ROZDZIAŁ 2

Struktury solne

Struktury solne występują powszechnie w basenach sedymentacyjnych, w których doszło do osadzenia się dużych kompleksów solnych. Są znane w wielu miejscach na świecie, np. na obszarze północnych Niemiec i Morza Północnego, w rejonie Zatoki Meksykańskiej, Niziny Nadkaspijskiej, Zatoki Perskiej, w Maroku, w basenach solnych południowego Atlantyku. Wielki postęp w ich rozpoznaniu i w zrozumieniu mechanizmów ich powstawania rozpoczął się od lat 70. XX wieku, w wyniku prowadzonych na szeroką skalę badań sejsmicznych w zagłębiach naftowych, którym zazwyczaj towarzyszą zalegające w nadkładzie rozległe formacje ewaporatowe.

2.1. Wybrane zagadnienia tektoniki solnej

Tektonika solna jest ogólnym terminem obejmującym deformacje tektoniczne, w których tworzeniu się zasadniczą rolę odgrywają skały solne. Współczesna wiedza o tektonice soli jest bardzo obszerna. W rozdziale przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z mobilnością soli, rodzajami struktur solnych, ich powstawaniem i ewolucją oraz omówiono struktury solne na terenie Polski środkowej.

2.1.1. Mobilność soli

W procesach tektonicznych sole zachowują się w szczególny sposób – wykazują zdolność do przemieszczania się w środowisku skalnym w różnych kierunkach, zwaną przepływem, ruchem, mobilnością lub migracją soli (ang. *salt flow*, *movement*, *mobility*, *migration*). Migracja soli prowadzi do powstawania **struktur solnych**, tzn. odkształceń w ułożeniu skał z udziałem soli. Na skutek przepływu soli warstwy macierzyste, z których sól migruje, ulegają tektonicznemu zubożeniu, a ciała solne, które powstają w wyniku migracji soli w ich kierunku – tektonicznemu wzbogaceniu. W obu przypadkach dochodzi do charakterystycznych odkształceń w warstwach sąsiadujących. Jednak nazwa „struktura solna” najczęściej określa te formy strukturalne, które powstają w wyniku nagromadzenia i spiętrzenia soli.

Przemieszczanie się mas solnych w skorupie ziemskiej i powstawanie struktur solnych było przedmiotem badań od przeszło wieku. W klasycznym, tradycyjnym ujęciu wyróżniono dwa mechanizmy migracji soli i tworzenia się deformacji z jej udziałem: **halokinezę** i **halotektonikę**. Halokineza jest samoistnym, biernym przepływem mas solnych, który zachodzi jedynie pod wpływem siły ciężkości. Pojęcie to, oznaczające w języku greckim „ruch soli", wprowadził w 1957 roku Ferdinand Trusheim (Trusheim 1957, Trusheim 1960). Halotektonika oznacza przemieszczenia mas solnych wywołane naprężeniami tektonicznymi.

Aktualna literatura związana z tektoniką solną nie rozdziela wyraźnie halokinezy i halotektoniki (Warren 2006). Wynika to ze zrozumienia złożoności procesów powodujących przepływ soli w kompleksach skał osadowych.

Szczególna ruchliwość soli w procesach tektonicznych wynika zasadniczo z dwóch właściwości skał solnych, a głównie soli kamiennej, jako występującej w największej masie w kompleksach solnych (Hudec i Jackson 2007, Jaroszewski 1994, Warren 2006). Pierwszą z nich jest **gęstość soli**, wyraźnie mniejsza od gęstości typowych zwięzłych skał osadowych. Z powodu znikomej ściśliwości soli, jej gęstość niemal nie ulega zmianie pod wpływem ciśnienia wywieranego przez nadkład. W przypadku typowych skał osadowych, pod wzrostem nacisku nadkładu ich gęstość rośnie i w sekwencjach osadowych na większych głębokościach sole kamienne o gęstości około 2200 kg/m^3 są przykryte skałami o większej gęstości. Taka inwersja gęstości prowadzi do powstawania niestatecznego pod względem mechanicznym układu.

Drugą szczególną cechą soli kamiennej, różniącą ją od typowych skał osadowych, jest jej **zdolność do lepkoplastycznych deformacji**. Sól charakteryzuje się mniejszą lepkością w porównaniu z wieloma skałami osadowymi. Lepkość soli zależy od warunków, w których jest wyznaczana: ciśnienia, temperatury oraz stanu zawilgocenia i przyjmuje wartość około 10^{15}–10^{20} Pa·s, tzn. o kilka rzędów mniejszą od lepkości pospolitych skał zwięzłych (Jaroszewski 1994). Skutkiem tego podczas deformacji powstających w długotrwałych procesach geologicznych sole w skorupie ziemskiej są „słabym ogniwem", ośrodkiem skłonnym do mobilności i lepkoplastycznych odkształceń.

Obecnie uważa się, że dominującym czynnikiem powodującym mobilność soli jest obciążenie różnicowe (ang. *differential loading*), jakiemu poddawana jest warstwa solna lub ciało solne (Fossen 2016, Hudec i Jackson 2007, Warren 2006). Może ono powstać w wyniku różnorodnych zjawisk i procesów. Jak to zreasumowali Michael R. Hudec i Martin P.A. Jackson (Hudec i Jackson 2007), wyróżnia się trzy rodzaje różnicowego obciążenia powodującego ruch soli: obciążenie grawitacyjne (ang. *gravitational loading*), wynikające z różnicy ciśnień wywieranych przez nadkład, obciążenie związane z przemieszczeniami (ang. *displacement loading*), spowodowane naprężeniami tektonicznymi ściskającymi lub rozciągającymi w basenie sedymentacyjnym oraz obciążenie termiczne (ang. *thermal loading*), spowodowane zmianą gęstości soli pod wpływem

różnicy temperatur na różnych głębokościach i prowadzące do konwekcji cieplnej wewnątrz ciał solnych.

2.1.2. Struktury solne i ich formy, diapiryzm

Strukturami solnymi nazywa się formy strukturalne w kompleksach skał osadowych, powstające w wyniku przemieszczania się, gromadzenia i spiętrzania mas solnych oraz niekiedy ich przebijania się przez formacje nadkładu. Jądro struktury solnej tworzy **ciało solne**, które podczas swego rozrastania się i wznoszenia ku górze powoduje odkształcenia skał otaczających, a przede wszystkim wysklepienie, wydźwignięcie, a czasem przerwanie ciągłości nadkładu.

Budowa geologiczna struktur solnych badana jest w różnych skalach – od skali regionalnej po szczegółowe badania tektoniczne w obrębie poszczególnych złóż. W tym rozdziale będzie mowa o strukturach solnych rozpatrywanych w skali regionalnej.

Struktury solne tworzą rozmaite formy, różniące się kształtem, wielkością i sposobem kontaktowania się z otoczeniem ciał solnych. Różnią się też stopniem zaangażowania tektoniki solnej, powodującym powstawanie form od prostych po bardzo złożone.

W tradycyjnej, do dziś stosowanej klasyfikacji struktur solnych, uwzględnia się formę ciała solnego, jego relację tektoniczną ze skałami otaczającymi oraz stopień zaangażowania tektoniki solnej. Na podstawie tych kryteriów struktury solne podzielono na dwie grupy:

1) ciała solne zalegające zgodnie pośród skał otaczających i nieprzebijające się przez nadkład,
2) ciała solne zalegające niezgodnie, przebijające się częściowo lub całkowicie przez nadkład.

Głównymi formami w grupie pierwszej są (np. Dadlez i in. 1980, Jackson i Talbot 1986, Jaroszewski 1994):

- antykliny solne,
- spęcznienia solne,
- poduszki solne,
- wały i grzbiety solne.

Poduszki solne są to ciała solne uwypuklone ku górze, w planie poziomym mające zarys owalny zbliżony do kołowego i przykryte wysklepionymi, ale zachowującymi ciągłość warstwami nadkładu. Wały solne są wydłużonymi formami poduszek. Grzbiety solne stanowią ciągi liniowo ułożonych poduszek.

Struktury solne drugiej grupy powstały w wyniku wznoszenia się soli przez warstwy nadkładu. Proces ten został nazwany **diapiryzmem** (gr. *diapeirein* – przebijać), a formy powstające w tym procesie nazywa się niekiedy ogólnie **diapirami** (Trusheim 1957).

ROZDZIAŁ 3

Wysady solne Polski środkowej i stan ich zagospodarowania górniczego

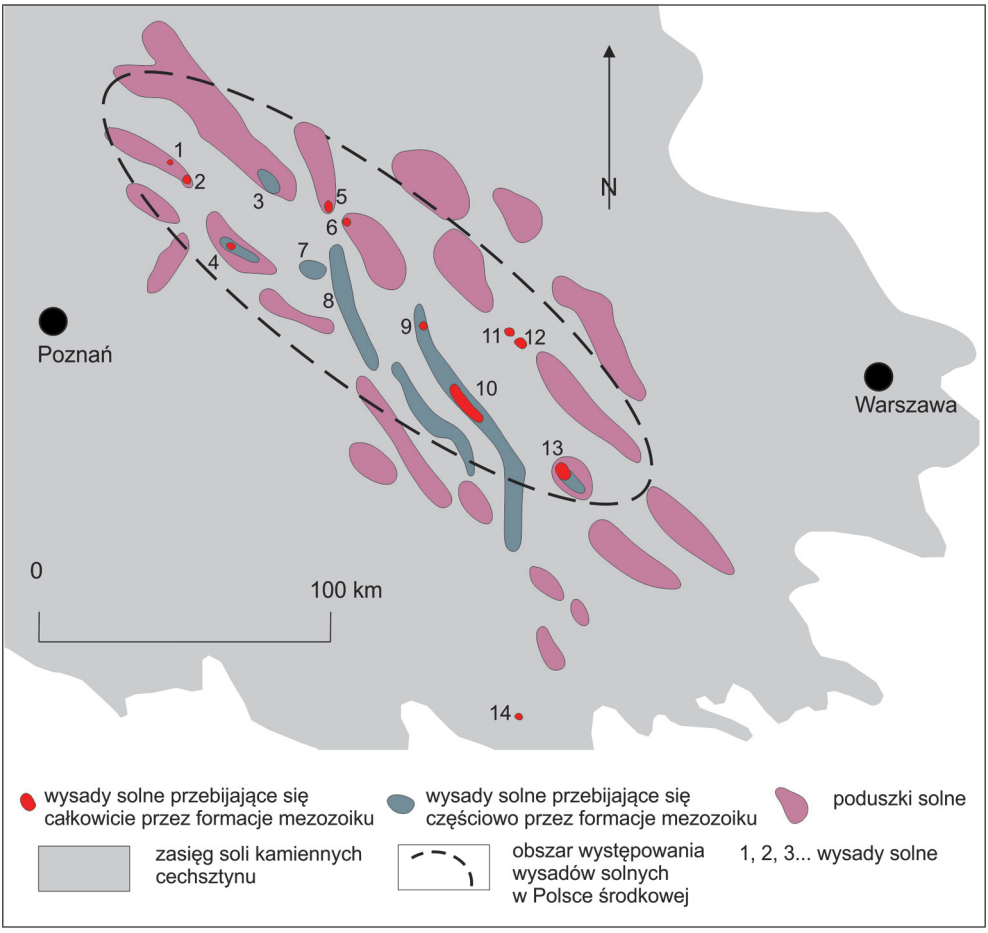
3.1. Położenie, rodzaj i wielkość wysadów solnych

Do najbardziej intensywnego rozwoju tektoniki solnej doszło w Polsce środkowej, na obszarze dwóch jednostek tektonicznych: segmentu kujawskiego wraz z pograniczną strefą z segmentem pomorskim i we wschodniej części segmentu mogileńsko-łódzkiego (rozdz. 1 przypis dolny nr 11). Na tym obszarze znajdują się wszystkie rozpoznane wysady solne, które przebiły się przez nadkład mezozoiczny do powierzchni podkenozoicznej. Na pozostałych obszarach basenu cechsztyńskiego nie rozpoznano całkowicie przebitych wysadów solnych, a jedynie wały, poduszki i częściowo przebijające się diapiry. Wyjątek stanowi wysunięty najbardziej na południe wysad solny Dębina.

Położenie wysadów solnych przedstawiono na mapie (rys. 3.1), która powstała w wyniku przetworzenia wycinka mapy struktur solnych (Czapowski i in. 2017).

Na mapie przedstawiono lokalizację trzech rodzajów struktur solnych: wysady solne, które przebiły się do spągu kenozoiku, diapiry, które częściowo się przebiły przez warstwy mezozoiczne i poduszki solne. Struktury solne układają się przeważnie w ciągi o przebiegu NW-SE, tzn. zgodnie z kierunkiem przebiegu głównych stref tektonicznych w głębokim podłożu bruzdy śródpolskiej. Są to struktury zwykle złożone, dwu- lub kilkuczłonowe i w poszczególnych swych częściach mogą się różnić stopniem intensywności tektoniki solnej (poduszka lub wał solny – grzebień solny – diapir). Przeważają rozległe, często podłużne antykliny solne, w których lokalnie doszło do częściowego lub całkowitego przebicia się soli przez nadkład mezozoiczny i utworzenia odpowiednio: nieprzebitych diapirów albo wysadów solnych, jak np. w strukturze solnej Mogilna. Podłoże struktur solnych, tzn. powierzchnia spągowa kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego na obszarze segmentu kujawskiego i mogileńsko-łódzkiego leży, jak wspomniano w rozdziale 1, przeważnie na głębokości od 5500 m do ponad 7500 m p.p.m. (Dadlez 1998).

Wydźwignięte z tej głębokości utwory cechsztynu można napotkać w wysadach solnych na znacznie mniejszych głębokościach, np. kilkunastu, kilkudziesięciu i stu kilkudziesięciu metrów.



Rys. 3.1. Wysady solne w Polsce środkowej (Czapowski i in. 2017, rysunek zmieniony). 1 – Wapno; 2 – Damasławek; 3 – Zalesie; 4 – Mogilno; 5 – Inowrocław; 6 – Góra; 7 – Strzelno; 8 – Gopło; 9 – Izbica; 10 – Kłodawa; 11 – Lubień; 12 – Łanięta; 13 – Rogóźno; 14 – Dębina

Ze względu na głębokość zalegania soli dostępną dla górnictwa podziemnego i otworowego, wysady solne w Polsce środkowej stanowią zasobne złoża solne. Obszar ich występowania (okonturowany obszar na rysunku 3.1) jest pod względem surowcowym bogatą częścią cechsztyńskiego zagłębia solnego w Polsce. W tabeli 3.1 zestawiono wysady solne i częściowo przebite diapiry Polski środkowej.

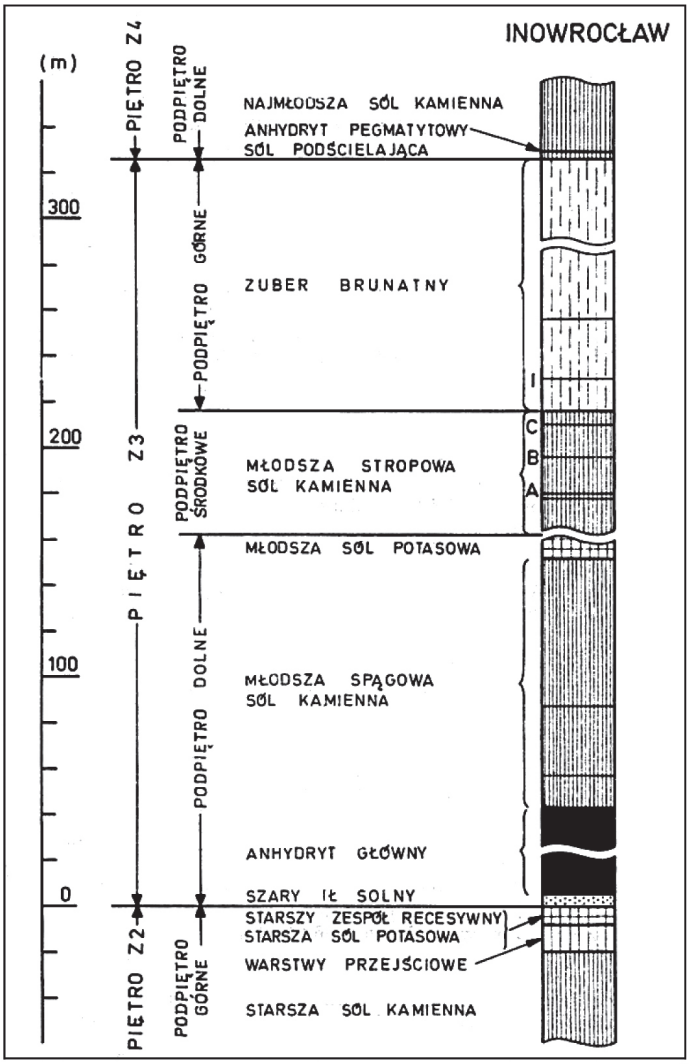
Profil litostratygraficzny w wysadzie inowrocławskim

Pierwsze obserwacje dotyczące stratygrafii w wysadzie solnym w Inowrocławiu pochodzą ze starych inowrocławskich kopalń oraz z profilowania otworów wiertniczych (Beyschlag 1913). Kolejne badania były prowadzone w kopalni Solno w miarę rozcinania złoża, kartowania geologicznego, wykreślania map geologicznych i studiów porównawczych z sukcesywnie rozpoznawaną stratygrafią cechsztynu w basenie niemieckim. Pierwszy pełniejszy profil stratygraficzny dla złoża inowrocławskiego przedstawił Józef Poborski (Poborski 1947, Poborski 1957). Zauważa on, że stratygrafię serii solnej w Inowrocławiu udało się poznać w nawiązaniu do klasycznego profilu hanowerskiego, a najważniejszym krokiem, w złożu o wysoce skomplikowanej budowie geologicznej, jakim jest wysad inowrocławski, było zidentyfikowanie kilku warstw przewodnich, m.in. anhydrytu pegmatytowego (A4a) i anhydrytu głównego (A3), w czasie gdy brakowało jeszcze polskich nazw i stosowanych dzisiaj oznaczeń dla tych stratygraficznych wydzieleń. W ówczesnych pionierskich badaniach wielką pomocą była niezwykła czytelność odsłonięć w chodnikach drążonych techniką ługowania przez zraszanie calizny (rozdz. 5) (rys. 4.1).

Rys. 4.1. Ocios chodnika w kopalni Solno w Inowrocławiu: pionowo zapadające czerwone warstwy młodszej soli kamiennej górnej (Na3g) z przerostami białawego anhydrytu (fot. S. Klimowski)

W kolejnych latach powstał szczegółowy profil stratygraficzny złoża, zwłaszcza utworów w cyklotemie PZ3, które najpełniej odsłoniły się w granicach kopalni (Charysz 1973). W profilu wyróżniono utwory należące do cyklotemów PZ2, PZ3 i PZ4. Utwory kompleksu najstarszej soli kamiennej PZ1 nie zostały rozpoznane w zasięgu wyrobisk górniczych i w profilach wierceń, chociaż uważano, że ich występowanie w udostępnionej części wysadu jest bardzo prawdopodobne. Całkowita miąższość zespołu warstw serii solnej odsłoniętej robotami górniczymi sięga 650 m (Cybulski 1972).

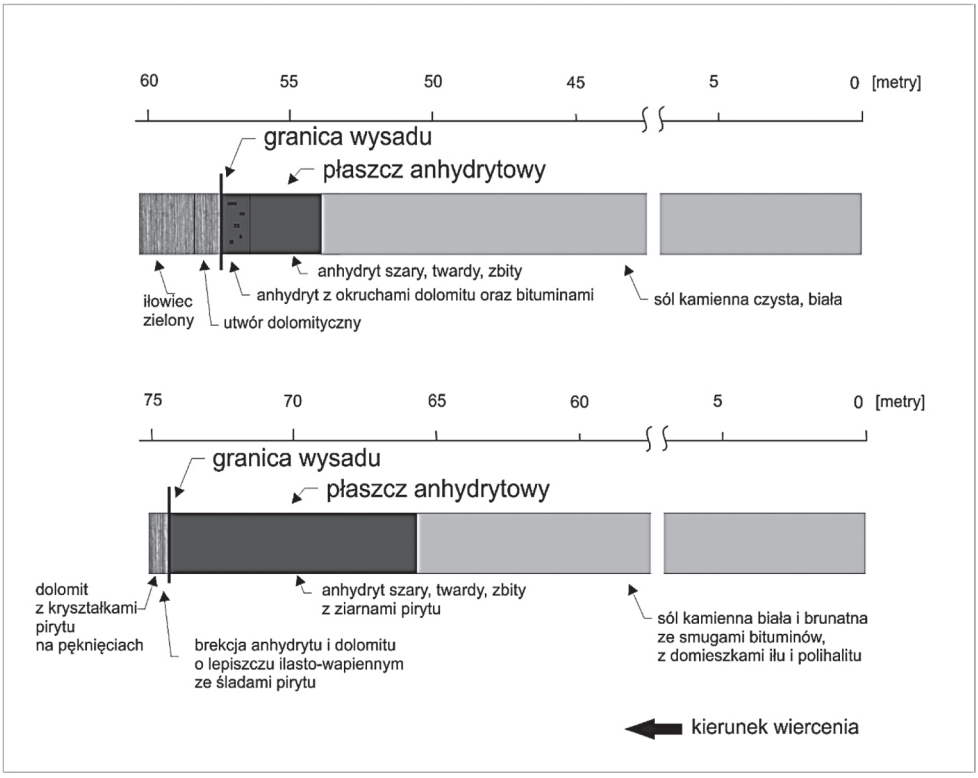
Uproszczony profil stratygraficzny, stosujący ówczesne nazewnictwo stratygraficzne (Charysz 1973), przedstawiono na rysunku 4.2. Ze względu na wspomnianą widoczność warstw i kontaktów geologicznych, a skutkiem tego szczegółowość opisu geologicznego, profil złoża inowrocławskiego ma szczególne znaczenie dla studiów porównawczych i identyfikacji członów stratygraficznych w wysadach solnych udostępnianych jedynie metodami wiertniczymi. Dlatego też poniżej przedstawiono szczegółowy, chociaż nieco skrócony opis litologiczny poszczególnych członów stratygraficznych za Włodzimierzem Charyszem (Charysz 1973).



Rys. 4.2. Profil stratygraficzny wysadu solnego w Inowrocławiu (Charysz 1973)

W wysadzie solnym Inowrocławia zaobserwowano w otworach do zachodniej granicy wysadu brekcję anhydrytowo-ilastą z ostrokrawędzistymi okruchami anhydrytu tkwiącymi w szarym zwięzłym ile.

Na podstawie analizy danych wiertniczych z wysadów Kłodawy i Inowrocławia należy wnioskować, że ciągłość płaszcza anhydrytowego bywa zachowana tylko lokalnie, natomiast tektoniczna brekcja graniczna stanowi rzeczywisty większościowy składnik utworów kontaktu pomiędzy wysadem solnym a jego otoczeniem. Przykłady charakterystycznych profili wierceń do granic przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Płaszcz anhydrytowy i granica wysadu w przykładowych profilach wierceń do granic

Strefy brekcji tektonicznych na granicy wysadu i skał otaczających nie tylko przylegają wprost do utworów solnych lub płaszcza anhydrytowego jak brekcja graniczna, ale występują też w pewnym oddaleniu od ścian. Na wysadzie solnym w Inowrocławiu strefę taką nawiercono otworem z powierzchni, poprowadzonym poza wysadem, ale w bliskim sąsiedztwie czapy i zachodniej krawędzi zwierciadła solnego. W profilu wiercenia

(otwór wiertniczy B1) stwierdzono druzgot tektoniczny skał jurajskich spojony wtórnie iłem i gipsem lub anhydrytem (Poborski 1969).

Kontakt ścian wysadu, płaszcza anhydrytowego i skał bezpośredniego otoczenia wysadu stanowi strefę krążenia wód podziemnych, najczęściej powiązaną hydraulicznie z wodami nadkładu. W strefie tej odbywa się też migracja wód i węglowodorów z głębszych warstw osadowych ku powierzchni. W historii górnictwa solnego wejście w tę strefę otworami wiertniczymi, drążonymi z wyrobisk kopalnianych lub samymi wyrobiskami, wielokrotnie skutkowało otwarciem się niebezpiecznych dopływów do kopalń (rozdz. 6.5). Czasem jednak ściana wysadu może być izolowana od wyżej zalegających poziomów wodonośnych przez przylegające do niej nieprzepuszczalne kompleksy skalne otoczenia (np. taką izolację stanowią iłowce kajpru na wschodniej ścianie wysadu w Kłodawie).

***

Strefy deformacji i dyslokacji w szerszym otoczeniu wysadów były przedmiotem intensywnych badań prowadzonych od lat 80. XX wieku, w związku z poszukiwaniem złóż węglowodorów w pułapkach tektonicznych powstających w sąsiedztwie struktur solnych. W wielu publikacjach, na podstawie badań na modelach fizycznych i badań sejsmicznych dokonywano prób charakterystyki i usystematyzowania informacji o deformacjach tektonicznych oraz geometrii tych stref nazwanych **strefami wleczenia** (ang. *drag zones*; np. Alsop i in. 2000, Loof i in. 2003).

4.2.4. Budowa zewnętrzna wysadów – podsumowanie

Rozpoznanie budowy zewnętrznej, odpowiednie wykorzystanie informacji geologicznej i doświadczenia górniczego ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowego zagospodarowania wysadów solnych i bezpieczeństwa eksploatacji. Główne cechy budowy zewnętrznej wysadów solnych scharakteryzowane w tym rozdziale zostały podsumowane poniżej.

– Na zwierciadle solnym wysadu utwory serii solnej tworzą wychodnie kompleksów skalnych należących do dolnego lub górnego oddziału litologicznego, wydzielonego w profilu litostratygraficznym cechsztynu (podrozdz. 4.1.2). Kompleksy skalne obu oddziałów różnią się składem litologicznym i wynikającymi z niego właściwościami fizycznymi i chemicznymi, a w szczególności podatnością na rozpuszczanie. W ogólności, sole dolnego oddziału litologicznego łatwo ulegają rozpuszczaniu (oprócz grubych warstw anhydrytu), podczas gdy utwory górnego oddziału znacznie słabiej.

4.5. Budowa geologiczna wysadów solnych w Inowrocławiu, Wapnie i Kłodawie

4.5.1. Budowa geologiczna wysadu solnego w Inowrocławiu

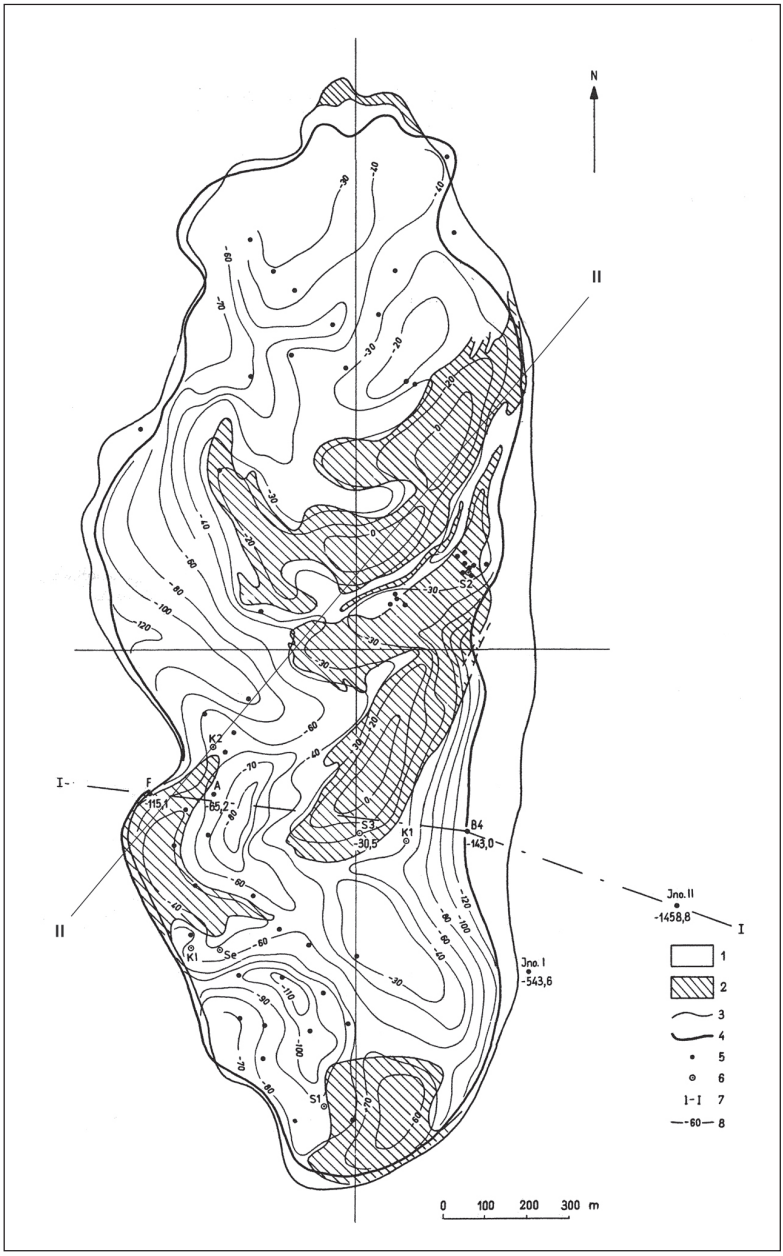
Budowa geologiczna wysadu solnego w Inowrocławiu została dość dokładnie zbadana i była omawiana w wielu publikacjach (np. Beyschlag 1913, Bujakowski 1984, Chandij 1976, Cybulski 1972, Poborska-Młynarska 1986, 1989, Poborski 1947, 1957, Tarka 1992).

Wysad inowrocławski jest jednym z najlepiej rozpoznanych, ponieważ został rozwiercony licznymi otworami i rozcięty podczas prowadzenia robót górniczych w niemal całym zarysie poziomym, do głębokości 637 m. W profilu pionowym ma kształt asymetrycznego słupa, nieco nachylonego w kierunku południowo-zachodnim lub WSW, wznoszącego się z szerokiej owalnej podstawy. Podłoże cechsztynu zalega tu na głębokości około 6000 m (Tarka 1992). Zachodnia ściana wysadu zapada niemal pionowo do głębokości 300 m. Poniżej załamuje się, tworząc stopnie poszerzające wysad i nadal zapada bardzo stromo, prawdopodobnie z odchyleniem wstecznym, tzn. w kierunku wschodnim. Ściana wschodnia zapada niemal równomiernie pod średnim kątem około 50°.

Wysad przebija się całkowicie przez pokrywę mezozoiczną, zbudowaną z utworów triasu i jury i dochodzi niemal do powierzchni terenu. Nadkład nad wysadem i na mezozoicznym obrzeżeniu wysadu stanowią osady kenozoiczne. Nad północną częścią wysadu w nadkładzie znajdują się miejscami bloki wapieni jurajskich, będących prawdopodobnie pozostałościami zapadniętego sklepienia mezozoicznego. Powierzchnia terenu ponad wysadem tworzy łagodne wzniesienie, którego kulminacja podniesiona o około 10 m ponad otaczającym obszarem znajduje się ponad środkową częścią wysadu (Poborska-Młynarska 1989).

Najwyższą część wysadu stanowi czapa iłowo-gipsowa napotykana na zmiennej głębokości: w niektórych wierceniach bardzo płytko do 10 m, w innych głębiej, np. poniżej 120 m. Miąższość czapy nad całym wysadem zmienia się od 50 m do 180 m. Przy ścianach wysadu czapa gipsowa przechodzi w płaszcz anhydrytowy o grubości od kilku do kilkunastu metrów.

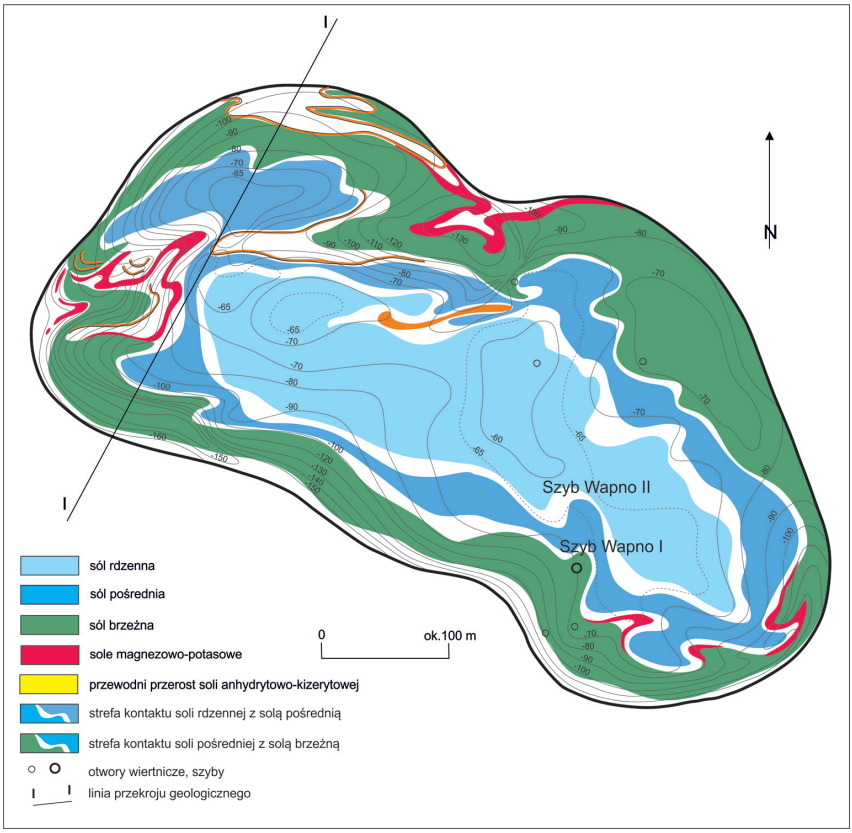
Poniżej czapy leży zwierciadło solne. Jego zarys poziomy jest eliptyczny, o osi dłuższej przebiegającej w kierunku północ – południe, osiągającej długość ponad 2500 m oraz o osi krótszej równej około 1000 m. Powierzchnia zwierciadła solnego wynosi 1,82 km^2, a przeciętna głębokość zalegania około 150 m. Ukształtowanie zwierciadła jest bardzo urozmaicone, z deniwelacjami dochodzącymi do 150 m i kątami największego nachylenia przekraczającymi 25°. Znajdują się na nim wychodnie dolnego i górnego oddziału litologicznego (rys. 4.17).



Rys. 4. 17. Mapa strukturalno-geologiczna zwierciadła solnego na wysadzie solnym w Inowrocławiu (Poborska-Młynarska 1984). 1 – wychodnie litologicznego oddziału dolnego serii solnej; 2 – wychodnie litologicznego oddziału górnego serii solnej; 3 – zarys wysadu na poziomie I kopalni Solno (na głębokości 470 m); 4 – krawędź zwierciadła solnego; 5 – otwór wiertniczy (w obrębie wysadu zaznaczono tylko te otwory, w których napotkano zwierciadło solne; 6 – szyb kopalniany; 7 – linia przekroju geologicznego; 8 – izohipsy zwierciadła solnego

Zwierciadło solne zalega przeważnie na głębokości 160–170 m. W środkowej części złoża w jednym z wierceń badawczych stwierdzono 60-metrowe obniżenie zwierciadła, utworzone na wychodni warstw soli potasowej (Kolonko 1972). To sugeruje, że zwierciadło solne jest bogato urzeźbione i na jego powierzchni znajdują się kotły i wąwozy krasowe (rys. 4.20, 4.21).

Wysad solny, w górnej części udostępnionej wyrobiskami górniczymi, jest zbudowany głównie z mas starszej soli kamiennej (Na2). Ponadto rozpoznano utwory z niektórych poziomów cyklotemów PZ3 i PZ4, występują jednak one w znikomej ilości w porównaniu z solą starszą. Wśród starszej soli kamiennej wyróżnia się trzy człony litologiczne: sól kamienną białą grubokrystaliczną, średniokrystaliczną i drobnokrystaliczną. Są rozmieszczone koncentrycznie wewnątrz wysadu, dlatego – przy uwzględnieniu ich położenia – nazywano je odpowiednio: solą rdzenną, pośrednią i brzeżną (rys. 4.20). Sole te są w dużej części pasiaste, dzięki czemu widoczne jest ich bardzo strome zapadanie i złożone deformacje fałdowe. Starsza sól kamienna zajmuje rdzenną część wysadu.



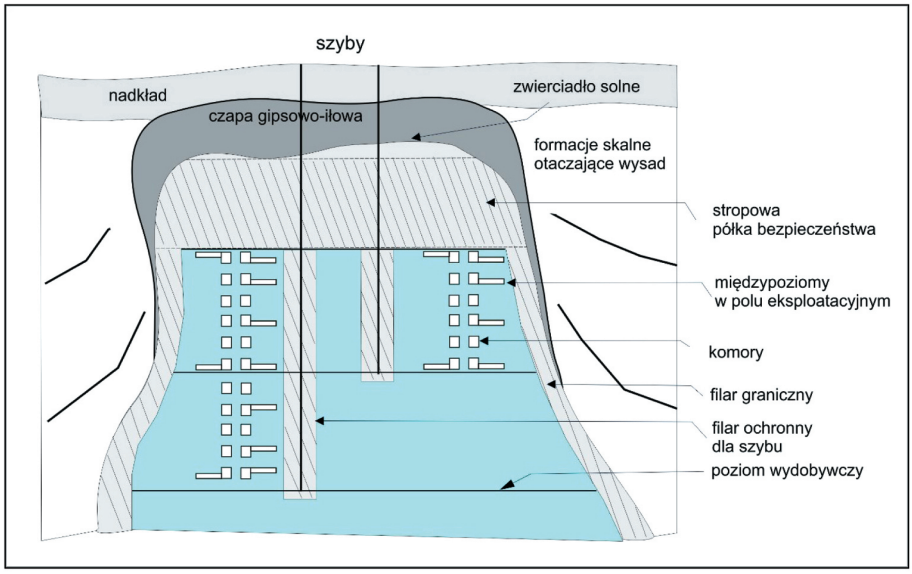
Rys. 4.20. Mapa geologiczno-strukturalna zwierciadła solnego na wysadzie solnym w Wapnie (Poborski 1977)

Filary bezpieczeństwa stanowią części złoża pozostawione w celu zabezpieczenia wyrobiska przed wdarciem się solanek lub innych wód, a także przed zawałem, niebezpiecznym ciśnieniem górotworu, zagrożeniem wyrzutami gazów i skał. Do filarów bezpieczeństwa w górnictwie solnym zalicza się calizny pionowe i poziome (np. półkę bezpieczeństwa nad kopalnią, półki międzypoziomowe i filary międzykomorowe).

Filary graniczne są to calizny wydzielone w złożu, oddzielające dwa sąsiednie obszary górnicze lub wyznaczone wzdłuż granic złoża (Paterek i in. 1982).

Wymiary filarów w wysadach solnych przyjmuje się na podstawie doświadczeń górniczych oraz obliczeń teoretycznych. Sposoby obliczania filarów były przedstawiane w stosownych przepisach. W wysadach solnych wyznacza się filary o następujących wymiarach (*Instrukcja…* 1984, Paterek i in. 1982) (rys. 5.1):

- poniżej zwierciadła solnego wyznacza się stropową półkę bezpieczeństwa o grubości 150–250 m, w zależności od wymiaru pola eksploatacyjnego (Ślizowski 1980);
- przy ścianach wysadu wyznacza się filary graniczne (brzeżne, przyścienne) wydzielone wzdłuż jego naturalnych granic bocznych; są to calizny pionowe lub nachylone zgodnie ze skłonem ścian wysadu, o szerokości uzależnionej od powierzchni pola eksploatacyjnego i kąta nachylenia ściany; do głębokości 600 m grubość filaru zmienia się w granicach 50–75 m, a poniżej 600 m od 50 m do 100 m;
- filary ochronne dla szybów mają promień co najmniej 100 m do głębokości 600 m oraz 150 m poniżej tej głębokości;
- wokół otworów wiertniczych z powierzchni pozostawia się filary o kształcie walca o promieniu nie mniejszym niż 50 m, sięgające 50 m poniżej dna otworu.



Rys. 5.1. Struktura przestrzenna kopalni podziemnej w wysadzie solnym

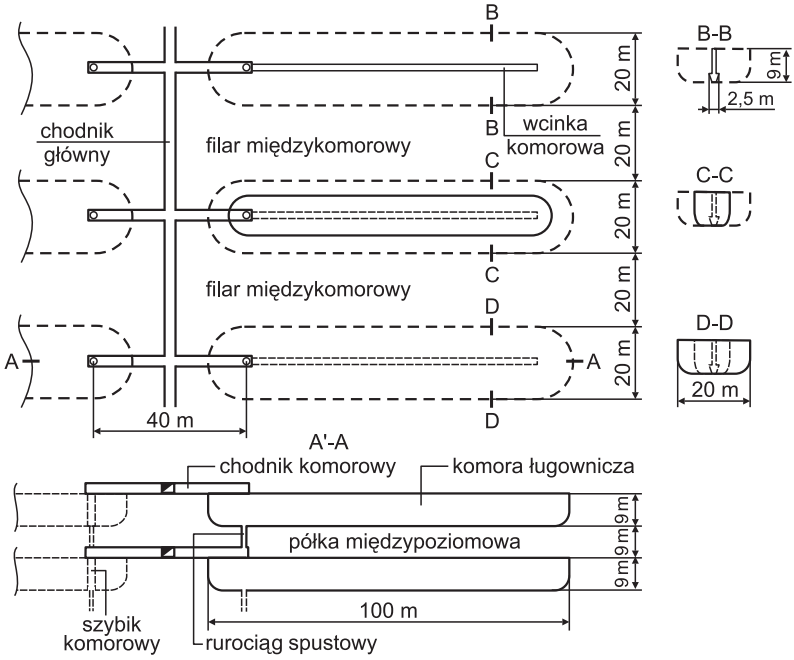
Wewnątrz wysadu mogą występować stromo zapadające warstwy anhydrytu tworzące wychodnie na zwierciadle solnym i wkraczające w czapę wysadu. Są to potencjalne drogi infiltracji wód z czapy i zwierciadła solnego do kopalni (rozdz. 6). Wzdłuż takich warstw wyznacza się obustronnie filary bezpieczeństwa. W kopalni w Kłodawie szerokość filaru wyznaczonego przy grubej warstwie anhydrytu (anhydryt główny) jest równa 30 m. Podobne filary wyznacza się w przypadku niebezpiecznych stref występowania gazów.

W wysadach solnych w Polsce (ogólnie – we wszystkich złożach soli), w złożach eksploatowanych metodą suchą, stosuje się jak dotychczas wyłącznie **systemy komorowe właściwe**, w których likwidację komór pozostawia się praktycznie do czasu likwidacji całej kopalni. W górnictwie solnym eksploatację prowadzi się z reguły z zachowaniem zasady tzw. **pełnej ochrony stropu**. Oznacza to, że strop komory po zakończeniu wybierania ma pozostać nienaruszony, a komory w polach eksploatacyjnych muszą zachowywać długotrwałą stateczność tak, aby nie doszło do rozwoju nadmiernych deformacji w filarach międzykomorowych i półkach międzypoziomowych, a skutkiem tego do spękania i rozszczelnienia górotworu i otwarcia się dróg dopływu dla wód podziemnych.

Filary międzykomorowe i półki międzypoziomowe wyznacza się w polach eksploatacyjnych stosownie do przyjętego systemu eksploatacji. Mają one utworzyć przestrzenną konstrukcję przejmującą naprężenia powstające w wyniku eksploatacji, dlatego osie filarów międzykomorowych na poziomie niższym mają pokrywać się z osiami filarów na poziomach wyższych (zachowanie tzw. osiowości filarów i komór) (rys. 5.2) (Dz.U. 2017 poz. 1118).

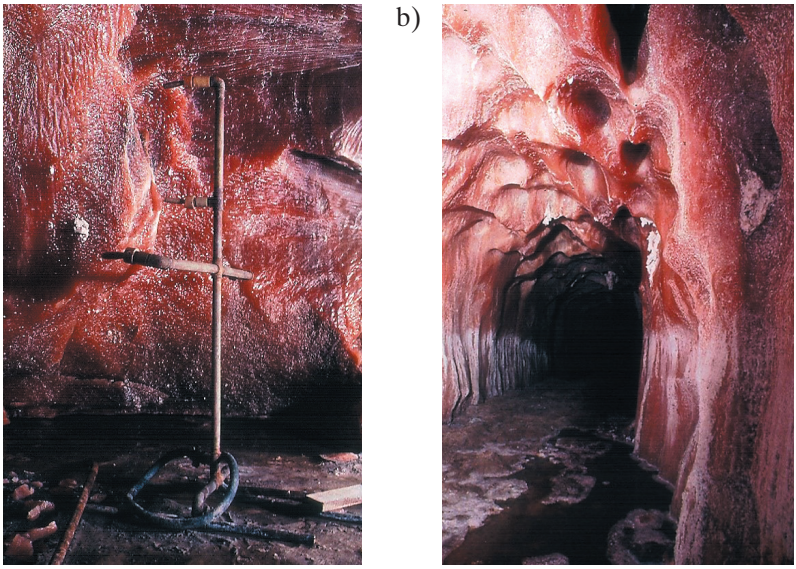
W wysadzie solnym szczególną rolę odgrywa **stropowa półka bezpieczeństwa**. Półka ma być wodoszczelna, aby wody z czapy gipsowej nie przenikały przez nią w głąb złoża do wyrobisk górniczych. Ponadto półka ma być takich rozmiarów, aby nie ulegała nadmiernym deformacjom, które mogłyby spowodować jej rozszczelnienie, przez cały czas funkcjonowania kopalni, a także po jej likwidacji. Stropowa półka bezpieczeństwa ma tak duże znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji w wysadzie solnym, że znalazło to swój wyraz przy określeniu granicznych wartości parametrów definiujących złoże (Dz.U. 2015 poz. 987). Położenie „stropu złoża" w wysadach solnych definiuje się w odległości co najmniej 150 m poniżej najniższego rozpoznanego punktu na zwierciadle solnym (tab. 5.1).

Z powodu urozmaiconej morfologii zwierciadła solnego (podrozdz. 4.2.1) i ograniczonych możliwości rozpoznania wiertniczego, przy wyznaczaniu stropowej półki bezpieczeństwa konieczna bywa dodatkowa interpretacja geologiczna. Zasadniczo półkę wyznacza się przez odmierzenie jej grubości pionowo w dół od najniższego rozpoznanego punktu na zwierciadle solnym.



Rys. 5.3. Komorowy system eksploatacji w kopalni Solno w Inowrocławiu (Poborska-Młynarska 1989)

a) b)



Rys. 5.4. Drążenie chodnika w solach różowych techniką ługowania przez natryskiwanie calizny w kopalni Solno w Inowrocławiu: a) rama natryskowa; b) wydrążony chodnik (fot. S. Klimowski)

Wody wewnętrzne powstają w rozmaitych procesach i na różnych etapach formowania się złoża. Pochodzenie tych roztworów może być związane z:

- osadzaniem się serii solnej (roztwory pierwotne, rezydualne),
- późniejszymi przemianami metamorficznymi w złożu, w wyniku których doszło do powstawania roztworów z wody krystalizacyjnej uwolnionej z uwodnionych minerałów (roztwory po procesach metamorficznych),
- procesami uwalniania się wód zamkniętych w inkluzjach,
- zdarzeniami tektonicznymi, prowadzącymi do przechwycenia i zamknięcia w złożu wód zewnętrznych (Herbert i Schwandt 2007).

Migrujące w złożu wody wewnętrzne podlegają dalszym przemianom (tzw. metamorfizm roztworów).

Naturalne izolowane zbiorniki z wodami wewnętrznymi

Wody wewnętrzne mogą wypełniać naturalne, izolowane w soli pustki, tzn. szczeliny i kawerny, występując czasem razem z gazami (rozdz. 7). Takie zbiorniki solanek lub solanek i gazów znane są w złożach soli, zwłaszcza w strefach występowania warstw i bloków anhydrytu.

Objętość zamkniętej solanki zależy od pojemności systemu połączonych spękań i kawern i chociaż może być bardzo duża (setki metrów sześciennych i więcej), to w ściśle izolowanych zbiornikach jest ograniczona.

Z powodu nieprzepuszczalności soli kamiennej i skłonności do lepkoplastycznych odkształceń ciśnienie płynów w takich zbiornikach może być bardzo wysokie, zbliżone do ciśnienia litostatycznego dla danej głębokości. Bywa też większe (Jackson i Hudec 2017, Warren 2006), co tłumaczy się procesami halokinezy. Gdy partie złóż zawierające izolowane zbiorniki płynów zostaną w wyniku halokinezy wyniesione z większych głębokości ku górze, powstają w nich strefy (domeny) nadciśnienia, tzn. ciśnienia wyższego niż ciśnienie litostatyczne w otaczających skałach na danej głębokości. Skutkiem tego płyny mogą wydostawać się ze zbiornika, wnikać w otaczające sole i tworzyć np. inkluzje (omówione w dalszej części tekstu). Według Johna Warrena istnieje także zjawisko odwrotne – w izolowanych zbiornikach płynów mogą powstawać domeny podciśnienia, tj. ciśnienia mniejszego niż litostatyczne na danej głębokości (Warren 2006). Taka sytuacja może się zdarzyć tylko w zbiornikach ściśle izolowanych wewnątrz złoża i nieposiadających połączeń z poziomami wodonośnymi poza złożem.

W złożach solnych mogą występować także zbiorniki wód wewnętrznych, mające pośrednie połączenia z wodami zewnętrznymi. Takie kontakty hydrauliczne mogą zamierać, ożywać i odnawiać się w historii geologicznej złoża, a także w wyniku działalności górniczej.

6.3.1. Drogi dopływu wód do kopalni

W górotworze solnym drogi dopływu wód do wyrobisk kopalni otwierają się w wyniku prowadzenia wierceń i robót górniczych. Dlatego też roboty te prowadzi się z zachowaniem szeregu rygorów i zabiegów technicznych zabezpieczających przed dopływem.

Rozpoznanie dróg dopływu ma podstawowe znaczenie dla określenia pochodzenia ługu i podjęcia działań profilaktycznych i zabezpieczających. Wody mogą dostawać się do kopalni przez:

- otwory wiertnicze z powierzchni (badawcze, mrożeniowe), przebijające poziomy wodonośne nadkładu i zawodnioną czapę gipsowo-iłową, nieprawidłowo zlikwidowane,
- szyby kopalniane, przebijające poziomy wodonośne nadkładu i zawodnioną czapę gipsowo-iłową, z nieszczelną obudową, na skutek czego dochodzi do migracji wód poza obudową,
- otwory wiertnicze prowadzone z wyrobisk kopalni, napotykające strefy występowania ługów (badawcze, do granicy złoża, wyprzedzające, przedwierty),
- wyrobiska górnicze wkraczające w strefy występowania ługów,
- spękania i szczeliny sięgające stropowych i brzeżnych części wysadu, naturalne lub takie, które powstały w wyniku nieprawidłowego prowadzenia robót górniczych (rozszczelnienie na skutek rozwoju nadmiernych deformacji górotworu wywołanych eksploatacją),
- spękania i szczeliny (rozszczelnienie górotworu), powstające w wyniku wyrzutów gazów i skał.

6.3.2. Profilaktyka otwarcia dopływu wód

Jak wspomniano, działania profilaktyczne przed otwarciem dopływu wód podejmuje się na wszystkich etapach działalności górniczej: od prac rozpoznawczych na wysadzie solnym, przez udostępnienie i rozcięcie robotami przygotowawczymi, do etapu eksploatacji. Do działań profilaktycznych należy zatem zaliczyć (Paterek i in. 1982):

- rozpoznanie budowy geologicznej wysadu, a szczególnie położenia granicy wysadu i stosunków wodnych w złożu i jego otoczeniu oraz stałą aktualizację danych,
- pozostawianie filarów bezpieczeństwa, granicznych i ochronnych o odpowiednich wymiarach (podrozdz. 5.1),
- prawidłową technologię wiercenia i likwidacji otworów wiertniczych drążonych z powierzchni i z wyrobisk kopalni,
- odpowiednią lokalizację szybów,

– odpowiednie metody zgłębiania szybów i wykonanie wodoszczelnej obudowy,
– wybór właściwego systemu i technologii eksploatacji, który nie spowoduje niepożądanych deformacji górotworu (podrozdz. 5.2),
– ukierunkowanie eksploatacji w ten sposób, aby system wyrobisk nie naruszył stref niebezpiecznych,
– stosowanie wierceń badawczych i wyprzedzających podczas drążenia wyrobisk rozpoznawczych i przygotowawczych,
– dokumentowanie aktualnego stanu zagrożenia, rejestracja i systematyczne obserwacje i badania wszystkich, nawet najmniejszych zjawisk wodnych.

Niektóre z tych punktów zostaną omówione szerzej w odniesieniu do kopalń w wysadach środkowopolskich.

Odpowiednia lokalizacja szybu

Zdecydowanie najkorzystniejsza jest lokalizacja szybu w obrębie typowej czapy iłowej, na wychodniach górnego oddziału litologicznego na zwierciadle solnym. Wówczas szyb zgłębiany jest w niezawodnionych albo słabo zawodnionych utworach czapy i w niezawodnionej strefie zwierciadła solnego.

Zgłębianie szybów

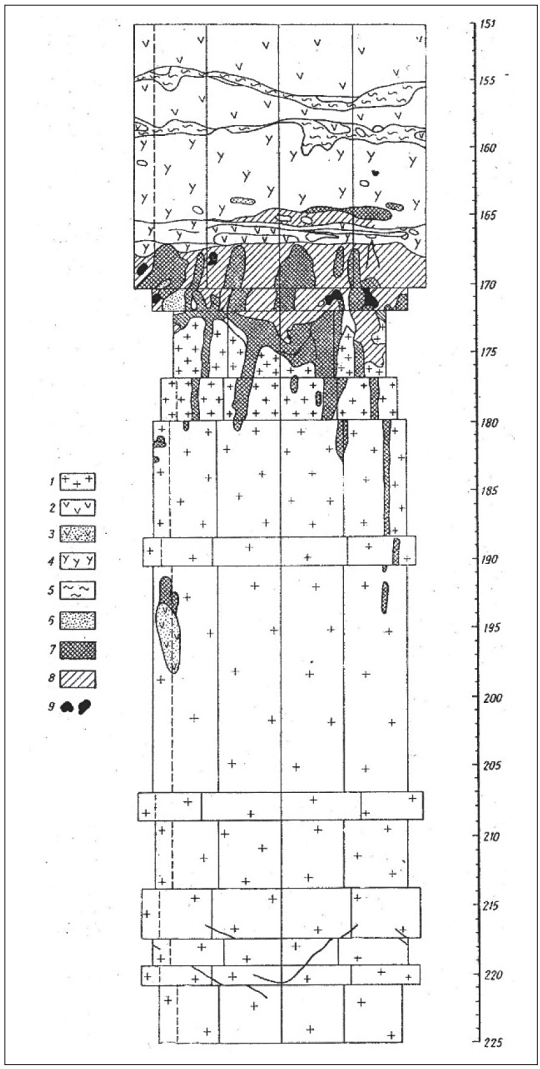
Jedną z dróg najbardziej niebezpiecznych dopływów do kopalń soli są szyby. Szyb założony na wysadzie solnym przebija kilka zawodnionych stref: poziomy wodonośne nadkładu, czapę gipsowo-iłową i strefę kontaktu ze zwierciadłem solnym. Zabezpieczenie przed dopływem osiąga się przez:
– wykonanie ściśle wodoszczelnej obudowy,
– odcięcie wód nadkładu i wód czapy oraz uniemożliwienie migracji wód za obudową szybu.

Jest to trudne zadanie techniczne, zwłaszcza gdy szyb nie został założony w obrębie niezawodnionej czapy iłowej, z powodów, takich jak:
– rozpuszczalność soli,
– pustki krasowe w czapie gipsowej, a szczególnie nad zwierciadłem solnym,
– silne zawodnienie czapy gipsowej z dużymi wydatkami dopływu,
– zasolenie wód, stwarzające agresywne chemicznie środowisko,
– tendencje górotworu solnego do zaciskania wyrobisk.

Korzystna lokalizacja szybu może te trudności znacznie ograniczyć.

Szyb Wapno I

Opis dopływów wód do szybu Wapno I podany jest za *Opinią Komisji do ustalenia stanu zagrożenia wodnego w kopalniach soli* (*Opinia Komisji…* 1970) oraz za Marianem Kolonką i współautorami (Kolonko i in. 2014). Szyb wydobywczy Wapno I został założony w południowo-zachodniej części wysadu pokrytego w całości czapą gipsowo-anhydrytową. W profilu geologicznym szybu widać strefę rozwiniętego i silnie zawodnionego krasu na pograniczu czapy gipsowej i zwierciadła solnego (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Rozwinięty profil geologiczny szybu Wapno I (Hwałek 1971).
1 – sól kamienna; 2 – gips; 3 – „piasek gipsowy"; 4 – anhydryt; 5 – ił; 6 – piasek; 7 – cement; 8 – szlam gipsowy z cementem; 9 – kawerny i szczeliny wypełnione lodem

Szyb został trzykrotnie zatopiony podczas głębienia. Pierwszy raz uległ zatopieniu w 1912 roku podczas głębienia metodą zwykłą. Na głębokości około 100 m wody z czapy gipsowej wlały się do wyrobiska z wydajnością 4,5 m^3/min, zatapiając je. Drugi raz do zatopienia doszło w 1931 roku, pięć lat po wznowieniu prac w szybie. Głębienie szybu odbywało się z zastosowaniem cementacji otworami z powierzchni i z dna szybu, którymi zatłoczono 16,4 tys. ton cementu. Pomimo to, na głębokości 160 m wdarły się wody, które ponownie zatopiły szyb. Trzeci raz szyb uległ zatopieniu w 1960 roku, na głębokości 170 m.

Ostatecznie szyb osiągnął głębokość 577 m po zastosowaniu w jego głębieniu metody mrożenia. Dopływ wód do szybu po jego ukończeniu w 1964 roku wynosił 2 dm^3/min.

Czwarte zatopienie szybu nastąpiło w 1970 roku podczas prac uszczelniających. Gdy bieżące kontrole dopływu wód w szybie wskazywały wzrost dopływu do 26 dm^3/min na głębokości około 215–230 m, podjęto decyzję o uszczelnieniu obudowy w tej strefie. Podczas uszczelniania podstawowego pierścienia obudowy tubingowej na głębokości około 222 m nastąpił gwałtowny wypływ nisko zasolonych wód przez otwór cementacyjny w tubingu o średnicy 57 mm. Wielkość wypływu oszacowano na 2,5 m^3/min, przy ciśnieniu 2,25 MPa. Po 23 godzinach intensywnej akcji ratowniczej udało się wypływ zredukować do 30 dm^3/min, a po upływie trzech dób całkowicie zamknąć. W czasie awarii do kopalni wlało się około 3500 m^3 solanki o małym stężeniu. W tym samym czasie stwierdzono obniżenie się o kilkanaście centymetrów lustra wody w starym gipsołomie, położonym nad kopalnią na wychodniach czapy gipsowej, co oznaczało, że dopływ do szybu był zasilany bezpośrednio wodami powierzchniowymi. Solanka zatopiła całkowicie rząpie szybu do głębokości 40 m poniżej poziomu IX oraz pobliskie wyrobiska i urządzenia systemu skipowego. Na skutek tego doszło do znacznego rozługowania calizny i w konsekwencji do poważnych uszkodzeń w uzbrojeniu szybu. Roboty eksploatacyjne zostały całkowicie wstrzymane na czas usuwania skutków awarii. Prace remontowe w szybie wymagały około dwóch miesięcy postoju (Kolonko i in. 2014, *Opinia Komisji*… 1970).

Szyb Solno II

Szyb Solno II w kopalni Solno w Inowrocławiu został założony na obszarze zalegania czapy iłowej z cienkim (około 10-metrowym) nadkładem najmłodszych osadów. Zgłębiano go w latach 1956–1960 z zastosowaniem metody mrożenia górotworu i założeniem obudowy tubingowej na stosunkowo krótkim odcinku. W rejonie szybu zasadniczo niezawodniona czapa iłowa była przecięta paroma wąskimi klinami zawodnionych gipsów. Ponadto w czapie występowały wodonośne, skrasowiałe przerosty gipsu grubości 25–75 cm jako pozostałości po warstwach anhydrytu w najmłodszej soli kamiennej (np. anhydryt pegmatytowy). W 1959 roku podczas głębienia, gdy dno szybu znajdowało się na głębokości poniżej 400 m, doszło do wdarcia się wód spoza obudowy i całkowitego zatopienia szybu (Cybulski 1973). Jako przyczynę, oprócz nieszczelności obudowy tubingowej, wskazano m.in. nadmierne rozwiercenie górotworu w sąsiedztwie szybu oraz zniszczenie struktury iłów w efekcie zamrażania i rozmrażania góro-

Zwalczanie wycieku

Już w 1973 roku podjęto prace zmierzające do ograniczenia i likwidacji dopływu. Oprócz zamontowania pompy i zabudowy rurociągu do odwadniania przygotowane zostały projekty tam wodnych. Jednak z powodu trudności związanych z tamowaniem, jako główny sposób likwidacji wycieku przyjęto uszczelnianie strefy wypływu przez zatłaczanie środka uszczelniającego. Były to pierwsze tego rodzaju prace uszczelniające w kopalniach soli w kraju (Kolonko 1973).

Początkowo przypuszczano, że wyciek może być związany z niedokładną likwidacją wiercenia badawczego N1 z powierzchni odwierconego ponad tym rejonem wysadu. Otwór zrekonstruowano i z niego podjęto próbę likwidacji pustki ponad zwierciadłem solnym przez iniekcję, którą wykonywano dwukrotnie w 1975 i 1976 roku, ale bez powodzenia (Kolonko i in. 2014).

Rok przed katastrofą, w sierpniu 1976 roku, podjęto prace likwidacyjne wycieku w komorze 36. Z sąsiednich wyrobisk prowadzono szereg wierceń w celu nawiercenia soli porowatych, jamistych prowadzących ługi i uszczelnienia ich ponad komorą. Otwory nie trafiły jednak w wyraźnie zawodnione warstwy, dlatego żeby je lepiej ukierunkować, 30 m ponad poziomem III wykonano chodnik. Z niego odwiercono dwa otwory, z których jeden nawiercił strefę soli zawodnionych. Cementacja przeprowadzona w otworze powstrzymała dopływ, ale wkrótce, po kilkunastu godzinach w pobliskiej komorze nr 34 pojawił się zwiększony wypływ. Podczas dalszego drążenia chodnika natrafiono na szczeliny z solanką. Dalszymi wierceniami z chodnika i z komory 37 napotykano nowe, szybko powiększające się szczeliny o dużym pionowym zasięgu (sięgające do poziomu IV). Ostatecznie wydatek dopływu wzrósł do katastrofalnych rozmiarów i wszystkie prace zostały przerwane (Kolonko i in. 2014).

Zastosowane sposoby likwidacji dopływu ługów w komorze nr 36 i jej otoczeniu okazały się nieskuteczne i jest wysoce prawdopodobne, że przyczyniły się do przyspieszenia katastrofalnego dopływu. Wskazać tu należy przede wszystkim:

- perforację górotworu w rejonie dopływu licznymi, wielokierunkowymi otworami, mającymi służyć uszczelnianiu górotworu,
- wydrążenie chodnika 30 m ponad komorą, który miał służyć lepszemu ukierunkowaniu otworów uszczelniających,
- stosowanie do uszczelniania niesprawdzonych wcześniej w górotworze solnym substancji (środek chemiczny pod nazwa solakryl) (Kolonko i in. 2014),
- stosowanie zbyt dużych ciśnień podczas zatłaczania substancji uszczelniających, co prowadziło do szczelinowania osłabionego górotworu (Duliński i in. 1998).

Powstrzymanie zniszczeń na powierzchni – sztuczne wspomaganie zatopienia kopalni

Wobec fatalnych zniszczeń na powierzchni podjęta została decyzja o sztucznym „dotopieniu" kopalni w celu powstrzymania drenażu poziomów wodonośnych w nadkładzie

kenozoicznym. Sztuczne zatapianie kopalni rozpoczęto 15 października 1977 roku (70 dni po katastrofalnym dopływie) wodami z pobliskiego Jeziora Czeszewskiego. Słodka woda płynęła rurociągiem, a do kopalni dostawała się otworem wiertniczym. Do kopalni wprowadzono 2,5 mln m^3 wody, która w lutym 1978 roku wypełniła wyrobiska (Kunstman i Urbańczyk 2003). Wówczas stosunki hydrologiczne w otoczeniu wysadu zaczęły powracać do równowagi, ustały też gwałtowne deformacje powierzchni. Wkrótce przystąpiono do usuwania zniszczeń. Jednak powierzchnia terenu w Wapnie deformuje się nadal i od czasu likwidacji szkód w połowie lat 80. ubiegłego wieku powstało kilka nowych zapadlisk (podrozdz. 8.3).

Przyczyny

Katastrofa w Wapnie była gorzką porażką górnictwa solnego w Polsce. Przyczyny katastrofy i sposób zwalczania zagrożenia były przedmiotem dyskusji w świecie nauki i przemysłu przez wiele lat, a początkowo, z powodów społeczno-politycznych dyskusja ta nie mogła odbywać się w pełni jawnie. Do dziś to zdarzenie jest omawiane w publikacjach (np. Kortas i Maj 2014, Ślizowski i Kortas 1980).

W świetle opinii wydanej przez zespół ekspertów cztery miesiące przed zatopieniem kopalni zagrożenie wodne kopalni było skutkiem współoddziaływania bardzo niekorzystnych czynników geologiczno-górniczych (Poborski 1977):

- sytuacji hydrogeologicznej w nadkładzie i czapie wysadu solnego,
- intensywnie rozwiniętych i głęboko sięgających form krasowych poniżej zwierciadła solnego,
- niekorzystnego wpływu zjawisk geodynamicznych wywołanych działalnością górniczą, które swym zasięgiem objęły po części skrasowiałą partię wysadu ponad kopalnią.

Stwierdzono, że czapa gipsowa na wysadzie jest typowym ośrodkiem hydrogeologicznym podatnym na rozwój zjawisk krasowych. Zwierciadło wód w czapie znajdowało się przed katastrofą na głębokości kilku metrów pod powierzchnią. Według ówczesnego rozpoznania kompleksy wodonośne kenozoiczne i mezozoiczne w otoczeniu wysadu stanowiły połączony system hydrauliczny. Na silnie urzeźbionym zwierciadle solnym procesy krasowienia rozwijały się nierównomiernie, rozcinając jego powierzchnię kawernami i kanałami wnikającymi w głąb złoża. Poniżej tej strefy utwory solne zostały pocięte siecią wyługowanych szczelin i mniejszych pustek krasowych zakorzenionych jeszcze niżej w systemie spękań. Takimi procesami została objęta górna północno-zachodnia część wysadu, w której utworzyła się sieć dróg infiltracji od strony obniżonego zwierciadła solnego. W takich warunkach półka bezpieczeństwa nad kopalnią w północno-zachodniej części wysadu miała niewystarczającą grubość i była nieszczelna (rys. 6.11).

7.2. Gazy w kopalniach wysadów środkowopolskich

Gazy oraz niebezpieczne zjawiska towarzyszące ich obecności w kopalni, a przede wszystkim wyrzuty gazów i skał, ujawniły się w wysadach solnych w Inowrocławiu i Kłodawie. Kopalnia w Wapnie okazała się niegazowa. Zagrożenie związane z gazami nasiliło się w latach 50. ubiegłego wieku w obu kopalniach, na skalę niespotykaną wcześniej w górnictwie solnym w Polsce, dlatego też już w połowie lat 50. rozpoczęto badania nad występowaniem gazów i związanym z tym zagrożeniem. W kolejnych kilkunastu latach rozpoznano naturę gazonośności złóż, opracowano metody badawcze, a także sposoby prognozowania zagrożenia i bezpiecznego prowadzenia robót górniczych.

7.2.1. Rodzaje gazów

W wysadach solnych w Inowrocławiu i Kłodawie skład gazów okazał się zróżnicowany. Pierwszą syntetyczną charakterystykę rodzajów gazu dla obu wysadów przedstawiono w 1965 roku (Poborski i Poborski 1965). Wyróżniono wówczas kilka charakterystycznych gazów i ich mieszanin spotykanych w obu kopalniach. Były to:

- węglowodory lekkie, tzn. głównie metan (CH_4), niekiedy z dodatkiem etanu (C_2H_6), którym miejscami towarzyszą cięższe węglowodory gazowe,
- azot (N_2),
- mieszaniny lekkich węglowodorów (metanu) z azotem,
- siarkowodór (H_2S), którego występowanie jest głównie związane z warstwami anhydrytu,
- inne gazy, stwierdzone w nielicznych próbkach i występujące w określonej sytuacji geologicznej, jak np. wodór (H_2),
- ponadto gazy szlachetne, np. hel (He).

Szczególnie wysokie zawartości helu sięgające 0,1% stwierdzono w kilku próbkach skał solnych pobranych w kopalni inowrocławskiej ze strefy wyrzutowej (Poborski i Zieliński 1959).

Obecnie najlepiej zbadany pod kątem gazonośności złoża jest wysad Kłodawy. W złożu występują następujące gazy:

- metan, etan i inne alkany C_xH_y,
- azot,
- siarkowodór,
- dwutlenek węgla,
- tlen,
- gazy szlachetne: argon i hel.

Gazy występują w mieszaninach o różnym udziale poszczególnych składników. Charakterystyczne są mieszaniny metanu i innych węglowodorów lekkich z azotem, z niewielką ilością dwutlenku węgla i gazów szlachetnych. Składnikiem tych mieszanin bywa siarkowodór.

Znane są też niemal samodzielne wystąpienia azotu, metanu, a także mieszaniny gazowe z bardzo dużą ilością siarkowodoru. Według Józefa Bąkowskiego (Bąkowski 1987), największa zmierzona zawartość siarkowodoru w mieszaninie gazów w złożu kłodawskim przekroczyła 44%.

W tabeli 7.1 przedstawiono zakres zawartości gazów występujących w mieszaninach gazowych w północno-wschodniej i południowo-zachodniej części kopalni w Kłodawie, określony na podstawie badań prowadzonych do 1987 roku.

Tabela 7.1

Skład chemiczny mieszanin gazowych w kopalni soli w Kłodawie, określony chromatograficznie (Bąkowski 1987)

Gaz	**Zawartość [% obj.]**	
	część południowo-zachodnia kopalni	**część północno-wschodnia kopalni**
CH_4	6,0–32,7	3,3–58,5
węglowodory cięższe	1,91–4,62	0,45–2,01
N_2	34,1–71,0	34,0–74,3
CO_2	2,0–34,2	2,4–49,0
Ar	1,4–5,2	2,3–6,5
He	0,01–0,06	0–0,13
H_2S	4,9–47,66	0

7.2.2. Sposoby wydzielania się gazów

Występowanie gazów w złożu solnym stwarza poważne zagrożenie dla kopalni. Wynika ono nie tylko z niebezpiecznych właściwości samych gazów, ale ze sposobu ich wydzielania się z calizny do wyrobisk. W kopalniach w Inowrocławiu i Kłodawie zaobserwowano, że gazy wydzielają się na kilka sposobów. W analogii do zjawisk wodnych można tu mówić o zjawiskach gazowych i gazodynamicznych. Obserwuje się:

- powolne odgazowywanie się calizny w świeżo wykonanych wyrobiskach,
- powolne wypływy gazów,
- nagłe wypływy gazów pod ciśnieniem, tzn. wydmuchy gazów zwane fukaczami,
- nagłe wyrzuty gazów i skał o różnym stopniu nasilenia.

Pierwszy z wymienionych wyrzutów gazów i skał był największy z wszystkich notowanych w kopalni. Do wyrzutu doszło podczas drążenia przekopu w południowo-wschodniej części kopalni. Wyrzut nastąpił z czystej soli różowej, grubokrystalicznej. Zostały naruszone też warstwy sąsiednie soli białej i ilastej szarej. Wyrobisko zostało zasypane wyrzuconymi skałami na długości 50 m, miejscami pod sam strop. Urobek został rozrzucony na długości 50 m.

Jamy powyrzutowe mogą przybierać rozmaite kształty (rys. 7.4).

Z powodu poważnego zagrożenia spowodowanego obecnością gazów w złożu, już w pierwszych latach działalności kopalni roboty górnicze prowadzono pod szczególnymi rygorami, m.in. odpalanie materiału wybuchowego odbywało się centralnie z powierzchni, po uprzednim wyjeździe z kopalni załogi i koni.

Rys. 7.4. Jama po wyrzucie gazów i skał z dwiema odnogami o średnicy 1–4 m, kopalnia w Kłodawie (fot. G. Misiek)

Przepisy odnoszące się do profilaktyki zagrożeń wyrzutami gazów i skał, przedstawione w podrozdziale 7.3.2 zostały sformułowane głównie na podstawie doświadczeń zdobytych w kopalni w Kłodawie.

7.4.3. Bituminy w wysadzie Inowrocławia i Kłodawy

Wystąpienia bituminów w wysadzie solnym Inowrocławia znane były od lat 40. ubiegłego wieku. Zaobserwowano wówczas w północno-wschodniej części kopalni kilka wycieków ropy naftowej z soli kamiennej. Były to wycieki kroplowe lżejszych rop

parafinowych, związane z warstwą anhydrytu w utworach starszej w soli kamiennej (Olewicz 1958, Poborski i Werner 1956).

W wysadzie Kłodawy w 1955 roku pojawił się wyciek ropy naftowej podczas rozcinania chodnikami południowo-zachodniej części kopalni. Wyciek pochodził z dość czystej soli z kompleksu starszej soli kamiennej. Była to ropa należąca do lżejszych rop parafinowych (Poborski i Werner 1956). W kolejnych latach podczas prac górniczych stwierdzano obecność węglowodorów ciekłych i gazowych, nagromadzonych głównie w soli kamiennej, anhydrytach i skałach węglanowych. Według obserwacji Józefa Bąkowskiego (Bąkowski 1972, Bąkowski 1987) ropa naftowa w solach występuje w warstwach zropiałej kawernistej soli o grubości kilkudziesięciu centymetrów, wypełnia także systemy szczelin i nasyca sole epigenetyczne. W anhydrytach i skałach węglanowych ropa występuje w drobnych szczelinach, kawernach i porach. Na skutek otwarcia takiego systemu dochodzi do wycieku ropy. Czasem ropa występuje w wyciekach razem z solankami. Do końca lat 80. ubiegłego wieku zarejestrowano 70 wycieków ropy naftowej, przy czym ilość ropy, która wypłynęła z pojedynczych wycieków, sięgała niekiedy kilkuset litrów (Bąkowski 1987).

Występowanie bituminów w kopalni nie jest pożądane. Sole zanieczyszczone bituminami nie spełniają wymagań jakościowych, ponadto mogą z nimi występować węglowodory gazowe. Obecność soli bitumicznych może więc wskazywać także na podwyższoną gazonośność złoża, chociaż w wielu odsłonięciach sole bitumiczne nie są gazonośne. Aby określić zasięg stref soli bitumicznych w kopalni kłodawskiej, wykorzystano zjawisko fluorescencji bituminów, używając przy kartowaniu geologicznym chodników lampy fluorescencyjnej (Bąkowski 1961).

Przy tak wyraźnych objawach ropo- i gazonośności soli w kopalni w Kłodawie przewidywano, że otoczenie wysadu kłodawskiego może okazać się perspektywiczne dla poszukiwań złóż węglowodorów. Najbardziej obiecująca wydawała się północno-wschodnia ściana wysadu (np. Bąkowski i Tokarski 1966, Poborski i Marek 1970). Jednak dotychczas nie napotkano złoża węglowodorów związanego z wysadem. W ostatnich kilkunastu latach podejmowane są nowe badania wyjaśniające genezę i drogi migracji węglowodorów w strukturze Kłodawy (m.in. Czechowski i in. 2011, Toboła 2010, Wesełucha-Birczyńska i Toboła 2016, Wolny i in. 2014).

Jak przedstawiono w rozdziale 3, złoże zostało odkryte wierceniem w 1871 roku i od tego czasu rozpoczęto w wysadzie wydobycie naturalnych solanek z głębokości zwierciadła solnego. Najpierw solankę pompowano z płytkich otworów wiertniczych, potem z płytkich kopalń podziemnych, a następnie zaczęto ją produkować w głębiej posadowionych komorach ługowniczych. Skutkiem wieloletniego sczerpywania solanek z pogranicza czapy gipsowej i zwierciadła solnego, trwającego do 1924 roku, doszło do długotrwałego drenażu i nasilenia krążenia wód w czapie gipsowej wysadu, w nadkładzie i na zwierciadle solnym. Procesy te, spowodowane eksploatacją, przyspieszyły rozpuszczanie soli i gipsu w stropie wysadu, w wyniku czego doszło do osiadania powierzchni i intensywnego rozwoju zapadlisk. W 1909 roku jedno z zapadlisk poważnie uszkodziło nowy kościół pw. Zwiastowania Najświętszej Maryi Pannie, którego budowę ukończono w 1900 roku. Zapadła się północna ściana transeptu wraz z portalem i witrażami (rys. 8.2). Do wypadku doszło podczas nabożeństwa, a jego przebieg był gwałtowny[22].

Rys. 8.2. Kościół pw. Zwiastowania Najświętszej Maryi Pannie w Inowrocławiu uszkodzony z powodu zapadliska w 1909 roku (kartka pocztowa ze zbiorów autorki)

[22] Mieszkaniec Inowrocławia, na kartce pocztowej przedstawiającej to zniszczenie, pisze 11 kwietnia 1909 roku: „Kochany Bracie i kochana Siostro. Przysyłam wam tę fotografię Nowego kościoła, co się stało w Wielki piątek po obiedzie o 4 godzinie. Się zarwała ziemia i ludzie byli w Kościele i ksiądz i się odprawiało ale nikogo nie zabiło bo wszyscy pouciekali. Ja za te kartkę dałem 30 fenigów. Jej nie zgub ino schowaj sobie na pamiątkę [...]. Dzisiaj w starym kościele ludzie płakali i ksiądz na kazaniu też płakał tego nowego kościoła. Tu przed tymi drzwiami to jest taka dziura i woda. Cały mur i drzwi i filary i schody wszystko wpadło i znaku nie masz, wszystko się przepadło” [w tekście wprowadzono zmiany dla jego czytelności, zachowując jednak część oryginalnej pisowni].

W światowym górnictwie solnym znane są trzy sposoby likwidacji podziemnych kopalń soli (Berest i in. 2004, Kunstman i in. 2007):

1) **likwidacja szybów i monitorowanie opuszczonej kopalni** z pozostawieniem niezlikwidowanych wyrobisk,
2) **celowe zatopienie solanką** lub wodą,
3) **wypełnienie (podsadzenie) wyrobisk** materiałem podsadzkowym lub odpadowym.

Wybór sposobu likwidacji kopalni powinien być dokonany na podstawie rozważnych decyzji, z uwzględnieniem warunków geologicznych w złożu i jego otoczeniu, struktury kopalni, stanu zachowania calizn bezpieczeństwa i ochronnych oraz stateczności wyrobisk i pól eksploatacyjnych.

9.1.1. Likwidacja szybów z pozostawieniem niezlikwidowanych wyrobisk

Likwidacja szybów i pozostawienie pustek pod ziemią jest najtańszym i najprostszym sposobem zamknięcia kopalni. Polega na wypełnieniu i uszczelnieniu szybów, jednak nie rozwiązuje problemu obecności pustek pod ziemią. Pozostawione wyrobiska komorowe, chociaż zwykle projektowane tak, aby zachowywały długotrwałą stateczność, ulegają z upływem czasu powolnemu zaciskaniu, a otaczający je górotwór – narastającym deformacjom. Może to prowadzić do utraty szczelności górotworu i uruchomienia dopływu wód spoza złoża. Również zlikwidowane szyby mogą z czasem utracić swą wodoszczelność i stać się drogą migracji wód do kopalni. Niezbędny jest więc ciągły i praktycznie bezterminowy monitoring kopalni. Jeżeli w wyniku monitorowania zostałby wykryty dopływ wód do wyrobisk, to jedynym rozwiązaniem jest uruchomienie przygotowanego uprzednio programu awaryjnego zatapiania kopalni, mającego na celu zmniejszenie szkód górniczych na powierzchni.

Przedstawiony sposób likwidacji jest najmniej kosztowny, ale jego bezpieczne stosowanie ograniczone jest do wyjątkowych warunków górniczych i geologicznych.

Jednym z przykładów tego rodzaju likwidacji jest przypadek zamknięcia kopalni soli w Kanopolis w stanie Kansas w USA (Berest i in. 2004). Kopalnia wydobywająca sól z głębokości 240 m, o objętości pustek 2,3 mln m^3, została zamknięta w 1948 roku. Do czynnej jeszcze kopalni, przez trzy szyby dopływały wody w ilości około 3,6 m^3/h. Szyby zostały zasypane, jednak nie uszczelnione. Monitoringu nie prowadzono. Dopływająca stale woda rozpuszczała sól w otoczeniu szybów i powoli wypełniała wyrobiska, sprężając pozostające w nich powietrze. W 2000 roku w jednym z szybów na skutek rozługowania złoża doszło do zapadnięcia się materiału, którym był zasypany. Wówczas sprężone powietrze z kopalni wyrwało się szybem na powierzchnię. Nad wylotem zlikwidowanego szybu znajdował się skład cegieł należący do fabryki, która została

zbudowana na dawnym placu kopalnianym. Strumień powietrza przez około 20 minut unosił cegły i rozrzucał je po okolicy na wysokość 50 m (Berest i in. 2004).

9.1.2. Likwidacja przez celowe zatopienie kopalni solanką lub wodą słodką

Ten sposób likwidacji polega na wprowadzeniu do kopalni solanki lub wody słodkiej i wypełnieniu nimi wyrobisk. Celowe zatopienie kopalni soli jest w północnych Niemczech obowiązującym, zgodnym z przepisami sposobem likwidacji kopalń soli. Warunkiem jest zachowanie integralności kopalni podczas zatapiania (Rölleke 2000).

Sposób ten został przyjęty na podstawie doświadczeń z licznych katastrof wodnych w niemieckich kopalniach soli potasowych, których konsekwencją były ogromne zniszczenia na powierzchni (Rölleke 2000). Zaobserwowano, że największe i najbardziej rozległe szkody na powierzchni powstawały na skutek nagłego i bardzo silnego drenażu przypowierzchniowych warstw wodonośnych, spowodowanego gwałtownym wdarciem się wód do kopalń. Powierzchnia stabilizowała się dopiero po zatopieniu się wyrobisk kopalni i po powrocie stanu równowagi hydrologicznej w warstwach wodonośnych w otoczeniu złoża (podrozdz. 6.6.1). Stąd też pojawiła się idea jak najszybszego kontrolowanego „dopełnienia" wodami słodkimi wyrobisk kopalnianych, aby zapobiec dalszemu niekontrolowanemu drenażowi warstw wodonośnych i ograniczyć szkody na powierzchni (Kunstman i in. 2007). Tak więc niejednokrotnie celowe zatapianie kopalń było spowodowane niemożliwym do opanowania katastrofalnym dopływem wód.

Wypełnianie wyrobisk solanką przynosi szereg korzyści: nie tylko zapobiega gwałtownemu wtargnięciu wód pozazłożowych do wyrobisk, a w konsekwencji – gwałtownej destrukcji terenu, ale wzmacnia filary i podpiera stropy oraz hamuje konwergencję przez wywieranie ciśnienia hydrostatycznego. Solanka o wysokim stężeniu nie rozpuszcza skał w złożu (albo rozpuszcza w niewielkim stopniu), a więc nie powoduje znacznego osłabienia pozostawionych w złożu filarów. Jest to szczególnie ważne, gdy w złożu występują łatwo rozpuszczalne sole potasowe.

Wypełnianie wyrobisk wodą słodką, chociaż częściowo przynosi podobne skutki jak wypełnianie solanką, niesie poważne ryzyko. Woda słodka rozpuszcza w wyrobiskach podziemnych sól, ługując filary międzykomorowe i półki międzypoziomowe, co może łatwo doprowadzić do zachwiania stateczności i rozwoju deformacji w górotworze, do rozszczelnienia półek i filarów ochronnych, a w dalszej konsekwencji – do wywołania destrukcji powierzchni terenu. Proces ługowania przebiega szczególnie intensywnie, jeśli w złożu występują kompleksy łatwo rozpuszczalnych soli potasowych. Dlatego też o zastosowaniu tej metody można zadecydować po przeprowadzeniu wszechstronnej i szczegółowej analizy warunków geologiczno-górniczych i geomechanicznych w złożu, analizy technologii zatapiania oraz wszystkich możliwych

konsekwencji, jakie może przynieść likwidacja. Zaletą metody są niewielkie w porównaniu z innymi koszty likwidacji.

Obydwie metody nie dają jednak zabezpieczenia przed rozwojem deformacji w złożu, z powodu stałej, chociaż spowolnionej ciśnieniem hydrostatycznym, konwergencji wyrobisk, a także mogących pojawić się wraz z upływem czasu deformacji nieciągłych: łuszczenia filarów, obwałów stropu, osłabienia mechanicznego niektórych skał złoża na skutek nasiąkania wodą lub solanką (skał ilastych, ilasto-solnych i marglistych). Takie deformacje skutkują na powierzchni osiadaniem terenu, powolnym, jednak narastającym z czasem. Obserwuje się je zarówno ponad obszarami górniczymi kopalń zlikwidowanych przez zatopienie, jak i ponad opuszczonymi polami eksploatacyjnymi kopalń otworowych (rozdz. 8).

9.1.3. Likwidacja przez podsadzanie lub wypełnianie wyrobisk

Najbardziej skuteczną dla stabilizacji górotworu metodą likwidacji wyrobisk w kopalni soli jest ich podsadzenie lub wypełnienie materiałem odpadowym. Zastosowanie odpadów jako składników mieszanin podsadzkowych ma uzasadnienie ekonomiczne i jest korzystne dla środowiska naturalnego (usuwanie ich z powierzchni). Użycie w materiale podsadzkowym (wypełniającym) odpadów może być traktowane jako utylizacja lub odzysk odpadów w procesach górniczych albo jako podziemne składowanie odpadów. Rozgraniczenie tych procesów możliwe jest na gruncie formalnoprawnym, zgodnie z przepisami obowiązującymi w danym kraju.

Metoda wypełniania wyrobisk odpadami lub mieszaninami odpadowymi umożliwia połączenie likwidacji kopalni z przemysłowym wykorzystaniem podziemnych pustek. Przynosi szereg korzyści (Korzeniowski i Poborska-Młynarska 2017), takich jak: polepszenie stateczności wyrobisk, zmniejszenie deformacji górotworu, zmniejszenie osiadania terenu, wcześniejsze rozpoczęcie systematycznego procesu likwidacji przestrzeni poeksploatacyjnej i obniżenie kosztów likwidacji kopalni.

Europejskie i światowe doświadczenia ukazują likwidację kopalń soli nie tylko jako problem trudny i obciążający zakłady górnicze w końcowej fazie ich działalności, ale jako szansę ekonomiczną, ekologiczną i społeczną (utrzymanie miejsc pracy) dla tych kopalń, w których geologiczno-górnicze warunki panujące w złożu umożliwiają utylizację odpadów w procesie likwidacji wyrobisk (podrozdz. 9.3, 9.4).

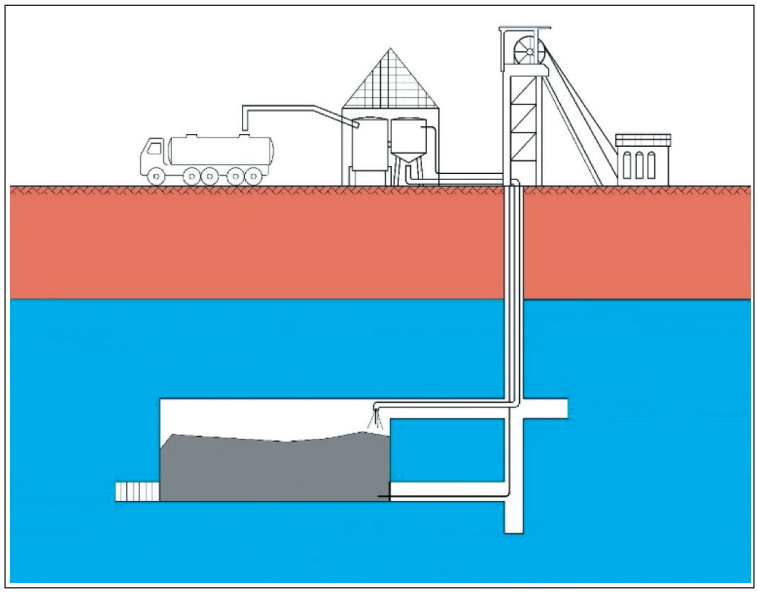
9.2. Likwidacja kopalni Solno w Inowrocławiu przez planowe zatopienie solankami

W polskim górnictwie solnym tylko jedna kopalnia podziemna – kopalnia Solno w Inowrocławiu – została zlikwidowana przez planowe zatopienie. Kopalnia Solno została

Rys. 9.3. Pneumatyczne doszczelnianie rozdrobnioną solą podsadzki układanej (https://www.kpluss.com/en-us/our-business-products/waste-management/underground-recovery/)

Podsadzkę pastową sporządza się z odpadów drobnofrakcyjnych nadających się do pneumatycznego transportu i umożliwiających przygotowanie gęstej, półpłynnej mieszaniny, która twardnieje w podsadzanych wyrobiskach. W specjalnej instalacji w wyrobiskach podziemnych wytwarza się z odpadów mieszaninę podsadzkową, która po umieszczeniu w komorze ulega samozestaleniu bez wydzielania cieczy (rys. 9.4, 9.5).

Jako przykład kopalni, w których likwidację wyrobisk połączono z utylizacją odpadów, przedstawiono dwie kopalnie soli w Niemczech: w Sonderhausen i Bernburgu.



Rys. 9.4. Schemat ideowy technologii podsadzania wyrobisk podsadzką pastową, w której materiałem podsadzkowym są mieszaniny z odpadami (Korzeniowski i in. 2018)

Rys. 9.5. Stanowisko przygotowania podsadzki pastowej
(https://www.kpluss.com/en-us/our-business-products/waste-management/underground-recovery/)

Podziemne składowisko odpadów i zakład podziemnej utylizacji odpadów Glückauf Sondershausen

Kopalnia Glückauf Sondershausen jest najstarszą czynną kopalnią soli potasowych w Niemczech. Została uruchomiona w 1896 roku i przez niemal 100 lat wydobywała sól potasową (Marx i in. 2003, https://www.gses.de). Obecnie kopalnia należy do kompanii Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES). Jest to przedsiębiorstwo zajmujące się głównie podsadzaniem wyrobisk kopalni z użyciem odpadów (podziemna utylizacja), prowadzące w wyrobiskach kopalni podziemne składowisko odpadów oraz zajmujące się wydobyciem niewielkiej ilości soli kamiennej jako soli drogowej.

Kopalnia przez 100 lat swojej działalności rozrosła się do wielkich rozmiarów: obszar kopalni rozciąga się na 20 km wzdłuż i prawie 6 km wszerz. Pionowa rozpiętość wyrobisk sięga od głębokości 600 m do 1000 m pod powierzchnią. Ze względu na deformacje górotworu, wstrząsy sejsmiczne i intensywne osiadanie powierzchni konieczne stało się zabezpieczenie kopalni przez podsadzenie części pól eksploatacyjnych, zwłaszcza tych, które leżą pod zabudowanym terenem (Fliss i in. 2011).

Jako materiał podsadzkowy używana jest sól „podsadzkowa" wydobywana w dalszych polach kopalnianych. Po rozdrobnieniu i zwilżeniu wypełnia się nią komory i wyrobiska korytarzowe. Innym rodzajem jest podsadzka sporządzana z odpadów przemysłowych. Z odpadów tych przygotowuje się trzy rodzaje podsadzki: podsadzkę zwałowaną, podsadzkę w postaci odpadów w workach big-bag i podsadzkę płynną (Fliss i in. 2011, Marx i in. 2003, https://www.gses.de). Od 2006 roku w kopalni funkcjonuje także podziemne składowisko odpadów. Obszar składowiska jest oddzielony od obszaru podsadzania i tworzy oddzielne odizolowane pole składowania. Odpady składuje się w opakowaniach, takich jak: worki big-bag, stalowe beczki i kontenery.