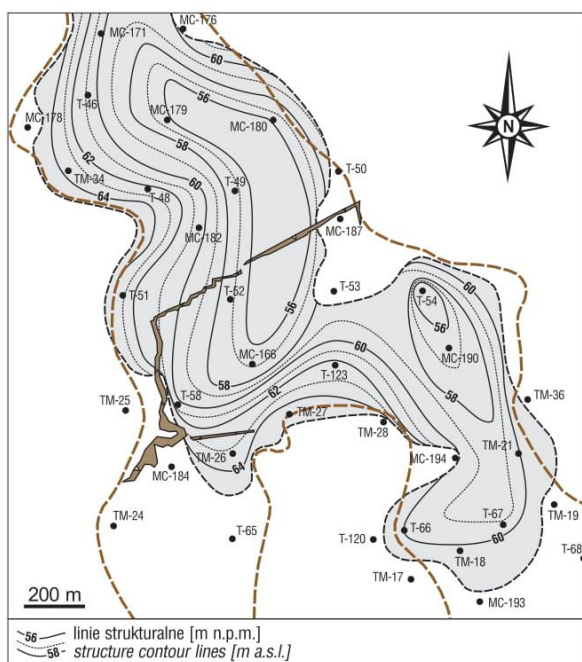
*Przewarstwienia piaszczyste (osady stożków krewasowych) w pokładzie węglowym.

*Sandy interbeddings (crevasse-splay sediments) within the lignite seam.



Ryc. 6. Mapa miąższości warstwy ilu w pokładzie ze złoża węgla brunatnego Tomislawice

Fig. 6. Thickness map of the clayey layer within the lignite seam from the Tomislawice lignite deposit



Ryc. 7. Mapa strukturalna spągu środkowomiocenijskiej warstwy ilastej przedstawionej na rycinie 6

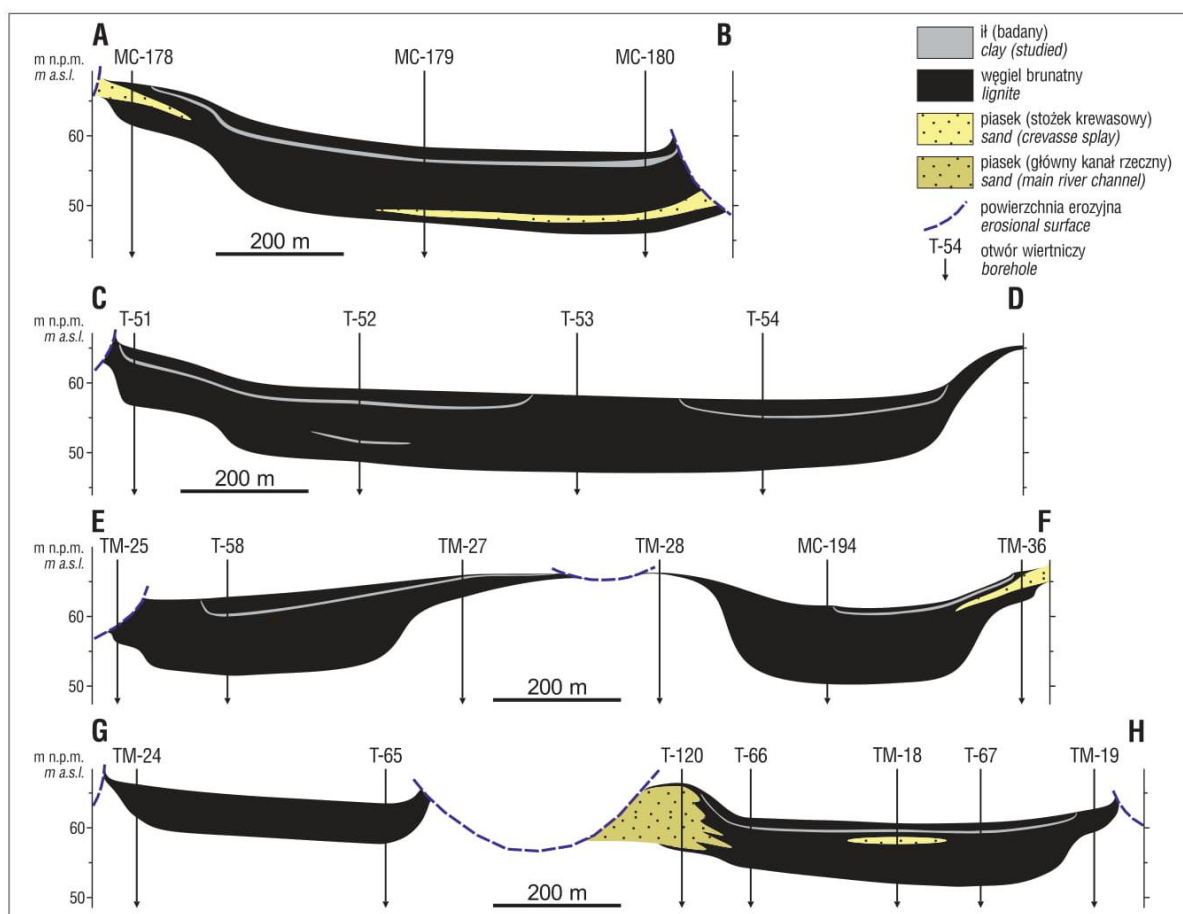
Fig. 7. Structural map of the base of the clayey layer show in Fig. 6

węgliste (por. ryc. 5 i tab. 1). Okazało się, że podane wyżej nazwy są tylko częściowo poprawne dla badanych próbek (ryc. 9). Tylko jedna z przebadanych próbek (pr. I2) może być nazwana ilem, gdyż zawiera >75% wag. frakcji ilowej wg kryterium Sheparda (1954). Z drugiej strony, wię-

szczość próbek nie reprezentuje mułów, a jeśli zostałyby zastosowana klasyfikacja Lundgarda i Samuela (1980) (33–66% wag. frakcji pyłowej i <50% wag. frakcji piaszkowej), to żadnej próbki nie należałoby nazwać mułem. Innymi słowy, największa liczba próbek reprezentuje il pylisty – 21 próbek, a tylko 3 próbki to il piaszczysty. Natomiast 10 próbek, obejmujących wszystkie frakcje (piaskową, pyłową, ilową) w ilości >20% wag. (Shepard, 1954), spełnia kryteria mułu i tak są w tej pracy opisane. Najwięcej najgrubszych ziaren, tj. frakcji piaszkowej i pyłowej, występuje w profilach VIII i IX, zaś najdrobniejsza frakcja jest w profilu I. Wskazuje to na generalny kierunek transportu materiału drobnookruchowego z zachodu na wschód (por. ryc. 3 i 9).

Pionowa zmienność uziarnienia jest zauważalna w większości analizowanych profili. Obecność w ilach warstw (soczew) wzbogaconych w detrytus roślinny do 34% wag. (ryc. 5, 9) dowodzi zmieniających się warunków depozycji, w tym kilkietapowej dostawy cząstek mineralnych i organicznych do zbiornika sedimentacyjnego. Osad drobnoklastyczny pochodził zapewne z koryt rzecznych opływających torfowisko (Bos i in., 2009, 2012; Widera, 2016a). Z kolei źródłem detrytus roślinny, tj. pyłu węglowego i fragmentów łodyg roślinności zielonej, była prawdopodobnie roślinność porastająca strefę przybrzeżną (do ok. 2 m) zbiornika wodnego istniejącego na powierzchni torfowiska (np. Horne i in., McCabe, 1984; 1978; Diessel i in., 2000). W głębszej (>2 m) części płytkiego jeziora położonego w strefie pozakorytowej środkowomiocenijskiej rzeki przeważała, a nawet dominowała sedimentacja klastyczna z zawiesiny (np. Lv i in., 2016; Widera, 2016a; Erkoyun i in., 2017; Matys Grygar i in., 2017). Natomiast ksylyty w badanych ilach mają dwojakie pochodzenie. Część z nich była redeponowana spoza zbiornika sedimentacyjnego, stanowiąc fragmenty roślinności krzewiastej i drzewiastej, która porastała wyniesienia (powyżej poziomu wód gruntowych) na środkowomiocenijskim torfowisku i jego otoczeniu (Kwiecińska, Wagner, 1997; Markič, Sachsenhofer, 1997; Widera, 2016b). Natomiast pozostałe ksylyty to uwęglone fragmenty korzeni roślinności krzewiastej i drzewiastej, z której m.in. powstała górna ława węglowa (ryc. 5A).

Rozprzestrzenienie badanych ilów w złożu Tomislawice jest największe spośród wszystkich złóż eksploatowanych przez PAK KWB Konin S.A. Dotyczy to także przewarstwień piaszczystych reprezentujących stożki krewasowe, odsłoniętych do bezpośrednich obserwacji w odkrywkach Tomislawice (Widera, 2016a; Widera i in., 2017; Chomiak, 2020a) i Józwin IIB (Chomiak i in., 2019a, b; van Loon, 2019). Przewarstwienia te występują w brzeżnych lub spągowych partiach pokładu węglowego, co wpływa na zmniejszenie zasobów, ale nie utrudnia eksploatacji poprzez odpowiednie okonturowanie złoża. Natomiast w przypadku badanych ilów międzywęglowych ze złoża Tomislawice, to zalegają one na przeważającym jego obszarze, w tym w jego strefie osiowej (ryc. 6, 7). Ponadto obecność warstwy ilów o grubości dochodzącej do 80 cm powoduje nie tylko problemy geologiczno-górnice (m.in. podwyższa stosunek nadkładu do węgla), ale przede wszystkim niekorzystnie wpływa na parametry chemiczno-techniczne węgla – głównie na zawartość popiołu. Niestety aktualnie, poza wyjątkowymi sytuacjami, w odkrywce Tomislawice nie jest prowadzona, ze względów technologicznych i finanso-



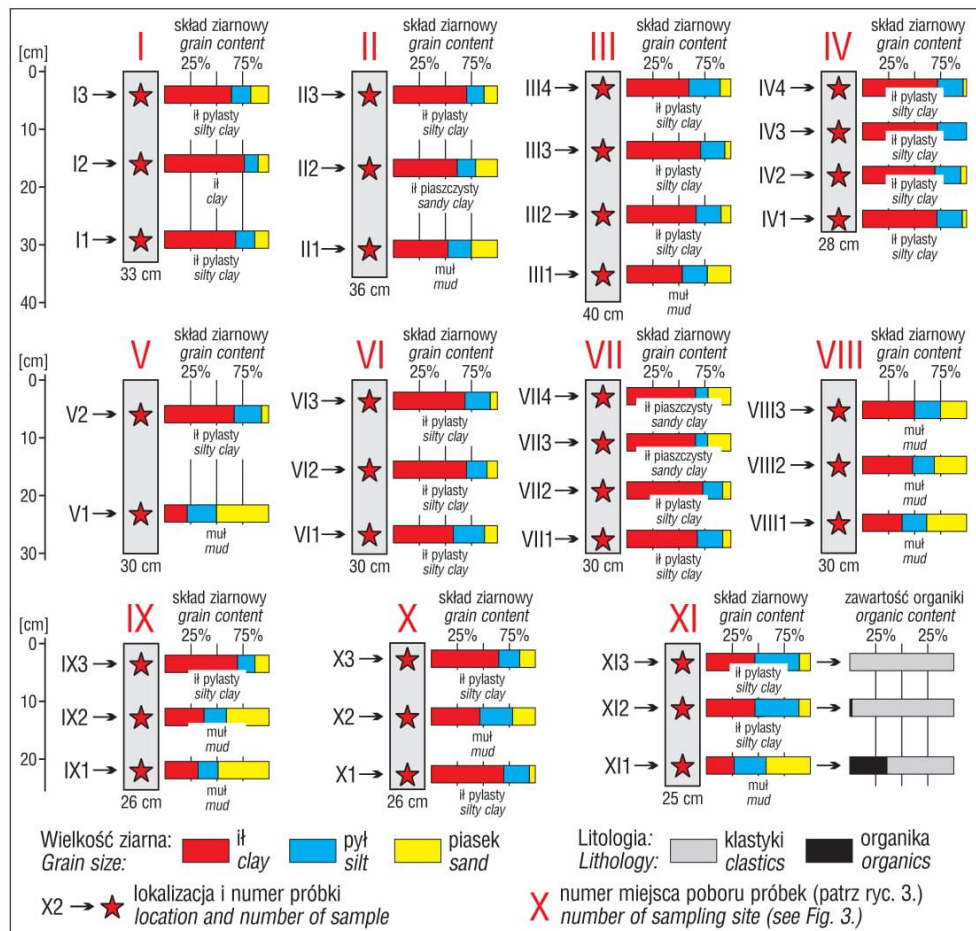
Ryc. 8. Uproszczone przekroje geologiczne ukazujące architekturę przewarstwień klastycznych (iłłów i piasków) w obrębie pierwszego środkowopolskiego pokładu węglowego (środkowy miocen) w złożu Tomisławice. Lokalizacja linii przekrojowych na ryc. 3
Fig. 8. Simplified cross-sections depicting an architecture of the clastic interbeddings (clays and sands) within the first mid-Polish lignite seam in the Tomisławice deposit. For location of the cross-section lines see Fig. 3

wych, selektywna eksploatacji dolnej i górnej ławy węglowej. W ostatnim przypadku nie byłoby spełnione kryterium bilansowe (>3 m miąższości węgla), gdyż górna ława węglowa w przeanalizowanych otworach ma grubość od 0,4 m w otw. MC-180 do 2,9 m w otw. MC-190 (tab. 2).

Ułożenie warstwy iłłów na obszarze ich występowania jest w przybliżeniu równoległe zarówno do spągu, jak i stropu pokładu węglowego. Jednakże w brzeźnych partiach są one często silnie *poddarte*, dochodząc do stropu węgla, co zaobserwowano w terenie (ryc. 10) i zinterpretowano na przekrojach (ryc. 8). W niektórych przypadkach, gdzie architektura warstwy iłłów nawiązuje do kształtu spągu węgla (otoczenie otworów: MC-178, T-51, TM-27, TM-36, T-66 i TM-19), przyczyn takiego ułożenia iłłów można dopatrywać się w tektonice postdepozycyjnej. Natomiast pozostałe przypadki (otoczenie otworów: T-53, T-58 i MC-194) skłaniają do łączenia *poddarcia* warstwy iłłów z nierównomierną, postdepozycyjną kompaktacją dolnej ławy węglowej (ryc. 8, 10). W ten sposób, pod ciężarem względnie grubej (do 80 cm) warstwy badanych osadów drobnoklastycznych, postępująca kompaktacja doprowadziła do utworzenia przestrzeni akomodacyjnej dla młodszych warstw torfu. W efekcie powstała górna ława węglowa, której obserwowana i nawiercona miąższość nie przekracza 3 m (por. ryc. 4, 10 i tab. 2). Niemniej jednak, ze względu na skutki plejstoceńskich procesów niszczących (erozja i egza-

racja) trudno jest wyznaczyć pierwotny zasięg i miąższość wspomnianej górnej ławy węglowej. Dlatego nie można też określić rozmiarów deformacji warstwy iłłów wywołanych zarówno przez subsydencję tektoniczną, jak i kompaktacyjną (Widera, 2007).

Badana warstwa iłłów ma zróżnicowany wpływ na popielność całego pokładu, w zależności od stosunku miąższości iłu do węgla. Dla uproszczenia obliczeń i interpretacji wyników przyjęto gęstość objętościową dla węgla brunatnego $1,2 \text{ Mg/m}^3$, dla iłłów $2,0 \text{ Mg/m}^3$ oraz średnią popielność $A^d = 17,2\%$ (Chomiak, 2020b). W przypadku otw. T-67 (9,15 m węgla i 0,15 m iłu; ryc. 6; tab. 2) wydobycie tej cienkiej warstwy iłu razem z węglem zwiększa popielność całego pokładu tylko o ok. 2,4%. Inaczej sytuacja wygląda w otw. MC-180, jeśli uwzględniony zostanie pokład powyżej warstwy piasków interpretowanych jako osady stożka krewasowego (ryc. 8). W tym przypadku łączna grubość pokładu wynosi 7,7 m, gdzie 6,9 m stanowi węgiel, a 0,8 m ił – jest to największa miąższość warstwy iłu na całym badanym obszarze (por. ryc. 6 i 8). W efekcie wydobycie węgla razem z przewarstwieniem ilastym powoduje wzrost popielności do ok. 32,7%. Innymi słowy, niespełna 1 m iłu zawiera więcej materii mineralnej (popiołu) niż blisko 7 m węgla brunatnego. Powyższe wyniki prostych obliczeń jasno pokazują, że nieselektywna eksploatacja węgla, tj. razem z warstwą iłłów, w skrajnych



Ryc. 9. Graficzne przedstawienie wyników badań laboratoryjnych ilów obejmujących głównie wielkość ziarna i dodatkowo zawartość organiki. Lokalizacja miejsc poboru analizowanych próbek na rycinie 3

Fig. 9. Graphic representation of the results of laboratory tests of clays, covering mainly grain size and additionally organic content. For location of the sampling sites see Fig. 3



Ryc. 10. Poddarcie warstwy ilów w brzeżnej strefie ich występowania: **A** – o ok. 1 m na dystansie poniżej 10 m, **B** – o blisko 3 m na dystansie ok. 50 m

Fig. 10. Upturned layer of clays in the marginal zone of their occurrence: **A** – by about 1 m at a distance of less than 10 m, **B** – by almost 3 m at a distance of about 50 m

przypadkach skutkuje wzrostem popielności węgla dostarczanego do elektrowni nawet o ok. 15,5%. Oczywiście uśredniona wartość jest mniejsza i najprawdopodobniej zbliżona do różnicy między wartościami uzyskanymi dla próbek węgla pobieranych bruzdowo (z przerostami mineralnymi) – $A^d = 22,4\%$ (Kozula, 2001), a wynikami uzyskanymi dla selektywnie pobieranych próbek węgla (bez przerostów mineralnych) – $A^d = 17,2\%$ (Chomiak, 2020b).

WNIOSKI

Na obszarze złoża węgla brunatnego Tomisławice udokumentowano warstwę ilu w obrębie aktualnie eksploatowanego pierwszego środkowopolskiego pokładu węglowego. Przewarstwienie osadów drobnoklastycznych ma względnie duże rozprzestrzenienie i miąższość, co utrudnia wydobycie węgla i negatywnie wpływa na jego wartość opałową.

Ich architektura na przeważającym obszarze nawiązuje do ukształtowania stropu i spągu pokładu węglowego. Są jednak przypadki, dobrze widoczne w terenie i na przekrojach geologicznych, gdzie takiej zależności brak. Należy dodać, że stropowe warstwy pokładu węgla są częściowo usunięte przez plejstocенską erozję i egzarcję. Dlatego trudno jest określić wpływ tektoniki i kompacji na ukształtowanie warstwy międzywęglowych osadów klastycznych.

Poddane badaniom osady międzywęglowe reprezentują głównie il pylasty, a także muł, il piaszczysty i il. Większość przebadanych próbek nie zawiera substancji organicznej lub zawiera jej śladowe ilości. Niemniej jednak w pojedynczych próbkach stwierdzono nawet do 34% wag. organiki w postaci pyłu węglowego i/lub ksyliłów, będących uwęglonymi fragmentami zarówno roślinności zielnej, jak

i krzaczasto-drzewiastej. Pionowy i poziomy rozkład uziarnienia wzdłuż ścian eksploatacyjnych w odkrywce Tomisławice wskazuje na więcej niż jeden cykl sedymentacyjny, a także na zachodni kierunek dostawy materiału klastycznego do basenu sedymentacyjnego.

Biorąc pod uwagę rozprzestrzenienie, architekturę stratygraficzną oraz cechy teksturalno-strukturalne badanych iłów, można jednoznacznie stwierdzić, że powstały one w zbiorniku jeziornym, który występował na powierzchni środkowomiocenijskiego torfowiska. Jezioro to było zasilane przez wody powodziowe pobliskiej rzeki, która pozostała w sąsiedztwie osady piaszczyste kilku stożków krewasowych, udokumentowanych w brzeźnych częściach złoża Tomisławice.

W praktyce górniczej węgiel brunatny w odkrywce Tomisławice jest eksploatowany razem z analizowanym przerostem ilastym. Jak wykazano w tej pracy, popielność węgla jest średnio o kilka, a w skrajnych przypadkach nawet o kilkanaście procent wyższa niż byłaby w sytuacji, gdyby węgiel był wydobywany selektywnie, tj. bez warstwy iłów. Niemniej jednak obecne uwarunkowania technologiczne, a przede wszystkim finansowe sprawiają, że takie działania są podejmowane tylko lokalnie.

Autorzy serdecznie dziękują pracownikom Działu Geologicznego PAK KWB Konin S.A. za pomoc w czasie prac terenowych i archiwalnych. Ponadto słowa wdzięczności kierujemy do prof. Z. Kasztelewicza i dr. J.R. Kasińskiego za bardzo pozytywne recenzje oraz do prof. W. Treli za pomoc edytorską. Prezentowana praca została sfinansowana z funduszy Narodowego Centrum Nauki, grant nr 2017/27/B/ST10/00001.

LITERATURA

- BOS I.J., FEIKEN H., BUNNIK F., SCHOKKER J. 2009 – Influence of organics and clastic lake fills on distributary channel processes in the distal Rhine-Meuse delta (The Netherlands). *Palaeogeograph., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 284: 355–374.
- BOS I.J., BUSSCHERS F.S., HOEK W.Z. 2012 – Organic-facies determination: a key for understanding facies distribution in the basal peat layer of the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Sedimentology*, 59: 679–703.
- CHOMIAK L. 2020a – Crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin, central Poland: architecture, sedimentology and depositional model. *Geologos*, 26: 25–37.
- CHOMIAK L. 2020b – Variation of lignite ash in vertical and horizontal sections of mining walls in the Konin Lignite Mine, central Poland. *Geol., Geophys., Environ.*, 46: 17–28.
- CHOMIAK L., WACHOCKI R., MACIASZEK P., WIDERA M., ZIELIŃSKI T. 2019a – Seismically deformed the crevasse-splay microdelta deposits – an example from Mid-Miocene of Poland. *Geol. Quart.*, 63: 162–177.
- CHOMIAK L., WACHOCKI R., MACIASZEK P., WIDERA M., ZIELIŃSKI T. 2019b – Seismically deformed the crevasse-splay microdelta deposits – an example from Mid-Miocene of Poland – reply. *Geol. Quart.*, 63: 429–433.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J. (red.) 2000 – Mapa Geologiczna Polski bez kenozoiku w skali 1 : 1 000 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DIESSEL C., BOYD R., WADSWORTH J., LECKIE D., CHALMERS G. 2000 – On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulations ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their sequence-stratigraphic significance. *Inter. J. Coal Geol.*, 43: 143–186.
- DOKTOR M. 2007 – Conditions of accumulation and sedimentary architecture of the upper Westphalian Cracow Sandstone Series (Upper Silesia Coal Basin, Poland). *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 77: 219–268.
- ERKOYUN H., KADIR S., KÜLAH T., HUGGETT J. 2017 – Mineralogy, geochemistry and genesis of clays interlayered coal seams succession in the Neogene lacustrine Seyitömer coal deposit, Kütahya, western Turkey. *Inter. J. Coal Geol.*, 172: 112–133.
- GRADZIŃSKI R., BARYŁA J., DANOWSKI W., DOKTOR M., GMUR D., GRADZIŃSKI M., KĘDZIOR A., PASZKOWSKI M., SOJA R., ZIELIŃSKI T., ŻUREK S. 2000 – Anastomosing system of the upper Narew river, NE Poland. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 70: 219–229.
- HORNE J.C., FERM J.C., CARUCCIO F.T., BAGANZ B.P. 1978 – Depositional models in Coal Exploration and Mine Planning in Appalachian Region. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 62: 2379–2411.
- KASIŃSKI J.R. 1986 – Sedimentary models of small lignite deposits: examples from the Polish Neogene. *Prz. Geol.*, 34: 189–197.
- KASIŃSKI J.R. 1989 – Lacustrine sedimentary sequences in the Polish Miocene lignite-bearing basins – Facies distribution and sedimentary development. *Palaeogeograph., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 70: 287–304.
- KASZTELEWICZ Z., PTAK M., SIKORA M. 2018 – Węgiel brunatny optymalnym surowcem energetycznym dla Polski. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, 106: 61–84.
- KOZULA R. 1999 – Dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego „Tomisławice” w kategorii C1 i C2, Część I – tekst. *Przed. Geol. PROXIMA*, Wrocław.
- KOZULA R. 2001 – Dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego „Tomisławice” w kategorii B i C1 w Tomisławicach, Część I – tekst. *Przed. Geol. PROXIMA*, Wrocław.
- KWIECIŃSKA B., WAGNER M. 1997 – Typizacja cech jakościowych węgla brunatnego z krajowych złóż według kryteriów petrograficznych i chemiczno-technologicznych dla celów dokumentacji geologicznej złóż oraz obsługi kopalń. *Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków*: 1–87.
- LUNDEGARD P.D., SAMUELS N.D. 1980 – Field classification of fine-grained sedimentary rocks. *J. Sediment. Petrol.*, 50: 781–786.
- LV D., FENG T., LI Z., LIU H., YONG P., YANG Q. 2016 – Sedimentary characteristics of clay deposits associated with coal beds and their geological implications for the Eastern Yanzhou Coalfield, North China. *Indian J. Geo-Marine Sci.*, 45: 5–15.
- MATYS GRYGAR T., MACH K., HOŠEK M., SCHNABL P., MARTINEZ M., KOUBOVÁ M. 2017 – Early stages of elastic deposition in the Most Basin (Ohře Rift, Czech Republic, Early Miocene): timing and possible controls. *Bull. Geosci.*, 92: 337–355.
- MCCABE P.J. 1984 – Depositional models of coal and coal-bearing strata. [W:] Rahmani R.A., Flores R.M. (red.), *Sedimentology of coal and coal-bearing sequences*. *Int. Ass. Sediment., Spec. Publ.*, 7: 13–42.
- MOROZOVA G.S., SMITH N.D. 2000 – Holocene avulsion styles and sedimentation patterns of the Saskatchewan River, Cumberland Marshes, Canada. *Sediment. Geol.*, 130: 81–105.
- MARKIĆ M., SACHSENHOFER R.F. 1997 – Petrographic composition and depositional environments of the Pliocene Velenje lignite seam (Slovenia). *Int. J. Coal Geol.*, 33: 229–254.
- PIWOŃKI M., ZIEMBIŃSKA-TWORZYDŁO M. 1997 – Neogene of the Polish Lowlands – lithostratigraphy and pollen-spore zones. *Geol. Quart.*, 41: 21–40.
- SHEPARD F.P. 1954 – Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sediment. Res.*, 24: 151–158.
- MASTALERZ M. 1992 – Petrografia i warunki depozycji pokładów węgla formacji wałbrzyskiej w niecce śródsudeckiej (SW Polska). *Geol. Sudet.*, 26: 1–82.
- MAZUREK S., TYMIŃSKI M. 2019 – Węgle brunatne. [W:] Szuflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.), *Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31 XII 2018 r.* Państw. Inst. Geol., Warszawa: 34–39.
- VAN LOON A.J. 2019 – Seismically-induced soft-sediment deformation in crevasse-splay microdelta deposits (Middle Miocene, central Poland): comment. *Geol. Quart.*, 63: 424–428.
- WIDERA M. 2007 – Litostratygrafia i paleotektonika kenozoiku podplejstocenijskiego Wielkopolski. *Geologia*, 18, Wyd. Nauk. UAM, Poznań: 1–224.
- WIDERA M. 2016a – Depositional environments of overbank sedimentation in the lignite-bearing Grey Clays Member: New evidence from Middle Miocene deposits of central Poland. *Sediment. Geol.*, 335: 150–165.
- WIDERA M. 2016b – An overview of lithotype associations forming the exploited lignite seams in Poland. *Geologos*, 22: 213–225.
- WIDERA M. 2017 – Sedimentary breccia formed atop a Miocene crevasse-splay succession in central Poland. *Sediment. Geol.*, 360: 96–104.
- WIDERA M., CHOMIAK L., GRADECKI D., WACHOCKI R. 2017 – Osady glifu krewasowego z miocenu Polski środkowej w okolicach Konina. *Prz. Geol.*, 65: 251–258.
- WIDERA M., CHOMIAK L., ZIELIŃSKI T. 2019 – Sedimentary facies, processes and paleochannel pattern of an anastomosing river system: an example from the Upper Neogene of Central Poland. *J. Sediment. Res.*, 89: 487–507.
- WIDERA M., KITA A. 2017 – Paleogene marginal marine sedimentation in central-western Poland. *Geol. Quart.*, 51: 79–90.
- ŻELAŻNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARNKOWSKI P.H., KONON A., ŚLĄCZKA A., ŻABA J., ŻYTKO K. 2011 – Regionalizacja tektoniczna Polski. *Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław*: 1–60.

Praca wpłynęła do redakcji 20.11.2019 r.
Akceptowano do druku 12.03.2020 r.

5.3. Trzecia publikacja

Chomiak L., 2020b. Variation of lignite ash in vertical and horizontal sections of mining walls in the Konin Lignite Mine, central Poland. **Geology, Geophysics and Environment**, 46, 1, 17–28. (mój udział: 100%)

Variation of lignite ash in vertical and horizontal sections of mining walls in the Konin Lignite Mine, central Poland

Lilianna Chomiak

Adam Mickiewicz University in Poznań, Institute of Geology; ul. B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań, Poland;
e-mail: lilcho@amu.edu.pl; ORCID ID: 0000-0003-4932-2732

© 2020 Author. This is an open access publication, which can be used, distributed and reproduced in any medium according to the Creative Commons CC-BY 4.0 License requiring that the original work has been properly cited.

Received: 16 January 2020; accepted: 3 April 2020; first published online: 18 April 2020

Abstract: This paper focuses on the variations of lignite ash along selected sections and mining walls from three lignite opencast mines in central Poland. They are owned by the Konin Lignite Mine, where the first Mid-Polish lignite seam is being mined to produce electricity. Ash content in lignite is important because ash lowers the calorific value of the lignite. The results obtained are based on 266 samples of lignite collected from the Drzewce, Tomisławice, and Józwin IIB opencasts. All samples were tested according to ISO 1171 standard procedures, that is, they were first burned at a temperature of 850°C, then the ash content was determined on a dry basis (A^d), before the basic statistical parameters were calculated. The studied lignite seam is characterised by a variable distribution pattern of ash both along selected vertical sections and lignite walls, as well as between the three opencasts. The ash content of individual samples ranged from 6.5 to 69.8 wt%, while the average content in opencast mines varied from 9.7 to 17.6 wt%. The coefficient of variation is large (80.23–96.33%) in the case of the Drzewce and Tomisławice, and low to average (14.53–37.75%) in the case of Józwin IIB. Significant ash enrichment of some beds is interpreted in this article as a consequence of floods occurring in a Mid-Miocene mire (backswamp), but also of chemical precipitation. When lignite is burned to generate electricity, a relatively large amount of ash is produced. Therefore, recognition of ash content in lignite, in addition to the chemical composition and phase of ash, is recommended to better protect the environment. At the first stage of protection, it can be best achieved by analysing field samples for ash content.

Keywords: Middle Miocene, backswamp, inorganic matter, coefficient of variation

INTRODUCTION

Approximately 30–35% of the electricity in Poland is generated from lignite (Tajduś et al. 2014, Polskie Sieci Elektroenergetyczne 2019). This is the second-most abundant raw material, after bituminous coal (hard coal), used in the Polish energy mix; about 20% of electricity is produced from renewable energy sources: solar, hydro, geothermal, wind, and biomass (Tajduś et al. 2014, Widera et al. 2016). Therefore, the composition of lignite, its ash content, as well as chemical and

phase composition, is important during mining and combustion activities.

Parameters such as organic matter, water content and ash content affect fuel quality. The values of these parameters are especially useful in evaluating the suitability of lignite for combustion in lignite-fired power plants (e.g. Kozula & Mazurek 1996, Kwiecińska & Wagner 1997, Kozula 2001, Naworyta 2008, Naworyta & Mazurek 2010, Mastej et al. 2015, Pawelec & Bielowicz 2016). According to Polish norms, the ash content in lignite must be lower than 40 wt%, on a dry basis (Rozporządzenie 2001).

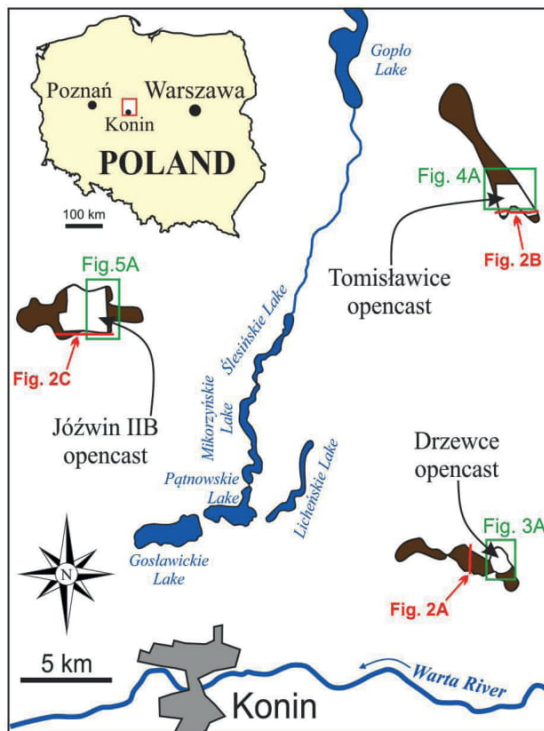


Fig. 1. Location map of the lignite opencast mines currently operating in the vicinity of Konin, central Poland

In the context of this study, the research question arose as to how the ash content in the lignite seam changes spatially. Hence, the main goals of the current study are (1) to present the quantitative ash content in the first Mid-Polish lignite seam from Drzewce, Tomisławice, and Józwin IIB opencasts (Fig. 1), which belong to the Konin Lignite Mine, (2) to calculate and compare basic statistical parameters for the ash content results obtained, and (3) to briefly discuss the impact of ash on the combustion of lignite and its environmental ramifications.

GEOLOGICAL BACKGROUND

Geologically, the research area is situated in the Szczecin–Miechów Synclinorium in the eastern part of the Mogilno–Łódź Segment (Żelaźniewicz et al. 2011). According to an older division of Poland into tectonic units, this region is located in the central part of the Mogilno–Łódź Basin, above the south-eastern slope of a deeply-rooted salt structure called the Gopło Anticline (Dadlez et al. 2000). The lignite deposits fill graben-like tectonic depressions that are up to several dozen metres

deep. These grabens began to develop at the turn of the Eocene/Oligocene or the Oligocene/Miocene transition as evidenced by the age of these deposits (Fig. 2, Widera & Kita 2007, Widera 2014).

The oldest sediments drilled in each of the three lignite deposits studied are predominantly marls of Late Cretaceous age (Fig. 2, Dadlez et al. 2000, Widera 2007). In the case of the Drzewce and Tomisławice opencasts, Paleogene glauconitic sands, with their characteristic greenish colour, lie on top of Mesozoic bedrock (Fig. 2A, B). These glauconitic sands are obviously of marine origin (Widera & Kita 2007). In the Józwin IIB opencast, sediments of Paleogene age were not documented until the end of 2019 (Fig. 2C).

Neogene deposition started after a period of uplift and erosion during the Late Oligocene, when the area that is now central Poland began to undergo subsidence. During this time, mainly fluvial sedimentation occurred in this area. The Neogene succession began with the deposition of sand approximately 10–40 m thick, often containing organic matter. These deposits belong to the Koźmin Formation of Early to Mid-Miocene age (Fig. 2).

The Poznań Formation of Mid-Miocene to earliest Pliocene age ends the Neogene succession in the study area. This formation is divided into two lithostratigraphic members: the older Grey Clays Member and the younger Wielkopolska Member (Fig. 2, Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997). The first Mid-Polish lignite seam belongs to the Grey Clays Member of Mid-Miocene age (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997, Kasiński & Słodkowska 2016). The thickness of this lignite seam reaches up to 19.8 m, but is less than 10 m on average (Fig. 2, Piwocki 1992, Widera 2007, 2014, Bechtel et al. 2019).

The Wielkopolska Member is the youngest lithostratigraphic unit in central Poland and is of late Mid-Miocene to earliest Pliocene age (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997). It consists predominantly of overbank muds (>95 vol.%) and channel-fill sands and muds (<5 vol.%). In the study area, these deposits are up to 30 m thick with evidence of glaciotectionic disturbances (Fig. 2). In recent years, the origin of this member has been connected with the environment of an upper Neogene anastomosing river system (e.g. Maciaszek et al. 2019, Widera et al. 2019).

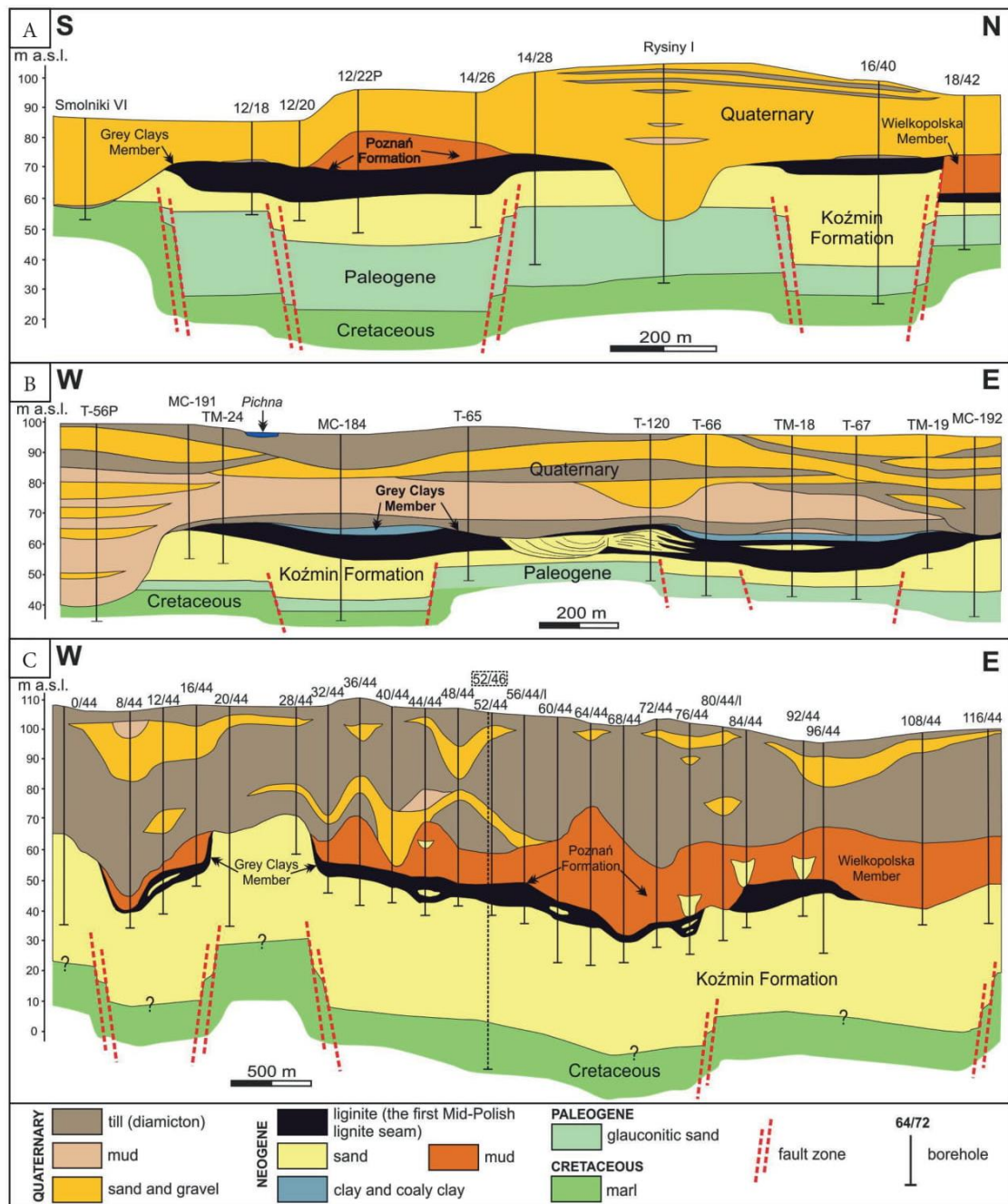


Fig. 2. Geological cross-sections through the studied lignite deposits: A) Drzewce with Drzewce opencast (after Widera 2007, modified); B) Tomisławice with Tomisławice opencast (after Widera et al. 2017, modified); C) Pątnów IV with Józwin IIB opencast (after Widera 2014, modified); for the location of cross-sectional lines, see Figure 1

The Neogene succession is covered by Quaternary sediments such as glacial tills, fluvio-glacial gravels and sands, and glaciolacustrine muds. These deposits were strongly eroded and deformed

by the Scandinavian ice sheets and/or their melt waters. Therefore, the Quaternary thickness varies between 20 and 60 m of overburden on the first Mid-Polish lignite seam (Fig. 2).

MATERIALS AND METHODS

Fieldwork

Fieldwork was conducted in 2018–2019 at three operational opencasts belonging to the Konin Lignite Mine. A total of 266 samples of lignite were collected from three different lignite deposits and opencasts: “Drzewce” lignite deposit in the Drzewce opencast, “Tomisławice” lignite deposit in the Tomisławice opencast, and “Pątnów IV” lignite deposit in the Józwin IIB opencast (Fig. 1). The first Mid-Polish lignite seam was sampled in each of these opencasts along the vertical sections and walls exploited (Figs. 3–5).

In the case of the vertical sections, 33–36 samples were collected at an interval of 10–20 cm. On the other hand, samples taken along the lignite walls were collected at intervals of 1 m or more. The profiles were separated from each other by approximately 200 m. The obtained results are presented in graphical form in Figures 3–8.

Laboratory analysis

All analyses of the ash content were made in accordance with the applicable ISO 1171:2010 standard and Polish equivalent PN-ISO 1171:2002 standard. They were conducted at the laboratory of the Institute of Geology in Poznań. Results from laboratory tests were subjected to basic statistical analysis using Microsoft[®] Excel. Several statistical parameters (mean, minimum, maximum values, and coefficients of variation) were calculated (Tabs. 1, 2), similar to the studies devoted to other Polish lignite deposits (e.g. Kasiński 1986, Naworyta & Mazurek 2010, Bielowicz 2013, Naworyta & Wasilewska-Błaszczuk 2014). In the case of ranges of the coefficient of variation, the classification according to Mucha (1994) was used.

Moreover, four histograms were prepared in order to sum up the distribution of the ash content results obtained. It was assumed that the sizes of the bins (intervals) were 5 wt% (Fig. 9).

RESULTS

Drzewce opencast

Ninety-one samples of lignite were collected from the Drzewce opencast, including 36 samples from the selected section D, and 55 from the exploitation fronts. The sampled lignite walls (sections) were 4.5–12.2 m high (Fig. 3). All these lignite samples were analysed for ash content.

In the case of section D, the arithmetic average ash content was 12.6 wt%, on a dry basis. However, it varies across a wide range from 6.7 to 66.0 wt% (Fig. 3B, Tab. 1). The highest values of ash content exceeded 30.0 wt% and were obtained from the lowermost beds of the lignite seam. The upper parts of this seam were characterised by a very even and relatively low ash content (<10 wt%), in which only 3 samples contained between 10.0 and 14.0 wt% (Fig. 3B). The coefficient of variation for these 36 samples was equal to 96.33% (Tab. 1).

The arithmetic average ash content along the lignite walls was 15.0 wt%, ranging from 6.5 to 69.8 wt% (Figs. 3C, 4, Tab. 2). Samples located close to the floor or roof of the seam had the highest ash content, exceeding 20–30 wt%. Similarly, sample number 52, situated in the middle part of the seam, was characterised by an ash content higher than 30 wt%. The remaining majority of the analysed lignite samples had an ash content below or slightly above 10.0 wt% (Fig. 4). Finally, in the case of these 55 samples, the coefficient of variation was 80.23% (Tab. 2).

Table 1

Basic statistical parameters of ash content obtained for selected sections of the first Mid-Polish lignite seam from opencasts of the Konin Lignite Mine

Name of opencast mine	Average ash content (A^d) [wt%]	Maximum ash content (A^d) [wt%]	Minimum ash content (A^d) [wt%]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]
Drzewce	12.6	66.0	6.7	12.09	96.33
Tomisławice	17.6	71.4	9.6	14.29	81.15
Józwin IIB	9.7	13.7	7.4	1.41	14.53

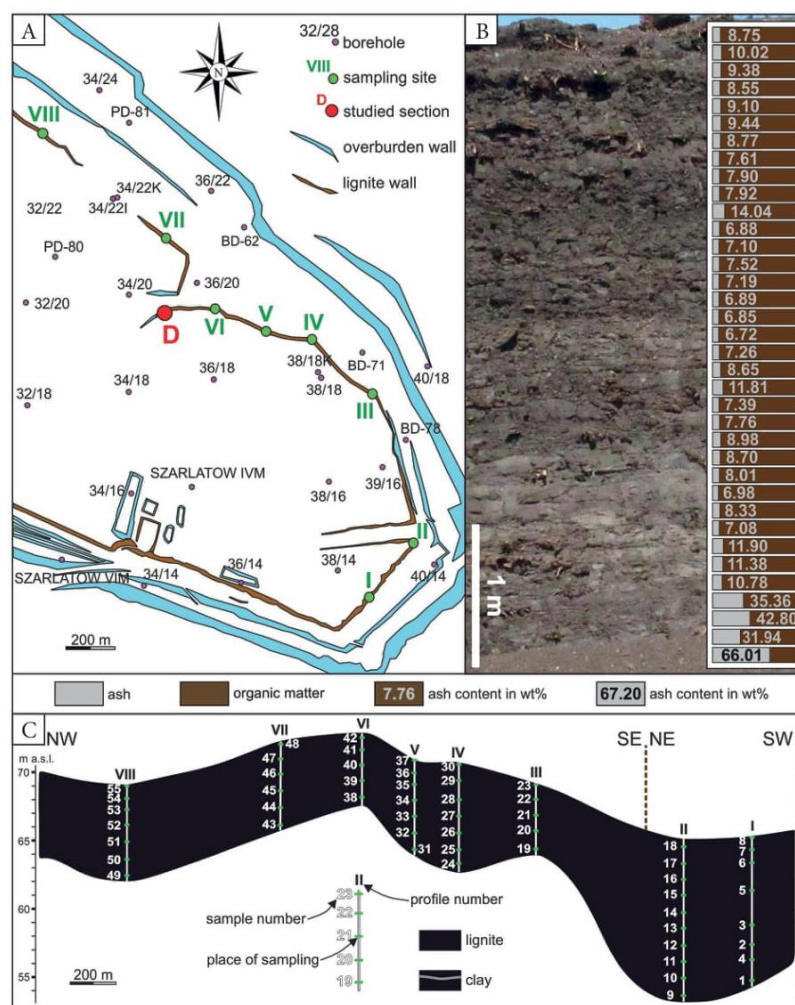


Fig. 3. Drzewce lignite opencast mine: A) location of the examined lignite walls with sampling sites I–VIII and the selected section D; B) broad view of the lignite seam with results of ash content tests; C) location of sampling sites along lignite walls; for the results of ash content tests see Figure 4

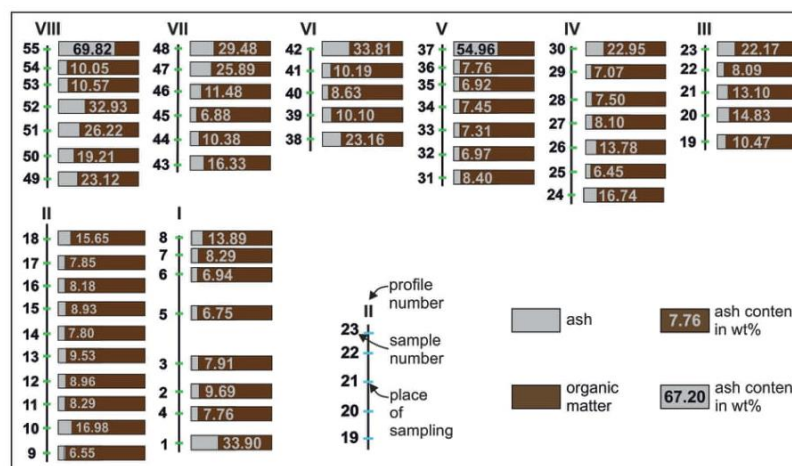


Fig. 4. Results of ash content tests obtained from lignite walls in the Drzewce opencast; for the location of sampling sites see Figure 3A and C

Tomislawice opencast

From the Tomislawice opencast, 87 samples of lignite were collected – 36 from section T and 51 from the lignite walls (Fig. 5). At the sampling sites, the first Mid-Polish lignite seam was thick, ranging from 7.4 to more than 10 m. The ash contents are shown graphically in Figures 5B and 6.

Section T contained 14.8 wt% (on a dry basis) of ash on average, but the variation in content was large, ranging from 6.9 to 71.4 wt% (Fig. 5B,

Tab. 1). Some samples contained an ash content 20–30 wt% higher in various parts of the lignite seam. These samples were found in floor, middle and roof layers of the seam, however, the most interesting two samples were situated about 1 m from the roof of the seam. These two samples contained an ash content of 69.8 and 71.4 wt%. In the middle part of this section, only two samples contained less than 10 wt% ash (Fig. 5B). For all 36 samples from section T, the coefficient of variation reached 81.15% (Tab. 1).

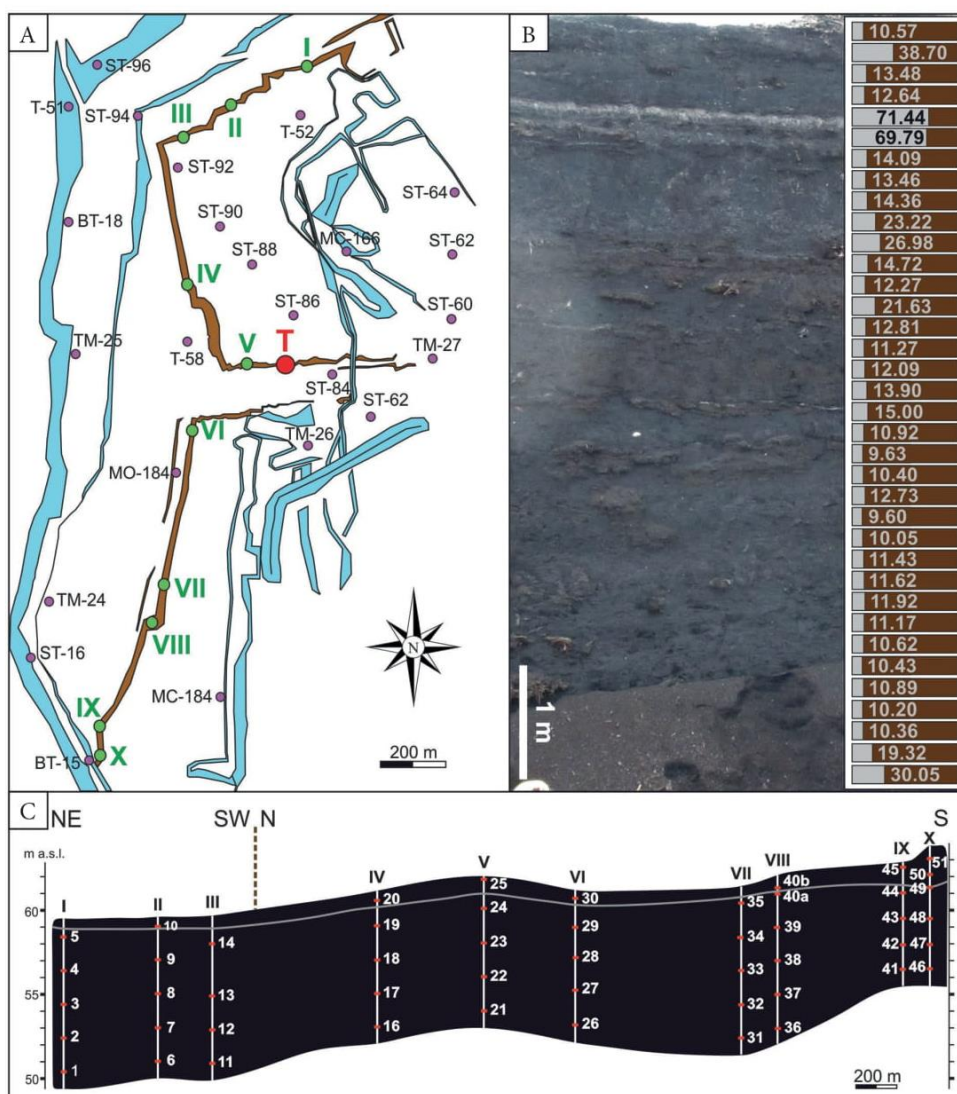


Fig. 5. Tomislawice lignite opencast mine: A) location of the examined lignite walls with sampling sites I–X and the selected section T; B) broad view of the lignite seam with results of ash content tests; C) location of sampling sites along lignite walls; for the results of ash content tests see Figure 6; for explanations see Figure 3

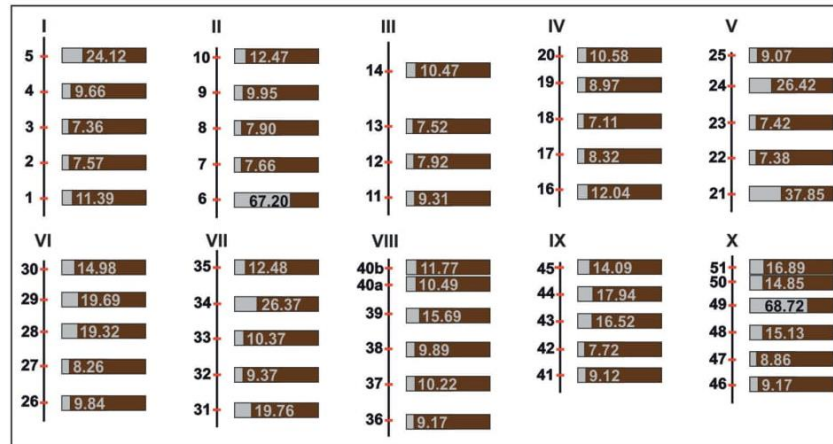


Fig. 6. Results of ash content tests obtained from lignite walls in the Tomisławice opencast; for location of sampling sites see Figure 5A and C; for explanations see Figure 4

Table 2

Basic statistical parameters of ash content obtained for exploited lignite walls of the first Mid-Polish lignite seam from opencasts of the Konin Lignite Mine

Name of opencast mine	Average ash content (A^d) [wt%]	Maximum ash content (A^d) [wt%]	Minimum ash content (A^d) [wt%]	Standard deviation	Coefficient of variation [%]
Drzewce	15.0	69.8	6.5	12.01	80.23
Tomisławice	14.8	68.7	7.1	12.31	83.41
Józwin IIB	13.9	30.5	7.8	5.23	37.75

In the case of 51 samples collected along the lignite walls, the average value of the ash content was 14.8 wt% and ranged from 7.1 to 68.7 wt% (Figs. 5C, 6, Tab. 2). The vertical and horizontal distribution of the ash did not show any regularity. Some floor and roof samples were characterised by clearly higher ash content (24.1–67.2 wt%), for example, samples 5, 6 and 24. Similarly, sample 49 contained very high ash content, reaching up to 68.7 wt% (Fig. 6). The coefficient of variation for these all samples was equal to 83.41% (Tab. 2).

Józwin IIB opencast

Eighty-eight samples were collected from the Józwin IIB opencast and analysed for ash content. Thirty-three of the samples came from the 3-m high section J, while the remaining 55 samples were collected from the mine walls up to 8.5 m high (Figs. 7B, 8).

In the Józwin IIB opencast mine, the average arithmetic ash content of the first Mid-Polish lignite seam was 9.7 wt% for section J. In this case, the difference between the maximum (13.7 wt%) and minimum (7.4 wt%) ash content was only 6.3 wt% (Fig. 7B, Tab. 1). Excluding the two lowest samples from the floor of the lignite seam, the ash content and distribution along section J was relatively low and fairly even. For the majority of these samples, the ash content was in the range of 10 ± 2 wt% (Fig. 7B). This is confirmed by the very low value of the coefficient of variation for 33 samples, which was only 14.53% (Tab. 1).

On the other hand, the arithmetic average ash content along the lignite walls was 13.9 wt% and ranged from 7.8 to 30.5 wt% (Figs. 7C, 8, Tab. 2). A few samples had ash contents greater than 20 wt%, and a dozen or so samples contained less than 10 wt% ash. Thus, most of the 55 samples had an ash content in the range of 10–20%, and the coefficient of variation is relatively low, only 37.75% (Tab. 2).

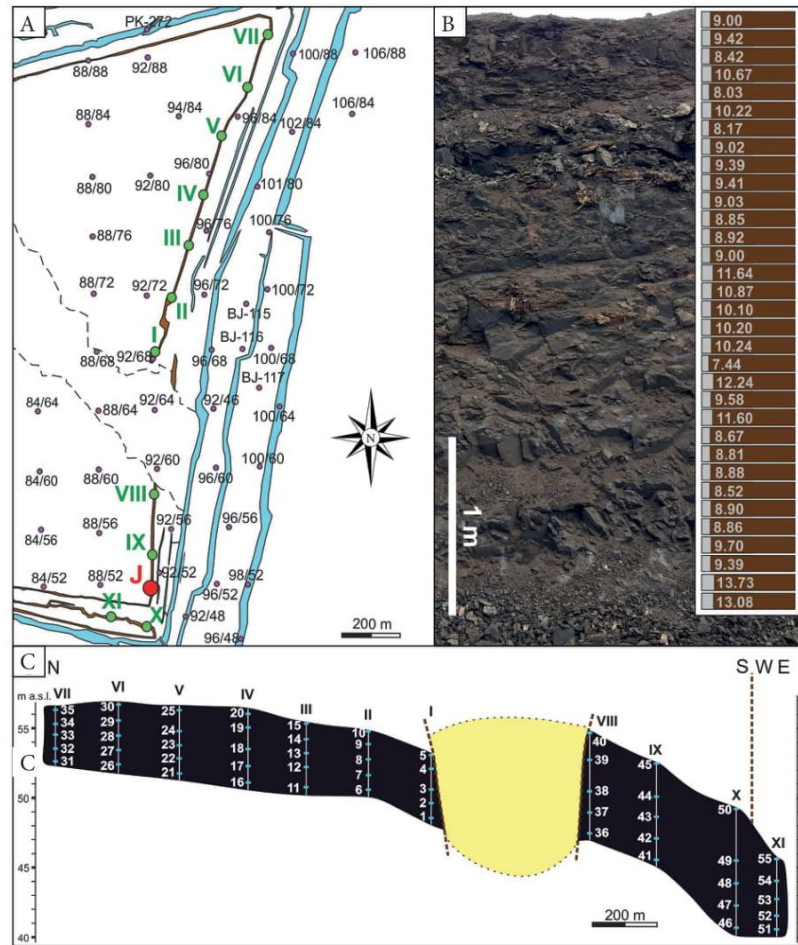


Fig. 7. Józwin IIB lignite opencast mine: A) location of the examined lignite walls with sampling sites I–XI and the selected section J; B) broad view of the lignite seam with results of ash content tests; C) location of sampling sites along lignite walls; for the results of ash content tests, see Figure 8; for explanations see Figure 3

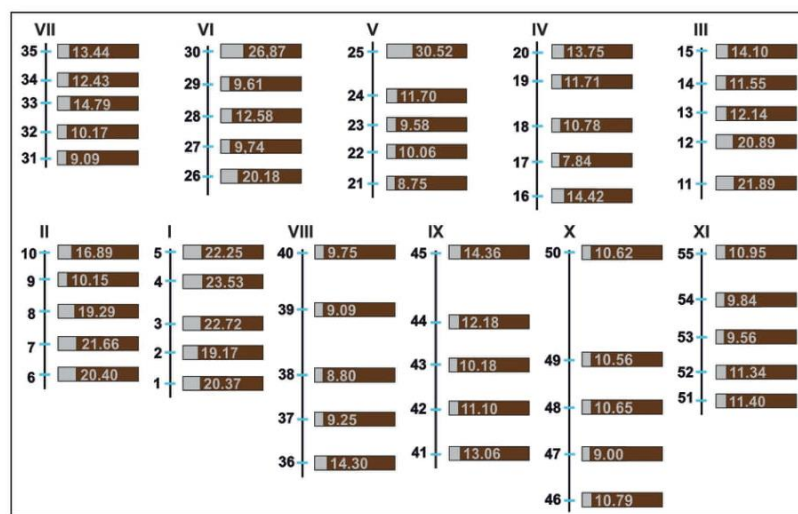


Fig. 8. Results of ash content tests obtained from lignite walls in the Józwin IIB opencast; for the location of sampling sites see Figure 7A and C; for explanations see Figure 4

INTERPRETATION AND DISCUSSION

The variation of ash content in the first Mid-Polish lignite seam, along vertical and horizontal sections of mining walls, will be briefly interpreted and discussed. Taking into account previous studies of this lignite seam, an initial attempt to clarify some issues can be made. Thus, ash content is a parameter that is given in both geological documentation (e.g. Kozula 2001) and scientific studies devoted to lignite deposits owned by the Konin Lignite Mine (e.g. Kozula & Mazurek 1996, Naworyta 2008, Naworyta & Mazurek 2010, Pawelec & Bielowicz 2016). In these contributions, various geostatistical methods, both standard and modern, were used as summarised by Mucha (1994) and Jurek et al. (2013). Regardless of the method applied, they all use the same data source that was obtained during exploration and documentation of the lignite deposits. Moreover, the ash distribution is most often shown in plan view, that is, on maps plotted by the appropriate computer program in recent years (e.g. Naworyta & Mazurek 2010, Jurek et al. 2013, Mastej et al. 2015, Pawelec & Bielowicz 2016). On the contrary, the methodology proposed in this paper additionally allows to present the ash content in the vertical section of the lignite seam to be determined (cf. Figs. 3–8). Therefore, the current research can be considered as complementary to those already mentioned.

Most likely, the increased ash content in some samples is at least partially attributable to the floods that occurred during the accumulation of peat (Middle Miocene), which in turn transformed into the first Mid-Polish lignite seam. This interpretation is supported by the fact that this lignite seam, especially in the Tomisławice and Józwin IIB opencasts, is often split by sandy and clayey partings. These interbeddings are likely connected with flood events during which siliciclastics were supplied to the mire (Widera 2016, Widera et al. 2017, Chomiak et al. 2019a, 2019b, 2020, Chomiak 2020). The effects of floods on mires (backswamps) located in close proximity to river channels are often described in the geological literature (e.g. Gradziński et al. 1976, Horne et al. 1978, Kasiński 1986, Smith et al. 1989, Zieliński 2014, and references therein). It should be noted

that the relatively high content of CaO (~30 wt% on average) in the ashes tested additionally indicates their autogenic origin.

In this paper, a macroscopically visible bed of siliciclastics within the exploited lignite seam was documented in the Tomisławice opencast mine. This 10–30 cm thick layer of clay in the upper part of the seam was found in two samples (Fig. 5B), and in sample 49 at sampling site X (Fig. 6). In fact, this layer comprises a coaly clay containing about 30 wt% organic matter and 70 wt% mineral matter (i.e. ash) (Fig. 5B). Because the siliciclastic partings are not the subject of the present study, their origin is not discussed here. However, the impact of the clayey bed on the ash content of the entire seam may be significant, as was found to be the case for the “Tomisławice” lignite deposit (Chomiak et al. 2020).

The distribution of ash content in the 266 lignite samples analysed from all currently operational opencasts belonging to the Konin Lignite Mine, is clearly visible on the histograms (Fig. 9). The shape of the statistical data is more similar in the case of lignite from the Tomisławice and Józwin IIB opencasts than from the Drzewce opencast. However, all these histograms are skewed right, that is, just like the histogram constructed for all samples (cf. Fig. 9A–D). This means that the largest number of lignite samples (>78.5%) is characterised by ash content in the range of 5–10 and 10–15 wt%, respectively. Consequently, only 8 samples analysed cannot be described as lignite because they contain >40 wt% of ash (Fig. 9D, Rozporządzenie 2001).

On the other hand, the statistically-calculated ash content within the first Mid-Polish lignite seam provides some interesting conclusions (Tabs. 1, 2). The values of the coefficients of variation obtained clearly show the similarity between the lignite seams in the Drzewce and Tomisławice opencasts. According to Mucha's classification (1994), this is expressed as a large variation in ash content (41–100%). In contrast to examples from the Drzewce and Tomisławice opencasts, the lignite seam from the Józwin IIB opencast is characterised by a low (<20%, in the case of section J) to an average (21–40%, in the case of the lignite walls) variation in ash content (Mucha 1994). At least two factors could have affected such significant

differences in ash content and its coefficient of variation. Firstly, the investigated lignite seam from the Józwin IIB opencast has the smallest thickness and is the least internally differentiated (Fig. 7B, C). Secondly, the sampled part of the seam only covers its upper bench, which rests above the sandy partings representing crevasse-splay sediments (Chomiak et al. 2019a, 2019b).

Finally, the ash (mineral matter) has a negative impact on the environment due to the combustion of lignite in power plants, as well as during other methods of its utilization, such as gasification, carbonisation, and liquefaction (e.g. Shirazi et al. 1995, Gülen 2007, Naworyta 2008, Bielowicz 2013,

and references therein). Therefore, the study of ash content in lignite seams is important, with many potential benefits for both industry and the environment. Detailed knowledge of the content and spatial distribution of ash in lignite deposits supplied to power plants can help reduce the amount of inorganic substance, and consequently less ash will be produced during combustion. This knowledge can help improve the quality of lignite used on an industrial scale, for example, by selective exploitation. Nevertheless, due to technological and financial limitations, this is practiced sporadically and only on a local scale by the Konin Lignite Mine (Chomiak et al. 2020).

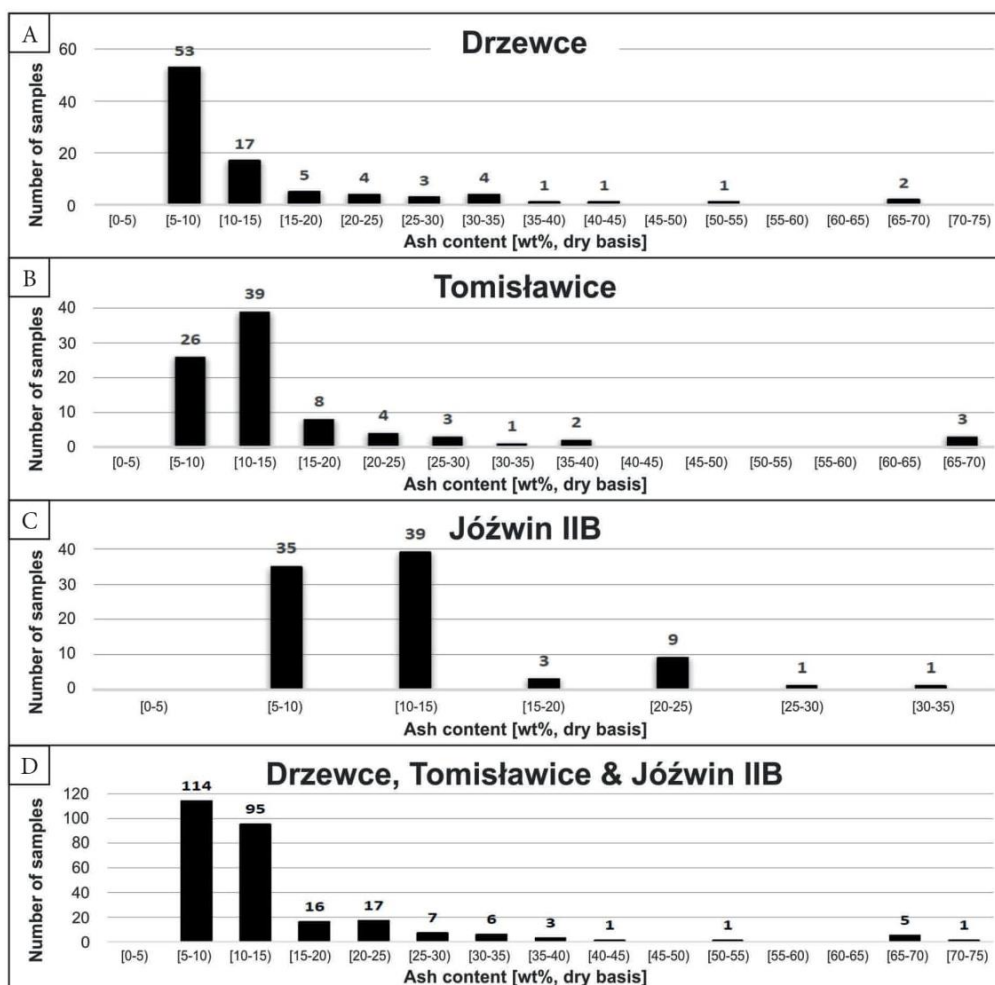


Fig. 9. Distribution of ash content in lignites from opencasts belonging to the Konin Lignite Mine: A) the Drzewce opencast; B) the Tomisławice opencast; C) the Józwin IIB opencast; D) all currently operating lignite opencasts; for detailed data see Figures 3–8

CONCLUSIONS

The results presented in this study summarize almost two years of fieldwork and laboratory analyses, as well as answering the research question posed in the introduction. Thus, the following conclusions can be drawn:

1. The examined first Mid-Polish lignite seam is relatively thin (<10 m on average) and contains a lot of ash (>10 wt% on average). The spatial distribution of the ash is highly diverse and ranges from 6.5 to 69.8 wt% (9.7–17.6 wt% on average). However, over 78.5% of analysed lignite samples contain 5–15 wt% of ash.
2. The coefficients of variation calculated for the results obtained (80.23–96.33%) indicate a large variation in ash content in lignites from the Drzewce and Tomisławice opencasts. The exceptions are lignites from the Józwin IIB opencast, where this coefficient is significantly lower (14.53–37.75%).
3. Such large differences in ash content make some parts of the first Mid-Polish lignite seam unsuitable for the production of electricity. Therefore, better knowledge of this seam, through detailed ash content analysis, could contribute to environmental protection by selected exploitation (avoiding the ash-rich parts) of the lignite seam and related lower ash production. But is it possible in light of the adopted method of mining?

The author wishes to thank two anonymous reviewers and prof. dr. hab. Marian Wagner (AGH UST, Krakow) for their insightful remarks and comments that have improved the final version of this paper. Sławomir Kaczorowski, Krzysztof Komorowski and Ewa Orkowska (all from the Geological Department of the Konin Lignite Mine, Kleczew) are also thanked for their help during the fieldwork and archive studies, respectively. I would like to send additional words of gratitude to Mariusz Działara (the head of the Geological Department of the same mine) for his logistical support and Marek Widera (Institute of Geology, Poznań), supervisor of my PhD theses, for his encouragement and help in preparing the manuscript.

This paper was funded by the National Science Centre of Poland, research project no. 2017/27/B/ST10/00001.

REFERENCES

- Bechtel A., Widera M. & Woszczyk M., 2019. Composition of lipids from the First Lusatian lignite seam of the Konin Basin (Poland): relationships with vegetation, climate and carbon cycling during the mid-Miocene Climatic Optimum. *Organic Geochemistry*, 138, 103908.
- Bielowicz B., 2013. Charakterystyka odmian technologicznych węgla brunatnego do zgazowania naziemnego w reaktorze fluidalnym. *Przegląd Górniczy*, 69, 1–9.
- Chomiak L., 2020. Architecture, sedimentology and depositional model for the formation of crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin in central Poland. *Geologos*, 26, 25–37.
- Chomiak L., Wachocki R., Maciaszek P., Widera M. & Zieliński T., 2019a. Seismically deformed the crevasse-splay microdelta deposits – an example from Mid-Miocene of Poland. *Geological Quarterly*, 63, 162–177.
- Chomiak L., Wachocki R., Maciaszek P., Widera M. & Zieliński T., 2019b. Seismically-induced soft-sediment deformation in crevasse-splay microdelta deposits (Middle Miocene, central Poland) – reply. *Geological Quarterly*, 63, 429–433.
- Chomiak L., Urbański P. & Widera M., 2020. Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice koło Konina w środkowej Polsce. *Przegląd Geologiczny*, 69, accepted.
- Dadlez R., Marek S. & Pokorski J. (red.), 2000. *Mapa Geologiczna Polski bez utworów kenozoiku w skali 1:1 000 000*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Gradziński R., Kostecka A., Radomski A. & Unrug R., 1976. *Sedymentologia*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Gülen J., 2007. Mineral Matter Identification in Nallihan Lignite by Leaching with Mineral Acids. *Energy Sources, Part A*, 29, 231–237.
- Horne J.C., Ferm J.C., Caruccio F.T. & Baganz B.P., 1978. Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian Region. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 62, 2379–2411.
- ISO 1171:2010. *Solid mineral fuels – Determination of ash*.
- Jurek J., Mucha J. & Wasilewska-Błaszczak M., 2013. Przegląd zastosowań geostatystyki do szacowania parametrów polskich złóż węgla brunatnego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energii Polskiej Akademii Nauk*, 85, 143–153.
- Kasiński J.R., 1986. Sedimentary models of small lignite deposits: examples from the Polish Neogene. *Przegląd Geologiczny*, 34, 189–197.
- Kasiński J.R. & Słodkowska B., 2016. Factors controlling Cenozoic anthracogenesis in the Polish Lowlands. *Geological Quarterly*, 60, 959–974.
- Kozula R., 2001. *Dokumentacja geologiczna złoża węgla brunatnego „Tomisławice” w kategorii B i C1 w Tomisławicach, Część I – tekst*. Przedsiębiorstwo Geologiczne PRO-XIMA, Wrocław.

- Kozula R. & Mazurek S., 1996. Wstępna ocena stopnia rozpoznania podstawowych parametrów złożowych konińskich złóż węgla brunatnego w blokach geologicznych metodą krigingu. *Górnictwo Odkrywkowe*, 38, 78–85.
- Kwiecińska B. & Wagner M., 1997. *Typizacja cech jakościowych węgla brunatnego z krajowych złóż według kryteriów petrograficznych i chemiczno-technologicznych dla celów dokumentacji geologicznej złóż oraz obsługi kopalń*. Wydawnictwo Centrum PPGSMiE Polskiej Akademii Nauk, Kraków.
- Maciaszek P., Chomiak L., Wachocki R. & Widera M., 2019. The interpretive significance of ripple-derived sedimentary structures within the late Neogene fluvial succession, central Poland. *Geologos*, 25, 1–13.
- Mastej W., Bartuś T. & Rydlewski., 2015. Analysis of lithofacies cyclicity in the Miocene Coal Complex of the Bełchatów lignite deposit, south-central Poland. *Geologos*, 21, 285–302.
- Mucha J., 1994. *Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Naworyta W., 2008. Analiza zmienności parametrów złożowych węgla brunatnego pod kątem sterowania jakością strumienia urobku. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24, 97–110.
- Naworyta W. & Mazurek S., 2010. Zastosowanie parametru cenowego jako wstęp do projektowania zagospodarowania górniczego złóż węgla brunatnego. *Polityka Energetyczna*, 13, 341–353.
- Naworyta W. & Wasilewska-Błaszczuk M., 2014. Analiza parametrów złoża węgla brunatnego dla potrzeb projektowania elektrowni. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 17, 127–136.
- Pawelec S. & Bielowicz B., 2016. Pozycja węgla brunatnego ze złoża Dęby Szlacheckie w klasyfikacjach międzynarodowych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 466, 233–244.
- Piwocki M., 1992. Zasięg i korelacja głównych grup trzeciorzędowych pokładów węgla brunatnego na platformowym obszarze Polski. *Przegląd Geologiczny*, 40, 281–286.
- Piwocki M. & Ziemińska-Tworzydło M., 1997. Neogene of the Polish Lowlands – lithostratigraphy and pollen-spore zones. *Geological Quarterly*, 41, 21–40.
- Polskie Sieci Elektroenergetyczne, 2019. Produkcja i zużycie energii elektrycznej w elektrowniach krajowych. [in:] *Raport 2018 KSE. Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania KSE w 2018 roku*, PSE, 29–31.
- PN-ISO 1171:2002. *Paliwa stałe. Oznaczanie popiołu*.
- Rozporządzenie, 2001. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 grudnia 2001 r. w sprawie kryteriów bilansowości złóż kopalni*. Dz.U. 2001 nr 153, poz. 1774.
- Shirazi A.R., Börtin O., Eklund L. & Lindquist O., 1995. The impact of mineral matter in coal on its combustion. A new approach to the determination of the calorific value of coal. *Fuel*, 74, 247–251.
- Smith N.D., Cross T.A., Dufficy J.P. & Clough S.R., 1989. Anatomy of an avulsion. *Sedimentology*, 36, 1–23.
- Tajduś A., Kaczorowski J., Kasztelewicz Z., Czaja P., Cała M., Bryja Z. & Żuk S., 2014. *Węgiel brunatny – oferta dla polskiej energetyki. Możliwości rozwoju działalności górnictwa węgla brunatnego w Polsce do 2050 roku*. Komitet Górnictwa Polskiej Akademii Nauk, Kraków.
- Widera M., 2007. *Litostratygrafia i paleotektonika kenozoiku podplejstoceniowego Wielkopolski*. Seria Geologia, 18, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań.
- Widera M., 2014. Lignite cleat studies from the first Middle-Polish (first Lusatian) lignite seam in central Poland. *International Journal of Coal Geology*, 131, 227–238
- Widera M., 2016. Depositional environments of overbank sedimentation in the lignite-bearing Grey Clays Member: New evidence from Middle Miocene deposits of central Poland. *Sedimentary Geology*, 335, 150–165.
- Widera M., Kasztelewicz Z. & Ptak M., 2016. Lignite mining and electricity generation in Poland: The current state and future prospects. *Energy Policy*, 92, 151–157.
- Widera M. & Kita A., 2007. Paleogene marginal marine sedimentation in central-western Poland. *Geological Quarterly*, 51, 79–90.
- Widera M., Chomiak L., Gradecki D. & Wachocki R., 2017. Osady glifu krewasowego z miocenu Polski środkowej w okolicach Konina. *Przegląd Geologiczny*, 65, 251–258.
- Widera M., Chomiak L. & Zieliński T., 2019. Sedimentary facies, processes and paleochannel pattern of an anastomosing river system: an example from the Upper Neogene of Central Poland. *Journal of Sedimentary Research*, 89, 487–507.
- Zieliński T., 2014. *Sedymentologia. Osady rzek i jezior*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Ślęczka A., Żaba J. & Żytko K., 2011. *Regionalizacja tektoniczna Polski*. Komitet Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, Wrocław.

5.4. Czwarta publikacja

Chomiak L., Widera M., 2020. A comparative study of the oxide and elemental composition of ash from lignite burned at various temperatures – Konin Lignite Mine, central Poland. **Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management**, 36, 4, 145–160. (mój szacowany udział: 60%)

LILIANNA CHOMIAK¹, MAREK WIDERA²

A comparative study of the oxide and elemental composition of ash from lignite burned at various temperatures – Konin Lignite Mine, Central Poland

Introduction

In Poland, lignite is mined at four mine-mouth power plants to provide one-third of the total domestic electric energy, approximately 50–55 TWh (Tajduś et al. 2014; Kasztelewicz et al. 2018). Lignite is currently exploited at five mines in eight opencasts, including those belonging to the Konin Lignite Mine (Chomiak 2020a). The total annual production of Polish lignite has decreased slightly in recent years, reaching 52.9 Mt in 2019, of which 5.8 Mt is extracted from the Konin Mine in the Józwin IIB, Drzewce and Tomisławice opencasts (Figure 1, Mazurek and Tymiński 2020).

Burning large amounts of lignite (and similar amounts of hard coal) produces large amounts of both fly ash and bottom ash. In general, ash chemistry is of great importance in many aspects of lignite (and hard coal) exploitation, combustion, and ash utilization, including environmental protection (e.g., Filippidis et al. 1996; Vassilev et al. 1997;

✉ Corresponding Author: Marek Widera; e-mail: widera@amu.edu.pl

¹ Institute of Geology, Adam Mickiewicz University in Poznań, Poland; ORCID iD: 0000-0003-4932-2732; e-mail: lilcho@amu.edu.pl

² Institute of Geology, Adam Mickiewicz University in Poznań, Poland; ORCID iD: 0000-0001-5092-2845; e-mail: widera@amu.edu.pl



© 2020. The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike International License (CC BY-SA 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the Article is properly cited.

Ratajczak et al. 1999; Ward 2002; Galos and Uliasz-Bocheńczyk 2005; Carmona and Ward 2008; Markič and Sachsenhofer 2010; Misiak 2015; Karayiğit et al. 2019; Oskay et al. 2019; Životić et al. 2019; and references therein). In Poland, fly ash is analyzed for critical elements content in lignite intended for the production of ‘clean energy’ (Bielowicz 2016; Wagner et al. 2019) and/or its utilization (Galos and Uliasz-Bocheńczyk 2005; Uliasz-Bocheńczyk 2011), while bottom ash obtained in the laboratory is studied for purposes of environmental protection, including human health (Goldsztein 2007; Bielowicz 2013).

In general, ash is an undesirable by-product of lignite combustion; hence, the major aim of this study was to identify changes in the chemical composition of ashes obtained by burning lignite samples at various temperatures (i.e., 100, 850, 950°C). Secondary goals were threefold:

- ◆ present the oxide and elemental composition of the ashes,
- ◆ determine if any correlations exist between oxides,
- ◆ compare results to their corresponding Clarke values.

1. Geology of the study area

Lignite deposits currently mined in the vicinity of Konin cover fault-bounded and relatively shallow (up to a few tens of meters deep) graben-like structures. These tectonic

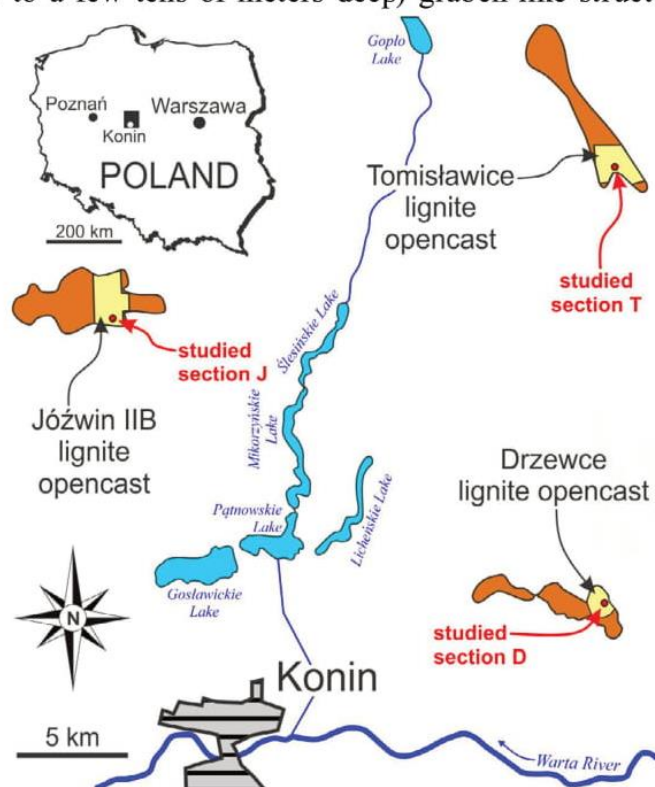


Fig. 1. An approximate location of the sampling sites (sections) in the area of the lignite opencasts belonging to the Konin Lignite Mine

Rys. 1. Przybliżona lokalizacja miejsc (profilu) poboru próbek na obszarze odkrywek węgla brunatnego należących do Kopalni Węgla Brunatnego Konin

depressions are filled with productive lignite deposits of the first Mid-Polish lignite seam (MPLS-1) greater than 3 m thick, while the flanks are covered by lignite beds thinner than 3 m; therefore, these lignite deposits represent both epirogenic and tectonic types of genesis, with a graben subtype (Widera 2016a).

Sedimentary logs modified from Bechtel et al. (Bechtel et al. 2019, 2020); ash yield and its average values taken from Chomiak (Chomiak 2020a); lignite lithotype codification modified from Widera (Widera 2016c); for location of examined sections J, D and T see Figure 1.

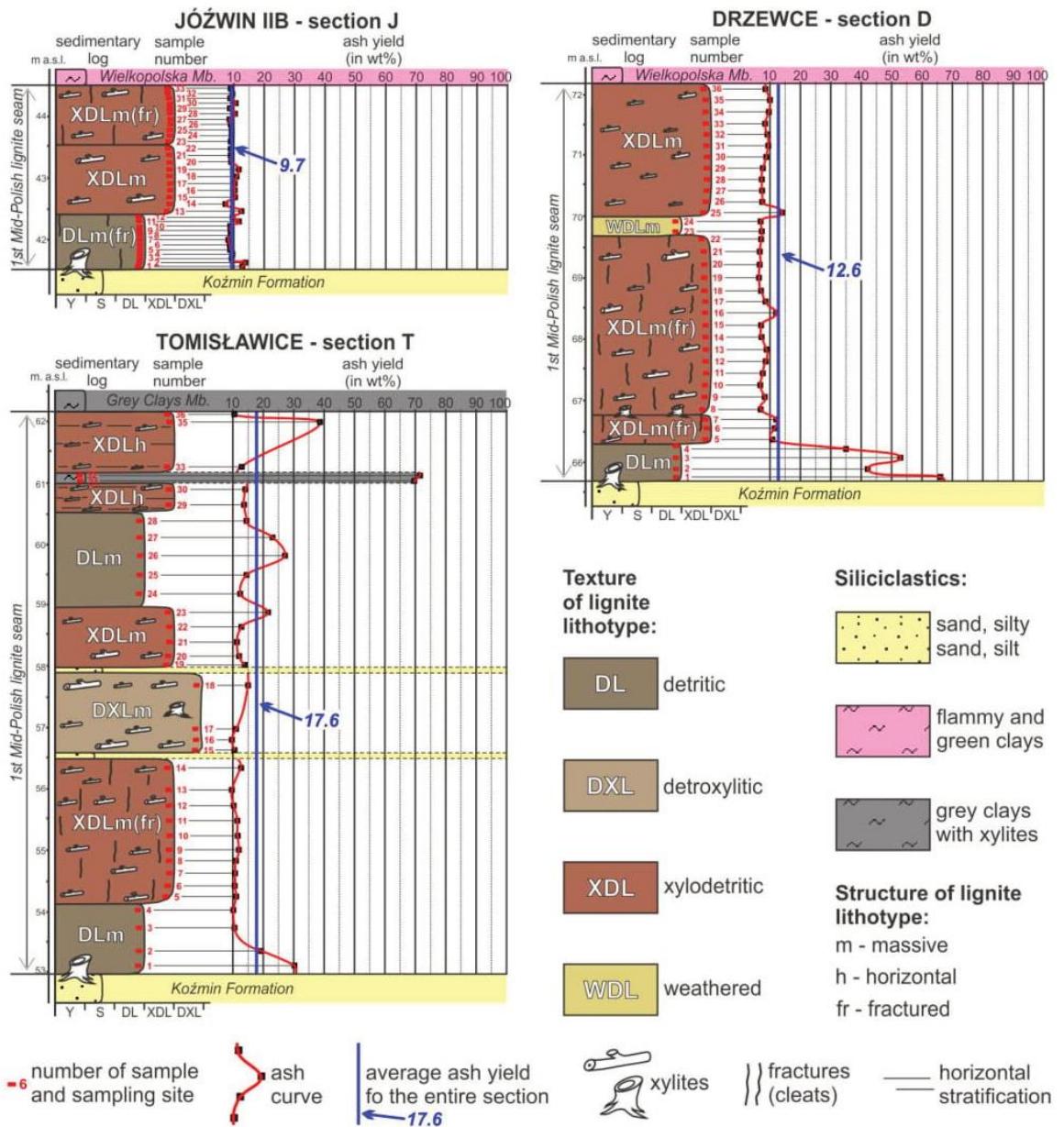


Fig. 2. Distribution of ash yield (obtained at 850°C) along the examined sections of the first Mid-Polish lignite seam (MPLS-1) in the Józwin IIB, Drzewce and Tomisławice opencasts

Rys. 2. Rozkład zawartości popiołu (uzyskanego w temp. 850°C) wzdłuż badanych profili pierwszego środkowopolskiego pokładu węgla brunatnego (MPLS-1) w odkrywkach Józwin IIB, Drzewce i Tomisławice

In general, the Mesozoic top contains marl and limy sandstone of the Late Cretaceous age (Dadlez et al. 2000). Paleogene strata of the Early Oligocene age, mostly glauconitic sand of marine origin, occur only locally, e.g., in Drzewce and Tomisławice lignite deposits (Chomiak et al. 2019, 2020a). The Grey Clays Member of the MPLS-1 is underlain by the sandy-coaly Koźmin Formation of Early to Mid-Miocene age and overlain by the muddy Wielkopolska Member of Late Mid-Miocene to Early Pliocene age (Figure 2). The Grey Clays Member (with MPLS-1) and the Wielkopolska Member together create the Poznań Formation (Piwocki and Ziemińska-Tworzydło 1997; Widera 2007). The Neogene succession is capped by a continuous layer of Quaternary glaciogenic deposits. Due to the destructive processes of the Scandinavian ice sheets and meltwaters during the Pleistocene, the uppermost beds, including the MPLS-1, were strongly deformed and/or zonally removed (Widera 2018; Maciaszek et al. 2020).

2. Materials and methods

2.1. Collection of lignite samples

The samples were collected in 2018–2019 on fresh exposures (exploitation fronts) at three operational opencasts belonging to the Konin Lignite Mine (Figure 1). Three vertical sections (referred to as sections J, D, and T) were sampled from the floor to the roof at an interval of 10–20 cm (Figure 2, Chomiak 2020a). A total of 105 lignite samples were collected from these sections for analysis to include ash content and chemistry.

2.2. Preparation of ash samples

In the laboratory, samples were divided into groups depending on the analysis for which they were intended. Ash yields were determined for all samples, while chemical analyses were performed on three representative groups of samples (assigned on the basis of an average mixture of 33–36 samples taken from each of the three sections J, D, and T, Figure 2). Each of these three groups were further subdivided into three groups for a total of nine lignite samples.

The first three samples (one from each section/opencast) were ashed using 30% hydrogen peroxide (H_2O_2) heated to 100°C. This procedure was time consuming because complete oxidation of the organic matter took several weeks. The second group of samples, analyzed in detail for the purpose of this study, was burnt at 850°C according to the ISO 1171:2010 standard and its Polish equivalent, the PN-ISO 1171:2002 standard. The third group of lignite samples was burnt at 950°C for at least 4 hours.

2.3. Analytical methods applied

Nine ash samples, obtained according to the procedure described in Section 2.2, were analyzed at the Central Measuring and Research Laboratory in Jastrzębie-Zdrój (Poland). The analytical procedure was carried out in accordance with the ASTM D6349-13 standard. The analyses were conducted using inductively-coupled plasma-optical emission spectrometers (ICP-OES), and the composition of the following oxides was determined: Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, TiO₂, Mn₃O₄, Fe₂O₃, P₂O₅, and SO₃ (Table 1). For these oxides, Pearson's correlation coefficient (*r*) was calculated using Microsoft[®] Excel (Table 2). The concentrations of trace elements were measured for Ag, Zn, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, St, Ni, Pb, V, Mo, Sn, Sb, As, Rb, Be, Tl, and Li (Table 3).

The concentrations of the trace elements were compared to the corresponding Clarke value for the world's lignite deposits, sedimentary rocks, and upper continental crust as summarized in Ketris and Yudovich (Ketris and Yudovich 2009), as well as Rudnick and Gao (Rudnick and Gao 2003) (Table 4, Figure 3). In sections 3 and 4, the results are briefly discussed to highlight the pros and cons of MPLS-1 combustion in the context of the chemical composition of its ashes.

3. Results

3.1. General characteristics of MPLS-1

Lignite exploited by the Konin Lignite Mine represents the MPLS-1 (first Lusatian). This is the only seam currently mined in opencasts in the vicinity of Konin. It can be up to several meters thick, 6–8 m on average. The MPLS-1 formed during the middle part of the Mid-Miocene (Piwocki and Ziemińska-Tworzydło 1997; Kasiński and Słodkowska 2016) as peat accumulated in a backswamp (low-lying mire) in the overbank zone of a Mid-Miocene fluvial system (Widera 2016b; Chomiak et al. 2019; Chomiak 2020b).

The MPLS-1 is described as a humic low-rank lignite B (ASTM D 388:2005) or ortho-lignite (ECE-UN 1998) characterized by an average reflectance coefficient (R^0) of eulminite B below 0.3% and a carbon content (C^{daf}) in the range of 60–70 wt% (Kwiecińska and Wagner 2001). The MPLS-1 produces medium ash yield (A^d) according to the classification of Vassilev et al. (Vassilev et al. 1997), with A^d from 10–20 wt% on average (Chomiak 2020a; Chomiak et al. 2020a) and low average sulphur content (≤ 1.2 wt%, Bechtel et al. 2019, 2020). The lignite from the Konin Mine is mainly composed of detritic (42 vol.%) and detroxylitic (35 vol.%) lithotype associations (Widera 2016c). The association of xylodetritic lithotypes occupies ~35 vol.% (section J) to more than 80 vol.% (section D) of the MPLS-1 sections examined in this study (Figure 2).

3.2. Chemical analysis of ashes

3.2.1. Oxide composition

The composition of the oxides varied with temperature at which the lignite samples were ashing, especially if the oxidation/burning occurred at 100, 850, or 950°C. Silicon dioxide (SiO₂) and calcium oxide (CaO) were the most abundant oxides (exceeding 80 wt%) in all samples. Oxides such as aluminum oxide (Al₂O₃), sulphur trioxide (SO₃), iron (III) oxide (Fe₂O₃), and titanium dioxide (TiO₂) were present in much smaller but significant amounts, while other oxides were present in trace amounts (Table 1).

The results from lignite samples burned at 850°C are presented herein as to illustrate the overall results analyzed in accordance with ISO 1171:2010 and PN-ISO 1171:2002 standards. The composition of the oxides (expressed in wt%) were 47.6–54.8 (SiO₂), 30.9–33.5 (CaO), 1.92–2.35 (Al₂O₃), 0.43–2.11 (SO₃), 0.26–0.69 (Fe₂O₃), and 0.25–0.57 (TiO₂). The content of the other oxides (Na₂O, MgO, K₂O, P₂O₅) did not exceed 0.3 wt% (Table 1).

Table 1. Oxide composition of the studied ashes (wt%)

Tabela 1. Skład tlenkowy badanych popiołów (% wag.)

Oxides	100°C			850°C			950°C		
	J1	D1	T1	J2	D2	T2	J3	D3	T3
Na ₂ O	<0.14	<0.14	<0.14	<0.14	0.17	<0.14	<0.14	<0.14	<0.14
MgO	<0.08	<0.08	<0.08	0.17	0.15	0.13	0.19	0.14	0.19
Al ₂ O ₃	0.62	1.03	0.79	2.13	2.35	1.92	2.44	2.55	2.10
SiO ₂	14.6	25.8	23.4	54.8	48.9	47.6	48.3	42.4	48.2
K ₂ O	0.13	0.22	0.08	0.48	0.44	0.19	0.47	0.47	0.18
CaO	8.57	11.5	13.6	30.9	32.9	33.5	34.9	34.0	37.9
TiO ₂	0.17	0.1	0.16	0.57	0.25	0.4	0.63	0.25	0.43
Mn ₃ O ₄	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
Fe ₂ O ₃	0.16	0.25	0.12	0.55	0.69	0.26	0.62	0.69	0.31
P ₂ O ₅	0.05	0.1	0.07	0.17	0.29	0.11	0.2	0.27	0.17
SO ₃	1.29	0.74	0.2	2.11	1.68	0.43	2.48	2.14	0.95
Loss on ignition	>74.18	>60.03	>61.35	>7.96	12.17	>15.3	>9.61	>16.94	>9.61
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

J1–J3 – samples from the studied section J (Józwin IIB opencast); D1–D3 – samples from the studied section D (Drzewce opencast); T1–T3 – samples from the studied section T (Tomisławice opencast); for location of the studied sections see Figure 1.

3.2.2. Interpretation of oxide composition

Large quantitative differences in ash oxide compositions at low (100°C) and high (850 and 950°C) temperatures can be explained by the loss of ignition. Simply put, a temperature of 100°C was too low to initiate mineralogical transformations and the incomplete combustion of organic and mineral-organic particles occurred (e.g., [Filippidis et al. 1996](#); [Markič and Sachsenhofer 2010](#)). Since the CaO content in ashes from lignite burned at different temperatures was relatively high (second only to SiO₂, Table 1), they can be called Ca-rich ashes (>10 wt%) according to the BN-79/6722-09 standard (e.g., [Galos and Uliasz-Bocheńczyk 2005](#); [Wagner et al. 2019](#)).

According to Moore et al. ([Moore et al. 2018](#)), values of $|r|$ larger than 0.7 indicate a strong linear (positive or negative) correlation. In this study, a perfect negative correlation ($r = -1$) between SiO₂ and CaO (Table 2) means that as the SiO₂ content increased, the CaO content decreased, and vice versa. Moreover, such a high negative correlation is indicative of a detrital origin for SiO₂ (quartz grains) and an authigenic origin for CaO in the form of CaCO₃ (calcium carbonate, [Filippidis et al. 1996](#)). A weak correlation ($r = 0.16$) between SiO₂ and Al₂O₃, and an Al₂O₃ content of ~2 wt% indicates a low content of kaolinite ([Carmona and Ward 2008](#)), the main clay mineral in Polish lignite. This observation was corroborated by depletion in Na₂O, MgO, and K₂O (but not kaolinite), which were widely present in minerals such as mica and illite ([Ward 2002](#); [Markič and Sachsenhofer 2010](#)).

Table 2. Pearson's correlation coefficient (r) between oxides content of ashes for lignite samples burned at 850°C

Tabela 2. Współczynnik korelacji Pearsona (r) między zawartością tlenków w popiołach dla próbek węgla brunatnego spalonego w temp. 850°C

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃
Na ₂ O	1.00	0.00	0.87	-0.35	0.39	0.30	-0.85	-1.00	0.75	0.94	0.27
MgO		1.00	0.49	0.94	0.92	-0.95	0.53	0.00	0.66	0.96	0.96
Al ₂ O ₃			1.00	0.16	0.79	-0.21	-0.48	-0.89	0.98	0.98	0.71
SiO ₂				1.00	0.73	-1.00	0.79	0.35	0.36	-0.02	0.81
K ₂ O					1.00	-0.77	0.16	-0.39	0.90	0.67	0.99
CaO						1.00	-0.79	-0.30	-0.41	-0.03	-0.84
TiO ₂							1.00	0.85	-0.28	-0.63	0.28
Mn ₃ O ₄								1.00	-0.75	-0.94	-0.27
Fe ₂ O ₃									1.00	0.93	0.84
P ₂ O ₅										1.00	0.57
SO ₃											1.00

In bold are marked strong and very strong correlations ($|r| \geq 0.7$); for calculation data see Table 1.

The SO₃ content in the ashes showed a strong negative correlation ($r = -0.84$) with a CaO, but strong positive correlation ($r = 0.84$) with a Fe₂O₃ (Table 2). The first case is most likely related to the emission of sulphur (S) in the form of SO₂ in the process of high-temperature combustion because the ash generated was enriched in CaO and depleted in SO₃. In the second case, a small amount of S of inorganic origin (i.e., pyrite) was a typical authigenic mineral (e.g., Ward 2002; Životić et al. 2019) as demonstrated by the Fe₂O₃ content 3–4 times less than SO₃ (cf. Table 1). Obviously, SO₃ was classified as pyrite and gypsum/anhydrite in high-temperature ashes as in this case (cf. Filippidis et al. 1996).

Table 3. Selected trace elements content in the studied ashes (ppm)

Tabela 3. Skład wybranych pierwiastków śladowych w badanych popiołach (ppm)

Trace elements	100°C			850°C			950°C		
	J1	D1	T1	J2	D2	T2	J3	D3	T3
Ag	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Zn	32.1	60.3	40.1	47.9	118.1	63.7	7.45	14.5	60.2
Ba	588.8	337.3	308.0	2046	921.5	798.5	2470	985.0	794.0
Cd	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Co	<4	<4	<4	6.12	<4	4.15	6.81	<4	4.54
Cr	6.96	9.26	10.1	22.0	24.8	15.8	36.8	25.5	20.4
Cu	81.1	99.2	54.8	270.9	248.0	100.5	296.8	221.8	126.7
Sr	108.1	188.8	413.5	361.0	490.4	1102	415.2	512.1	1141
Ni	<4	7.69	7.23	10.6	13.5	10.4	7.57	11.9	7.73
Pb	23.7	32.9	36.7	61.0	67.3	84.6	52.6	45.7	65.9
V	4.19	4.81	5.67	17.8	12.9	14.6	20.8	13.5	15.7
Mo	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Sn	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Sb	5.11	<4	5.77	6.31	6.97	9.88	7.55	8.17	8.62
As	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Rb	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Be	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Tl	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Li	4.33	5.35	4.11	17.9	14.1	10.1	16.8	14.3	12.1

Explanations as in Table 1.

3.2.3. Elemental composition

A total of 19 trace elements were identified and quantified in the ashes of lignite samples burned at 100, 850, and 950°C. The results obtained (and converted to 100%) show similar proportions between individual elements (Table 3). Among the trace elements, the average content of Ba, Sr, and Cu, each exceeded 100 ppm. The content of Zn, Pb, V, Rb, Cr, and Ni each ranged from 10–100 ppm. The remaining trace elements occurred in amounts below 10 ppm or below the detection limit of 4 ppm (cf. Tables 3 and 4). As an example, the elemental composition of ash from samples burned at 850°C (Table 4) is discussed below.

Table 4. Comparison of the study results obtained with various Clarke values (ppm)

Tabela 4. Porównanie uzyskanych wyników badań z różnymi wartościami klarków (ppm)

Trace elements	Average value for J2, D2 and T2 samples ashed at 850°C	Clarke value for world's lignite ashes*	Clarke value for sedimentary rocks*	Clarke value for upper continental crust**
Ag	<4	0.59	0.12	0.05
Zn	76.6	110	43	67
Ba	1255.3	900	410	628
Cd	<4	1.1	0.8	0.09
Co	<4.8	26	14	17.3
Cr	20.9	82	58	92
Cu	206.5	74	31	28
Sr	617.8	740	270	320
Ni	11.5	52	37	47
Pb	71.0	38	12	17
V	51.1	140	91	97
Mo	<4	15	1.5	1.1
Sn	<4	4.7	2.9	2.1
Sb	7.7	5.0	1.2	0.4
As	<4	48	7.6	4.8
Rb	<50	48	94	84
Be	<4	6.7	1.9	2.1
Tl	<4	5.1	0.89	0.9
Li	14.0	49	33	24

* – acc. to [Ketris and Yudovich 2009](#); ** – acc. to [Rudnick and Gao 2003](#).

3.2.4. Interpretation of trace elements

The trace elements listed in Tables 3 and 4 are recommended for further testing to assess the potentially toxic effects on the environment, including human health (e.g., Wagner 2001; Ma et al. 2020). The most harmful elements were Pb, Cd, Be, As, and Hg at any concentration; however, due to the high volatility of Hg, its content in bottom ash was negligible (beyond detection) and was not tested. Other analyzed trace elements (Ag, Zn, Co, Cr, Cu, Mo, Sn, Sb, Tl) are harmful only at elevated concentrations (Bielowicz 2013; Hycnar et al. 2015); therefore, the absolute content of these trace elements in relation to the corresponding Clarke values is important (Table 4, Figure 3).

Only four of the trace elements (Ba, Cu, Pb, Sb) were characterized by higher values as compared to Clarke values (Figure 3). In the case of Cu and Pb, the concentration was 3 and 2 times higher, respectively. On the other hand, the average results obtained for Co, Cr, Ni, As, and Rb were lower than the corresponding Clarkes. The content of Co, Cr, and Ni found in our samples were 3–5 times higher than the Clarke values but the curves are similar. The values of other trace elements fall between these curves and the curve of the Clarke values for the world's lignite ashes (Figure 3).

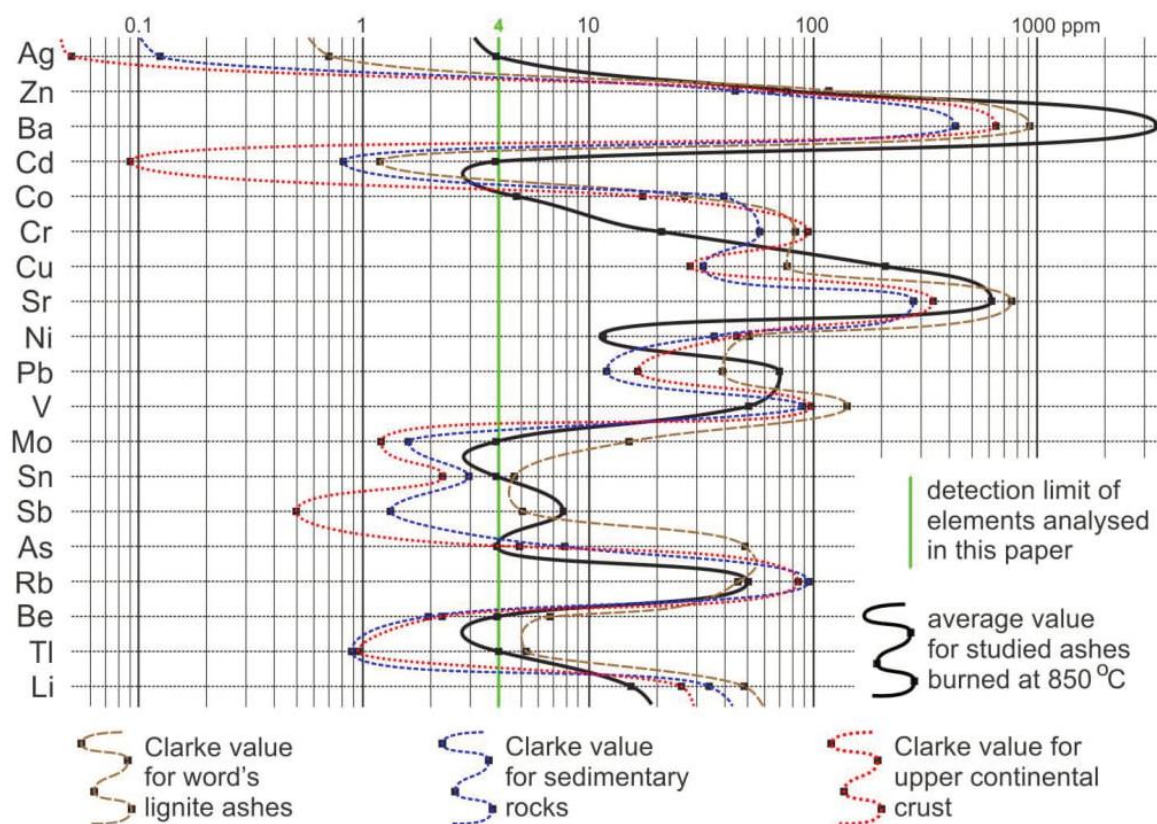


Fig. 3. Graphical presentation of the data contained in Table 4 on a logarithmic scale
For other explanations see captions to Table 4 and the text

Rys. 3. Graficzna prezentacja danych zawartych w tabeli 4 w skali logarytmicznej

4. Discussion

The oxide composition of ashes from MPLS-1 clearly indicates the dominance of SiO_2 and CaO with an average of 47.6–54.8 and 30.9–33.5 wt%, respectively (Table 1). Most of the SiO_2 occurs in the form of quartz grains in ashes and lignite seams. In the case of lignite seams, sandy, silty, and clayey interbeds (several dm to >1 m thick) are well documented in some parts of the lignite deposits exploited by the Konin Mine in central Poland (Figure 2; Widera 2016b; Chomiak 2020a, b; Chomiak et al. 2019; 2020a, b).

The situation with CaO is completely different from the one for SiO_2 . No CaCO_3 -rich layers (lacustrine chalk and/or gytja) have been found macroscopically (in the field and borehole profiles) in any of the lignite deposits in the vicinity of Konin. Nevertheless, such carbonate interbeds (up to several dozen meters thick) are quite common in other Polish lignite deposits, such as Bełchatów, Szczerców, and Złoczew (Wagner and Matl 2007; Urbański and Widera 2020). Similar partings (referred to as chalk, marl, marly limestone, limestone, clayey limestone, etc.) also occur in some European lignite seams (e.g., Kolovos et al. 2002; Thomas and Frankland 2004; Akkiraz et al. 2012; Villalba-Breva et al. 2012; Oskay et al. 2019). Thus, the majority of CaO is dispersed within organic matter in the form of CaCO_3 , while the remainder enters into other mineral phases.

Siliciclastics (sands and clays) and carbonates (predominantly calcite) increase the total ash content and decrease the calorific value of lignite. However, free CaO produced during combustion (mainly from decomposition of CaCO_3) has a positive impact on the environment because it holds SO_2 in the form of anhydrite (CaSO_4) and consequently limits SO_2 emissions (Filippidis et al. 1996; Galos et al. 2016). Simply put, the elevated CaCO_3 content in lignite (and free CaO in ash) promotes so-called natural desulphurization (Kolovos et al. 2002).

In general, bottom ashes, left as residue after the combustion process (e.g., Goldsztejn 2007; Chomiak 2020a), are less frequently investigated than fly ash which is relatively more harmful to the environment (e.g., Galos and Uliasz-Bocheńczyk 2005; Misiak 2015; Wagner et al. 2019). The rule is that as the temperature rises, the ash loses organic matter and gains mineral matter (e.g., Kolovos et al. 2002; Filippidis et al. 1996). In other words, low-temperature ash contains more unburned organic and mineral-organic particles than high-temperature ash as demonstrated herein (cf. Table 1). On the other hand, ashes obtained from lignite burned at different temperatures clearly show that the proportions between the oxides and the elements (after conversion to 100%) are similar (Table 1), hence, ash analysis for lignite samples burned at 850°C (i.e., acc. to the ISO 1171:2010 and PN-ISO 1171:2010 standards) appear to be sufficient in most (geo)chemical studies.

Conclusions

Based on the chemical analyses of ashes from the first Mid-Polish lignite seam (MPLS-1) the most important conclusions are:

- ◆ The ashes were enriched in silicon dioxide (SiO_2 , ~50 wt% on average) and calcium oxide (CaO, exceeded 30 wt% on average); hence, these ashes have a calcium character.
- ◆ A perfect negative correlation ($|r| = -1$) between SiO_2 and CaO content indicates an exogenous origin for detrital quartz grains (SiO_2) and an authigenic origin for CaO in the form of calcium carbonate (CaCO_3).
- ◆ Among the trace elements identified, the greatest content belonged to Ba, Sr, Cu, and Pb characterized by values higher than their corresponding Clarke values.
- ◆ Based on the results obtained from this work, we conclude that combustion of lignite from MPLS-1 is no more harmful to the environment than coal from other countries burned in large amounts to generate electricity. In addition, a higher concentration of CaCO_3 facilitates flue gas desulphurization, which reduces SO_2 emission.

The authors are indebted to the anonymous reviewers for their careful reading and constructive comments that helped improve the typescript. This paper is funded by the National Science Centre, Poland, through research project no. 2017/27/B/ST10/00001.

REFERENCES

- Akkiraz et al. 2012 – Akkiraz, M.S., Akgün, F., Utescher, T., Wilde, V., Bruch, A.A., Mosbrugger, V. and Üçbaş, S.D. 2012. Palaeoflora and Climate of Lignite-bearing Lower–Middle Miocene Sediments in the Seyitömer and Tunçbilek Sub-basins, Kütahya Province, Northwest Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 21, pp. 213–235.
- ASTM D 388:2005 – Standard Classification of Coals by Rank. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6349-13 – Standard Test Method for Determination of Major and Minor Elements in Coal, Coke, and Solid Residues from Combustion of Coal and Coke by Inductively Coupled Plasma & mdash; Atomic Emission Spectrometry. American Society for Testing and Materials.
- Bechtel et al. 2019 – Bechtel, A., Widera, M. and Woszczyk, M. 2019. Composition of lipids from the First Lusatian lignite seam of the Konin Basin (Poland): relationships with vegetation, climate and carbon cycling during the mid-Miocene Climatic Optimum. *Organic Geochemistry* 138, DOI: 10.1016/j.orggeochem.2019.103908.
- Bechtel et al. 2020 – Bechtel, A., Widera, M., Lücke, A., Groß, D. and Woszczyk, M. 2020. Petrological and geochemical characteristics of xylites and associated lipids from the First Lusatian lignite seam (Konin Basin, Poland): implications for floral sources, decomposition and environmental conditions. *Organic Geochemistry* 146, DOI: 10.1016/j.orggeochem.2020.104052.
- Bielowicz, B. 2013. Selected harmful elements in Polish lignite (*Występowanie wybranych pierwiastków szkodliwych w polskim węglu brunatnym*). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 29(3), pp. 47–59 (in Polish with English abstract).
- Bielowicz, B. 2016. Qualitative and chemical characteristics of mineral matter in the selected lignite deposits in light of their suitability for clean coal technologies. *E3S Web of Conferences* 10, 00002, DOI: 10.1051/e3sconf/20161000002.

- BN-79/6722-09 – Fly ash and slag from coal and brown coal fired boilers.
- Carmona, I. and Ward, C.R. 2008. Composition and mode of occurrence of mineral matter in some Colombian coals. *International Journal of Coal Geology* 73, pp. 3–8.
- Chomiak, L. 2020a. Variation of lignite ash in vertical and horizontal sections of mining walls in the Konin Lignite Mine, central Poland. *Geology, Geophysics and Environment* 46(1), pp. 17–28.
- Chomiak, L. 2020b. Crevasse splays within a lignite seam at the Tomisławice opencast mine near Konin, central Poland: architecture, sedimentology and depositional model. *Geologos* 26(1), pp. 25–37.
- Chomiak et al. 2019 – Chomiak, L., Maciaszek, P., Wachocki, R., Widera, M. and Zieliński, T. 2019. Seismically-induced soft-sediment deformation in crevasse-splay microdelta deposits (Middle Miocene, central Poland). *Geological Quarterly* 63(1), pp. 162–177.
- Chomiak et al. 2020a – Chomiak, L., Urbański, P. and Widera, M. 2020. Architecture and origin of clays within the upper part of lignites of the Poznań Formation (Middle Miocene) – the Tomisławice lignite opencast near Konin in central Poland (*Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice k. Konina w środkowej Polsce*). *Przegląd Geologiczny* 68(6), pp. 526–534 (in Polish with English abstract).
- Chomiak et al. 2020b – Chomiak, L., Kaczmarek, P., Kubiak, M. and Widera, M. 2020. Chemical composition of ashes from selected sections of the lignite seam mined in the Konin Basin, Central Poland. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium – WMESS 2020*, 7–11 September, 2020 – Prague (Czech Republic).
- Dadlez et al. 2000 – Dadlez, R., Marek, S. and Pokorski, J. eds. 2000. Geological map of Poland without Cenozoic deposits, scale 1:1000000 (*Mapa geologiczna Polski bez osadów kenozoicznych w skali 1: 1 000 000*). Warszawa: Polish Geological Institute (in Polish).
- ECE-UN 1998 – International classification of in-seam coals. ECE-UN Geneva, UN New York.
- Filippidis et al. 1996 – Filippidis, A., Georgakopoulos, A. and Kassoli-Fournaraki, A. 1996. Mineralogical components of some thermally decomposed lignite and lignite ash from the Ptolemais basin, Greece. *International Journal of Coal Geology* 30, pp. 303–314.
- Galos, K. and Uliasz-Bocheńczyk, A. 2005. Sources and utilization of fly ashes from coal combustion in Poland (*Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 21(1), pp. 23–42 (in Polish with English abstract).
- Galos et al. 2016 – Galos, K., Szlugaj, J., Burkowicz, A. 2016. Sources of limestone sorbents for flue gas desulphurization in Poland in the context of the needs of domestic power industry (*Źródła sorbentów wapiennych do odsiarczania spalin w Polsce w kontekście potrzeb krajowej energetyki*). *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 19(2), pp. 149–170 (in Polish).
- Goldsztein, P. 2007. Abundances of selected elements in brown coal from Ościsłowo deposit in Konin area (Koncentracje wybranych pierwiastków w węglu brunatnym ze złoża Ościsłowo w rejonie Konina). *Prace Naukowe Instytutu Górniczo-Politechniki Wrocławskiej* 118(33), pp. 17–24 (in Polish with English abstract).
- Hycnar et al. 2015 – Hycnar, E., Ratajczak, T., Jończyk, W. and Wagner, M. 2015. The ecological criteria for evaluation the quality lignite on the example of the Bełchatów deposit (*Ekologiczne kryteria oceny jakości węgla brunatnego na przykładzie złoża Bełchatów*). *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk* 91, pp. 81–89 (in Polish with English abstract).
- ISO 1171:2010 – Solid mineral fuels – Determination of ash.
- Karayigit et al. 2019 – Karayigit, A.İ., Yigitler, Ö., İserli, S., Querol, X., Mastalerz, M., Oskay, R.G. and Hower, J.C. 2019. Mineralogy and Geochemistry of Feed Coals and Combustion Residues from Tunçbilek and Seyitömer Coal-Fired Power Plants in Western Turkey. *Coal Combustion and Gasification Products* 11, pp. 18–31.
- Kasiński, J.R. and Słodkowska, B. 2016. Factors controlling Cenozoic anthracogenesis in the Polish Lowlands. *Geological Quarterly* 60, pp. 959–974.
- Kasztelewicz et al. 2018 – Kasztelewicz, Z., Ptak, M. and Sikora, M. 2018. Brown coal as an optimal energy raw material for Poland (*Węgiel brunatny optymalnym surowcem energetycznym dla Polski*). *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk* 106, pp. 61–84 (in Polish with English abstract).
- Ketris, M.P. and Yudovich, Y.E. 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology* 78, pp. 135–148.

- Kolovos et al. 2002 – Kolovos, N., Georgakopoulos, A., Filippidis, A. and Kavouridis, C. 2002. Environmental Effects of Lignite and Intermediate Steriles Coexcavation in the Southern Lignite Field Mine of Ptolemais, Northern Greece. *Energy Sources* 24, pp. 561–573.
- Kwiecińska, B. and Wagner, M. 2001. Application of reflectance in natural and technological classification of brown coal (lignite) (*Zastosowanie współczynnika odbicia w naturalnej i technologicznej klasyfikacji węgla brunatnego (lignitu)*). Kraków: AGH, 35 pp. (in Polish).
- Ma et al. 2020 – Ma, J., Liu, B., Zhang, K., Wang, Z., Li, J., Blokhin, M.G. and Zhao, C. 2020. Geochemical characteristics of No. 6 coal from Nanyangpo Mine, Datong coalfield, north China: Emphasis on the influence of hydrothermal solutions. *Energy Exploration & Exploitation*, pp. 1–20. DOI: 10.1177/0144598720922309.
- Maciaszek et al. 2020 – Maciaszek, P., Chomiak, L., Urbański, P. and Widera, M. 2020. New insights into the genesis of the “Poznań Clays” – upper Neogene of Poland. *Civil and Environmental Engineering Reports* 30, pp. 18–32.
- Markič, M. and Sachsenhofer, R.F. 2010. *The Velenje Lignite: Its Petrology and Genesis*. Ljubljana: Geološki Zavod Slovenije, 218 pp.
- Mazurek, S. and Tymiński, M. 2020. *Lignites (Węgle brunatne)*. [In:] Szufficki, M., Malon, A. and Tymiński, M. (eds.) 2020. *The Balance of Mineral Resources Deposits in Poland as of 31.12.2018*. Warszawa: Polish Geological Institute, pp. 35–40 (in Polish).
- Misiak, J. 2015. Coal particles in the fly ashes from Polish coal combustion (*Cząstki węglowe w popiołach lotnych ze spalania węgla z polskich złóż*). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 31(3), pp. 111–120 (in Polish with English abstract).
- Moore et al. 2018 – Moore, D.S., Notz, W.I. and Flinger, M.A. 2018. *The basic practice of statistics* (8th ed.). New York: Freeman and Company, 654 pp.
- Oskay et al. 2019 – Oskay, R.G., Christanis, K. and Salman, M. 2019. Coal features and depositional environment of the Northern Karapınar–Ayrancı coal deposit (Konya, Central Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences* 28, pp. 260–274.
- Piwocki, M. and Ziemińska-Tworzydło, M. 1997. Neogene of the Polish Lowlands – lithostratigraphy and pollen-spore zones. *Geological Quarterly* 41(1), pp. 21–40.
- PN-ISO 1171:2002. Solid fuels. Ash determination (in Polish).
- Ratajczak et al. 1999 – Ratajczak, T., Gawel, A., Górnjak, K., Muszyński, M., Szydłak, T. and Wyszomirski, P. 1999. Characteristics of fly ash from combustion of some hard and brown coals (*Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgla kamiennych i brunatnych*). *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne – Prace specjalne* 13, pp. 9–34 (in Polish).
- Rudnick, R.L. and Gao, S. 2003. *The composition of the continental crust*. [In:] Rudnick, R.L. ed., *The Crust*. Elsevier-Pergamon, Oxford, 64 pp.
- Tajduś et al. 2014 – Tajduś, A., Kaczorowski, J., Kasztelewicz, Z., Czaja, P., Cała, M., Bryja, Z. and Żuk, S. 2014. Brown coal – an offer for Polish power industry – development possibilities for brown coal mining functioning in Poland by the year 2050 (*Węgiel brunatny – oferta dla polskiej energetyki - możliwości rozwoju wydobycia węgla brunatnego funkcjonującego w Polsce do 2050 roku*). Kraków: Komitet Górnictwa PAN, 85 pp. (in Polish).
- Thomas, L. and Frankland, S. 2004. Mining at Gacko opencast mine, Bosnia-Herzegovina a question of economics. *Geologica Belgica* 7(3–4), pp. 267–271.
- Uliasz-Bocheńczyk, A. 2011. Mineral sequestration of CO₂ using water suspensions of selected fly ashes from the combustion of lignite coal (*Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu zawiesin wodnych wybranych popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego*). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 27(1), pp. 145–153 (in Polish with English abstract).
- Urbański, P. and Widera, M. 2020. Is the Złoczew lignite deposit geologically suitable for the first underground gasification installation in Poland? *Geologos* 26(2), pp. 113–125.
- Vassilev et al. 1997 – Vassilev, S.V., Kitano, K. and Vassileva, C.G. 1997. Relations between ash yield and chemical and mineral composition of coals. *Fuel* 76, pp. 3–8.
- Villalba-Breva et al. 2012 – Villalba-Breva, S., Martín-Closas, C., Marmi, J., Gomez, B. and Fernández-Marrón, M.T. 2012. Peat-forming plants in the Maastrichtian coals of the Eastern Pyrenees. *Geologica Acta* 10(2), pp. 189–207.

- Wagner, M. 2001. Determination of toxic and harmful elements in coal and its ashes (*Oznaczenie pierwiastków toksycznych i szkodliwych w węglu i jego popiołach*). [In:] Stryszewski, M. Selective exploitation of lignite as a method of limiting the harmful environmental impact of elements present in coal and its combustion products (*Eksploatacja selektywna węgla brunatnego jako metoda ograniczenia szkodliwego oddziaływania na środowisko pierwiastków obecnych w węglu i produktach jego spalania*). Kraków: AGH (in Polish).
- Wagner, M. and Matl, K. 2007. Stratigraphy of lacustrine chalk from the “Szczerców” lignite deposit (*Stratygrafia kredy jeziornej ze złoża węgla brunatnego „Szczerców”*). *Geologia* 33(3), pp. 289–315 (in Polish with English abstract).
- Wagner et al. 2019 – Wagner, M., Bielowicz, B. and Misiak, J. 2019. Analysis of the occurrence of critical elements and raw materials in Polish lignite deposits with particular emphasis on coal ashes. [In:] *2nd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development*. 14–17 November 2017, Kraków, Poland. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 214 (2019) 012026, DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012026.
- Ward, C.R. 2002. Analysis and significance of mineral matter in coal seams. *International Journal of Coal Geology* 50, pp. 135–168.
- Widera, M. 2007. Lithostratigraphy and palaeotectonics of the sub-Pleistocene Cenozoic of Wielkopolska (*Litostratygrafia i paleotektonika kenozoiku podplejstoczeńskiego Wielkopolski*). Poznań: Adam Mickiewicz University Press, 224 pp. (in Polish with English abstract).
- Widera, M. 2016a. Genetic classification of Polish lignite deposits: A review. *International Journal of Coal Geology* 158, pp. 107–118.
- Widera, M. 2016b. Depositional environments of overbank sedimentation in the lignite-bearing Grey Clays Member: new evidence from Middle Miocene deposits of central Poland. *Sedimentary Geology* 335, pp. 150–165.
- Widera, M. 2016c. An overview of lithotype associations forming the exploited lignite seams in Poland. *Geologos* 22(3), pp. 213–225.
- Widera, M. 2018. Tectonic and glaciotectionic deformations in the areas of Polish lignite deposits. *Civil and Environmental Engineering Reports* 28, pp. 182–193.
- Životić et al. 2019 – Životić, D., Cvetković, O., Vulić, P., Gržetić, I., Simić, V., Ilijević, K., Dojčinović, B., Erić, S., Radić, B., Stojadinović, S. and Trifunović, S. 2019. Distribution of major and trace elements in the Kovin lignite (Serbia). *Geologia Croatica* 72(1), pp. 51–79.

**A COMPARATIVE STUDY OF THE OXIDE AND ELEMENTAL COMPOSITION
OF ASH FROM LIGNITE BURNED AT VARIOUS TEMPERATURES –
KONIN LIGNITE MINE, CENTRAL POLAND**

Keywords

Ash yield, oxide composition, elemental composition, Pearson correlation, Clarke value

Abstract

Lignite still plays a key role in the production of electricity in Poland. About one-third of domestic electric energy comes from lignite burned in large power plants that produce megatons (Mt) of bottom ash and fly ash annually. Nearly 11 wt% of the total ash generated by the lignite-fired power industry in Poland comes from lignite extracted from the Konin Lignite Mine. Part of the ash escapes into the atmosphere, and the rest is utilized, which is expensive and often harmful to the environment; hence, geochemical studies of these ashes are fully justified and increasingly carried out. The lignite samples examined in this paper represent the entire vertical section of the first Mid-Polish

lignite seam (MPLS-1) mined in opencasts at Józwin IIB, Drzewce, and Tomisławice. First, the samples were oxidized (burnt) at one of three temperatures: 100, 850, and 950°C; then the chemical composition of oxides and trace elements was determined according to the ASTM D6349-13 standard. The ashes were rich in SiO₂ and CaO; Ba, Sr, and Cu dominated the trace element content. Among the harmful elements found, Pb is of most concern. Only a few elements (Ba, Cu, Pb, Sb) reached values higher than their corresponding Clarke values. Based on the results obtained, it can be concluded that the examined ashes are approximately as harmful to the environment as ashes from other lignite used to generate electricity. Moreover, the increased amount of CaCO₃ in the MPLS-1 is beneficial in the process of natural desulphurization.

**BADANIA PORÓWNAWCZE SKŁADU TLENKOWEGO I PIERWIĄSTKOWEGO
POPIOŁÓW ZE SPALANIA WĘGLA BRUNATNEGO W RÓŻNYCH TEMPERATURACH –
KOPALNIA WĘGLA BRUNATNEGO KONIN W CENTRALNEJ POLSCE**

Słowa kluczowe

zawartość popiołu, skład tlenkowy, skład pierwiastkowy, korelacja Pearsona, wartość klarkowa

Streszczenie

W ostatnich latach około jednej trzeciej polskiej energii elektrycznej pochodzi z węgla brunatnego, który jest spalany w wielkich elektrowniach. Powoduje to produkcję popiołów (żużla paleniskowego i popiołu lotnego) w łącznej ilości wyrażonej w milionach ton (Mt). Blisko 11% wag. popiołu produkowanego przez polską energetykę opartą na węglu brunatnym pochodzi z węgla wydobywanego przez Kopalnię Węgla Brunatnego Konin. Oczywiście, popiół jest składnikiem niepożądanym w węglu z wielu względów. Część popiołu może przedostać się do atmosfery, a pozostałą część należy poddać utylizacji, co jest kosztowne i często szkodliwe dla środowiska naturalnego. Stąd badania geochemiczne tych popiołów wydają się celowe i dlatego są coraz częściej przeprowadzane. Badane w tej pracy uśrednione próbki węgla reprezentują cały profil pierwszego środkowopolskiego pokładu węglowego (MPLS-1) eksploatowanego w odkrywkach: Józwin IIB, Drzewce i Tomisławice. Te próbki zostały najpierw utlenione/spalone w temperaturze: 100, 850 i 950°C. Następnie został określony ich skład chemiczny (tlenki i pierwiastki śladowe) według normy ASTM D6349-13. Badane popioły cechują się dominacją SiO₂ i CaO, zaś w składzie pierwiastków śladowych przeważają: Ba, Sr i Cu. Natomiast wśród pierwiastków szkodliwych najważniejszy jest Pb. Wreszcie, tylko kilka z analizowanych pierwiastków (Ba, Cu, Pb, Sb) osiąga wartości wyższe niż wartości odpowiednich klarków. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że badane popioły są w przybliżeniu tak samo szkodliwe dla środowiska jak popioły z innych węgla brunatnych używanych do wytwarzania energii elektrycznej, a zwiększona ilość CaCO₃ jest też korzystna w procesie naturalnego odsiarczania.

6. Wnioski

Przedstawione do oceny na stopień doktorski cztery publikacje (3 z listy ministerialnej, 1 z listy filadelfijskiej) pozwoliły lepiej zrozumieć warunki środowiskowe powstania węgla, który jest wydobywany przez Kopalnię Węgla Brunatnego Konin (KWB Konin) dla celów energetycznych. Wyniki badań, uzyskane w czasie przygotowywania ww. artykułów, prowadzą do kilku głównych wniosków:

- 1) środkowomiocenne torfowisko, z którego powstał badany pokład węgla (1. środkowopolski), istniało w pobliżu aktywnych koryt rzecznych; co najmniej kilka razy dochodziło do powodzi, tzn. wody rzeczne wylewały się na obszar torfowiska, czego bezpośrednim dowodem są osady stożka krewasowego (pierwsza publikacja);
- 2) zdarzało się też, że wody powodziowe względnie długo obejmowały znaczny obszar torfowiska w postaci jeziora; skutkowało to przerwą w sedymentacji torfowej (fitogenicznej) i zastąpieniu jej sedymentacją klastyczną, tj. ilów jeziornych; ich miąższość (do 0,8 m) w pokładzie węglowym nawet dwukrotnie podwyższa średnią popielność węgla (druga publikacja);
- 3) przestrzenny rozkład popiołu w węglu różni się zarówno między odkrywkami (od 9,7 do 17,6% wag.), jak i w obrębie tej samej odkrywki; w przebadanych >260 próbkach zawartość popiołu waha się w przedziale 6,5–69,8% wag., dlatego zasugerowano, by pewne partie złoża (bez warstw o wysokiej popielności) były eksploatowane selektywnie (trzecia publikacja);
- 4) przebadane geochemicznie popioły zawierają kilka pierwiastków (Ba, Cu, Pb, Sb) w ilości przewyższającej wartości klarkowe; z drugiej jednak strony, popioły te są silnie wzbogacone w kalcyt (średnio >30% wag. CaO), co jest bardzo korzystne w tzw. procesie naturalnego odsiarczania;
- 5) przewarstwienia klastyczne oraz popiół są składnikami niepożądanymi w węglu przeznaczonym do spalania w elektrowniach; część z nich (popiół z klastyków i popiół z węgla) należy zutylizować, a część może dostać się do atmosfery, co jest szkodliwe dla środowiska naturalnego; dlatego przeprowadzone badania wydają się uzasadnione, gdyż wskazują na potrzebę ograniczenia spalania węgla (częściowo także przerostów klastycznych) o podwyższonej zawartości popiołu.

7. Conclusions

Four publications (3 from the ministerial list, 1 from the Philadelphia list) submitted to fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy allowed for a better understanding of the environmental conditions of the formation of lignite, which is mined by the Konin Lignite Mine (KWB Konin) for electricity production. The research results obtained during the preparation of the above-mentioned articles lead to several main conclusions:

- 1) the mid-Miocene mire from which the investigated lignite seam was formed (first Mid-Polish), existed in the vicinity of active river channels; floods occurred at least several times, that is, river waters flooded the mire, which is directly evidenced by the crevasse-splay deposits (first publication);
- 2) it also happened that the flood waters covered a considerable area of the mire in the form of a lake for a relatively long time; this resulted in a break in peat (phytogenic) sedimentation and its replacement with clastic deposition, i.e. lacustrine clays; their thickness (up to 0.8 m) in the lignite seam even doubles the average ash content of lignite (second publication);
- 3) the spatial distribution of ash in lignite differs both between the opencasts (from 9.7 to 17.6 wt.%) and within the same opencast; in more than 260 analysed samples, ash content ranges from 6.5–69.8 wt.%; hence, it was suggested that some parts of the lignite seam (without layers with high ash content) should be mined selectively (third publication);
- 4) the geochemically tested ashes contain several elements (Ba, Cu, Pb, Sb) in an amount exceeding the corresponding Clarke values; on the other hand, these ashes are highly enriched in calcite (on average >30 wt.% of CaO), which is very advantageous in the so-called natural desulphurization process;
- 5) clastic layers and ash are undesirable components in lignite intended for combustion in power plants; some of them (ash from clastics and lignite ash) must be utilized, and some may get into the atmosphere, which is harmful to the environment; therefore, the conducted studies seem justified, as they indicate the need to reduce the combustion of lignite (partly also clastic interbeds) with an increased ash content.

8. Oświadczenia współautorów

Poniżej zamieszczone zostały podpisane i zeskanowane oświadczenia współautorów o procentowym ich udziale w publikacjach, które przedstawiłam w zestawie na stopień doktorski. W jednej z tych prac współautorem był mgr Paweł Urbański (Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa), w dwóch z nich prof. UAM dr hab. Marek Widera – promotor mojego doktoratu (UAM, Poznań).

Mgr Paweł Urbański
Państwowy Instytut Geologiczny

Warszawa, dnia 20.04.2021

Oświadczenie o współautorstwie

Oświadczam, że mój udział w przygotowaniu niżej wymienionego artykułu oceniam na 35%.



Chomiak L., Urbański P., Widera M., 2020. Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice k. Konina w środkowej Polsce. Przegląd Geologiczny, 68, 6, 526–534.

Prof. UAM dr hab. Marek Widera
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w miejscu

Poznań, 10-05-2021

Oświadczenie o współautorstwie

Mój udział w przygotowaniu niżej wymienionego artykułu szacuję na 30%.



Chomiak L., Urbański P., Widera M., 2020. Architektura i geneza ilów w górnym poziomie węgla brunatnych formacji poznańskiej (środkowy miocen) – odkrywka Tomisławice k. Konina w środkowej Polsce. Przegląd Geologiczny, 68, 6, 526–534.

Prof. UAM dr hab. Marek Widera
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w miejscu

Poznań, 10-05-2021

Oświadczenie o współautorstwie

Mój udział w przygotowaniu niżej wymienionego artykułu szacuję na 40%.



Chomiak L., Widera M., 2020. A comparative study of the oxide and elemental composition of ash from lignite burned at various temperatures – Konin Lignite Mine, central Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 36, 4, 145–160.