



Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej
Katedra Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców

mgr inż. Dagmara Perżyło

ROZPRAWA DOKTORSKA:

***Model nieustalonych deformacji terenu górniczego
wykorzystujący nową funkcję wpływów uwzględniającą jej
zmiennność w czasie***

Promotor:

dr hab. inż. Roman Ścigała, prof. PŚ

Dyscyplina naukowa:

Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka



Gliwice, 2023

Podziękowanie

*Pragnę podziękować Panu dr hab. inż. Romanowi Ścigale, prof. PŚ
za opiekę promotorską, poświęcony czas, cierpliwość, nieocenioną
pomoc merytoryczną oraz cenne i wnikliwe uwagi w trakcie
pisania niniejszej rozprawy.*

SPIS TREŚCI:

1. WSTĘP	3
2. NIEUSTALONE DEFORMACJE TERENU GÓRNICZEGO W ŚWIETLE LITERATURY	5
2.1. Przegląd wybranych modeli teoretycznych prognozowania nieustalonych deformacji terenu górniczego	5
2.2. Nieustalone deformacje terenu w świetle znanych z literatury analiz wyników pomiarów	18
3. MODEL S. KNOTHEGO PROGNOZOWANIA NIEUSTALONYCH DEFORMACJI TERENU GÓRNICZEGO	22
3.1. Założenia modelu S. Knothego	22
3.2. Prognozowanie nieustalonych deformacji wg rozwiązania S. Knothego w świetle dotychczasowych spostrzeżeń	26
4. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY	27
5. WYKORZYSTANE W PRACY WYNIKI POMIARÓW	29
5.1. Charakterystyka rozpatrywanych linii obserwacyjnych oraz warunków geologiczno - górniczych prowadzonej eksploatacji	30
5.2. Identyfikacja wartości parametrów odpowiedzialnych za opis profilu niecki asymptotycznej	46
6. PROPOZYCJA MODELU PROGNOZOWANIA WYKORZYSTUJĄCEGO FUNKCJĘ WPLYWÓW UJMującą WSPÓLRZĘDNĄ CZASOWĄ	52
6.1. Ogólna koncepcja proponowanego rozwiązania	52
6.2. Charakterystyka modelu bazowego.....	53
6.2.1. Określenie obniżen dla przypadku eksploatacji w kształcie „nieskończonego paska”	58
6.2.2. Określenie obniżen dla pola eksploatacyjnego w kształcie prostokąta	60
6.3. Weryfikacja modelu bazowego na wybranych liniach pomiarowych	62
6.4. Analiza otrzymanych wyników	82
7. KONCEPCJA MODELU ROZSZERZONEGO	88
7.1. Charakterystyka modelu rozszerzonego	88
7.1.1. Określenie obniżen dla przypadku eksploatacji w kształcie „nieskończonego paska”	92
7.1.2. Określenie obniżen dla pola eksploatacyjnego w kształcie prostokąta	92

7.2. Weryfikacja modelu rozszerzonego na wybranych liniach pomiarowych.....	95
7.3. Ocena przydatności modelu rozszerzonego do prognozowania anomalii procesu osiadań związanych z przerwami w eksploatacji	119
8. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW	122
8.1. Jakość analizowanych modeli w świetle przeprowadzonej weryfikacji	122
8.2. Zmienność parametrów uzyskanych w procesie identyfikacji.....	124
8.2.1. Model bazowy	124
8.2.2. Model rozszerzony	128
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	134
10. LITERATURA WYKORZYSTANA W RAMACH PRACY	137
11. DODATEK: CHARAKTERYSTYKA OPRACOWANEGO I WYKORZYSTANEGO W RAMACH PRACY OPROGRAMOWANIA	142
11.1. Narzędzia opracowane w środowisku Wolfram Mathematica	143
11.1.1. Kod źródłowy notatnika dla modelu S. Knothego.....	144
11.1.2. Kod źródłowy notatnika dla modelu bazowego	146
11.1.3. Kod źródłowy notatnika dla modelu rozszerzonego.....	150
11.2. Program Ray - Param	153
11.3. Skrypt Wykres	159

1. WSTĘP

Eksploatacja surowców prowadzona metodami podziemnymi prowadzi zawsze do przekształceń geomechanicznych górotworu w obszarze od stropu eksploatowanego złoża aż do powierzchni. Oddziaływanie to z oczywistych względów ma negatywny wpływ zarówno na górotwór, gdzie zlokalizowane są wyrobiska górnicze wykorzystywane w procesie eksploatacji, jak też i na powierzchnię.

Problemem o istotnej wadze jest bezpośrednie oddziaływanie eksploatacji na powierzchnię, szczególnie w przypadkach jej prowadzenia pod terenami zurbanizowanymi. W takich sytuacjach dużego znaczenia zarówno z punktu widzenia technicznego jak i ekonomicznego nabiera problem tzw. szkód górniczych, rozumianych potocznie jako uszkodzenia obiektów budowlanych wskutek działalności górniczej.

Skutki podziemnej eksploatacji dla środowiska obejmują szerokie spektrum czynników, natomiast najbardziej istotne jest występowanie deformacji ciągłych i nieciągłych oraz wstrząsów górotworu (Kratzsch 1983, Piwowarski i in. 1995, Chudek 2002, Butra i in. 2007, Strzałkowski 2015).

Deformacje nieciągłe wiążą się z przerwaniem ciągłości przypowierzchniowych warstw górotworu, co skutkuje na powierzchni najczęściej występowaniem zapadlisk, szczelin lub stopni terenowych. Z uwagi na losowość tych zjawisk są one trudne do prognozowania, lecz należy zauważyć, że nie towarzyszą one każdej eksploatacji podziemnej - występują one tylko w przypadku zaistnienia sprzyjających warunków.

Deformacje ciągłe obserwujemy na powierzchni w postaci niecek obniżeniowych, których kształt i wielkość zależy od głębokości prowadzonej eksploatacji, kształtu i rozmiaru wybieranych pól oraz od własności górotworu. Deformacje tego typu towarzyszą każdej podziemnej eksploatacji.

Zagadnienie prognozowania deformacji ciągłych było przedmiotem wielu badań od czasów rozpoczęcia intensywnej eksploatacji węgla kamiennego w Europie, czyli od XIX wieku. Zaowocowało to powstaniem wielu modeli prognostycznych, służących ówczesnie przede wszystkim do prognozowania deformacji ciągłych w stanie asymptotycznym, czyli występujących na powierzchni w momencie, kiedy zakończyła się eksploatacja i ustały wszelkie ruchy terenu z nią związane (popularna nazwa to „niecki statyczne”). W Polsce największą popularnością do dzisiaj cieszy się teoria W. Budryka – S. Knothe, opracowana i opublikowana w latach 50-tych ubiegłego wieku (Knothe 1953a).

Odrębnym zagadnieniem, którego wagę dostrzeżono nieco później, jest oddziaływanie eksploatacji w tzw. fazie nieustalonej, czyli głównie w czasie, kiedy eksploatacja jest prowadzona, a niecka obniżeniowa zmienia swój kształt i wielkość wraz z postępującym frontem eksploatacyjnym. Do tej fazy zalicza się także okres końcowy tzw. oddziaływań rezydualnych, kiedy eksploatacja już się zakończyła, natomiast na powierzchni wciąż obserwuje się przemieszczenia. Do prognozowania deformacji nieustalonych w Polsce wykorzystuje się najczęściej model opracowany również przez S. Knothe (Knothe 1953b), a oparty na równaniu różniczkowym opisującym prawo ograniczonego wzrostu. Rozwiązanie to było później przedmiotem wielu modyfikacji, których celem było poprawienie jakości prognoz.

Niniejsza rozprawa doktorska poświęcona została badaniom nad deformacjami ciągłymi w fazie nieustalonej. Efektem końcowym tych badań jest opracowany model prognozowania nieustalonych obniżeń terenu górniczego oparty na założeniu modyfikacji funkcji wpływów teorii W. Budryka – S. Knothe w taki sposób, aby funkcja ta odzwierciedlała proces przyrostu deformacji wraz z upływem czasu dla danego wybranego fragmentu pola eksploatacyjnego. Otrzymane rozwiązanie wraz z opracowanym oprogramowaniem może stanowić narzędzie do predykcji nieustalonych niecek obniżeniowych, pozwalając na osiągnięcie wysokiej jakości prognoz we współczesnych warunkach prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej.

2. NIEUSTALONE DEFORMACJE TERENU GÓRNICZEGO W ŚWIETLE LITERATURY

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd literatury dotyczący szeroko rozumianych zagadnień prognozowania nieustalonych deformacji terenu górnictwa. W rozdziale 2.1 przedstawiono wybrane rozwiązania teoretyczne służące do opisu deformacji terenu górnictwa w nieustalonej fazie, natomiast rozdział 2.2 zawiera informacje dotyczące praktycznych spostrzeżeń znanych z literatury, poczynionych przez różnych autorów na podstawie analiz wyników pomiarów deformacji wywołanych podziemną eksploatacją górnictwa.

2.1. Przegląd wybranych modeli teoretycznych prognozowania nieustalonych deformacji terenu górnictwa

Jednym z pierwszych istotnych rozwiązań dotyczących wpływu czasu na wartości obniżenia terenu górnictwa była propozycja H. Keinhörsta z 1928 roku (Keinhorst 1928). Zaproponował on określanie nieustalonych wartości obniżenia za pomocą zależności (2.1):

$$w(t) = a \cdot g \cdot f \cdot z \quad (2.1)$$

gdzie:

$w(t)$ – obniżenie punktu w chwili t ,

a – współczynnik eksploatacji,

g – miąższość wybieranego złoża,

f – stosunek wielkości wybranej powierzchni złoża w ramach danej strefy wpływów do całkowitej powierzchni strefy wpływów,

z – współczynnik czasu.

W 1931 roku Kołmogorow w pracy (Kołmogorow 1931) zaproponował powiązanie prędkości obniżenia z krzywą nachyleń – pochodną obniżenia po wybranym kierunku:

$$\dot{w}(t) = V \cdot w'(x) \quad (2.2)$$

gdzie:

$$\dot{w}(t) = \frac{\partial w(t)}{\partial t},$$

$$w'(x) = \frac{\partial w(x)}{\partial x},$$

V – prędkość postępu frontu.

S.G. Awierszyn (Awierszyn 1947) zaproponował podobne rozwiązanie, ale oparte na krzywej wykładniczej:

$$\dot{w}(t) = A \cdot \exp(kt'') \quad (2.3)$$

gdzie:

A, k – parametry empiryczne,

t – czas.

W 1948 roku F. Perz (Perz 1948) przedstawił rozwiązanie, które było później inspiracją do dalszych badań prowadzonych przez badaczy w Polsce oraz krajach Zachodniej Europy, głównie w Niemczech. Zaproponował on obliczanie tzw. „obniżeń dynamicznych” w oparciu o następującą zależność:

$$w_{dyn} = \int_0^l z \cdot s' dx \quad (2.4)$$

gdzie:

w_{dyn} – „obniżenie dynamiczne”,

z – współczynnik czasu,

l – wielkość wyeksploatowanej powierzchni pokładu,

s' – wartość maksymalnego nachylenia w nieustalonej niecce obniżeniowej.

Autor zaproponował, aby wartości współczynników z oraz s' określać graficznie na podstawie odpowiednich wykresów, w zależności od rozmiarów dokonanej eksploatacji dla różnych położań punktów.

Kilka lat później opublikowane zostało jedno z najistotniejszych rozwiązań, które zyskało ogromną popularność w Polsce – model zaproponowany S. Knothego (Knothe 1953b).

Rozwiązanie zaproponowane przez S. Knothego bazuje na wykorzystaniu równania różniczkowego opisującego prawo ograniczonego wzrostu w postaci podanej wzorem:

$$\frac{dw(x, p, t)}{dt} = c \cdot [w_a(x, p, t) - w(x, p, t)] \quad (2.5)$$

gdzie:

t – współrzędna czasowa,

p – współrzędna geometryczna rozpatrywanego punktu

c – współczynnik prędkości osiadania (współczynnik czasu),

$w_a(\dots)$ – obniżenie asymptotyczne, jakiego hipotetycznie doznałby punkt na powierzchni, gdyby eksploatacja została zakończona w chwili czasu t

$w(\dots)$ - obniżenie nieustalone w danym punkcie w chwili czasu t .

Z uwagi na fakt, iż model S. Knothego był bazą do opracowania rozwiązania prezentowanego w ramach niniejszej pracy, jego szczegółową charakterystykę przedstawiono w rozdziale 3.

Kolejne rozwiązanie zostało zaprezentowane przez J. Litwiniszyn w pracy (Litwiniszyn 1955), gdzie podano propozycję obliczania przemieszczeń górotworu z uwzględnieniem opóźnienia w ujawnianiu się wpływów. Składowe przemieszczeń dowolnego punktu autor określił, jako funkcje zmienne w czasie i przestrzeni: $u(x,y,t)$, $v(x,y,z,t)$ oraz $w(x,y,z,t)$. Zakładając zasadę zachowania masy oraz przyjmując, że górotwór jest nieściśliwy, sformułował zależność (2.7) w postaci równania różniczkowego cząstkowego, którego rozwiązaniem są składowe wektora przemieszczenia:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

Z uwagi na konieczność identyfikacji dużej liczby parametrów występujących we wzorach zaprezentowane rozwiązanie jest trudne do praktycznego zastosowania.

A. Sałustowicz (Sałustowicz 1957) za określił związek jaki zachodzi pomiędzy wielkością obniżenia w a czasem t w postaci:

$$w(t) = h \cdot (1 - e^{-ct}) \quad (2.8)$$

gdzie:

h – wielkość końcowego (asymptotycznego) osiadania,

e – podstawa logarytmów naturalnych,

c – stała.

Zależność (2.8) została później zmodyfikowana poprzez wprowadzenie dodatkowej stałej g_0 , której wartość zawiera się w przedziale (0,1) oraz stałą czasową t_0 , oznaczającą opóźnienie w ujawnianiu się wpływów. Zmodyfikowaną zależność przedstawia się następująco:

$$w = h \cdot (1 - g_0 \cdot e^{-c(t-t_0)}) \quad (2.9)$$

T. Kochmański rozszerzył propozycję określenia obniżenia punktu w czasie podaną przez S. Knothego, wprowadzając do równania różniczkowego (2.5) dodatkową funkcję $f(t)$ (Kochmański 1956):

$$\frac{dw}{dt} = c \cdot [w_k(t) - w(t)] \cdot f(t) \quad (2.10)$$

K. Wyciśło w swojej rozprawie doktorskiej (Wyciśło 1964) założył, że wielkość osiadania końcowego w_k ulega zmianie w czasie, a także zależy od wielkości pola eksploatacyjnego (2.11).

$$w_k = a \cdot g \cdot \varphi(t) \quad (2.11)$$

gdzie:

a – współczynnik osiadania,

g – grubość eksploatowanego pokładu,

$\varphi(t)$ – funkcja osiadania zależna od kształtu wybieranego pola i jego położenia względem rozpatrywanego punktu:

$$\phi(t) = (1 - e^{-ct}) \frac{e^c - 1}{c} \quad (2.12)$$

W latach 60 XX w. ideę modelu S. Knothego rozszerzył K. Trojanowski (Trojanowski 1964) poprzez modyfikacje równania różniczkowego (2.5) w następującej postaci:

$$\frac{\partial w(t)}{\partial t} = c[w_K - w(t)] \cdot t^{(b-1)} \quad (2.13)$$

Dalsze badania Trojanowskiego doprowadziły do wniosku, że optymalna wartość parametru b w powyższym równaniu wynosi: $b = 2$. Przy tak przyjętym założeniu, uproszczone rozwiązanie równania (2.13) przyjmuje postać:

$$w(t) = w_k \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{ct^2}{2}\right)\right) \quad (2.14)$$

B. Skinderowicz w pracy (Skinderowicz 1971) zaproponował nieco inne podejście, a mianowicie przyjął, że przebieg osiadania punktu w czasie jest zgodny z funkcją osiadań opisaną przez S. Knothego, ale założył przy tym zmieniającą się wartość współczynnika kierowania stropem a_s , wraz z rozwojem frontu eksploatacyjnego:

$$dw = a_s \cdot g \cdot f(x - s) ds \quad (2.15)$$

gdzie:

s – szerokość wyeksploatowanego pola pokładu,

a_s – zmienna wartość współczynnika kierowania stropem,

g – miąższość eksploatowanej warstwy pokładu.

Własną propozycję obliczania nieustalonych wartości wskaźników deformacji podał również Z. Kowalczyk w pracy (Kowalczyk 1972). Zaproponował on, aby wskaźniki

deformacji w stanie nieustalonym obliczać wg podanej zależności (2.16), przy czym funkcja czasu $f(t)$ w tej zależności przedstawiona jest wzorem (2.17).

$$D_d = D_s \cdot f(t) \quad (2.16)$$

gdzie:

D_d – wartość danego wskaźnika deformacji w stanie nieustalonym,

D_s – wartość danego wskaźnika w stanie asymptotycznym,

c – współczynnik czasu,

$f(t)$ – funkcja czasu:

$$f(t) = 1 - e^{-ct} = ct - \frac{c^2 t^2}{2} + \frac{c^3 t^3}{6} \quad (2.17)$$

W 1973 r. T. Lubina w swojej pracy (Lubina 1973) oparł się na założeniach teorii T. Kochmańskiego i przyjął założenie, że w czasie trwania procesu deformacji górotworu w różnych momentach bierze udział coraz większa objętość górotworu. Na tej podstawie zaproponował on nowy model geometrycznego opisu mechanizmu rozchodzenia się wpływów robót górniczych w górotworze opisany zależnościami (2.18) oraz (2.19):

$$dw(P, t) = a \cdot g \cdot f_1(t) \cdot f_2(\lambda) \cdot dP \cdot dt \quad (2.18)$$

$$f_2(\lambda) = c \cdot b(z) \cdot e^{-\frac{\lambda}{r_0(z,y,z,t)} b(z)} \quad (2.19)$$

gdzie:

dw – obniżenie elementarne w badanym punkcie w danym momencie t pod wpływem wyeksploatowanego pola elementarnego dP ,

a – współczynnik kierowania stropem,

g – grubość wybieranej warstwy pokładu,

$f_1(t)$ – funkcja czasu, której wartość zmienia się od 0 do 1,

$f_2(\lambda)$ – funkcja oddziaływania eksploatacji w zależności od odległości badanego punktu od elementarnego pola eksploatacji dP i czasu t ,

c – parametr,

$b(z)$ – parametr teorii T. Kochmańskiego.

K. Greń zaproponował, aby do modelowania wpływu czasu na rozkład deformacji na powierzchni wykorzystać tzw. analog fotoelektryczny (Greń 1973). Urządzenie było swoistym sumatorem wpływów (integrator), działającym w oparciu o zależność:

$$dw = a \cdot g \cdot f(r) \cdot dP \quad (2.20)$$

gdzie:

a – współczynnik osiadania,

g – grubość wybranej partii złoza,

$f(r)$ – funkcja wpływów,

r – pozioma odległość punktu obliczeniowego od wybranego elementu złoza,

dP – elementarne pole wybranego złoza.

W 1974 r. B. Skinderowicz ponownie zajął się analizą współczynnika czasu c , proponując rozwiązanie przedstawione w pracy (Skinderowicz 1974), w której sformułował wzór opisujący profil dynamicznej niecki osiadania (2.21):

$$w(x, t) = \frac{agvC}{r} \cdot \int_{-\infty}^t e^{\frac{-\pi[Cvz - (1-c)r - cx]^2}{r^2}} dz \quad (2.21)$$

$$C = \frac{r}{r + d} \quad (2.22)$$

gdzie:

d – przesunięcie punktu przegięcia niecki dynamicznej w stosunku do krawędzi ściany,

v – prędkość postępu frontu ścianowego,

r – promień rozproszenia wpływów,

x – odcięta dowolnego punktu powierzchni terenu.

A. Sroka w swojej pracy doktorskiej (Sroka 1974) założył, że za posuwającym się frontem eksploatacji górniczej na powierzchni przemieszcza się fala deformacji, której kształt zależy od wartości tzw. „zmiennnej dynamicznej” u wyrażonej zależnością:

$$u = c \cdot \frac{r}{v} \quad (2.23)$$

gdzie:

r – promień zasięgu wpływów,

c – współczynnik czasu,

v – prędkość postępu frontu eksploatacyjnego.

Im mniejsza jest wartość zmiennej dynamicznej u , tym łagodniejszy jest profil fali deformacji. Sroka uznał, iż zasadniczą przyczyną uszkodzeń obiektów jest zbyt duża prędkość eksploatacji górniczej.

Sroka zaproponował również inne rozwiązanie (Sroka 1984) funkcji czasu podane wzorem:

$$f(t) = C \cdot \ln(B \cdot t + 1) \quad (2.24)$$

$$\text{dla } t \leq \frac{\exp(\frac{1}{C}) - 1}{B} \quad (2.25)$$

gdzie:

C, B – parametry.

W swoich kolejnych publikacjach A. Sroka (Sroka 1999) zwrócił uwagę na wpływ zmieniających się warunków geologiczno – górniczych prowadzonej eksploatacji oraz postojów sobotnio – niedzielnych ścian na zmiany w przebiegu osiadania w czasie na powierzchni. Analiza tych zagadnień doprowadziła do nowych wniosków oraz do sformułowania innej postaci funkcji czasu:

$$f(t) = 1 - e^{(-\frac{t}{t_0})^m} \quad (2.26)$$

gdzie:

$$t_0 = \frac{1}{c}$$

m – parametr przyjmujący wartość od 0,1 do 2.

K. Pfläging w pracy (Pfläging 1974) zauważa różnice w kształcie krzywych osiadania punktów w czasie, zależnie od prędkości postępu frontu eksploatacyjnego.

W. Piwowarski w swojej pracy doktorskiej (Piwowarski 1977) przedstawił model opisu przemieszczeń górotworu w stanie nieustalonym. Zaproponował on rozwiązanie oparte na tzw. „modelu adaptacyjnym”, w którym parametr odpowiadający za opis nieustalonej fazy deformacji jest zmienny w czasie – wraz z rozwojem frontu eksploatacyjnego:

$$w_d(t) = F[w_t(t), u(t, \tau)] \quad (2.27)$$

gdzie:

$w_d(t)$ – obniżenie rzeczywiste w chwili t ,

$w_t(t)$ – obniżenie teoretyczne końcowe w chwili t ,

$u(t, \tau)$ – parametr modelu odpowiedzialny za opis deformacji w czasie.

T. Niemiec i W. Radoła w 1981 roku przedstawili oryginalne podejście do prognozowania deformacji (Niemiec, Radoła 1981), w tym ich określania w fazie nieustalonej w postaci modelu odzwierciedlającego w sposób dyskretny wędrówkę pustki poeksploatacyjnej od źródła jej powstania (pokładu), aż do powierzchni. Autorzy wykorzystali analogię przemieszczania się zaburzenia wywołanego eksploatacją elementarnej objętości pokładu do zjawiska błędzenia losowego pustki w przestrzeni górotworu.

A. Sroka oraz F. Schober (Schober, Sroka 1983) zaproponowali, aby do opisu deformacji nieustalonych została użyta funkcja czasu złożona z dwóch funkcji. Funkcje te zostały oparte na założeniach S. Knothego, opisujących: konwergencje wyrobiska górniczego oraz opóźniające działanie nadległego górotworu nad eksploatacją.

K. Pfläging w swojej propozycji (Pfläging 1984) przyjął, że dla stałej prędkości eksploatacji profil dynamicznej niecki osiadania oraz kształt krzywej, która opisuje przebieg osiadania punktu w czasie są jakościowo identyczne. Autor sformułował zależność (2.28) opisującą maksymalną prędkość osiadania punktu w czasie:

$$\dot{w}_{dyn} = \frac{\sigma \cdot v}{0.1R} \cdot w_{max} \quad (2.28)$$

gdzie:

σ – maksymalny względny przyrost osiadania przy przesunięciu frontu eksploatacji o 0.1 R,

R – promień zasięgu wpływów granicznych,

v – prędkość eksploatacji,

w_{max} – maksymalne osiadanie punktu.

W. Piwowarski w 1989 roku przedstawił oryginalną propozycję opisu przemieszczeń pionowych w stanie nieustalonym (Piwowarski 1989). Wykorzystał do tego celu równanie różniczkowe paraboliczne stosowane do opisu procesu dyfuzji, zdefiniowane w przestrzeni czterowymiarowej (x, y, z, t):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \cdot \Delta w + B \cdot \frac{\partial w}{\partial x_2} \quad (2.29)$$

gdzie:

D – współczynnik związany z dyfuzją masy,

Δ – operator Laplace'a,

$B \cdot \frac{\partial w}{\partial x_2}$ – tzw. prąd procesu.

M. Chudek oraz L. Stefański w swojej pracy (Chudek, Stefański 1989) podali wzory umożliwiające obliczenie prędkości osiadania punktów na powierzchni:

$$v_z = v \cdot w_{max} \sqrt{\frac{\gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}}} \cdot \exp \left[\frac{-\pi \cdot x^2 \cdot \gamma_{sr}}{H \cdot R_{rs}} \right] \quad (2.30)$$

gdzie:

v – prędkość postępu frontu,

γ_{sr} – ciężar objętościowy skał,
 R_{rs} – wytrzymałość skał na rozciąganie,
 H – głębokość eksploatacji.

J. Białek w swoim rozwiązaniu (Białek 1991) zaproponował modyfikację wyjściowego równania różniczkowego modelu S. Knothego. Autor doszedł do wniosku, że przy uwzględnieniu czasoprzestrzennego rozwoju eksploatacji można otrzymać dokładniejszy opis procesu obniżen w czasie, zakładając zmienność parametru charakteryzującego nieustaloną fazę deformacji. W tym celu w równaniu S. Knothego stały współczynnik osiadania c zastąpiony został odpowiednią funkcją w następującej postaci:

$$c(t, x, y, h) = C_1 - C_2 \frac{dw_k(t, x, y, h)}{dt} \quad (2.31)$$

gdzie:

C_1, C_2 – parametry, które zostały wyznaczone z pomiarów,
 $\frac{dw_k(t, x, y, h)}{dt}$ – prędkość obniżen, zależna od prędkości eksploatacji.

Zależność (2.31) ujmuje w sposób ogólny zmienność parametru c , gdyż prędkość dw_k/dt jest proporcjonalna do prędkości postępu frontu ścianowego, i jednocześnie maleje wraz z głębokością eksploatacji. Wstawiając zależność (2.31) do równania różniczkowego S. Knothego (2.5) otrzymano opis procesu obniżen w czasie zdefiniowany za pomocą równania:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \left[C_1 - C_2 \frac{dw_k(t)}{dt} \right] [w_{k(t)} - w(t)] \quad (2.32)$$

B. Drzęzła (Drzęzła 1992) zaproponował, aby przy prognozowaniu deformacji w stanie nieustalonym uwzględniać różnice w prędkości rozchodzenia się wpływów w kierunkach: poziomym i pionowym w górotworze, co można ująć zakładając przestrzenną zmienność parametru c . Obrazuje to poniższa zależność podana przez autora:

$$\frac{1}{c} = \sqrt{\left(\frac{\alpha - \alpha_0}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{\beta - \beta_0}{v_2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma - \gamma_0}{v_3}\right)^2} \quad (2.33)$$

gdzie:

α, β, γ – współrzędne rozpatrywanego punktu górotworu w układzie, którego osie pokrywają się z osiami elipsoidy zmian parametru c ,
 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ – współrzędne elementu eksploatacji,

v_1, v_2, v_3 – parametry określające prędkość zmian parametru c w trzech ortogonalnych kierunkach, w miarę oddalania się od wyeksploatowanego elementu pokładu.

W 1995 r. A. Sroka przedstawił kolejne rozwiązanie (Sroka 1995), w którym możliwe jest wyznaczenie dopuszczalnych przerw eksploatacji, gdzie proponowana funkcja czasu ma postać:

$$f(t) = (1 - e^{-\xi t})(1 - e^{-ct}) \quad (2.34)$$

gdzie:

ξ – współrzędna przestrzenna.

J. Kwiatek zaproponował postać funkcji czasu opartą na modelu reologicznym (Kwiatek 1998) o właściwościach ciała Zenera. W swoich rozważaniach przyjął założenie istnienia elementów oddziaływania, które charakteryzują zarówno obniżenie natychmiastowe jak i obniżenie końcowe. Wyeksploatowanie elementarnej objętości pokładu ΔV w czasie τ , autor opisał za pomocą zależności:

$$\Delta w_A = \omega[x(\tau)]\zeta_1(t - \tau)\Delta V \quad (2.35)$$

gdzie:

$x(\tau)$ – położenie x frontu eksploatacyjnego w czasie τ ,

$\zeta_1(t - \tau)$ – funkcja charakteryzująca pełzanie górotworu.

Obniżenie punktu na powierzchni w czasie $t \geq \tau_0$ spowodowane eksploatacją w czasie od $-\infty$ do τ_0 , określona została przez J. Kwiatka na podstawie zasady superpozycji Boltzmanna zależnością:

$$w_A(t) = \int_{-\infty}^{\tau_0} \omega[x(\tau)]\zeta_1(t - \tau)dV \quad (2.36)$$

W 1998 roku P. Strzałkowski opublikował pracę (Strzałkowski 1998), w której zaproponował model bazujący na założeniu zmienności współczynnika czasu zarówno w czasie jak i przestrzeni:

$$\frac{dw(t, x)}{dt} = c(t, x)[w_k(t_k, x) - w(t, x)] \quad (2.37)$$

gdzie:

c – współczynnik czasu zmienny w czasie i przestrzeni: $c = c(t, x)$,

t_k – czas po upływie którego $w(t, x) = w_k(x)$,

x – współrzędne przestrzenne.

Rozwiązanie ogólne równania (2.37), przy założeniu: $c = c(t,x)$, przedstawia zależność:

$$w(t, x) = w_k(t_k, x) + k \cdot e^{-\int c(t,x)dt} \quad (2.38)$$

gdzie:

w_k – końcowe osiadanie punktu zależne od czasu niezbędnego do całkowitego ujawnienia się wpływów eksploatacji danej partii złoża,

k – stała.

R. Ścigała w pracy doktorskiej (Ścigała 1999) analizował przemieszczenia i odkształcenia poziome w nieustalonej fazie deformacji. W pracy tej zaproponował wykorzystanie do prognoz deformacji funkcji czasu w postaci:

$$w(t) = w_k [1 - (1 - p(t) \cdot \lambda) \exp(-\lambda \cdot t)] \quad (2.39)$$

gdzie:

w_k – asymptotyczne przemieszczenie pionowe lub poziome,

$p(t)$, λ – parametry, $p\lambda < 1$,

t – czas.

R. Hejmanowski w pracy (Hejmanowski, 2015) przedstawił uniwersalny model prognozowania deformacji, w którym przyjmuje się podział eksploatowanego złoża na elementarne objętości, co do których zakłada się, że ich wybranie spowoduje na powierzchni niecki elementarne o zmiennej w czasie objętości, którą można określić za pomocą zależności:

$$V_i(t) = V_i^E \cdot \theta(t) \quad (2.40)$$

$$\theta(t) = 1 + \frac{\xi}{\vartheta - \xi} e^{-\vartheta t} - \frac{\vartheta}{\vartheta - \xi} e^{-\xi t} \quad (2.41)$$

gdzie:

$V_i(t)$ – objętość elementarnej niecki będącej efektem wybrania elementarnej objętości złoża,

V_i^E - elementarna objętość złoża,

$\theta(t)$ – funkcja czasu,

ξ – parametr charakteryzujący opóźnienie procesu deformacji z uwagi na charakter skał stropowych

ϑ – parametr charakteryzujący opóźnienie procesu deformacji z uwagi na nadkład, przy czym:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{\vartheta} + \frac{1}{\xi}$$

W pracy (Kowalski 2007) zaproponowano metodykę określania nieustalonych obniżen z wykorzystaniem oryginalnej funkcji wpływów:

$$w(t) = \int_{x_0}^{x_f(t)} agK(x, t - \tau(x)) dx \quad (2.42)$$

gdzie:

$\tau(x)$ – moment wybrania elementarnego pasa w złożu,

$K(\dots)$ – nowa funkcja wpływów o postaci:

$$K(x, t - \tau(x)) = Ae^{-\alpha x^2} T(t - \tau(x)) \quad (2.43)$$

gdzie:

A – stała zależna od położenia punktu P względem dolnej i górnej krawędzi pola eksploatacyjnego,

α – stały współczynnik zależny od promienia rozproszenia wpływów r ,

T – funkcja czasu o własności: $T(\infty) = 1$.

M. Kruczkowski (Kruczkowski 2007) zaproponował uwzględnianie zmiennej wartości współczynnika czasu w zależności od lokalizacji analizowanego punktu na powierzchni w stosunku do położenia elementarnego wybieranego pola. Założył, że zbiór wartości $c(P_i, l_{P_i})$ można opisać funkcją (2.44):

$$c(P_i, l_{P_i}) = P_i \frac{1}{\alpha} \cdot \exp\left[-\pi \frac{l_{P_i}^2}{r_w^2}\right] \quad (2.44)$$

gdzie:

α – parametr, [m^2 doła],

l_{P_i} – odległość geometrycznego środka eksploatowanych pasków elementarnych (opisanych przez dobowe postępy frontu eksploatacyjnego) od badanego punktu, [m],

P_i – dobowy postęp frontu eksploatacji, opisany zbiorem pasków elementarnych aproksymujących fragment eksploatowanego złoża w danym dniu, [m],

r_w – parametr teorii J. Zycha (Zych 1987) opisujący zasięg oddziaływania dla ruchów pionowych (w przypadku teorii S. Knothego $r_w = r$), [m].

Autor podał zależność pozwalającą na obliczanie osiadania w kolejnych dyskretnych chwilach:

$$w(nT) = \sum_{i=1}^n w_{iT}^k \{1 - \exp[-c(P_i, l_{P_i}) \cdot (n - i + 1)T]\} \quad (2.45)$$

gdzie:

w_{iT}^k – osiadanie końcowe wywołane eksploatacją paska elementarnego o powierzchni P_i ,

l_{P_i} – odległość środka ciężkości eksploatowanego i -tego pola od badanego punktu,

$c(P_i, l_{P_i})$ – funkcja opisująca zmienność współczynnika czasu.

P. Sikora w swojej pracy doktorskiej (Sikora 2011), zaprezentował propozycję opisu obniżeń górotworu z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. Komórkowa budowa siatki może w przybliżeniu odwzorowywać przekrój przez górotwór, zaś wymiana informacji między poszczególnymi komórkami w siatce może symulować ruch pustek (wyeksploatowanych partii pokładu) od stropu pokładu do powierzchni. Poszczególnym komórkom w siatce przypisuje się wartość liczbową, która odpowiada, co do wartości objętości wybranego złoża. Iteracyjna symulacja interakcji pomiędzy daną komórką a jej otoczeniem pozwala symulować przebieg procesów deformacyjnych w górotworze, w tym między innymi ewolucję niecki obniżeniowej.

W 2020 roku T. Niemiec przedstawił przekrojową pracę (Niemiec 2020) podsumowującą i rozszerzającą opracowany w latach 80-tych ubiegłego wieku tzw. „model kwantowy” deformacji (Niemiec, Radola 1981). W pracy zawarto m.in. rozważania związane z wpływem czasu na wartości wskaźników deformacji określanych na podstawie modelu bazującego na symulacjach zjawiska błędzenia losowego i teorii automatów komórkowych.

W pracy (Tajduś i inni 2021) przedstawiono propozycję wykorzystania zmodyfikowanej postaci funkcji czasu S. Knothe’a analizy procesu obniżeń po zakończeniu eksploatacji górniczej w postaci (2.46). Propozycja ta została wykorzystana w zagłębiu Ruhry dla oceny oddziaływania jednej ze zlikwidowanych kopalń węgla.

$$w(t) = w(t_1) + [w_e - w(t_1)] * [1 - \exp(-c(t - t_1))], t > T \quad (2.46)$$

gdzie:

t_1 – czas pierwszego pomiaru po zakończeniu eksploatacji,

$w(t_1)$ – obniżenie nieustalone w momencie t_1 ,

T – czas zakończenia eksploatacji,

w_e – obniżenie końcowe.

2.2. Nieustalone deformacje terenu w świetle znanych z literatury analiz wyników pomiarów

Jednym z pierwszych europejskich badaczy, który zajmował się wpływem czasu na przebieg deformacji terenu górniczego był O. Niemczyk (Niemczyk 1949). Na podstawie analiz wyników pomiarów stwierdził on, że wartości stosowanego ówczynie w Niemczech parametru odpowiedzialnego za opis nieustalonej fazy deformacji zależą w głównej mierze od prędkości postępu frontu oraz wielkości parceli eksploatacyjnych.

W Polsce pomiary deformacji terenu górniczego na większą skalę prowadzone były od lat 50. ubiegłego wieku. W latach 60. K. Trojanowski (Trojanowski 1964) na podstawie przeprowadzonych analiz przedstawił następujące spostrzeżenia:

- wraz ze wzrostem prędkości eksploatacji wzrasta prędkość osiadań na powierzchni,
- wartości maksymalnych nieustalonych przemieszczeń są mniejsze od ich wartości ustalonych,
- wartości nieustalonych wartości wskaźników deformacji maleją wraz ze wzrostem prędkości eksploatacji

W cytowanej pracy K. Trojanowski zaproponował ogólną zależność między maksymalnymi deformacjami nieustalonymi oraz ustalonymi w następującej postaci:

$$D_{tmax} = D_{amax} f_D(k) \quad (2.47)$$

gdzie:

D_{tmax} – maksymalna wartość bezwzględna każdego spośród wskaźników deformacji: u , T , ε , K

D_{amax} – maksymalna wartość bezwzględna odpowiedniego wskaźnika deformacji ustalonej,

$f_D(k)$ – współczynnik zależny od czynnika k ,

k – bezwymiarowa wielkość charakteryzująca górotwór, którą można zapisać za pomocą wzoru (2.48):

$$k = \frac{v}{cr} \quad (2.48)$$

gdzie:

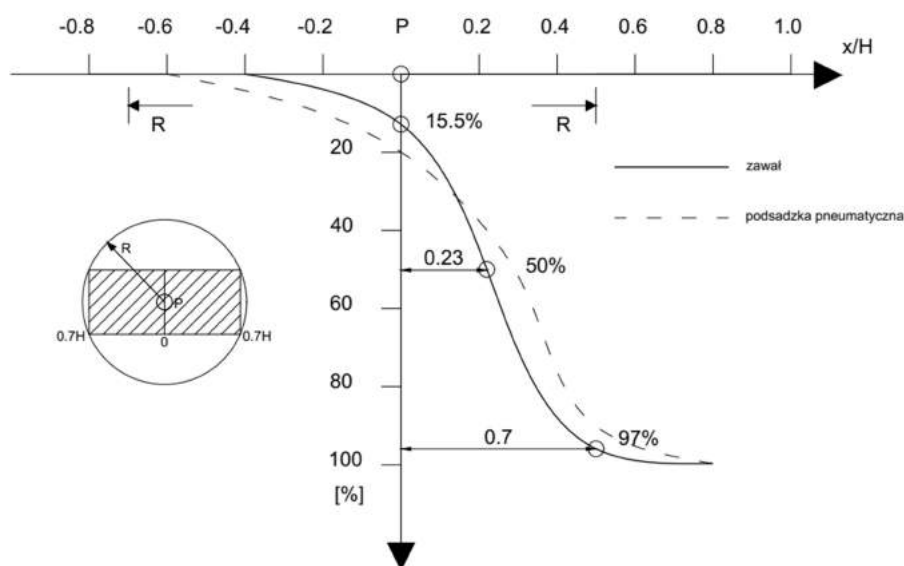
v – prędkość frontu eksploatacyjnego,

r – parametr teorii, promień rozproszenia wpływów.

c – współczynnik czasu.

B. Skinderowicz w pracy (Skinderowicz 1974) przedstawił pogląd, iż kształt dynamicznych niecek osiadania nie zależy od prędkości postępu frontu eksploatacyjnego, lecz tylko od współczynnika czasu c . Co więcej, autor zauważa, że prędkość osiadania punktów powierzchni jest zależna od: promienia zasięgu wpływów głównych, współczynnika czasu, grubości pokładu, współczynnika eksploatacyjnego oraz od szybkości postępu frontu eksploatacyjnego.

Badania nad wielkością osiadania punktu znajdującego się nad krawędzią były również prowadzone w Wielkiej Brytanii przez National Coal Board (Kratzsch 1983). We wnioskach z tych prac stwierdzono, że dla punktów obserwacyjnych położonych nad polem eksploatacyjnym, w przypadku eksploatacji z zawałem stropu obniżenie w momencie, kiedy front eksploatacyjny znajdował się pod danym punktem wynosiło około 15% obniżenia końcowego, a około 50%, gdy front znajdował się w odległości ok. $0.23 x/H$ – rys.2.1.



Rys.2.1. Kratzsch 1983, National Coal Board 1965.

Do podobnych wniosków doszli również naukowcy z byłego ZSRR. W 1984 r. opublikowano spostrzeżenia z analiz wyników pomiarów (Praca zbiorowa 1984), z których wynika, że w chwili, gdy front znajdował się pod punktem obserwacyjnym, jego obniżenie wynosiło około 14% wartości końcowej.

Whittaker oraz Reddish (Whittaker, Reddish 1989) na podstawie analiz wyników pomiarów nieustalonych obniżeń sformułowali następujące wnioski:

- ujawnianie się wpływów na powierzchni wykazuje prawie natychmiastową reakcję na zatrzymanie i rozpoczęcie eksploatacji,

- po zatrzymaniu frontu eksploatacyjnego zanikające obniżenie wynosi około 5-10% obniżenia końcowego.

Podobne spostrzeżenia wynikające z analiz wyników pomiarów deformacji powierzchni nad eksploatacją pojawiły się w Niemczech w 1995 r. (Eichholtz 1995). W pracy stwierdzono, iż powierzchnia terenu reaguje niemal bez zwłoki na postęp lub zatrzymanie frontu ścianowego. Ponadto zauważono, iż powstająca nieustalona niecka jest symetryczna.

J. Białek (Białek 1991) wykorzystał wartości współczynników f_w , f_T , f_K do analizy wpływu prędkości postępu frontu na maksymalne wartości wskaźników w fazie nieustalonej, przy czym współczynniki te zdefiniowane zostały następująco:

$$f_w = \frac{w(x=0)}{w_{max}}, f_T = \frac{T_{max}}{T_{kmax}}, f_K = \frac{K_{max}}{K_{kmax}} \quad (2.49)$$

Na podstawie przeprowadzonych wielowariantowych obliczeń wywnioskował, iż obniżenie nad czynną krawędzią frontu eksploatacyjnego wynosi średnio 18% w_{max} , nachylenia nieustalone w rejonie czynnej krawędzi średnio wynoszą 76% ich wartości końcowych.

A. Kowalski (Kowalski 1995) wraz z zespołem przeprowadził w latach 90. XX w. analizy wyników pomiarów obniżeń prowadzonych w OG kopalni „Staszic”, gdzie eksploatację prowadzono z dużą prędkością do kilkunastu metrów na dobę. Wyniki tych analiz pozwoliły stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości postępu frontu wpływy docierają do powierzchni znacznie szybciej. W takich sytuacjach istotnego znaczenia nabiera wpływ przerw w eksploatacji na czasowe zmiany deformacji na powierzchni. Zmiany te w postaci spowolnienia procesu obniżeń następują maksymalnie do kilku dni od momentu wystąpienia przerwy.

P. Strzałkowski (Strzałkowski 1998) poddał analizie zgodność rozwiązania S. Knothego dla stanów nieustalonych z wynikami pomiarów geodezyjnych. Autor na podstawie przeprowadzonych badań stwierdził, iż wartości współczynnika prędkości osiadania wyznaczone na podstawie obniżeń określonych w kolejnych cyklach pomiarowych są zmienne. Strzałkowski swoje spostrzeżenia wyjaśnia tym, iż proces osiadania przebiega w początkowej fazie wolniej, ponieważ górotwór o nieprzerwanej pierwotnie ciągłości warstw z natury będzie odkształcał się wolniej, niż ten zruszony na skutek oddziaływania przemieszczającego się frontu eksploatacyjnego.

Spostrzeżenia P. Strzałkowskiego potwierdzają również wcześniejsze prace M. Chudka (Chudek 1980), w których autor stwierdza, że prędkość osiadania punktów na

powierzchni jest związana z wytrzymałością skał budujących górotwór od stropu eksploatowanego pokładu aż do powierzchni. W przypadku górotworu zbudowanego ze skał zwięzłych, nienaruszonych wcześniejszą eksploatacją, proces osiadania jest wolniejszy.

B. Dżegniuk i Z. Niedojadło w swojej pracy (Dżegniuk, Niedojadło 1981) na podstawie przeprowadzonych obserwacji geodezyjnych stwierdzili, że współczynnik czasu c zależy głównie od prędkości eksploatacji oraz od parametru charakteryzującego zasięg wpływów.

W latach 2001-2002, zespoły badawcze kierowane przez J. Gustkiewicza, S. Knotheego oraz E. Popiołka (Gustkiewicz i inni 2003) wykonały pomiary geodezyjne, które wskazały na fakt, iż przerwy w prowadzeniu eksploatacji powodowały zmniejszanie a następnie w momencie ponownego uruchamiania wydobywania – narastanie prędkości deformacji powierzchni.

3. MODEL S. KNOTHEGO PROGNOZOWANIA NIEUSTALONYCH DEFORMACJI TERENU GÓRNICZEGO

3.1. Założenia modelu S. Knothego

W rozdziale 2.1 zostały scharakteryzowane wybrane modele służące do prognozowania deformacji terenu górniczego w stanie nieustalonym zarówno opracowane w kraju, jak i za granicą. Jak już to wspomniano, największą popularnością w Polsce cieszy się do dzisiaj rozwiązanie opracowane przez S. Knothego (Knothe 1953a), a następnie rozszerzone przez W. Budryka w zakresie obliczenia przemieszczeń i odkształceń poziomych (Budryk 1953). Rozwiązanie to zostało opracowane dla celów prognozowania asymptotycznych niecek obniżeniowych i nosi popularną nazwę teorii W. Budryka – S. Knothego. Współcześnie w dalszym ciągu rozwiązanie to jest wykorzystywane dla celów prognostycznych w polskim przemyśle wydobywczym. Z uwagi na fakt, iż model ten stanowi podstawę rozwiązania opracowanego w ramach niniejszej pracy, bieżący rozdział został poświęcony właśnie temu rozwiązaniu.

W teorii W. Budryka – S. Knothego, należącej do grupy teorii geometryczno – całkowych, zakłada się, że miarą obniżenia asymptotycznego (końcowego) jest całka z funkcji wpływów obliczoną po rzucie pola wybranej powierzchni na płaszczyznę poziomą. S. Knothe w pracy (Knothe 1953a) zdefiniował funkcję wpływów w oparciu o funkcję gęstości rozkładu Gaussa, odpowiednio ją parametryzując. Dla zagadnienia płaskiego ma ona postać:

$$f(x, s) = \frac{a g}{r} \exp\left(\frac{-\pi(x - p)^2}{r^2}\right) \quad (3.1)$$

gdzie:

x – przestrzenna zmienna niezależna,

p – współrzędna punktu na powierzchni,

r – parametr rozproszenia wpływów głównych,

g – miąższość wybieranej warstwy pokładu.

Stąd obniżenie końcowe dla wybranego fragmentu złoża w przedziale (x_1, x_2) wynosi:

$$w_k(x, s) = a g \int_{x_1}^{x_2} f(x, s) dx \quad (3.2)$$

Jako obniżenie końcowe należy rozumieć jego wartość, jaka wystąpi na powierzchni po teoretycznie nieskończenie długim okresie czasu ($t \rightarrow \infty$).

Jak już wspomniano, rozwiązanie to nie pozwala na bezpośrednie określenie prognozowanego rozkładu obniżeń w trakcie prowadzenia eksploatacji, a także przez pewien czas po jej zakończeniu, kiedy proces deformacji jeszcze się nie zakończył. W celu określenia deformacji terenu w stanie nieustalonym, S. Knothe zaproponował rozszerzenie teorii o zagadnienie zmian deformacji w czasie (Knothe 1953b). W dalszej części pracy sformułowanie "model S. Knothe'ego" będzie używane w stosunku do tego rozwiązania. Do opisu przebiegu deformacji w czasie Autor wykorzystał równanie różniczkowe opisujące prawo ograniczonego wzrostu w postaci podanej wzorem:

$$\frac{dw(t)}{dt} = c \cdot [w_k(t) - w(t)] \quad (3.3)$$

gdzie:

$\frac{dw(t)}{dt}$ – prędkość obniżeń na powierzchni

t – współrzędna czasowa,

c – współczynnik prędkości osiadania (popularnie nazywany współczynnikiem czasu),

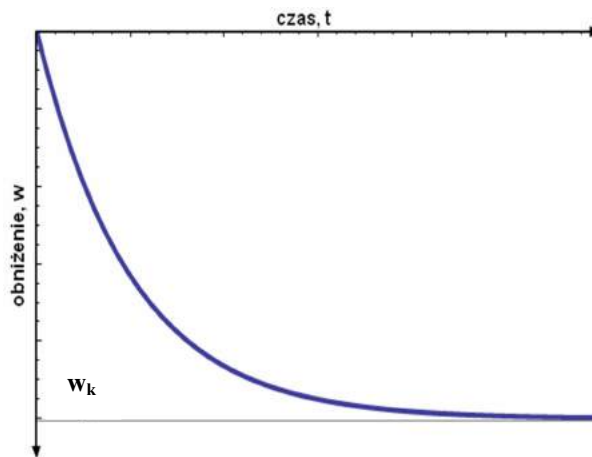
$w_k(t)$ – obniżenie asymptotyczne, jakiego hipotetycznie doznałby punkt na powierzchni, gdyby eksploatacja została zakończona w chwili t ,

$w(t)$ – obniżenie nieustalone w danym punkcie w chwili t .

Autor podał dwa rozwiązania powyższego równania, przy czym pierwsze z nich - uproszczone, znalazło szerokie zastosowanie praktyczne.

Rozwiązanie uproszczone opiera się na założeniu, że fragment pokładu w przedziale (x_1, x_2) został wybrany natychmiastowo (co oznacza, że: $w_k(t)_{t \rightarrow 0} = const.$). Przy takim podejściu rozwiązanie równania (3.12) dla przypadku przestrzennie jednowymiarowego ma postać podaną wzorem (3.4) i przebieg w czasie pokazany graficznie na rys.3.3:

$$w(x, p, t) = w_k(x, p) \cdot [1 - Exp(-ct)] \quad (3.4)$$



Rys.3.3. Teoretyczny przebieg obniżeń w czasie $w(t)$ punktu na powierzchni przy zastosowaniu uproszczonego rozwiązania równania (3.3).

Oczywiście powyższe założenie jest dalekim uproszczeniem zagadnienia i w praktyce nie znajduje uzasadnienia, ale możliwe jest jego zastosowanie np. do tzw. „modelu zdyskretyzowanego” (Knothe 1984, Strzałkowski 1998, Białek 2003, Ścigała 2008). Przy takim podejściu eksploatowane pole pokładu dzieli się na elementarne pola, co do których można z określonym przybliżeniem założyć, że zostały wybrane w czasie zdążającym do zera. Przy takim założeniu można dla każdego elementarnego pola zastosować zależność (3.4) do określania elementarnych obniżeń. Najczęściej przyjmuje się prostokątny kształt pola elementarnego. Stosując następnie zasadę superpozycji wpływów, otrzymuje się przebieg osiadania punktów w czasie zgodny z obserwowanym na drodze pomiarów. Takie podejście ma jeszcze dwa korzystne aspekty praktyczne:

- podział na elementarne prostokąty w kierunku postępu frontu zapewnia naturalne odzwierciedlenie rozwoju frontu eksploatacyjnego w czasie i przestrzeni,
- za pomocą elementarnych prostokątów można z dużą dokładnością aproksymować rzeczywisty kształt pola eksploatacyjnego, który może mieć kształt dowolnego wielokąta.

Drugie rozwiązanie równania (3.3) opiera się na uwzględnieniu faktu, że eksploatacja w rzeczywistości nie przebiega natychmiastowo, a rozwija się stopniowo w czasie (co oznacza, że: $w_k(t)_{t \rightarrow 0} \neq const.$). W takim przypadku rozwiązanie równania jest rozbudowane i ma postać podaną wzorem (3.5). Przebieg osiadania w czasie dla tego rozwiązania pokazany został na rysunku 3.4.

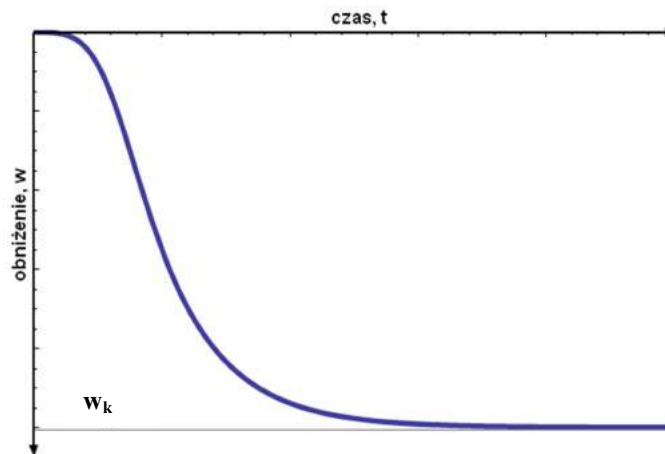
$$w(p, \lambda) = \int_0^t f(\lambda v - p) \cdot v d\lambda - \text{Exp}(-ct) \cdot \int_0^t f(\lambda v - p) \cdot v \cdot \text{Exp}(e\lambda) d\lambda \quad (3.5)$$

gdzie:

v – prędkość postępu frontu,

λ – czasowa zmienna niezależna,

p – współrzędna geometryczna.



Rys. 3.4. Przebieg obniżeń $w(t)$ punktu na powierzchni przy założeniu: $w_k(t)_{t \rightarrow 0} \neq const.$

Podsumowując rozwiązania (3.4) oraz (3.5) należy zauważyć co następuje:

1. Zależność (3.4) cechuje się prostotą obliczeniową, lecz od strony fizycznej jest trudna do uzasadnienia, gdyż wg tej zależności proces obniżeń rozpoczyna się z maksymalną prędkością (największe nachylenie krzywej), co z oczywistych względów nie jest możliwe.
2. Zależność (3.5) daje przebiegi czasowe obniżeń zgodne z obserwowanymi w rzeczywistości z wyraźnie zaznaczonym punktem przegięcia krzywej osiadania w czasie, natomiast nastrocza ona sporo problemów natury obliczeniowej.
3. Wykorzystując algorytmy dyskretyzacji pola eksploatacyjnego i stosując do każdego elementarnego pola prostą zależność (3.4) można uzyskać dobrą zgodność przebiegu osiadania w czasie z przebiegiem otrzymanym za pomocą zależności (3.5).

3.2. Prognozowanie nieustalonych deformacji wg rozwiązania S. Knothego w świetle dotychczasowych spostrzeżeń

Od momentu powstania modelu S. Knothego w latach 50. ubiegłego wieku warunki prowadzonej eksploatacji bardzo się zmieniły; rozwój technologiczny umożliwił znaczne zwiększenie długości ścian, ich wybiegów, ale przede wszystkim prędkości postępu frontu. Należy mieć także na uwadze, że z uwagi na wieloletnią eksploatację doszło do istotnego zruszenia górotworu w obszarach górniczych istniejących kopalń. Spowodowało to niewątpliwie zmianę warunków przejścia deformacji od stropu eksploatowanego pokładu do powierzchni.

Dokonany przegląd literatury dotyczącej modelu S. Knothego oraz przeprowadzone badania własne pozwalają na przedstawienie następujących spostrzeżeń:

- według rozwiązania S. Knothego, wraz ze wzrostem prędkości postępu frontu niecka staje się zdecydowanie bardziej wypłaszczone – maleją wartości nachylenia oraz krzywizny pionowej, czego nie obserwuje się w praktyce (Białek 1991, Sroka 1993).
- wyznaczone wartości współczynnika prędkości osiadania c na podstawie wyników współcześnie prowadzonych pomiarów nieustalonych obniżeń wykazują większe wartości niż sugerowano to wcześniej – S. Knothe podaje przedział zmienności parametru c dla GZW od 0.5 do 7.0 1/rok. Niektóre prace, w których prezentowano wyznaczone wartości c (m.in. Strzałkowski i in. 2020, Ścigała 2002) wskazują na jego wartości odbiegające od sugerowanych przez S. Knothego. Na tej podstawie można stwierdzić, że proces deformacji współcześnie przebiega szybciej, przede wszystkim z uwagi na większy stopień zruszenia górotworu wywołany wcześniejszą eksploatacją.
- prowadzone w ostatnich dekadach szczegółowe pomiary z dużą częstotliwością (m.in. Kowalski 1993, Sroka 1995) pozwoliły stwierdzić, że w przypadku większych prędkości eksploatacji przejście fali deformacji od stropu eksploatowanego pokładu do powierzchni odbywa się bardzo szybko – w przeciągu kilku dni, co wywołuje dodatkowe niekorzystne zjawisko w przypadku przerw w eksploatacji, nawet krótkich, sobotnio – niedzielnych. Mianowicie na powierzchni obserwuje się zmniejszenie prędkości przyrostu deformacji po zatrzymaniu ściany, a później wzrost po jej uruchomieniu (Kowalski 1993, Sroka 1999, Dzegniuk, Sroka 2002). Wyniki innych badań (Ścigała 2007, Strzałkowski 2002) wskazują, że za pomocą modelu S. Knothego nie można uzyskać prawidłowego opisu przebiegu w czasie takich zjawisk.

4. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Dokonane rozpoznanie literaturowe, a także przeprowadzone w ramach pracy analizy stosowanych dotychczas modeli prognozowania deformacji w stanie nieustalonym pozwalają stwierdzić, że rozwiązania te posiadają pewne ograniczenia, które wpływają na jakość wyników prognoz we współczesnych warunkach prowadzenia eksploatacji.

Mając powyższe na uwadze można przedstawić następującą tezę pracy:

Możliwa jest poprawa jakości opisu obniżeń terenu górniczego w stanie nieustalonym poprzez zastosowanie do prognoz modelu wykorzystującego zmienną w czasie funkcję wpływów.

Celem pracy było udowodnienie powyższej tezy poprzez opracowanie i weryfikację nowego modelu prognozowania nieustalonych deformacji terenu górniczego pozwalającego na uzyskanie poprawy jakości opisu rozkładu obniżeń w czasie.

Mając na uwadze zdefiniowaną powyżej tezę i cel pracy, przyjęto i zrealizowano następujący zakres prac:

- Przegląd polskiej i zagranicznej literatury dotyczącej nieustalonych deformacji terenu górniczego.
- Zgromadzenie dostępnych wyników pomiarów geodezyjnych nieustalonych deformacji terenu górniczego, niezbędnych do przeprowadzenia analiz w ramach pracy.
- Analiza możliwości wykorzystania funkcji wpływów teorii W. Budryka – S. Knothego do modyfikacji zgodnie z przyjętą tezą pracy.
- Badania nad ustaleniem postaci zmodyfikowanej funkcji wpływów – analiza wybranych funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa pod kątem możliwości ich wykorzystania.
- Opracowanie modelu umownie nazwanego modelem „bazowym”, dla celów wstępnej weryfikacji celowości dalszych prac.
- Opracowanie niezbędnego oprogramowania służącego do identyfikacji wartości parametrów zaproponowanego modelu.

- Opracowanie modelu „rozszerzonego” na bazie wniosków wynikających z weryfikacji modelu „bazowego”. Model ten stanowi ostateczne rozwiązanie zaproponowane w ramach pracy.
- Analiza otrzymanych wyników oraz sformułowanie wniosków końcowych.

5. WYKORZYSTANE W PRACY WYNIKI POMIARÓW

W ramach niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów geodezyjnych wysokościowych z linii obserwacyjnych zlokalizowanych na terenach górniczych kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Z uwagi na fakt, iż do analiz niezbędne było wykorzystanie wyników pomiarów obniżeń w nieustalonej fazie deformacji, ich selekcja była obciążona specyficznymi wymaganiami, takimi jak:

- duża częstotliwość pomiarów, aby można było zaobserwować rozwój obniżeń w czasie,
- analizowane wpływy na powierzchni powinny być wywołane eksploatacją pojedynczego pola eksploatacyjnego,
- na uzyskane wyniki pomiarów deformacji nie powinny mieć wpływu żadne inne czynniki poza eksploatacją górnictw,
- do analiz przewidzianych w ramach pracy powinny być uwzględniane punkty obserwacyjne zlokalizowane nad polem eksploatacyjnym (Kruczkowski 2016, Perżyło, Ścigała 2018).

Dla celów niniejszej pracy przeanalizowano wyniki pomiarów geodezyjnych z ponad 20 linii obserwacyjnych, jednak biorąc pod uwagę wymienione wyżej wymagania zostały wyselekcjonowane do dalszej analizy następujące linie pomiarowe:

- linia B-L z terenu KWK „Dębieńsko”,
- linie 2, 4a i 5a z terenu KWK „Jan Kanty”,
- linia nr 1 oraz nr 3 z terenu KWK „Czeczott”,
- linia nr 1 z terenu KWK „Staszic”,
- linia nr 1 z terenu KWK „Siersza”,
- linia ul. Bławatkowa z terenu KWK „Jankowice”.

5.1 Charakterystyka rozpatrywanych linii obserwacyjnych oraz warunków geologiczno - górnictwa prowadzonej eksploatacji

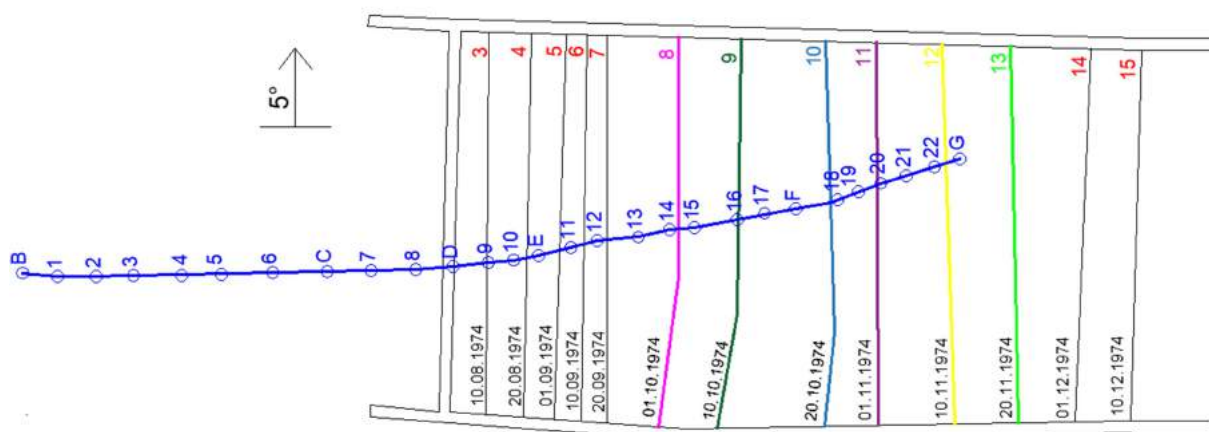
Linia B-L z terenu KWK „Dębieńsko”

Linia obserwacyjna składała się z kilkunastu punktów obserwacyjnych zlokalizowanych w odległości około 15 m od siebie. Linia przebiegała równoległe do kierunku eksploatacji. Linia B-L przebiegała z północy na południe wzdłuż ul. Szkolnej oraz przez tereny rolne.

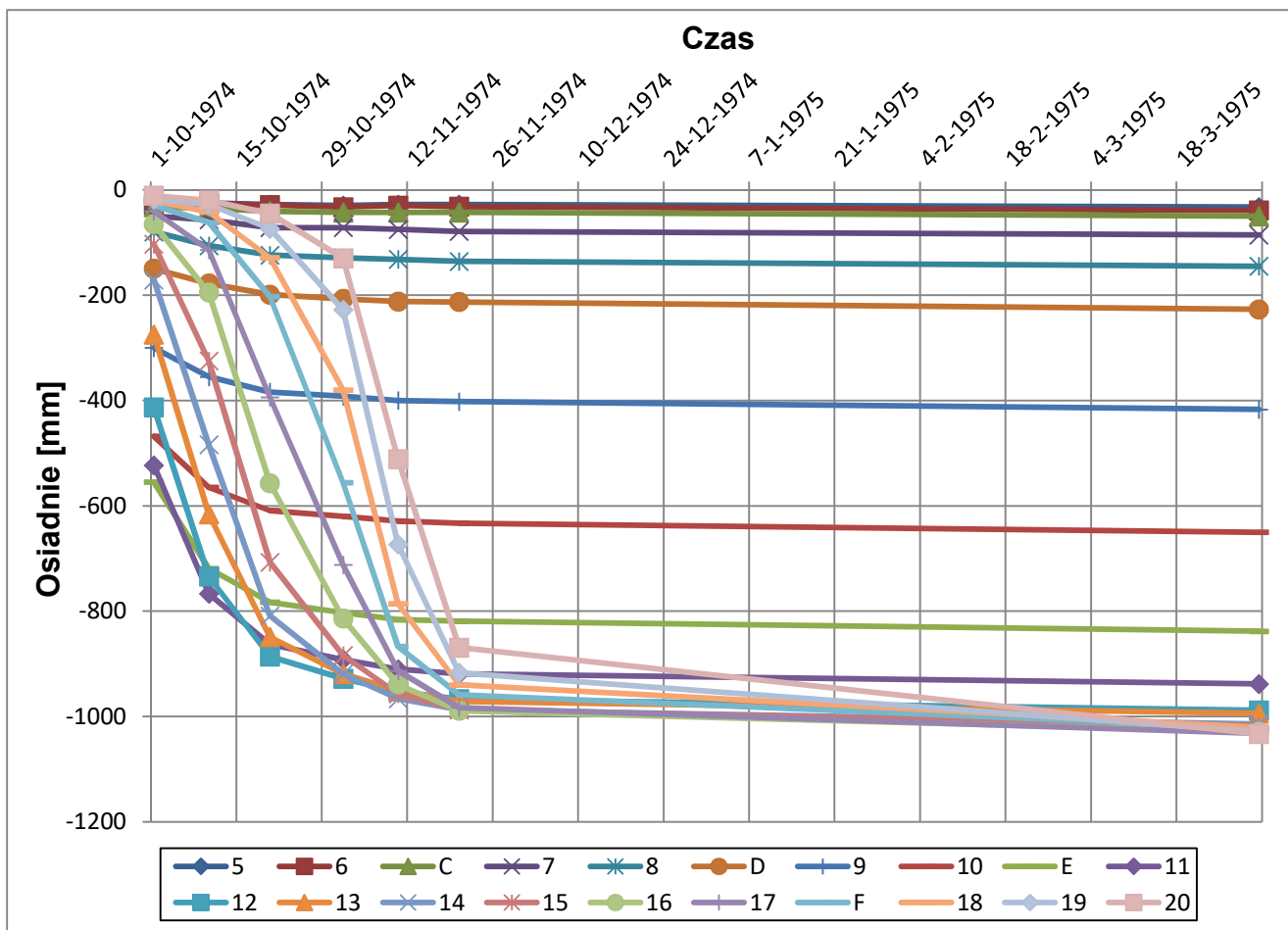
Pod linią obserwacyjną prowadzono eksploatację pokładu 326/5 systemem ścianowym z zawałem stropu, przy średniej miąższości 1.3 m. Średnia głębokość pokładu w rejonie linii wynosiła około 160 m, a kąt upadu wynosił 5° . Prędkość postępu frontu eksploatacyjnego była zmienna i wahała się od 1.5 m/dobę do 4.5 m/dobę.

Nadkład o średniej miąższości 55 m tworzą warstwy: piasku, gliny i mułu marglistego. Masyw skalny składa się z utworów karbońskich, w którym pokłady węgla z grupy „orzeskiej” występują naprzemienne z warstwami łupków ilastych i drobnoziarnistego piaskowca.

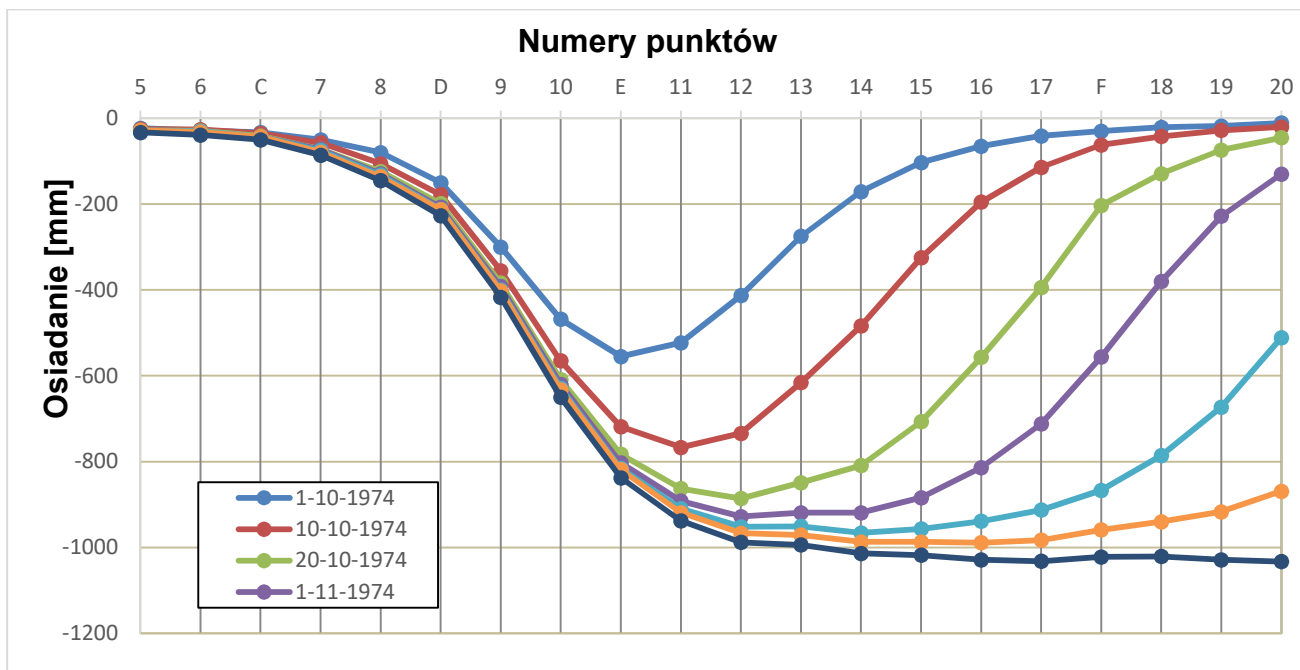
Lokalizację linii obserwacyjnej w stosunku do eksploatacji przedstawiono na rysunku 5.1. Na rys. 5.2. przedstawiono wykresy osiadania punktów w czasie, a na rys. 5.3 profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych.



Rys.5.1. Lokalizacja linii obserwacyjnej B-L KWK Dębieńsko w stosunku do eksploatacji górnictwa.



Rys.5.2. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii B-L KWK Dębieńsko.



Rys.5.3. Profile niecek obniżeniowych na linii B-L KWK Dębieńsko w wybranych cyklach pomiarowych.

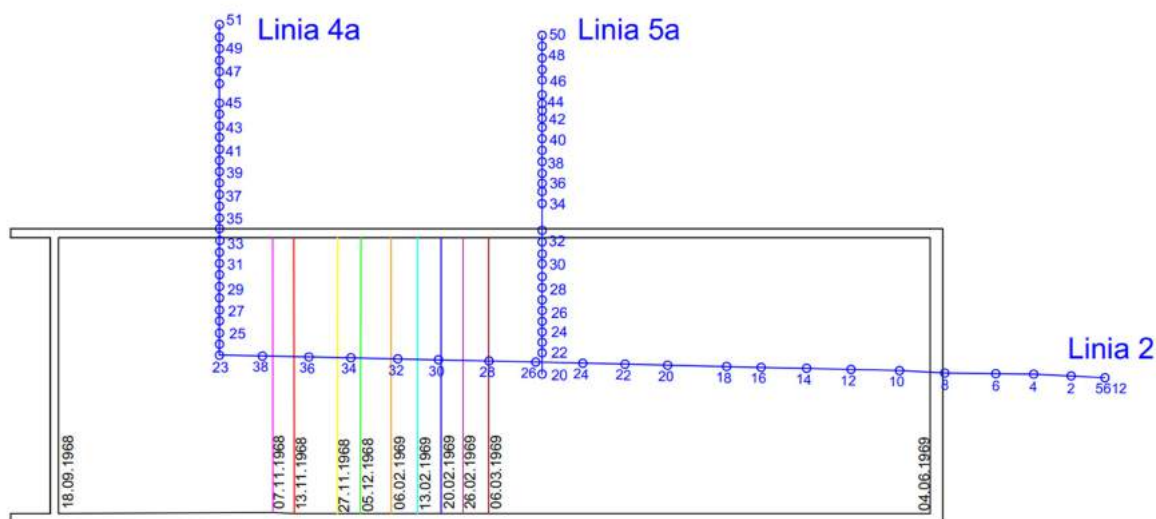
Linia 2, 4a i 5a z terenu KWK „Jan Kanty”

Linie obserwacyjne 4a oraz 5a składały się z punktów ziemnych zastabilizowanych średnio co 5 m, a pomiary wykonywane były cyklicznie, co 7 dni. W przypadku linii obserwacyjnej numer 2 punkty znajdowały się w odległości ok. 20 m od siebie, a pomiary wykonywano cyklicznie, co około 20 dni. Linie obserwacyjne 4a jak i 5a zostały zlokalizowane prostopadle do prowadzonej eksploatacji, zaś linia 2 – równoległe do kierunku wybierania złoża.

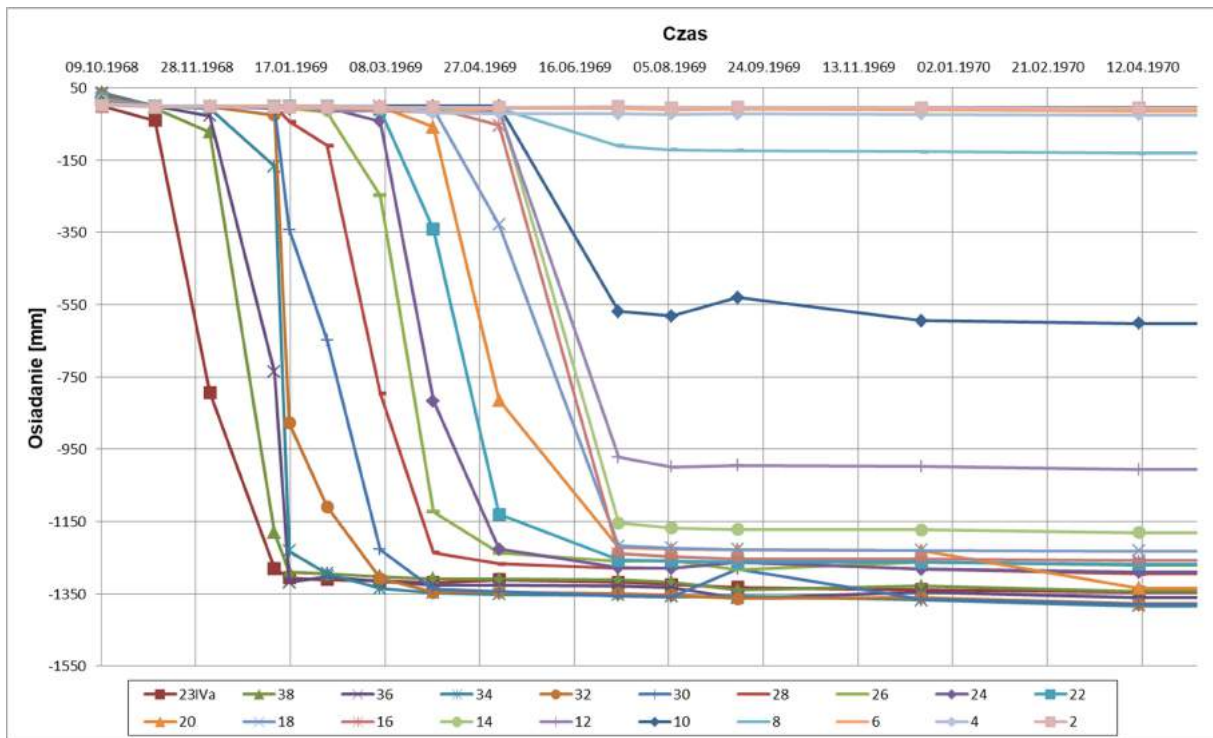
Pod liniami obserwacyjnymi prowadzona była eksploatacja górnicza w pokładzie 324/1, na średniej głębokości wahającej się od 64 m do 84 m. Eksploatacja prowadzona była z zawałem stropu. Prędkość postępu frontu była w przybliżeniu stała i wynosiła około 1.4 m/dobę.

Górotwór w rejonie linii zbudowany jest nadkładu o miąższości około 5 m, w którym przeważają warstwy piasku oraz z karbonu, gdzie występują warstwy łupków piaszczystych, piaskowców oraz łupków ilastych. Kąt upadu warstw wynosi 7°.

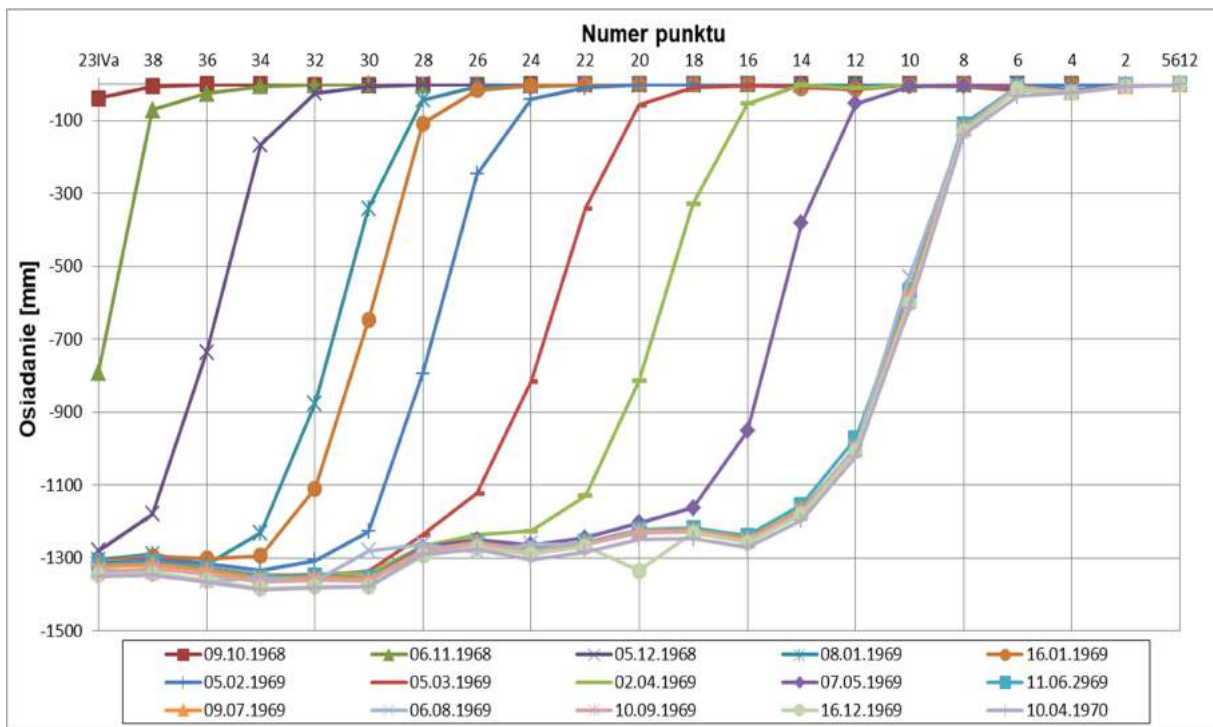
Schemat lokalizacji linii względem eksploatacji pokazano na rysunku 5.4. Poniżej znajdują się wykresy osiadania punktów w czasie oraz profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych dla poszczególnych linii: nr 2, nr 4a oraz nr 5a (rys. 5.5-5.12).



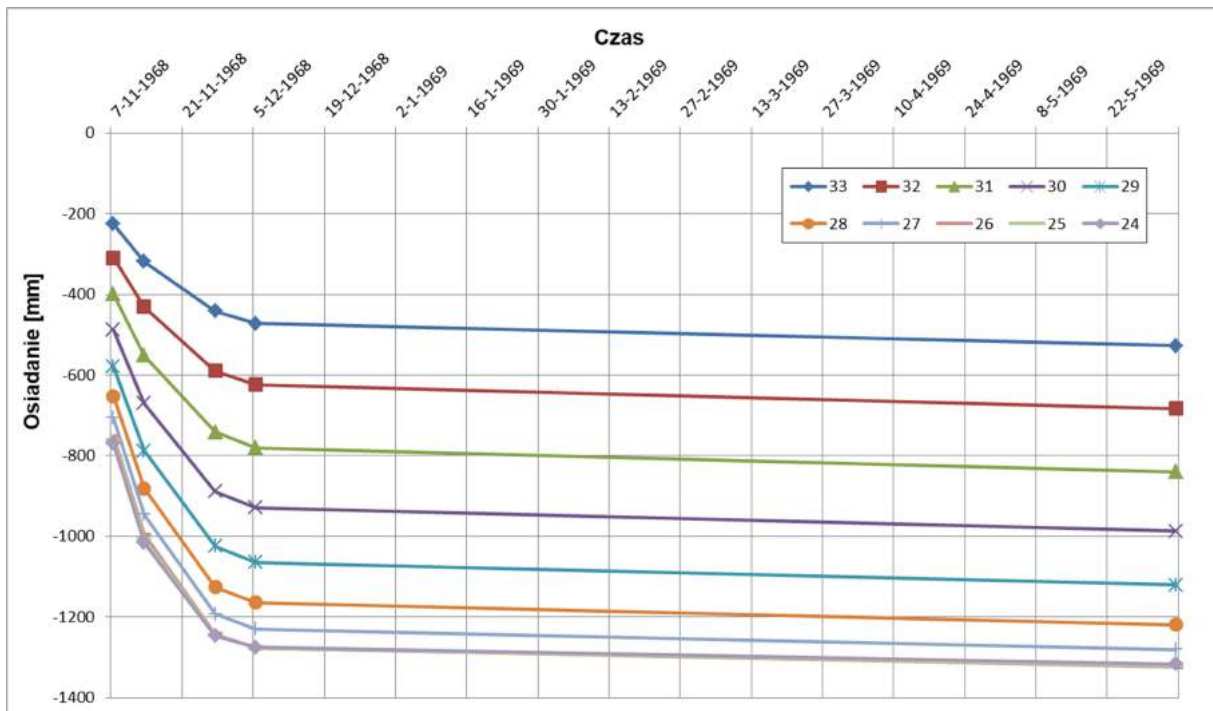
Rys.5.4. Lokalizacja linii obserwacyjnych: 2, 4a oraz 5a KWK Jan Kanty w stosunku do eksploatacji górnicznej.



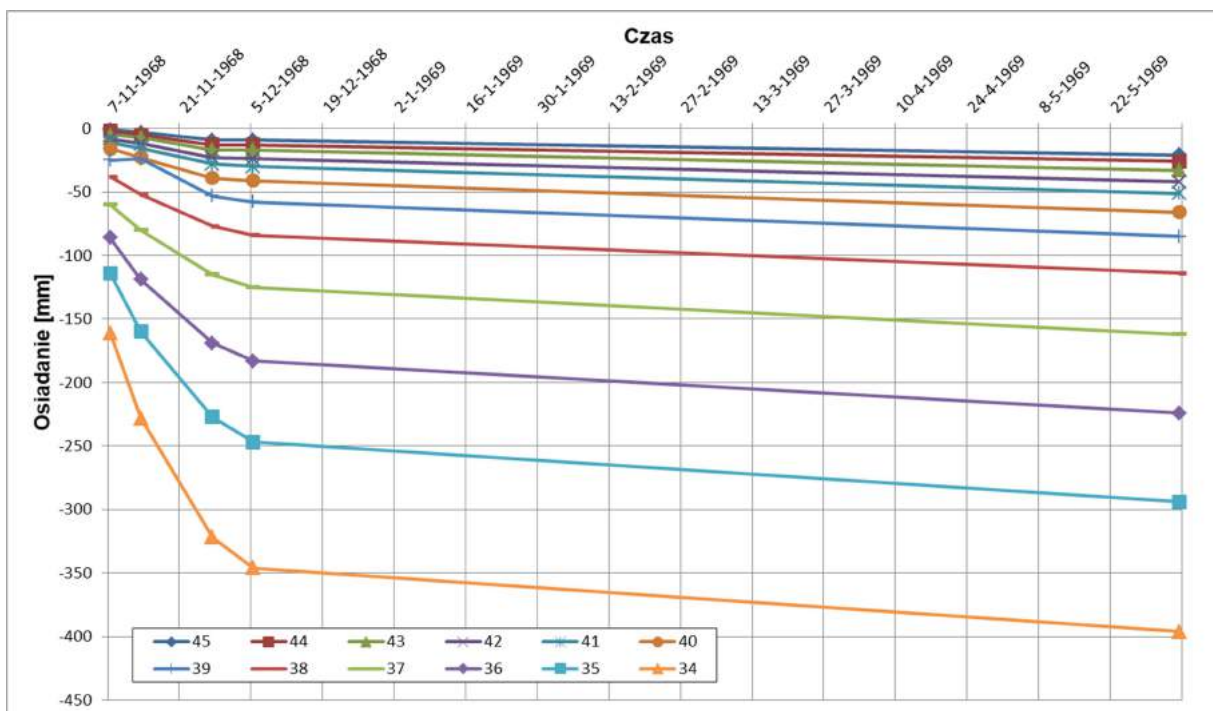
Rys.5.5. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 2 KWK Jan Kanty.



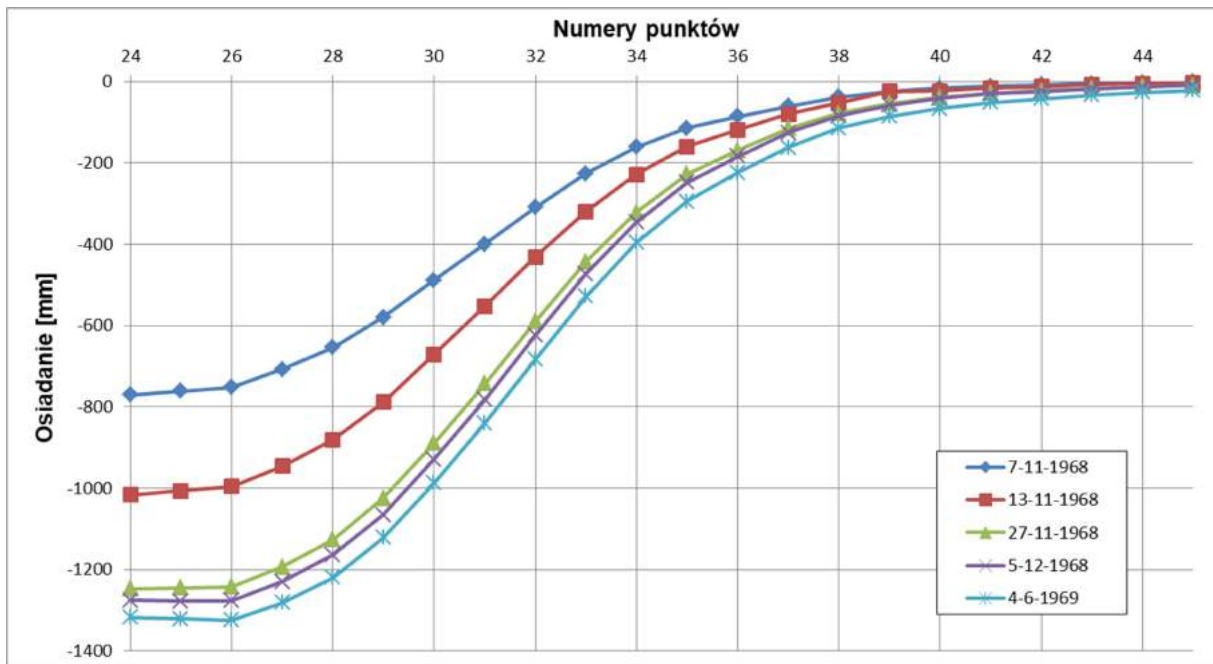
Rys.5.6. Profile niecek obniżeniowych na linii 2 KWK Jan Kanty w wybranych cyklach pomiarowych.



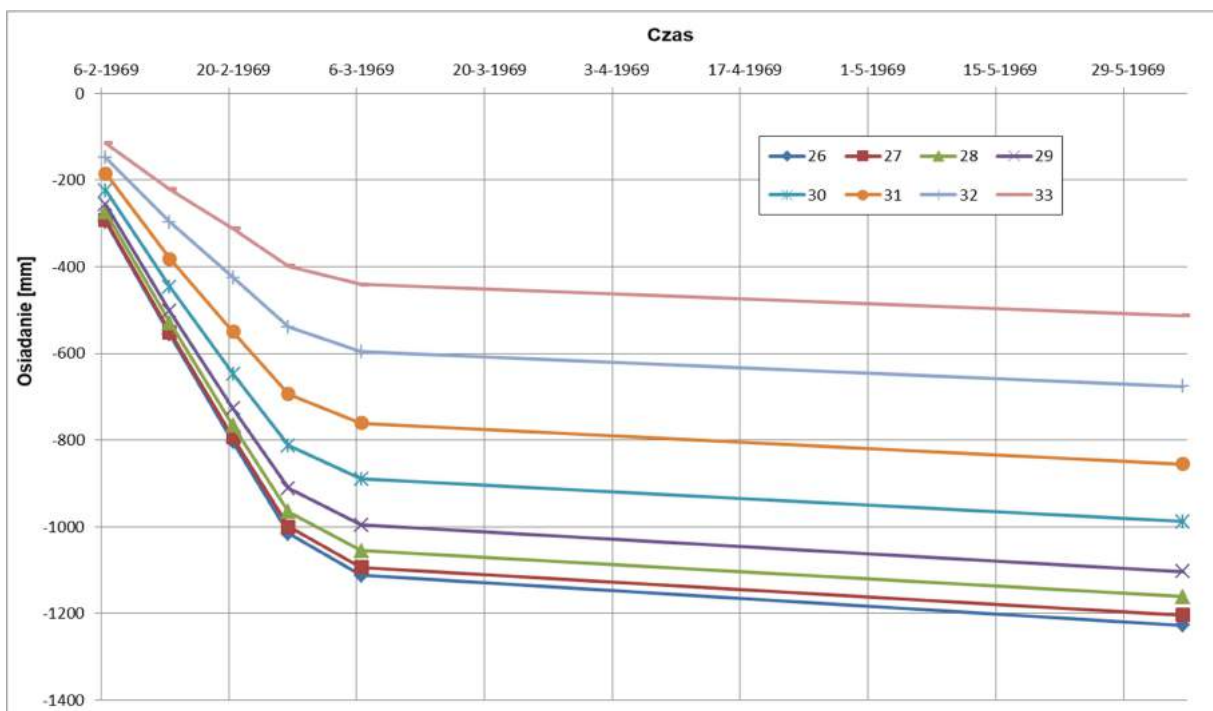
Rys.5.7. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 4a KWK Jan Kanty.



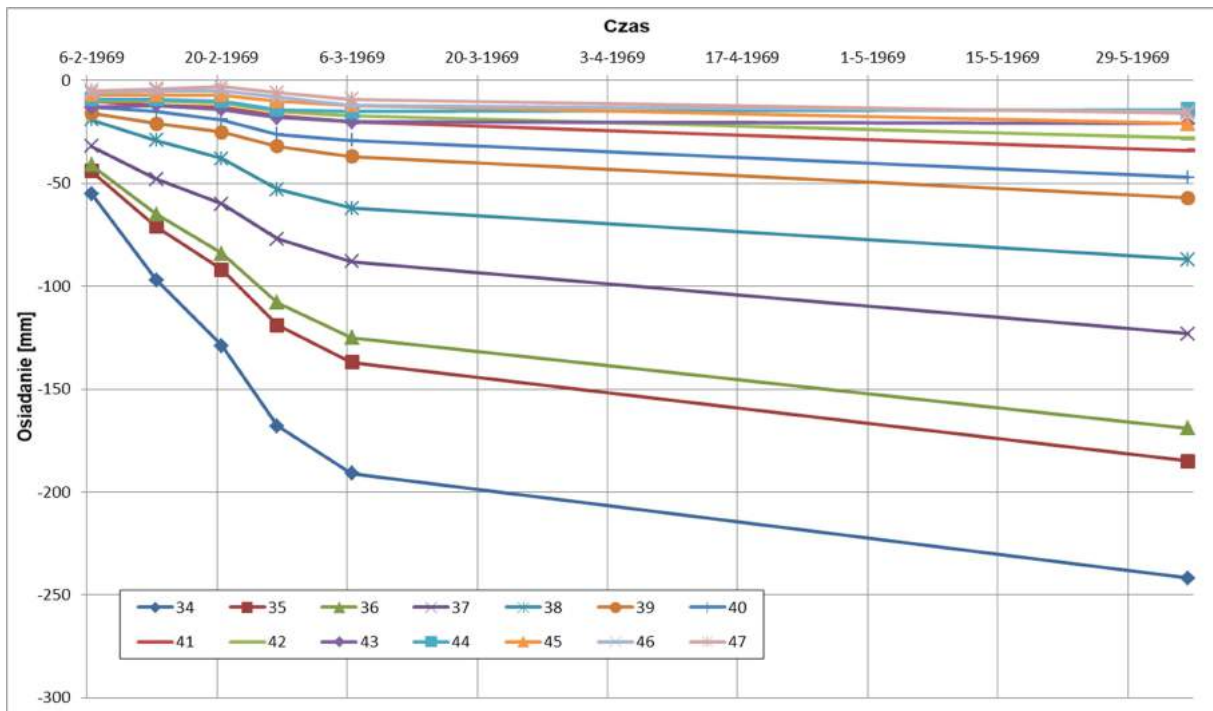
Rys.5.8. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 4a KWK Jan Kanty.



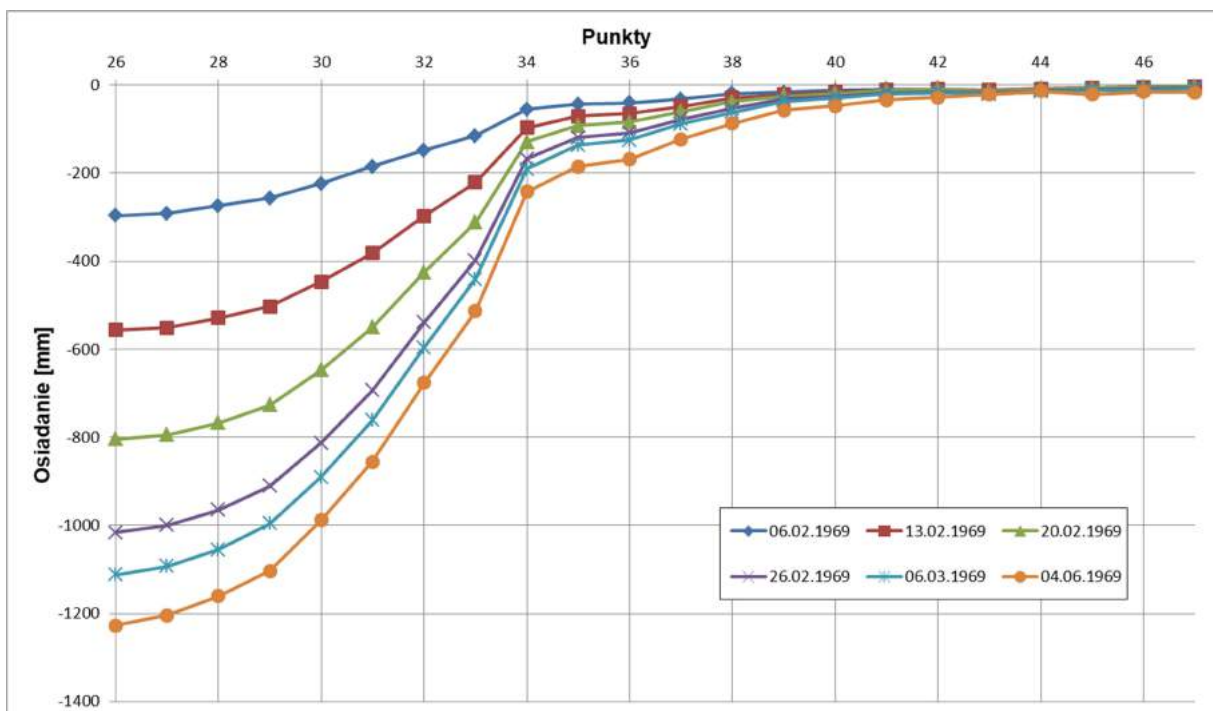
Rys.5.9. Profile niecek obniżeniowych na linii 4a KWK Jan Kanty w wybranych cyklach pomiarowych.



Rys.5.10. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 5a KWK Jan Kanty.



Rys.5.11. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 5a KWK Jan Kanty.



Rys.5.12. Profile niecek obniżeniowych na linii 5a KWK Jan Kanty w wybranych cyklach pomiarowych.

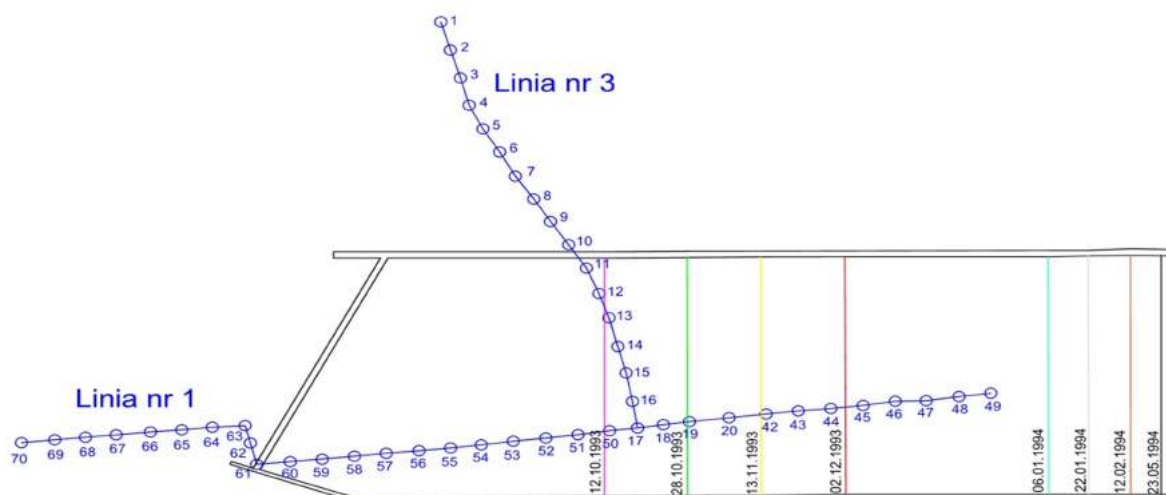
Linia nr 1 oraz linia nr 3 z terenu KWK „Czczott”

Linie obserwacyjne składają się z kilkunastu punktów ziemnych zastabilizowanych średnio, co 30 m. Pomiary sytuacyjno-wysokościowe prowadzone były co 14 dni za pomocą niwelacji technicznej. Linia nr 1 przebiega równoległe do kierunku wybierania złoża, zaś prostopadle do niej przebiega linia nr 3, a punkt pomiarowy nr 17 jest wspólnym punktem dla obu linii.

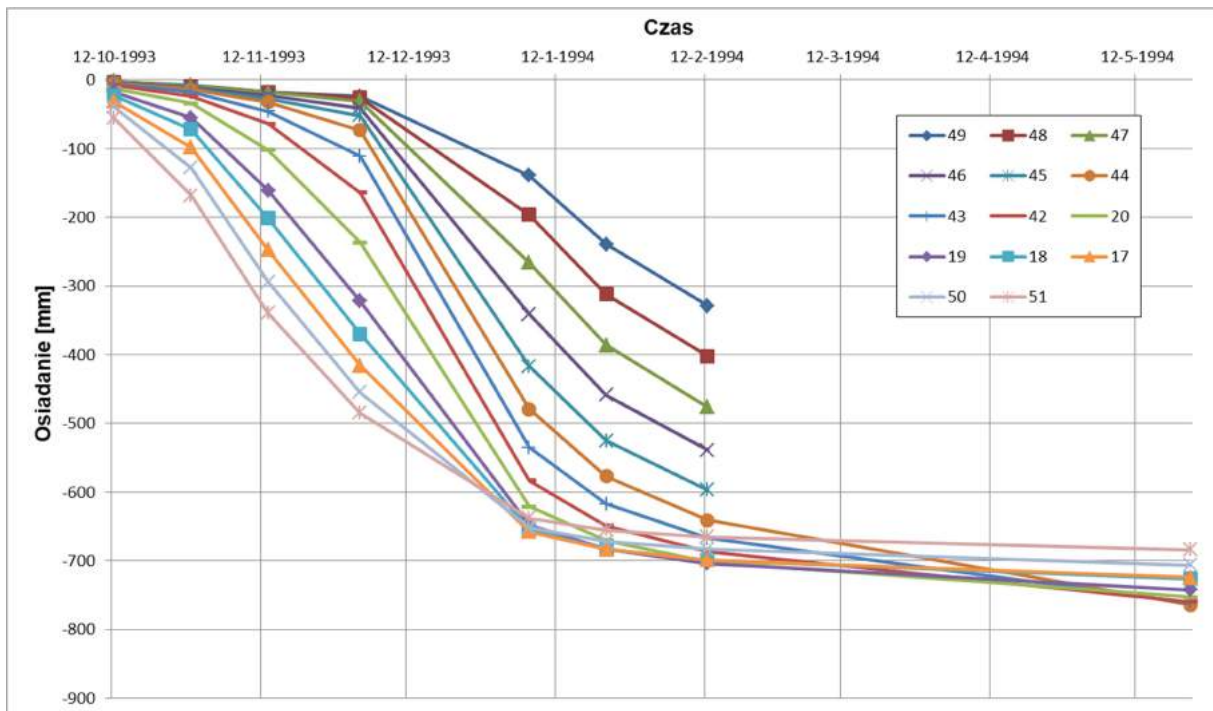
Pod liniami obserwacyjnymi prowadzono eksploatację pokładu 207 systemem ścianowym z zawałem stropu, przy średniej miąższości 2.7 m. Średnia głębokość pokładu w rejonie linii wynosiła około 500 m, a kąt upadu wynosił 10°. Prędkość postępu frontu eksploatacyjnego była zmienna i wahała się od 1.5 m/dobę do 5.5 m/dobę, średnia wartość wynosiła 3.5 m/dobę.

Nadkład o średniej miąższości około 15 m tworzą warstwy czwartorzędu (piasek, glina) oraz warstwy trzeciorzędu o miąższości około 170m zbudowane głównie z iłów i iłowców. Karbon zbudowany jest z warstw iłowców, mułowców oraz piaskowców.

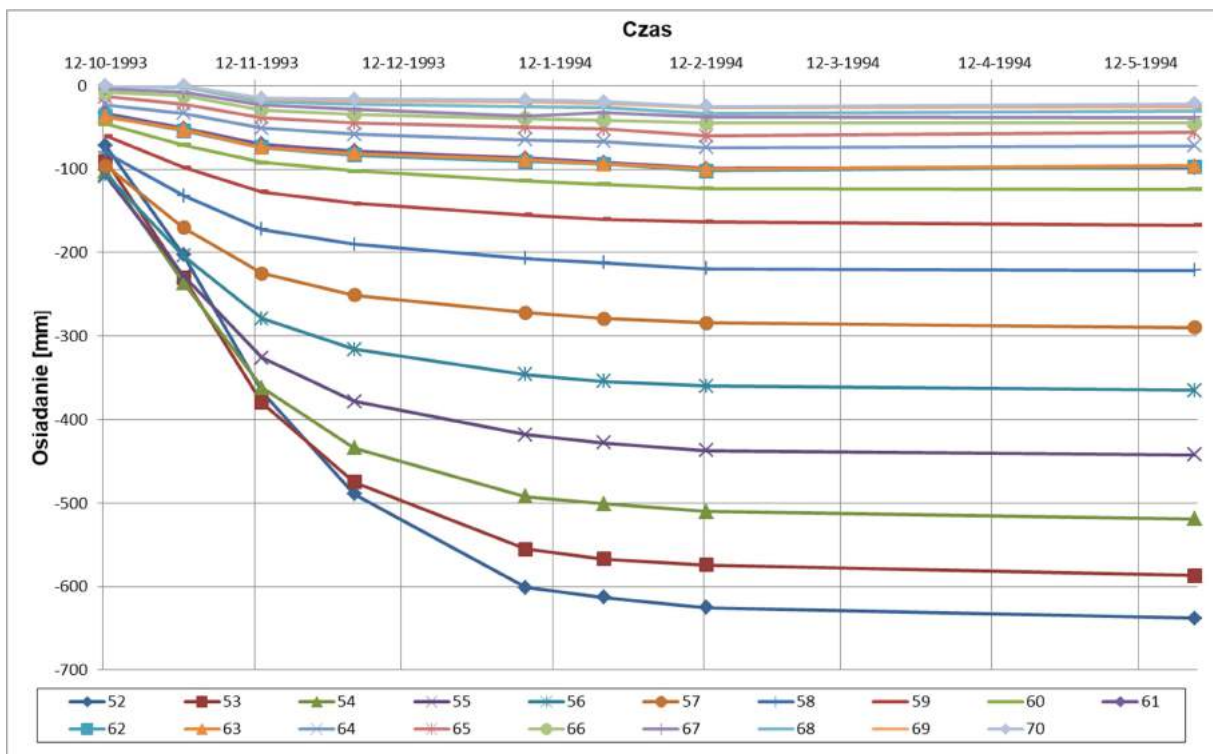
Usytuowanie linii obserwacyjnych względem dokonanej eksploatacji przedstawiono na rysunku 5.13. Wykresy osiadania punktów w czasie oraz profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych przedstawiono na rysunkach 5.14 - 5.18.



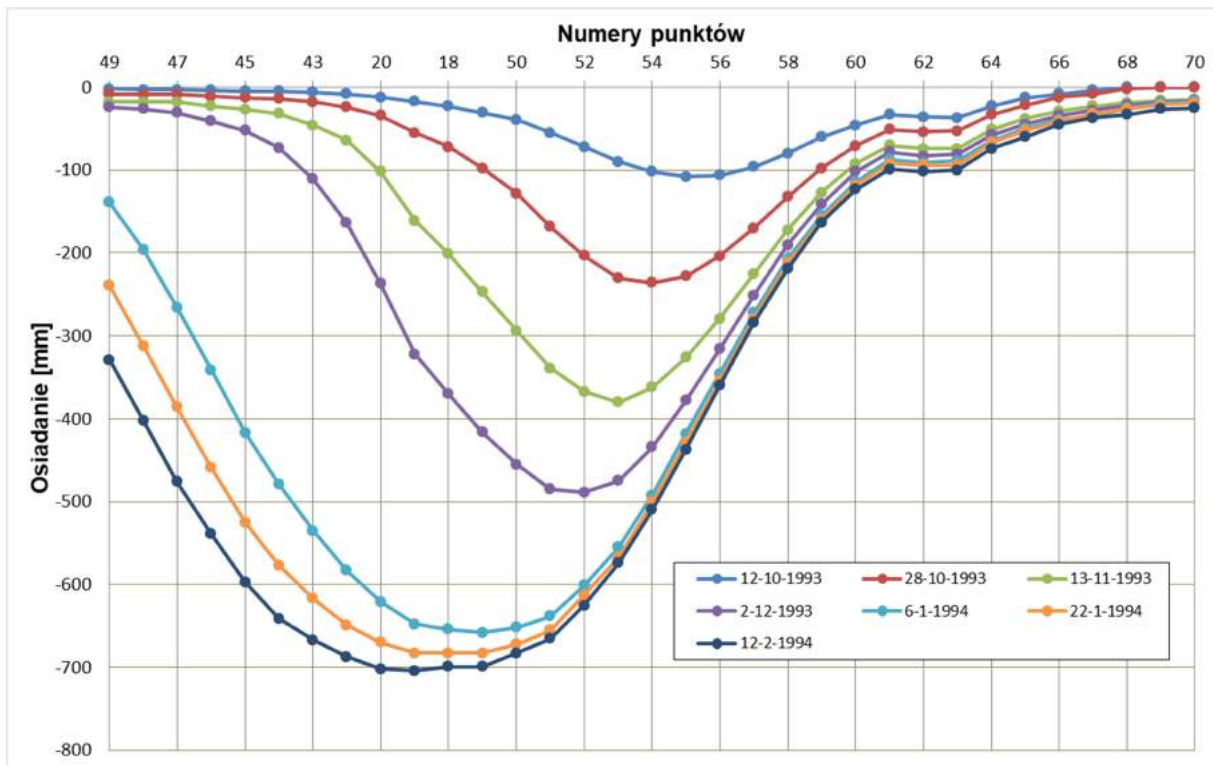
Rys.5.13. Lokalizacja linii obserwacyjnej nr 1 oraz nr 3 KWK Czeczott w stosunku do eksploatacji górniczej.



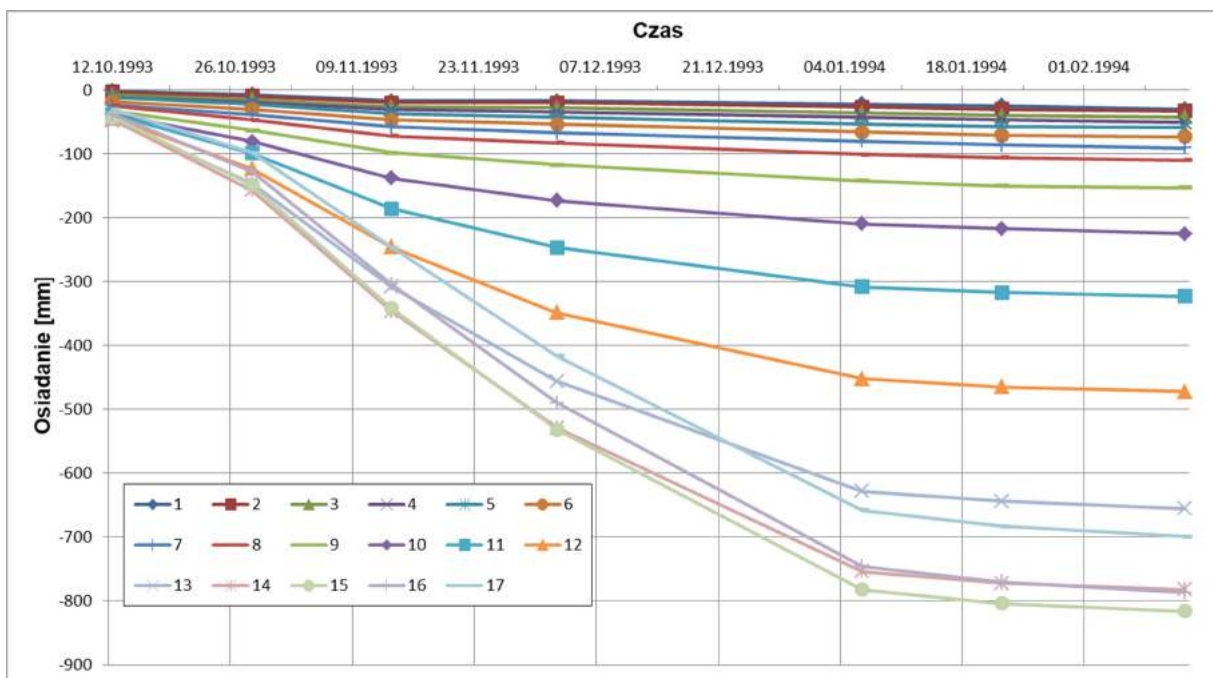
Rys.5.14. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 1 KWK Czczott.



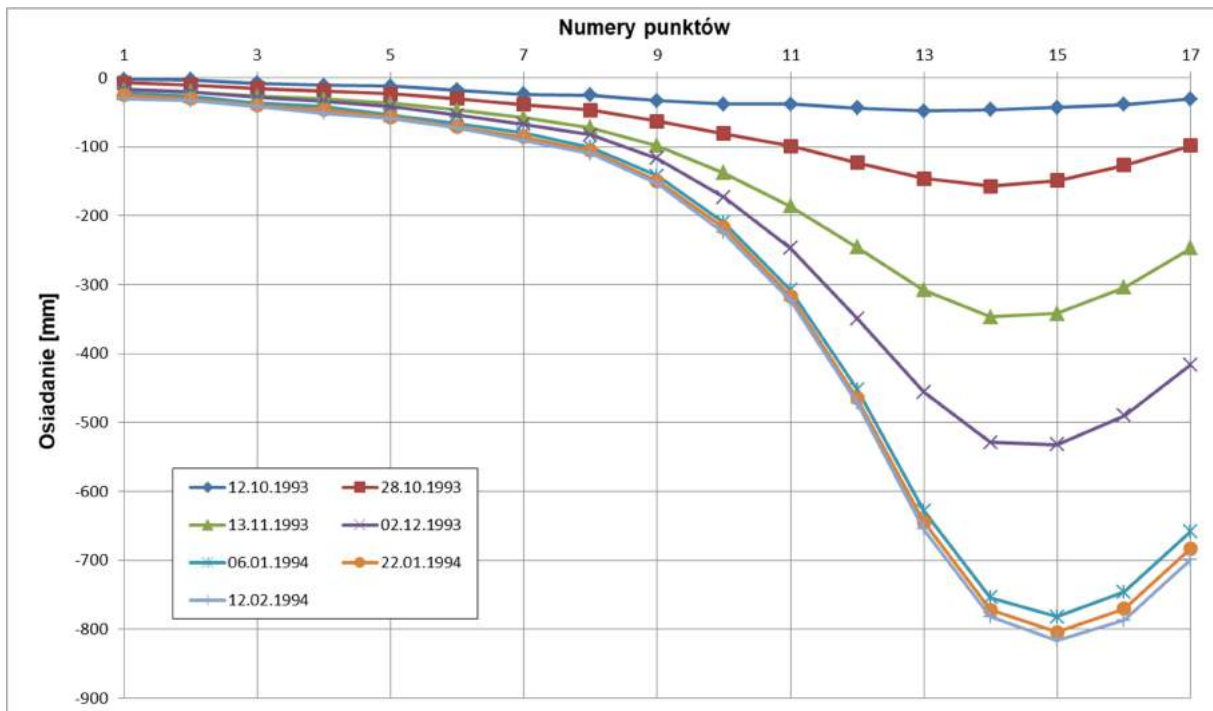
Rys.5.15. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 1 KWK Czczott.



Rys.5.16 Profile niecek obniżeniowych na linii 1 KWK Cieczott w wybranych cyklach pomiarowych.



Rys.5.17. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 3 KWK Cieczott.



Rys.5.18. Profile niecek obniżeniowych na linii 3 KWK Czczott w wybranych cyklach pomiarowych.

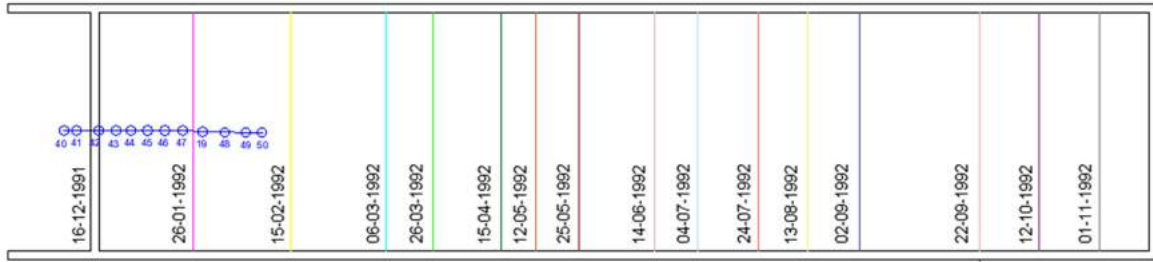
Linia nr 1 z terenu KWK „Staszic”

Linie obserwacyjną tworzyło 13 punktów ziemnych, stabilizowanych średnio co 20m. Linia obserwacyjna usytuowana była równolegle do kierunku postępu frontu.

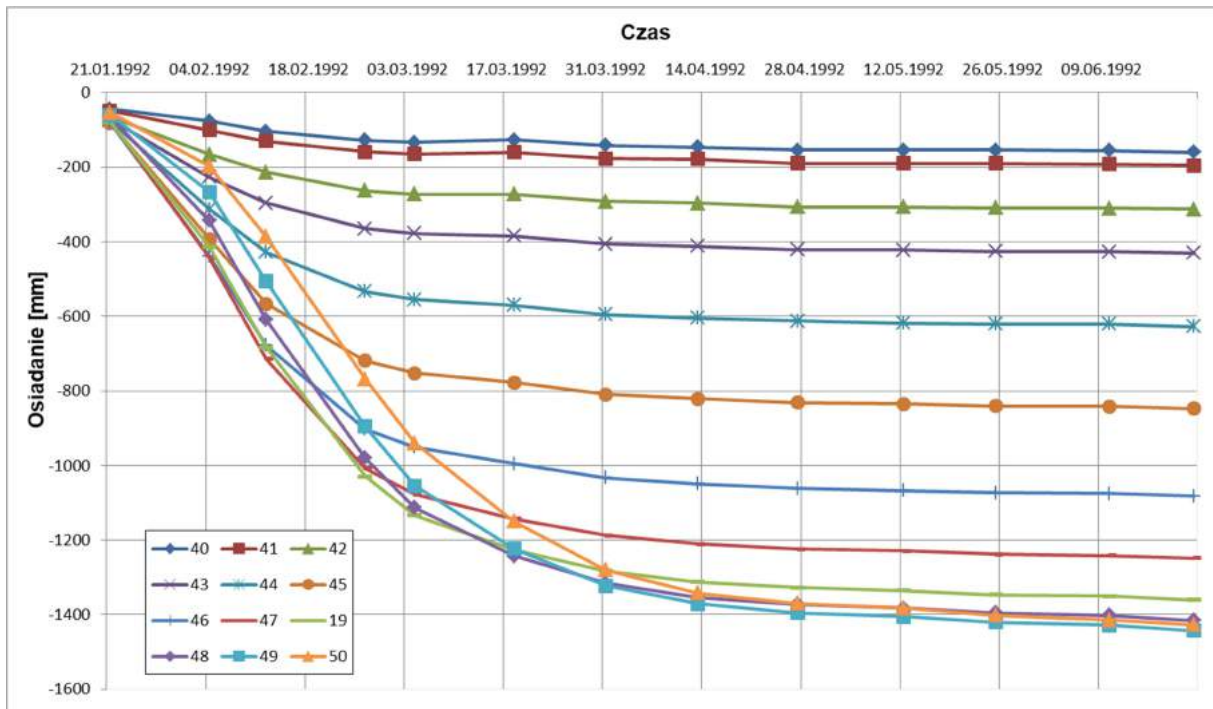
Eksploatacja pod linią prowadzona była w pokładzie 352 z zawalem stropu. Średnia miąższość pokładu wynosiła ok. 2.5 – 2.8 m. Prędkość postępu frontu sięgała do 12 m/dobę, średnio od 3.5 do 5.5 m/dobę. Pokład zalegał na głębokości około 270 m.

Górotwór w rejonie linii zbudowany jest z warstw nadkładu i karbonu. Nadkład tworzą warstwy czwartorzędu o miąższości około 40 m składające się z warstw piasku i gliny oraz trzeciorzędu zbudowanego z iłów i iłowców o miąższości około 50 m. Karbon zbudowany jest z warstw iłów i piaskowców wraz z pokładami węgla.

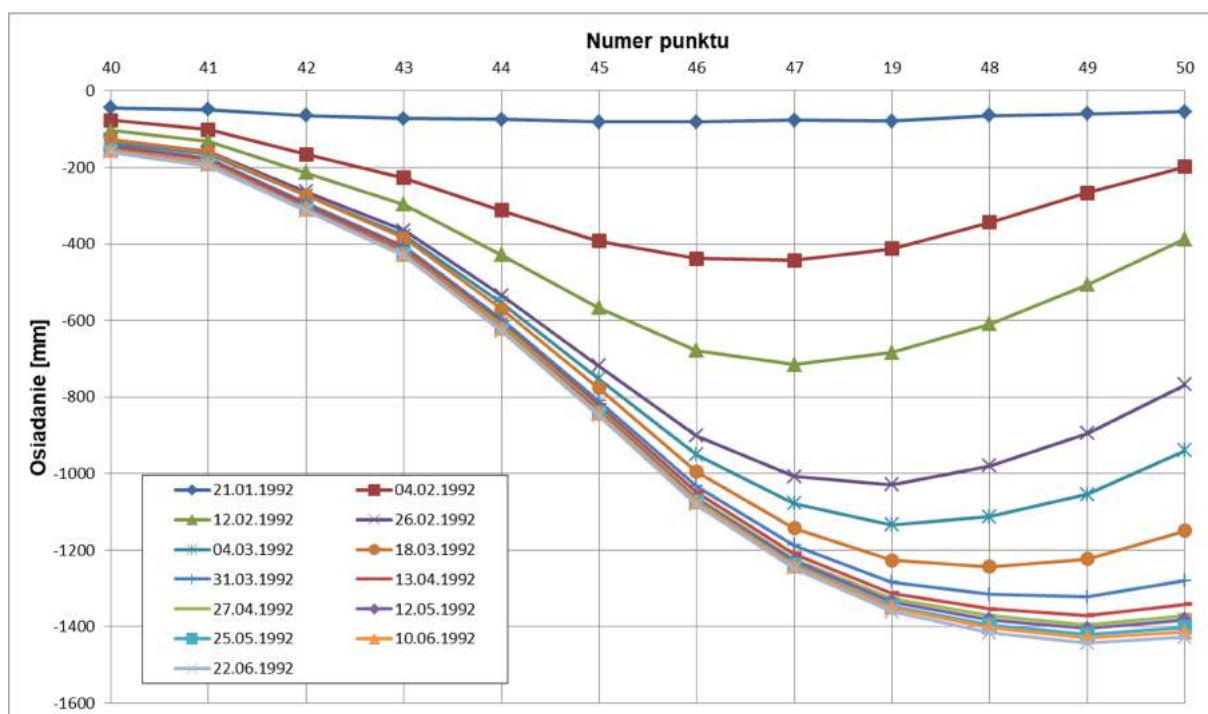
Lokalizację linii obserwacyjnej w stosunku do eksploatacji przedstawiono na rysunku 5.19. Wykres osiadania punktów w czasie przedstawiono na rys. 5.20, natomiast profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych pokazano na rys. 5.21.



Rys.5.19. Lokalizacja linii obserwacyjnej nr 1 KWK Staszic w stosunku do eksploatacji górnicej.



Rys.5.20. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 1 KWK Staszic.



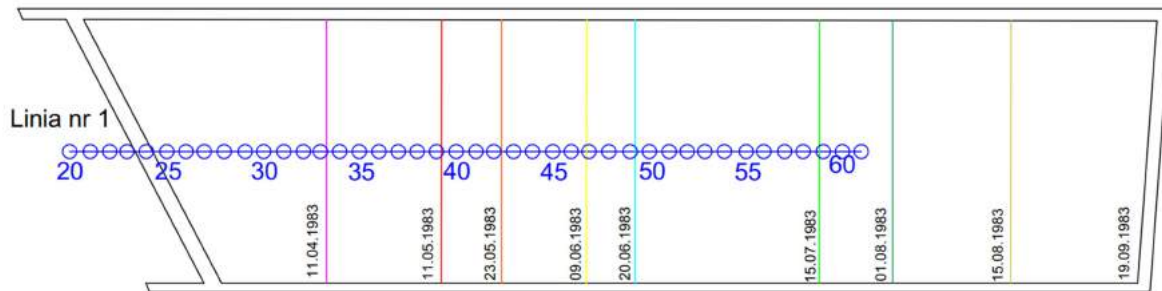
Rys.5.21. Profile niecek obniżeniowych na linii 1 KWK Staszic w wybranych cyklach pomiarowych.

Linia nr 1 z terenu KWK Siersza

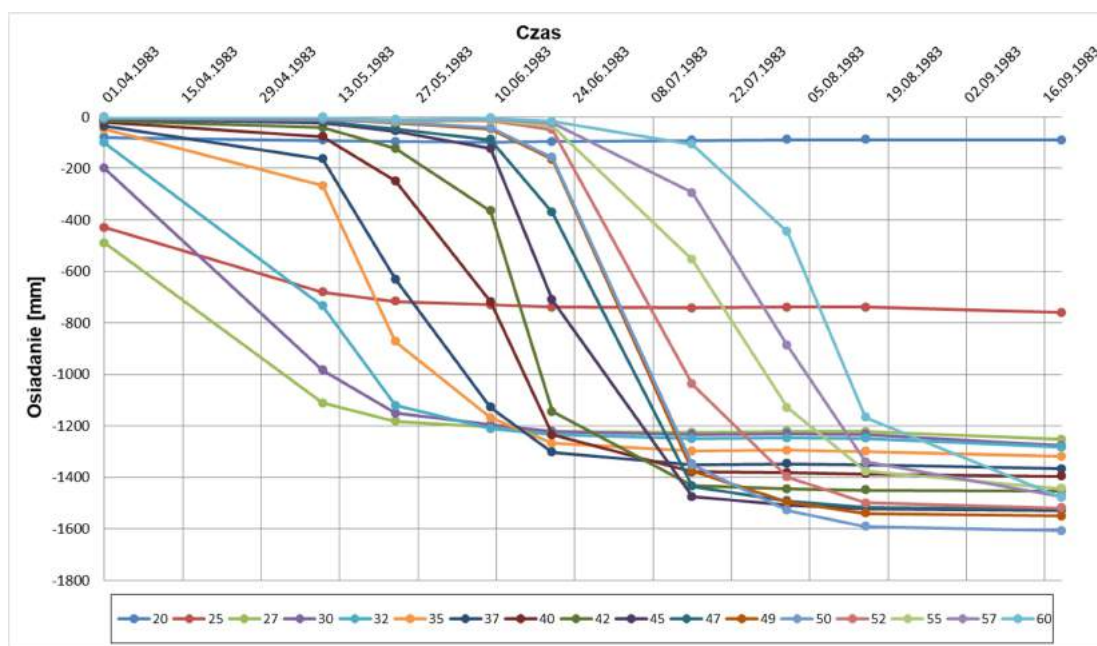
Linia nr 1 składała się z 17 punktów obserwacyjnych zlokalizowanych równolegle do kierunku postępu frontu eksploatacyjnego. Wybieranie złoża prowadzono systemem ścianowym z zawalem stropu na głębokości około 130 m, zaś średnia miąższość pokładu wynosiła 2.5 m.

Nadkład pokrywający warstwy karbonu wynosił ok. 10 m, tworzą go utwory triasu oraz neogenu zbudowane z: ilów, ilowców, piasków oraz gliny. Pod nadkładem zalega karbon zbudowany głównie z łupków, piaskowców oraz pokładów węgla.

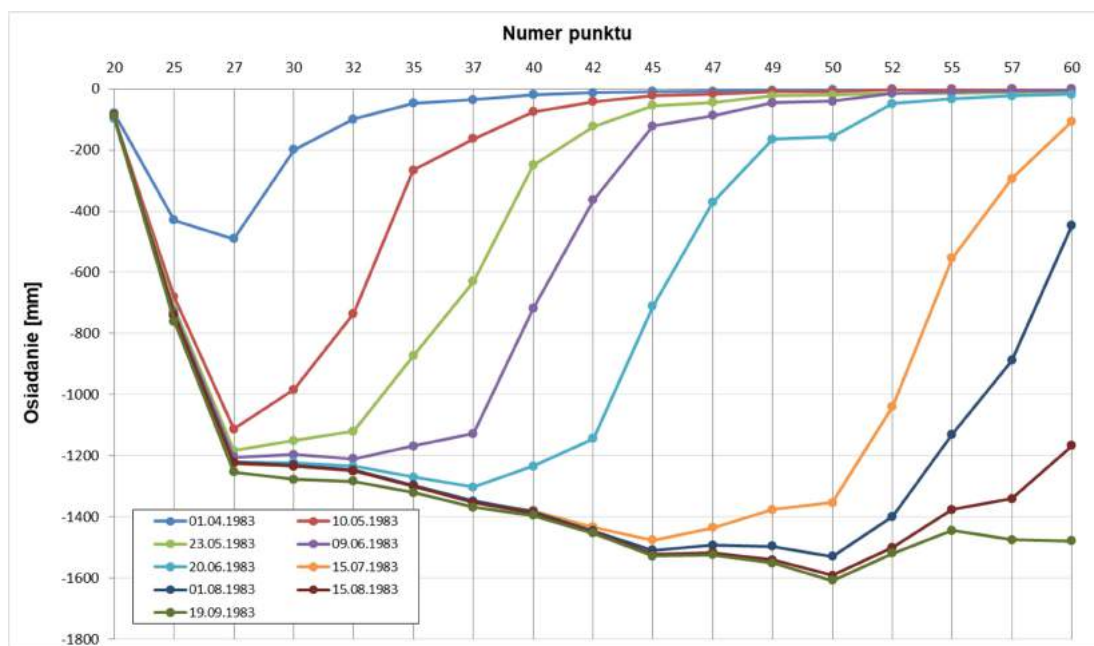
Szkic obrazujący lokalizację linii obserwacyjnej względem prowadzonej eksploatacji zamieszczono na rysunku 5.22. Na rysunku 5.23 przedstawiono wykres osiadania punktów w czasie, a na rys. 5.24 profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych.



Rys.5.22. Lokalizacja linii obserwacyjnej nr 1 KWK Siersza w stosunku do eksploatacji górnicej.



Rys.5.23. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii 1 KWK Siersza.



Rys.5.24. Profile niecek obniżeniowych na linii 1 KWK Siersza.

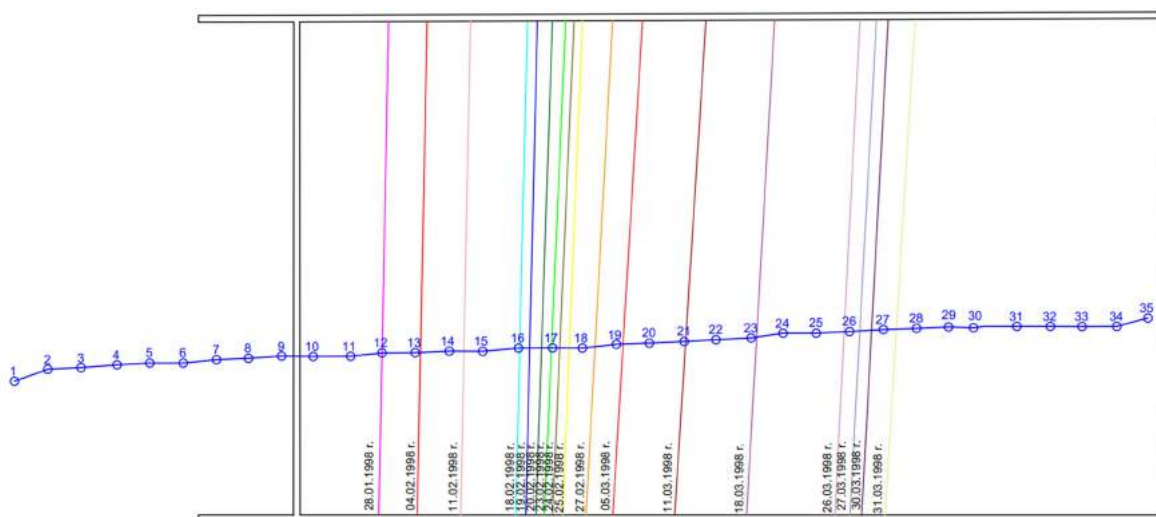
Linia „ul. Bławatkowa” z terenu KWK Jankowice

Linia pomiarowa „Bławatkowa” składała się z 35 punktów obserwacyjnych, miała przebieg równoległy do kierunku postępu frontu eksploatacyjnego.

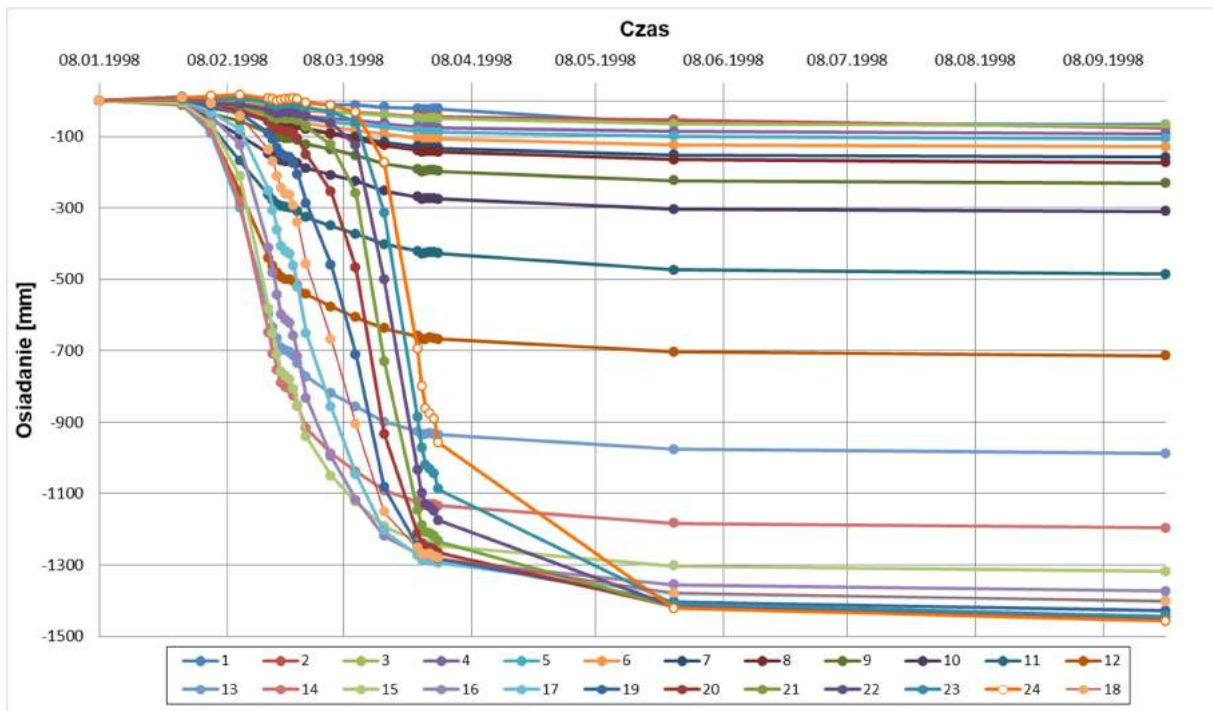
Bezpośrednio pod linią była prowadzona eksploatacja w pokładzie 409/2 z zawałem warstw stropowych. Długość ściany wynosiła średnio 300 m, natomiast jej wybieg wynosił około 1720 m. Średnia głębokość eksploatacji wynosiła 275 m, zaś prędkość postępu frontu eksploatacyjnego była zmienna i wynosiła maksymalnie około 14 m/dobę.

Górotwór rejonie linii zbudowany jest z utworów czwartorzędowych, trzeciorzędowych i karbońskich. W skład warstw czwartorzędowych wchodzi warstwy piasków, żwirów oraz glin o sumarycznej grubości 59 m, zaś trzeciorzęd zbudowany jest z warstwy iłu o grubości 24 m. Warstwy karbonu produktywnego (warstwy orzeskie i rudzkie) składają się w przeważającej części z warstw iłowców z licznymi pokładami węgla i niewielką liczbą warstw piaskowców.

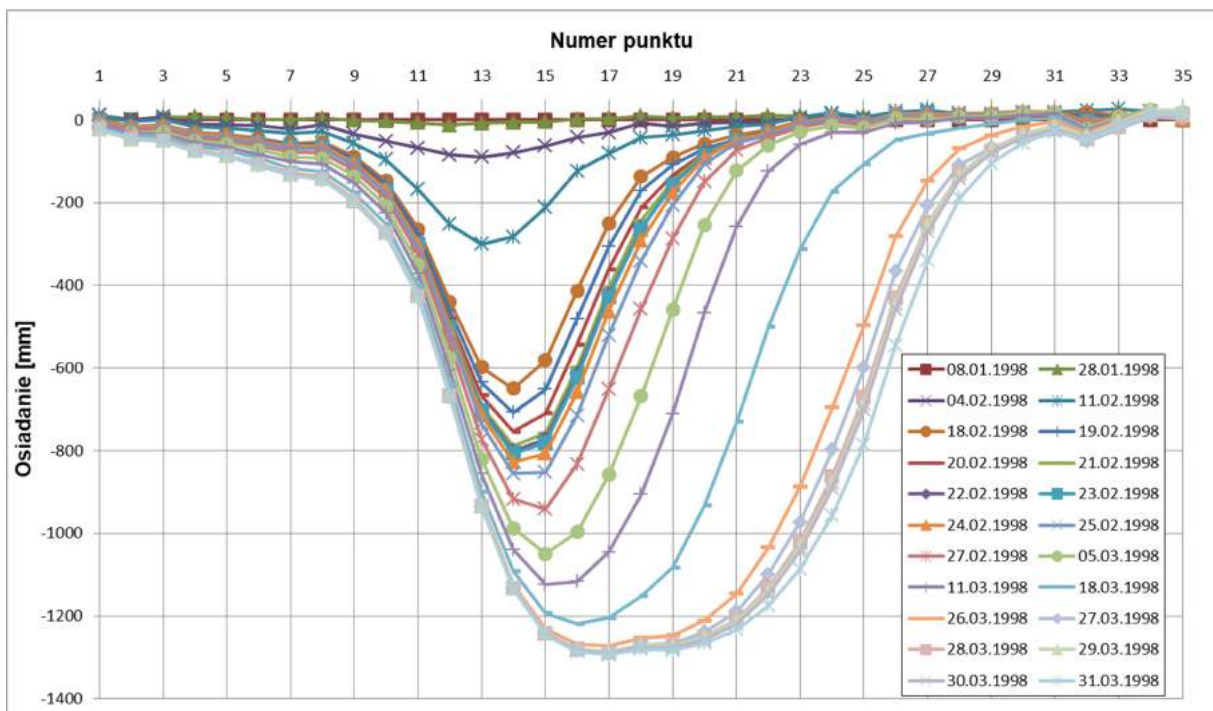
Szkic obrazujący lokalizację linii obserwacyjnej względem prowadzonej eksploatacji zamieszczono na rysunku 5.25. Na rys. 5.26 przedstawiono wykres osiadania punktów w czasie, natomiast rys. 5.27 przedstawia profile niecek obniżeniowych w wybranych cyklach pomiarowych.



Rys.5.25. Lokalizacja linii obserwacyjnej „Bławatkowa” KWK Jankowice w stosunku do eksploatacji górniczej.



Rys.5.26. Wykres osiadań w czasie wybranych punktów z linii ul. Bławatkowa KWK Jankowice.



Rys.5.27. Profile niecek obniżeniowych na linii ul. Bławatkowa KWK Jankowice w wybranych cyklach pomiarowych.

5.2. Identyfikacja wartości parametrów odpowiedzialnych za opis profilu niecki asymptotycznej

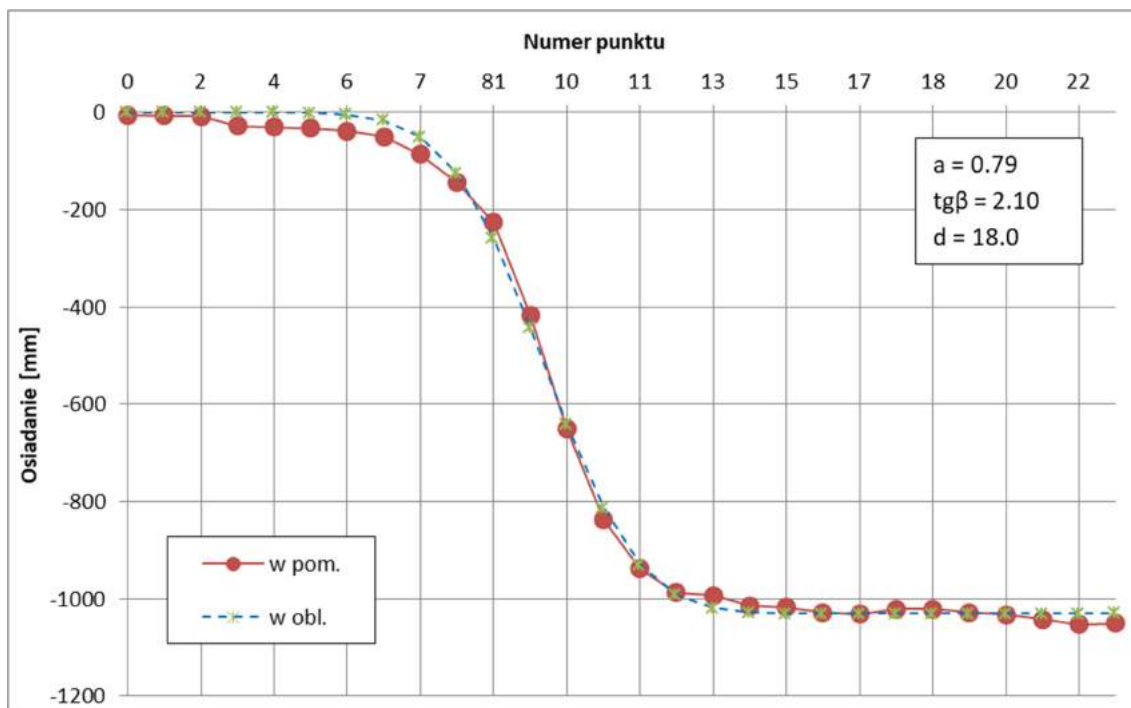
Dla każdej z wyżej wymienionych linii pomiarowych przeprowadzono analizę dostępnych wyników pomiarów pod kątem ich doboru na potrzeby identyfikacji wartości parametrów teorii W. Budryka – S. Knothego odpowiedzialnych za opis asymptotycznych deformacji terenu. Poprawne przeprowadzenie procesu wyznaczenia parametrów ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia jakości prognoz (Strzałkowski 1988, Mielimąka, Orwat 2016) zarówno dla końcowego stanu deformacji, jak i dla stanu nieustalonego.

Dla każdej z linii ustalono cykl pomiarowy obrazujący asymptotyczny profil niecki obniżeniowej i na jego podstawie dokonano identyfikacji wartości parametrów: $\{a, \text{tg}\beta, d\}$. Identyfikację przeprowadzono za pomocą oprogramowania DEFK-Win-Param opracowanego przez R. Ścigałę (Ścigała 2008). Uzyskane dla poszczególnych linii wartości parametrów wraz z wartościami błędów procentowych aproksymacji przedstawiono w tabeli 5.1, natomiast na rysunkach 5.28 – 5.36 przedstawiono porównanie profili niecek asymptycznych uzyskanych z pomiarów z nieckami teoretycznymi, określonymi przy wyznaczonych wartościach parametrów teorii W. Budryka – S. Knothego dla wszystkich analizowanych linii obserwacyjnych.

Tabela 5.1

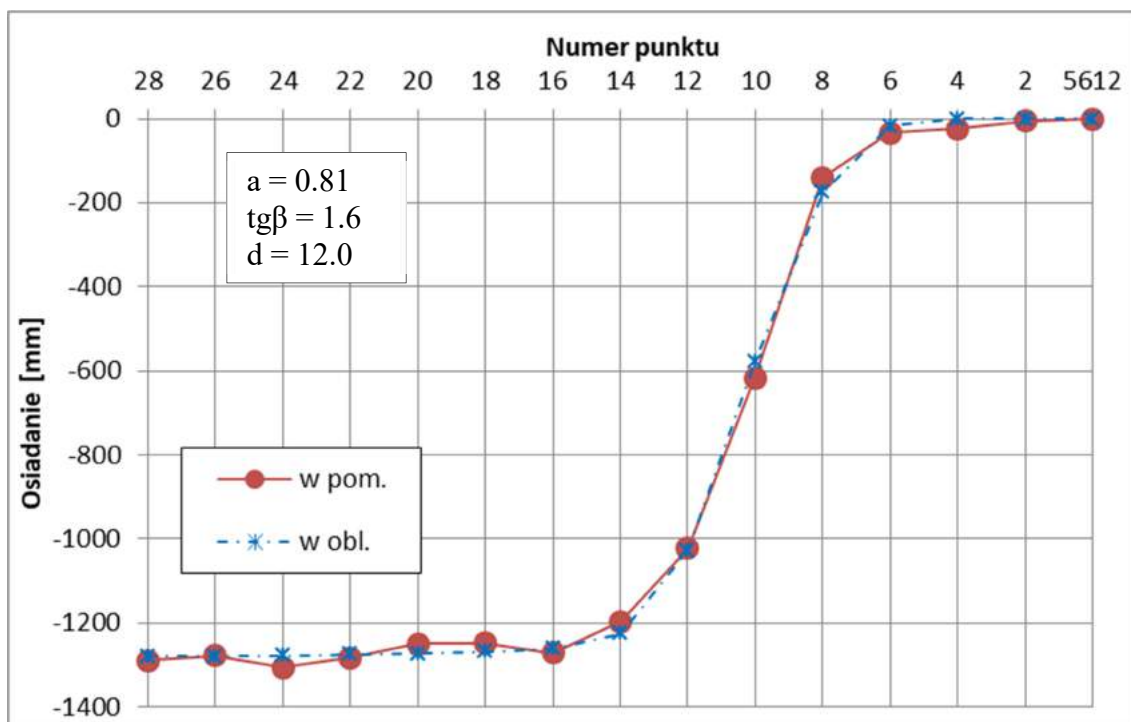
Zestawienie uzyskanych wartości parametrów teorii W. Budryka – S. Knothego

Linia	Kopalnia	Wartości parametrów			
		a	tg β	d	Błąd procentowy M_p
B-L	Dębieńsko	0.79	2.10	18.0	1.96%
2	Jan Kanty	0.81	1.60	12.0	1.61%
4a	Jan Kanty	0.86	1.69	6.0	1.98%
5a	Jan Kanty	0.79	1.79	8.0	2.42%
1	Czczcott	0.62	2.12	67.0	3.26%
3	Czczcott	0.62	2.12	67.0	5.69%
1	Staszic	0.70	3.27	45.0	2.76%
1	Siersza	0.63	1.91	14.4	5.64%
Bławatkowa	Jankowice	0.76	2.10	41.0	4.57%



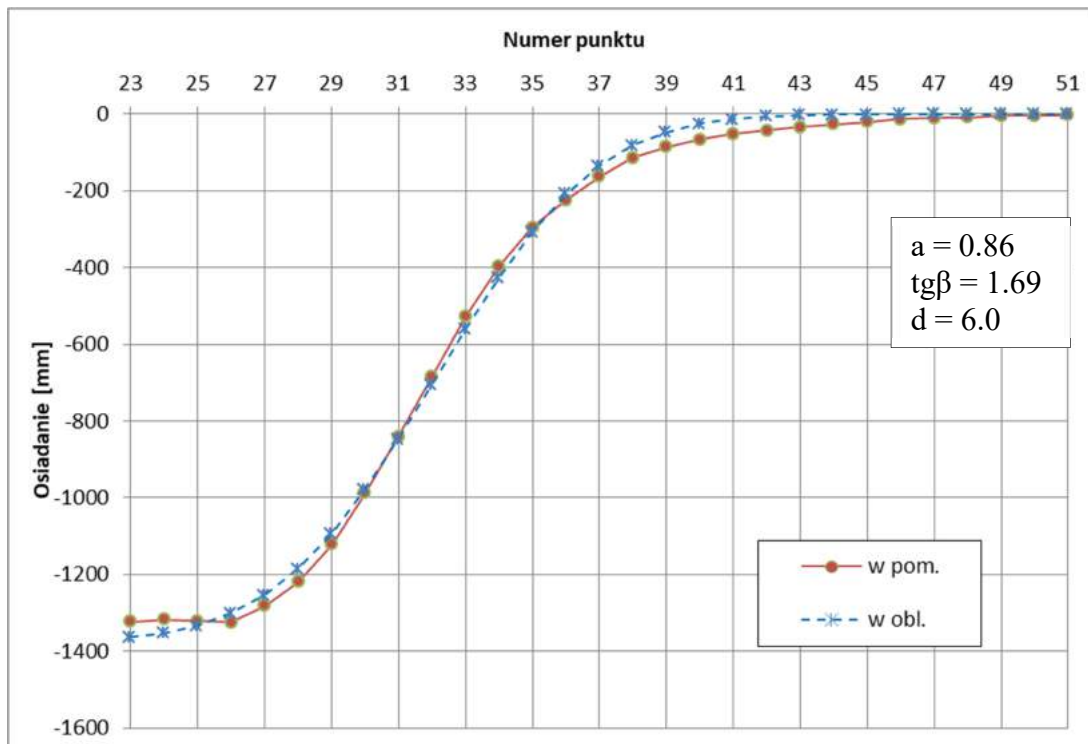
Rys.5.28. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia B-L, KWK Dębieńsko.



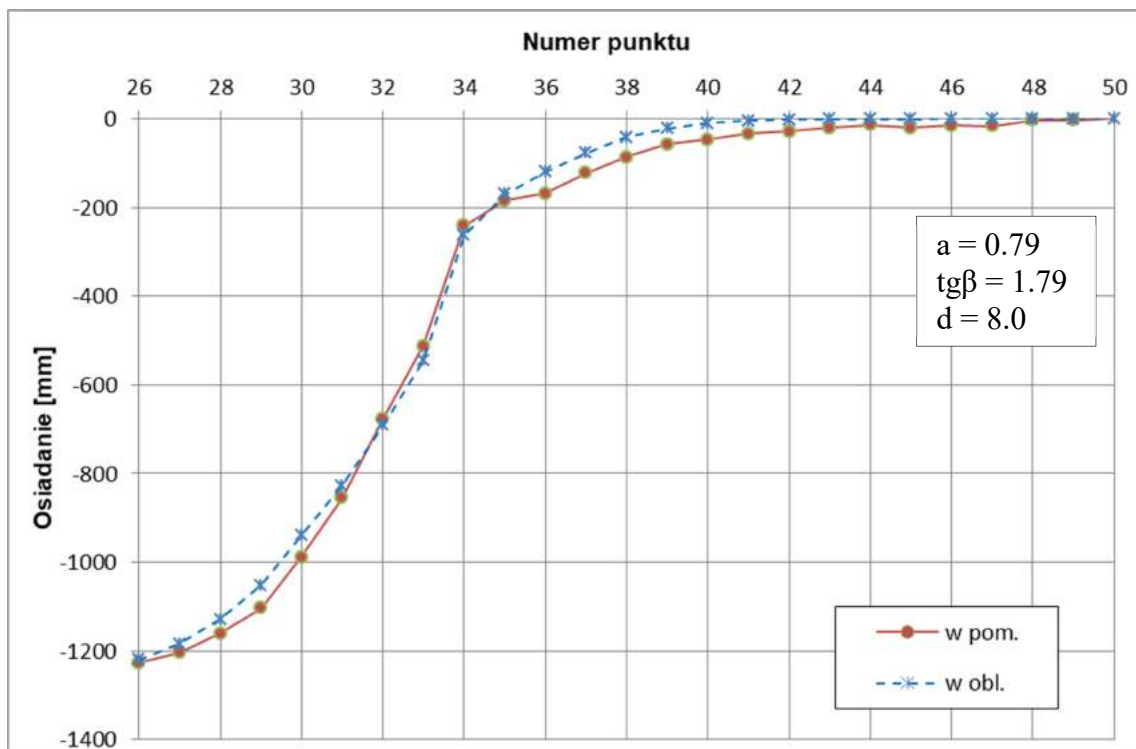
Rys.5.29. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 2, KWK Jan Kanty.



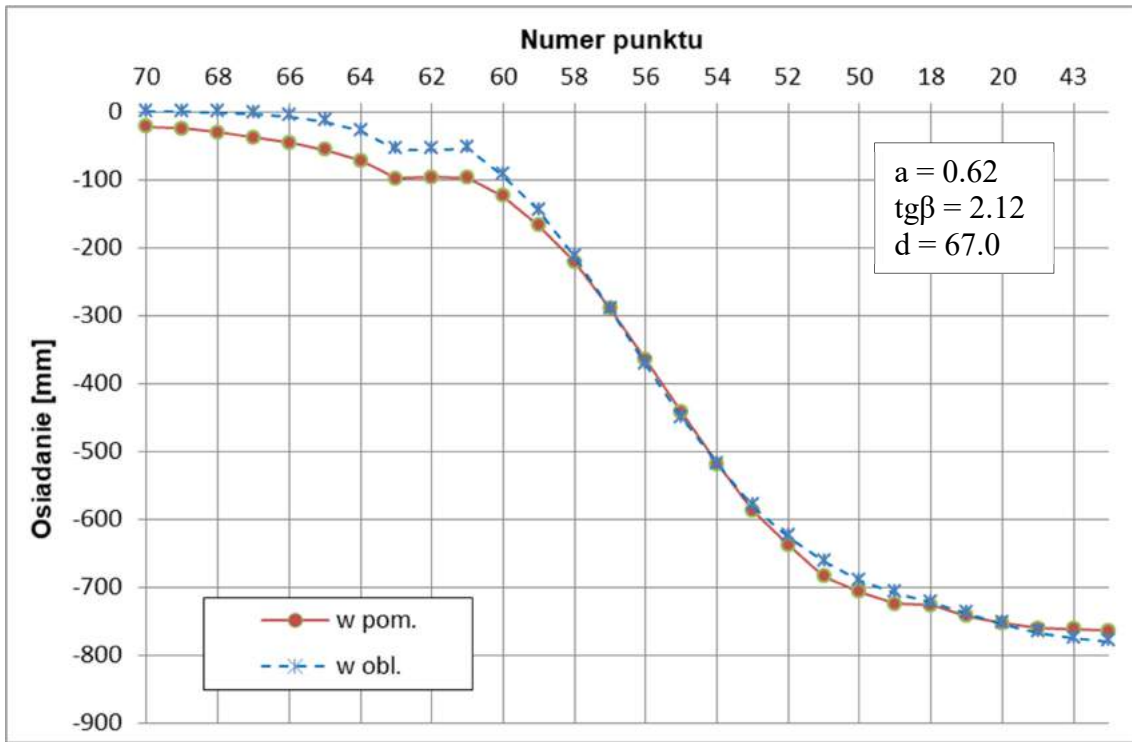
Rys.5.30. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 4a, KWK Jan Kanty.



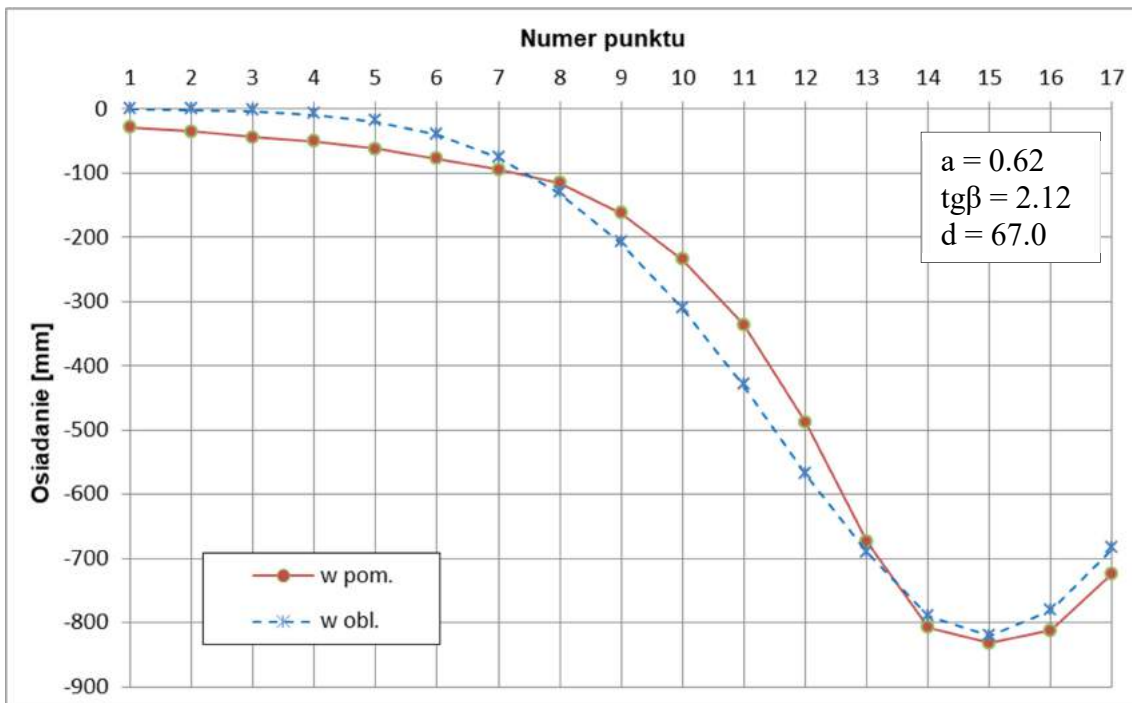
Rys.5.31. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 5a, KWK Jan Kanty.



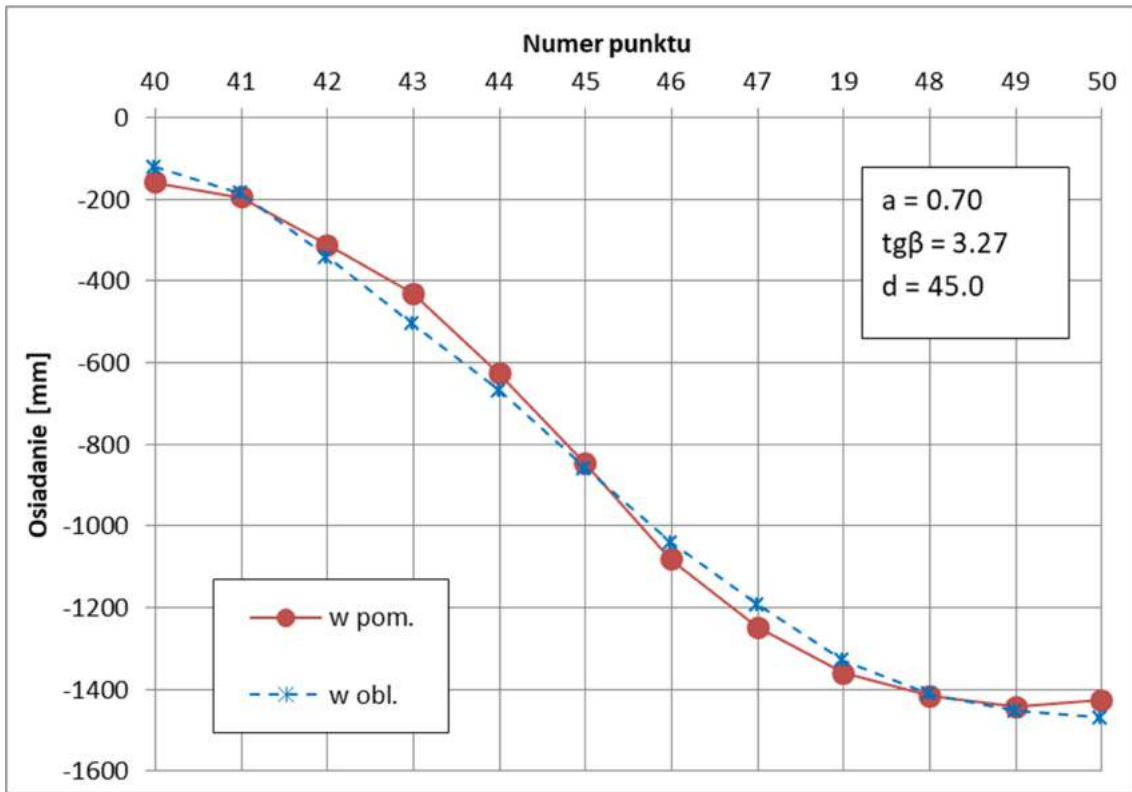
Rys.5.32. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 1, KWK Czczott.



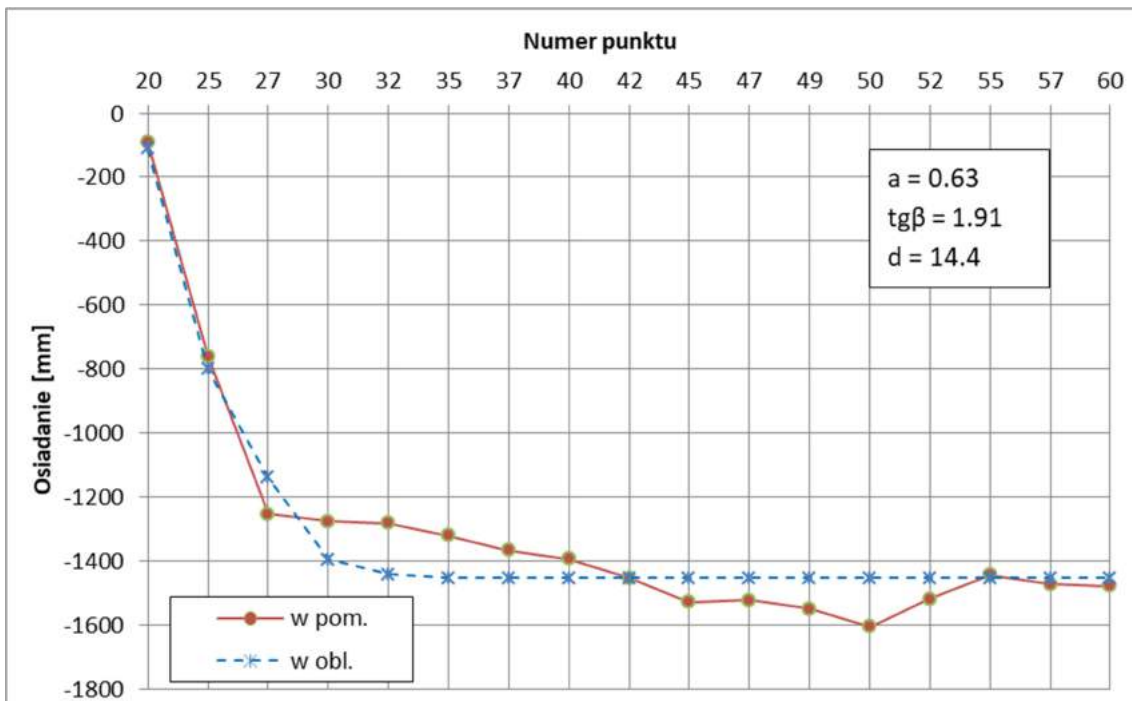
Rys.5.33. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 3, KWK Czczott.



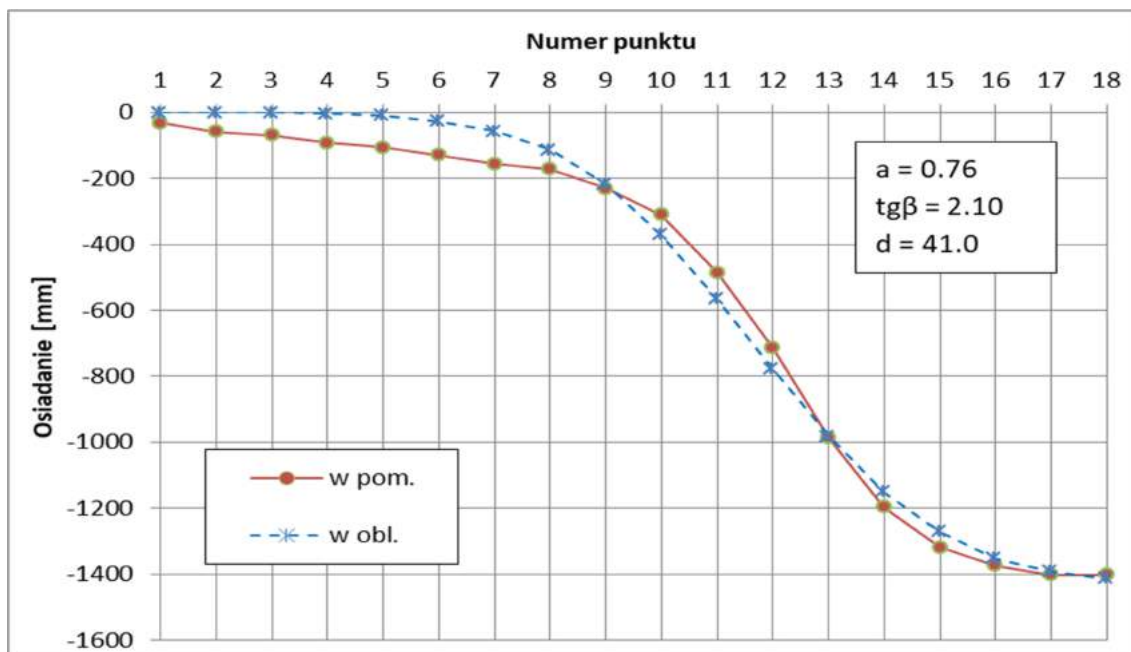
Rys.4.34. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 1, KWK Staszic.



Rys.5.35. P Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia 1, KWK Siersza.



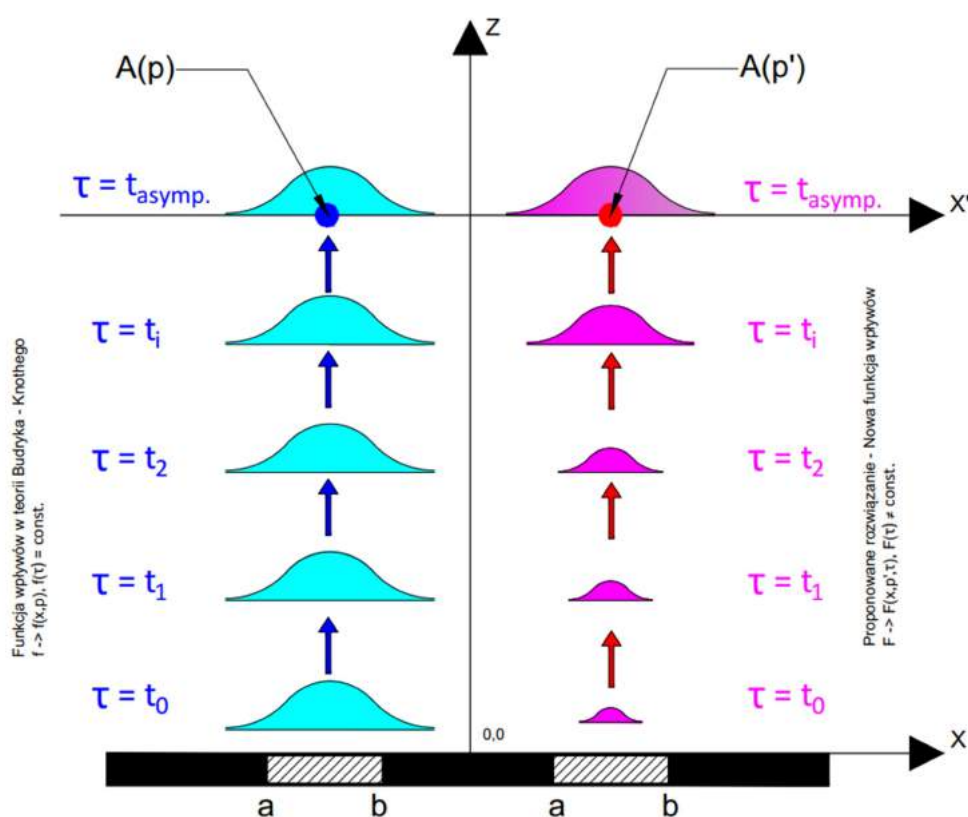
Rys.5.36. Porównanie profilu niecki asymptotycznej uzyskanej z pomiarów z profilem teoretycznym określonym przy wyznaczonych wartościach parametrów.

Linia ul. Bławatkowa, KWK Jankowice.

6. PROPOZYCJA MODELU PROGNOZOWANIA WYKORZYSTUJĄCEGO FUNKCJĘ WPŁYWÓW UJMUJĄCĄ WSPÓLRZĘDNĄ CZASOWĄ

6.1. Ogólna koncepcja proponowanego rozwiązania

Zaproponowana w ramach niniejszej pracy koncepcja polega na wprowadzeniu czynnika odpowiedzialnego za opis fazy nieustalonej procesu deformacji bezpośrednio do funkcji wpływów. W związku z takim założeniem, dla wybranego fragmentu pola eksploatacyjnego wraz z upływem czasu wzrasta wartość całki z funkcji wpływów. Matematycznie oznacza to, że zależność: $f \rightarrow f(x, p)$ została zastąpiona przez: $F \rightarrow F(x, \tau, p)$, gdzie τ oznacza czas. Rozpatrując punkt znajdujący się na powierzchni można zauważyć, że oddziaływanie wybranego fragmentu pola eksploatacyjnego rośnie w czasie do pewnej wartości końcowej, wynikającej z grubości wybieranej warstwy pokładu, sposobu likwidacji wybranej przestrzeni oraz głębokości eksploatacji. Inaczej mówiąc, wpływy eksploatacji danego elementarnego pola docierają z głębokości H do rozpatrywanego punktu na powierzchni z pewnym opóźnieniem, narastając w czasie od 0 do wartości końcowej w_k .



Rys.6.1 Różnica pomiędzy funkcją wpływu Budryka-Knothea (po lewej) a zaproponowaną nową funkcją wpływów $F(\dots)$ (po prawej) dla eksploatacji pola o szerokości (a, b)

Proponowana zmodyfikowana funkcja musi spełniać podstawowe założenie funkcji wpływów w teorii geometryczno - całkowej, a mianowicie dla dowolnego punktu o współrzędnych (p,q) musi zachodzić równość:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{t_e}^{+\infty} F(x, y, \tau, p, q) dx dy d\tau = 1 \quad (6.1)$$

gdzie:

x,y – przestrzenne zmienne niezależne,

τ – czasowa zmienna niezależna,

t_e – moment (czas) eksploatacji danego pola elementarnego.

Jest to warunek niezbędny, aby po nieskończenie długim czasie od zakończenia eksploatacji, na powierzchni dla danego punktu obniżenia mogły osiągnąć końcową, największą dla tego punktu wartość w_k .

Przeprowadzone analizy pozwoliły stwierdzić, iż dobrymi kandydatami do realizacji nakreślonego celu są funkcje gęstości prawdopodobieństwa (PDF), które z natury rzeczy spełniają warunek (6.1). Należy jednak mieć na uwadze, że w rozważanym problemie mamy do czynienia z wpływem czasu na rozwój niecki obniżeniowej od rozpoczęcia eksploatacji aż do jej zakończenia. Stąd ograniczeniem jest warunek początkowy - proces obniżeń powierzchni w danej lokalizacji musi rozpoczynać się od wartości zerowej. Dlatego też zastosowania nie mogą znaleźć tutaj funkcje mające asymptoty w „ $-\infty$ ”, tak jak jest to w przypadku np. funkcji Gaussa (czas biegnący od początku eksploatacji danego pola nie może być „ujemny”). Dalsze rozważania dotyczące wykorzystania funkcji gęstości prawdopodobieństwa przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

6.2. Charakterystyka modelu bazowego

Tak jak to już wspomniano wcześniej, elementem odpowiedzialnym za opis przebiegu procesu deformacji w czasie w poszukiwanej nowej postaci funkcji wpływów ma być odpowiednio dobrana i sparametryzowana funkcja gęstości prawdopodobieństwa.

Na podstawie przeprowadzonych analiz różnych funkcji PDF, do modelu umownie nazwanego „bazowym” zastosowano funkcję gęstości prawdopodobieństwa Rayleigh’a (Weisstein EW, 2014) o postaci:

$$R(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot \text{Exp}\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right), x \geq 0 \quad (6.2)$$

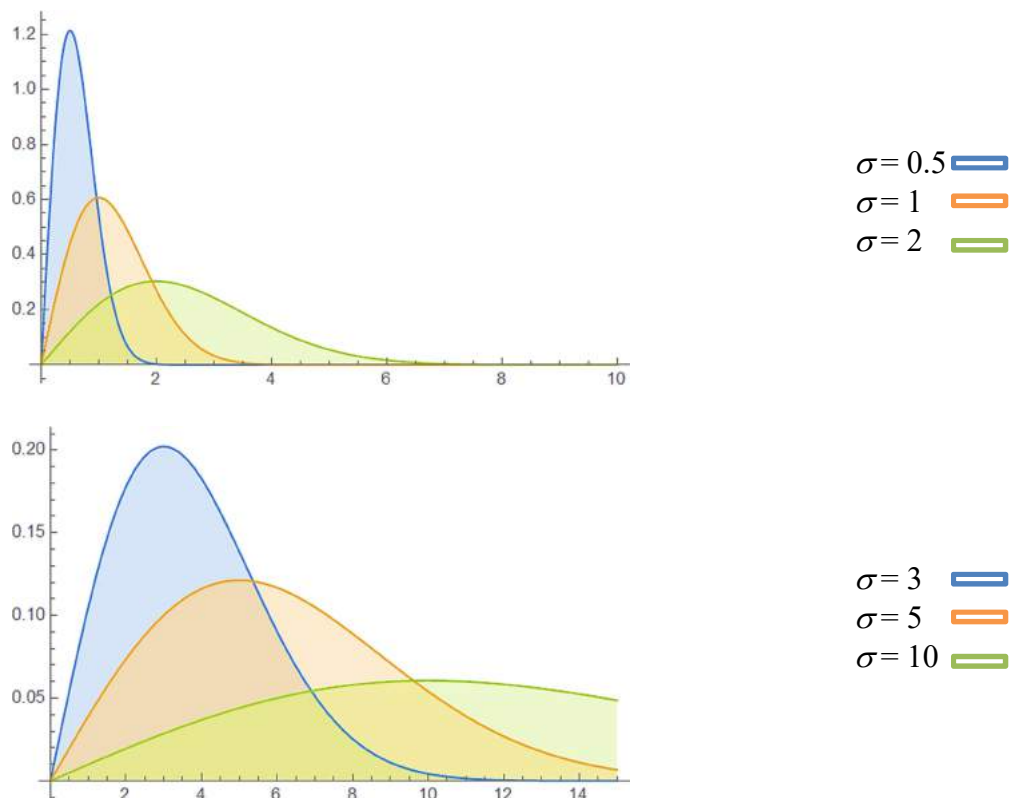
gdzie:

σ – parametr skali.

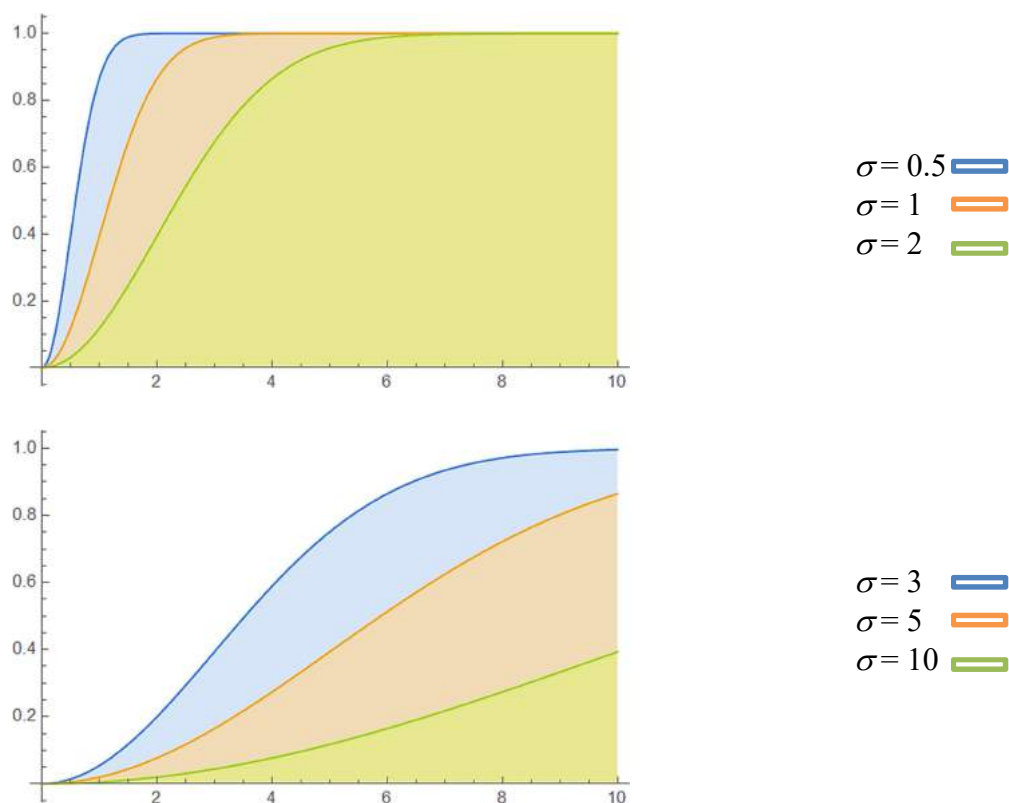
x – zmienna niezależna

Rozkład Rayleigh'a jest ciągłym rozkładem prawdopodobieństwa, opartym na przedziale $<0, +\infty)$ i sparametryzowanym przez liczbę rzeczywistą - parametr skali σ . Rozkład ten jest jednomodalny z pojedynczym maksimum globalnym, po czym wartości funkcji maleją asymptotycznie do 0 w $+\infty$.

Na rys. 6.2 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji PDF Rayleigh'a $R(x)$ dla kilku wybranych wartości tego parametru oraz ich dystrybuanty (CDF) – na rys. 6.3.



Rys.6.2 Przebiegi funkcji Rayleigh'a $R(x)$ dla wybranych przykładowych wartości parametru skali.



Rys.6.3 Dystrybuanty funkcji Rayleigh'a $R(x)$ dla wybranych wartości parametru skali.

Jak można stwierdzić z przedstawionych powyżej przebiegów funkcji Rayleigh'a oraz ich dystrybuanty, pozwala ona odzwierciedlić przebieg w czasie zjawisk charakteryzujących się narastaniem ich intensywności w czasie ze zmienną prędkością, a następnie asymptotycznym ich zanikaniem.

Mając na uwadze powyższe, można przyjąć założenie o analogii przebiegu procesu deformacji w czasie do rozkładów generowanych przez funkcję Rayleigh'a. Stąd zaproponowano zmodyfikowanie zależności (6.2) wg następujących założeń:

- parametr skali σ zastąpiono współczynnikiem r_t , który nazwano „czasowym promieniem zasięgu wpływów głównych” ($\sigma = r_t$),
- zmienną niezależną x zastąpiono zmienną czasową τ .
- wprowadzono wielkość t_e oznaczającą moment wybrania elementarnego pola eksploatacyjnego.

W efekcie zależność (6.2) przyjmuje postać:

$$R(\tau) = \frac{\tau - t_e}{r_t^2} \cdot \text{Exp}\left(\frac{-(\tau - t_e)^2}{2r_t^2}\right), \tau \geq 0 \quad (6.3)$$

Zależność (6.3) pozwala więc opisać przebieg procesu deformacji terenu górniczego w czasie dla elementarnego pola eksploatacyjnego wybranego w momencie czasu t_e (od momentu wybrania t_e do zaniku procesu obniżen) za pomocą parametru r_t .

Zakładając, że postać funkcji wpływów w teorii W. Budryka – S. Knothego dla eksploatacji w kształcie nieskończonej półpłaszczyzny ma postać:

$$f(x, p) = \frac{w_{max}}{r} \cdot \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x - p)^2}{r^2} \right) \quad (6.4)$$

oraz przyjmując, że nowa funkcja wpływów F ma postać iloczynu:

$$F(x, p, \tau) = f(x, p) * R(\tau) \quad (6.5)$$

otrzymujemy ostatecznie dla eksploatacji w kształcie nieskończonej półpłaszczyzny funkcję wpływów w postaci:

$$F(x, p, \tau) = \frac{w_{max}}{r} \cdot \frac{(\tau - t_e)}{r_t^2} \cdot \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x - p)^2}{r^2} - \frac{(\tau - t_e)^2}{2r_t^2} \right) \quad (6.6)$$

gdzie:

r – promień zasięgu wpływów głównych,

r_t – parametr charakteryzujący czas ujawniania się wpływów („czasowy promień zasięgu wpływów głównych”),

p – współrzędna geometryczna punktu,

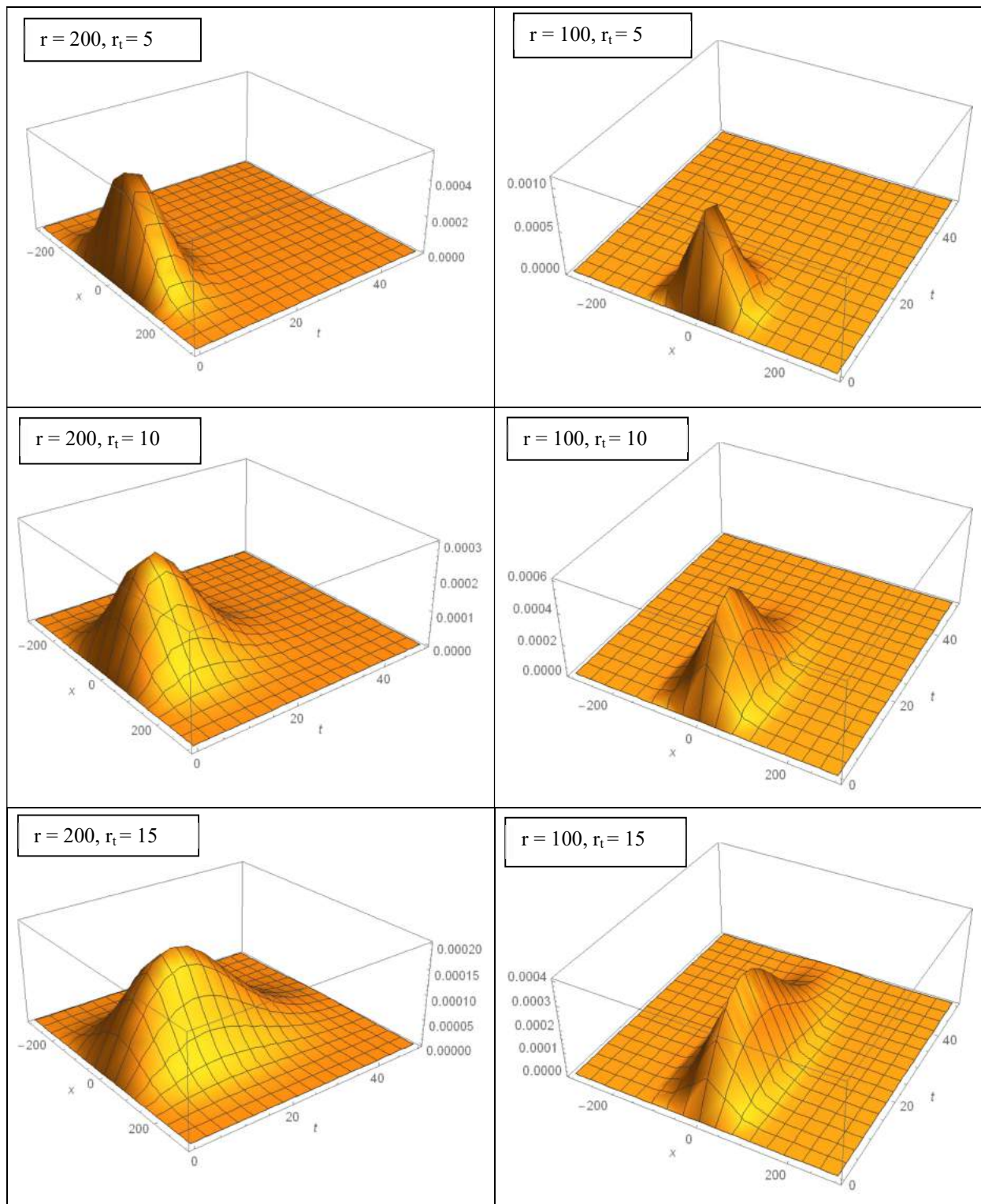
t_e – moment wybrania elementarnego pola eksploatacyjnego,

x, τ – zmienne niezależne.

Funkcja (6.6) spełnia oczywiście warunek:

$$\int_{t_e}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, p, \tau) dx d\tau = w_{max} \quad (6.7)$$

Przykładowe rozkłady funkcji F w przestrzeni zmiennych (x, τ) dla wybranych par wartości parametrów $\{r, r_t\}$ przedstawiono na rys. 6.4.



Rys.6.4. Ilustracja do zależności (6.6): przebiegi proponowanej funkcji wpływów $F(x, p, \tau)$ dla zagadnienia jednowymiarowe przestrzennie (w kierunku zmiennej przestrzennej x) dla wybranych wartości parametrów $\{r, r_t\}$.

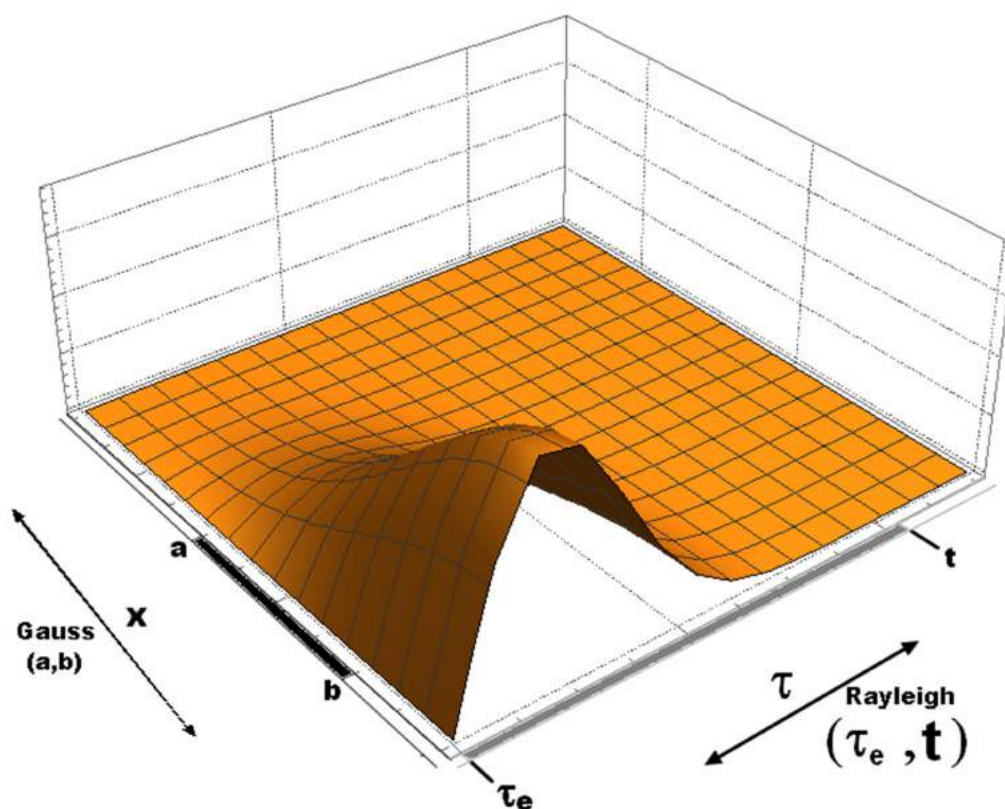
6.2.1. Określenie obniżen dla przypadku eksploatacji w kształcie „nieskończonego paska”

Obniżenia w dowolnej chwili czasu t w punkcie $A(p)$, przy założeniu, że fragment pokładu w przedziale (a,b) został wybrany natychmiastowo w chwili czasu t_e ($t > t_e$) można więc określić z zależności:

$$w(x,p,t) = \int_{t_e}^t \int_a^b F(x,p,\tau) dx d\tau \quad (6.8)$$

Po odpowiednich podstawieniach otrzymujemy:

$$w(x,p,t) = \int_{t_e}^t \int_a^b \frac{w_{max}}{r} \cdot \frac{(\tau - t_e)}{r_t^2} \cdot \text{Exp} \left(\frac{-\pi(x-p)^2}{r^2} - \frac{(\tau - t_e)^2}{2r_t^2} \right) dx d\tau \quad (6.9)$$



Rys.6.5. Ilustracja do zależności (6.9): całkowanie funkcji wpływów $F(\dots)$ w granicach przestrzennych (a,b) oraz w przedziale czasu (t_e, t)

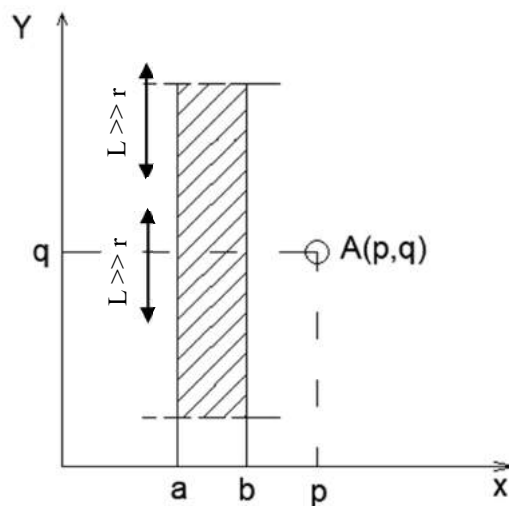
Po dokonaniu całkowania zależności (6.9) otrzymujemy zależność (6.10). Całkowanie wykonano za pomocą oprogramowania Wolfram Mathematica, kod źródłowy rozwiązania modelu łącznie z procedurą całkowania symbolicznego w postaci tzw. notatnika Mathematica zawarto w rozdziale 11 pracy.

Otrzymana formuła pozwala na obliczenie elementarnej wartości obniżenia w_e punktu $A(p)$ na powierzchni w dowolnej chwili czasu t pod wpływem „natychmiastowego” wybrania elementarnego pola eksploatacyjnego postaci „nieskończonego paska” w granicach (a,b) . Na rysunku 6.6 zwymiarowano wybrane zmienne występujące w zależności (6.10). Na szkicu oznaczono warunek niezbędny do przyjęcia, że pole ma kształt nieskończonego paska, mianowicie odległość L liczona od punktu obliczeniowego do hipotetycznej krawędzi eksploatacyjnej w kierunku współrzędnej „ Y ” jest daleko większa od promienia zasięgu wpływów głównych r : $L \gg r$, co w praktyce oznacza, że górna i dolna krawędź pola eksploatacyjnego nie oddziałuje na dany punkt na powierzchni.

$$w_e(p, t) = \frac{w_{max}}{2} \cdot \left[\text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{2r_t^2} \right) - 1 \right] \cdot \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(a - p)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(b - p)}{r} \right) \right] \quad (6.10)$$

gdzie:

$\text{Erf}(\cdot)$ – funkcja wyrażona wzorem: $\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \text{Exp}(-\lambda^2) d\lambda$



Rys.6.6. Szkic objaśniający do zależności (6.10) – rzut elementarnego pola eksploatacyjnego o kształcie nieskończonego paska na płaszczyznę poziomą XY

Zakładając dyskretyzację pola eksploatacyjnego za pomocą zbioru wystarczająco małych pól elementarnych, osiadanie całkowite w punkcie $A(p)$ w chwili t będzie sumą osiadań elementarnych w_{ei} , które pochodzą od poszczególnych pól elementarnych wybieranych natychmiastowo w kolejnych chwilach t_{ei} :

$$w(p, t) = \sum_{i=1}^N w_{ei}(p, t)_{t_{ei}} \quad (6.11)$$

gdzie:

N – liczba pól elementarnych (w tym przypadku nieskończonych pasków).

6.2.2. Określenie obniżen dla pola eksploatacyjnego w kształcie prostokąta

Jeżeli założymy, że elementarne pole eksploatacyjne ma kształt prostokąta, to zależność (6.5) przyjmuje postać zapisaną wzorem (6.12).

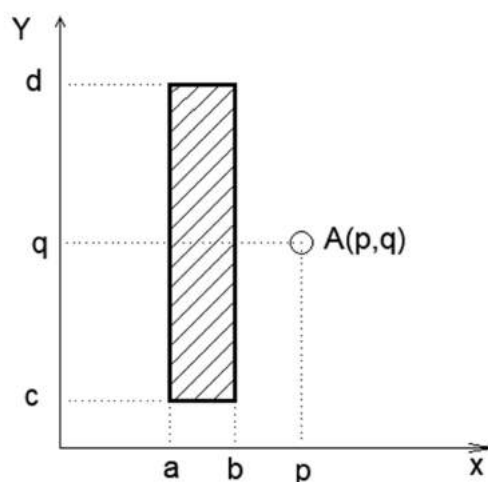
$$F(x, y, p, q, \tau) = f(x, y, p, q) \cdot R(\tau) \quad (6.12)$$

Po odpowiednich podstawieniach otrzymujemy dla eksploatacji w kształcie prostokąta ograniczonego rzędnymi $\{(a, b), (c, d)\}$ i punktu $A(p, q)$ na powierzchni (rys. 6.7) następującą postać funkcji wpływów:

$$F(x, y, p, q, \tau) = \frac{w_{max}}{r^2} \cdot \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{r^2} \right) \cdot \frac{(\tau - t_e)}{r_t^2} \cdot \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_t^2} \right) \quad (6.13)$$

Całkując funkcję wpływów (6.13) względem odpowiednich współrzędnych przestrzennych i współrzędnej czasowej, otrzymujemy zależność pozwalającą na obliczenie elementarnego obniżenia wskutek wybrania prostokątnego pola elementarnego:

$$w_e(p, q, t) = \int_{t_e}^t \int_c^d \int_a^b F(x, y, p, q, \tau) dx dy d\tau = \frac{w_{max}}{4} \left[1 - \text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{r_t^2} \right) \right] \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(a-p)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(b-p)}{r} \right) \right] \cdot \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(c-q)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(d-q)}{r} \right) \right] \quad (6.14)$$



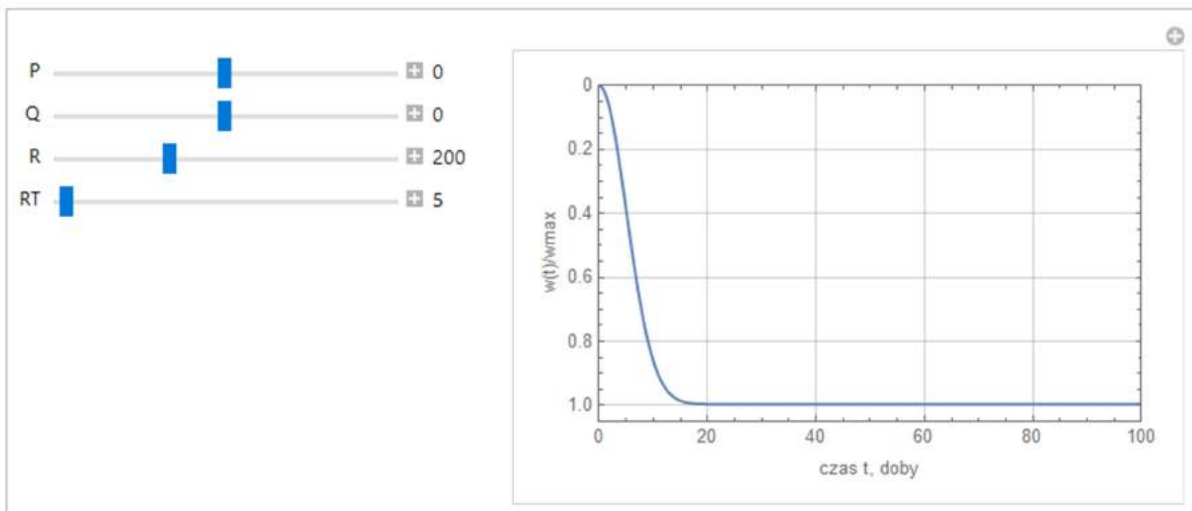
Rys.6.7. Szkic objaśniający do zależności (6.13, 6.14) - rzut elementarnego pola eksploatacyjnego o kształcie nieskończonego paska na płaszczyznę poziomą XY

Stosując ponownie zasadę superpozycji otrzymujemy:

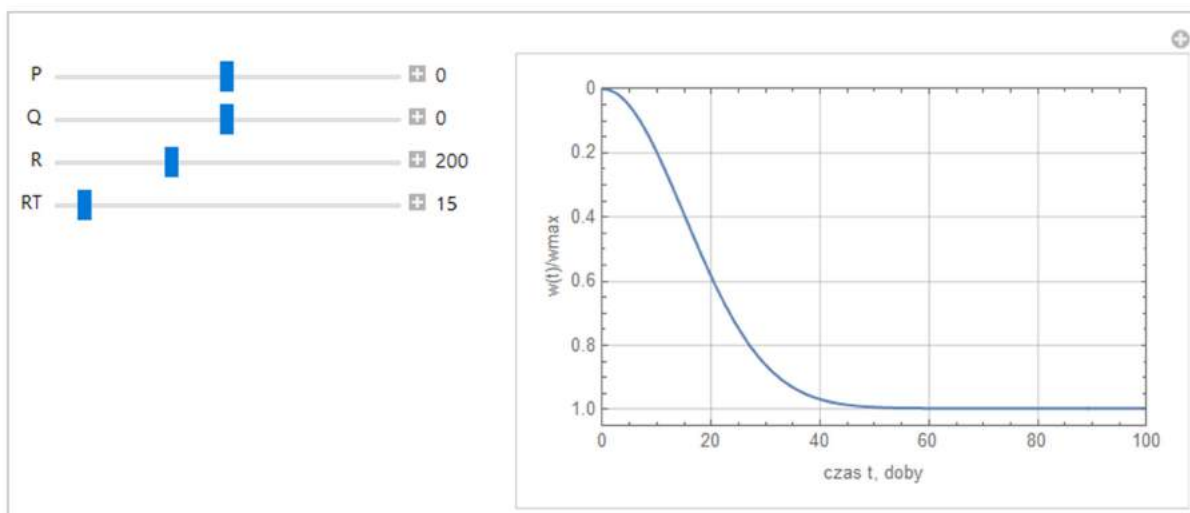
$$w(p, q, t) = \sum_{i=1}^N w_{ei}(p, q, t)_{t_{ei}} \quad (6.15)$$

Na rysunkach 6.8 - 6.10 przedstawiono przykładowe przebiegi osiadania w czasie punktu zlokalizowanego nad środkiem pola o kształcie prostokąta dla trzech wybranych wartości parametru r_i . Poniższe rysunki stanowią wycinek notatnika przygotowanego w programie Wolfram Mathematica, którego kod został zamieszczony w dodatku do niniejszej pracy w rozdziale 11. Za pomocą tego notatnika możliwe jest interaktywne badanie przebiegu analizowanych funkcji z możliwością graficznej prezentacji wyników w czasie rzeczywistym.

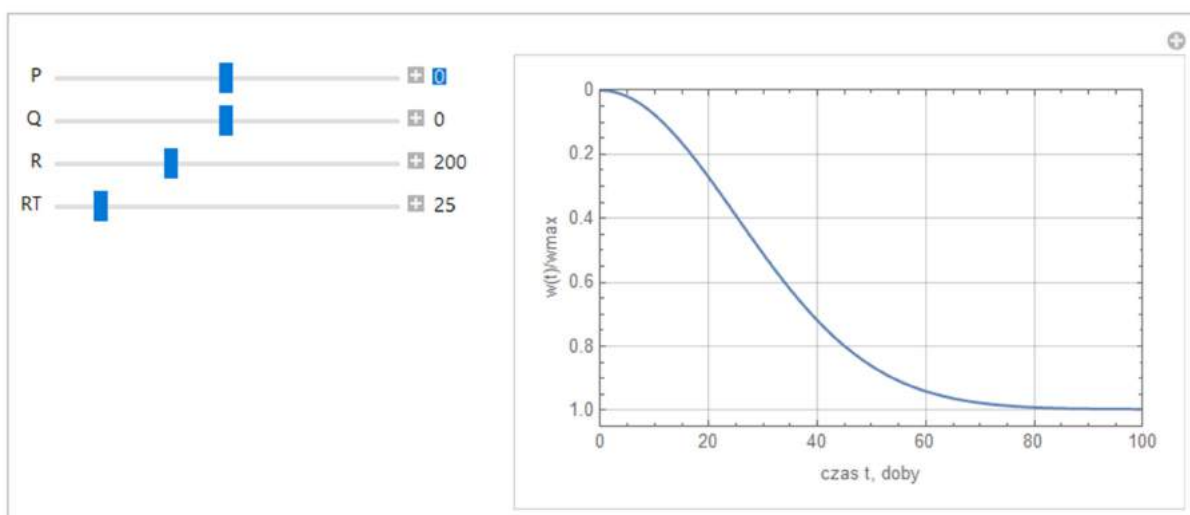
Na rysunkach 6.8 – 6.10 zapis zmiennych wykorzystany w równaniu (6.14) został uproszczony z uwagi na wymogi tego programu: P, Q to współrzędne punktu, R – promień zasięgu wpływów głównych przyjęty w tym przypadku jako równy 200m, RT – parametr ujmujący czas ujawniania się wpływów. Pole eksploatacyjne ma kształt prostokąta o wymiarach 500 x 500 metrów, a współrzędne analizowanego punktu $(p, q) = (0, 0)$, czyli punkt znajduje się dokładnie nad środkiem tego pola.



Rys.6.8 Przebieg obniżen w czasie punktu zlokalizowanego nad środkiem prostokątnego pola eksploatacyjnego dla wartości parametru $r_i=5.0$



Rys.6.9 Przebieg obniżeń w czasie punktu nad środkiem pola dla wartości parametru $r_i=15.0$



Rys.6.10 Przebieg obniżeń w czasie punktu nad środkiem pola dla wartości parametru $r_i=25.0$

6.3. Weryfikacja modelu bazowego

W celu przeprowadzenia weryfikacji modelu bazowego wykonano szereg obliczeń, które pozwoliły na porównanie proponowanego rozwiązania z modelem S. Knothego. Aby można było wykonać niezbędne obliczenia, konieczne było stworzenie odpowiedniego oprogramowania pozwalającego na identyfikację parametrów modelu oraz porównanie z modelem referencyjnym. Oprogramowanie to o nazwie Ray-Param zostało opisane w dodatku do niniejszej pracy (rozdział 11). Weryfikację przeprowadzono na podstawie wyników obserwacji geodezyjnych na liniach obserwacyjnych, które zostały scharakteryzowane w rozdziale 5 pracy.

Do identyfikacji parametrów odpowiedzialnych za opis nieustalonej fazy deformacji niezbędne było wyznaczenie parametrów charakteryzujących profil niecki asymptotycznej: współczynnik kierowania stropem a , parametr charakteryzujący rozproszenie wpływów $tg\beta$ oraz obrzeże eksploatacyjne d . Wyznaczone wartości tych parametrów zestawiono w rozdziale 5.2 pracy.

W ramach weryfikacji dokonano wyznaczenia wartości parametrów nowego modelu: r_t oraz współczynnika prędkości osiadania c modelu S. Knothego na podstawie przebiegów obniżen w czasie dla wybranych punktów obserwacyjnych. Zgodnie z wnioskami wynikającymi z analizy literatury, do weryfikacji wybrano punkty z linii obserwacyjnych znajdujące się nad polem eksploatacyjnym. Dla każdego wybranego punktu zrealizowano zadanie znalezienia optymalnej w sensie metody najmniejszych kwadratów wartości danego parametru (c lub r_t), przy której uzyskano opis przebiegu osiadania nieustalonego w czasie najlepiej aproksymujący przebieg zaobserwowany pomiarem.

Wyniki obliczeń dla poszczególnych punktów obserwacyjnych przedstawiono graficznie za pomocą diagramu zbudowanego z trzech wykresów:

- przebieg osiadania w czasie,
- wykres rozrzutu wartości obniżen uzyskanych na podstawie modelu w stosunku do pomiaru wraz z określeniem wartości współczynnika determinacji,
- wykres wartości rezydualnych.

Dla celów wykonania powyższej analizy opracowano skrypt w języku Python realizujący w sposób automatyczny powyższe zadanie. Szczegółowy opis skryptu przedstawiono w rozdziale 11, stanowiącym załącznik do niniejszej pracy.

Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki dla poszczególnych analizowanych linii obserwacyjnych. Z uwagi na ograniczoną objętość, w pracy przedstawiono dla każdej linii obserwacyjnej wykresy dla trzech wybranych punktów, natomiast dla pozostałych przeanalizowanych punktów wyniki zestawiono w tabeli zbiorczej, gdzie podano otrzymane wartości parametru c i r_t oraz miary jakości dopasowania, zgodnie z opisem programów zawartym w dodatku do pracy.

Wyniki obliczeń dla linii B-L z terenu KWK Debieńsko.

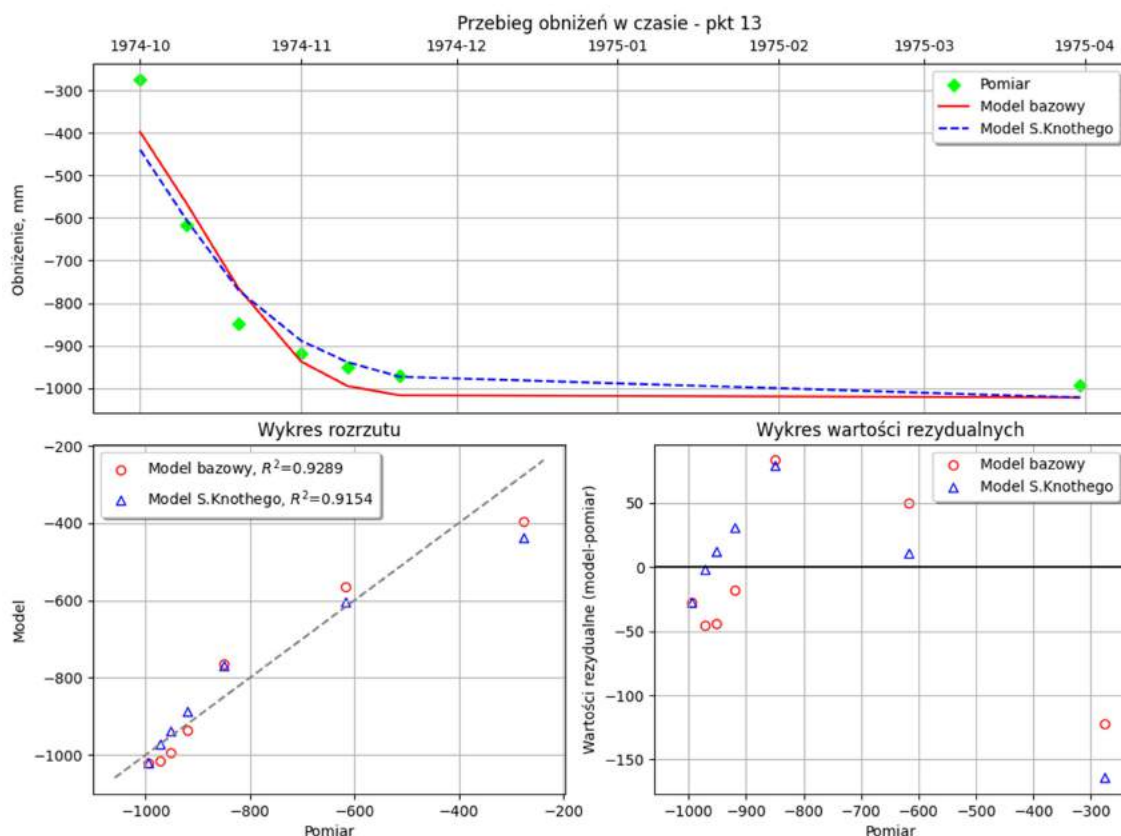
Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.1. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych

zaprezentowano w tabeli 6.1, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.13a - 6.13c.

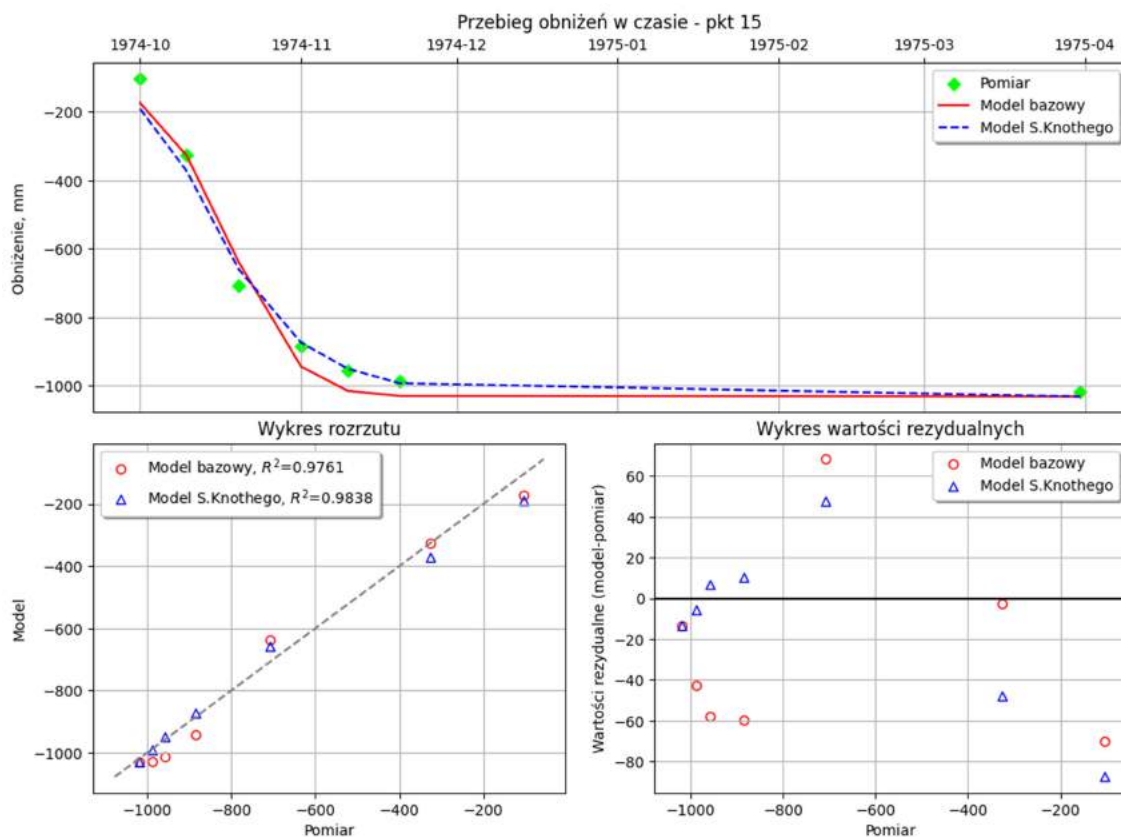
Tabela 6.1

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothe'go wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia B-L, KWK Dębniński.

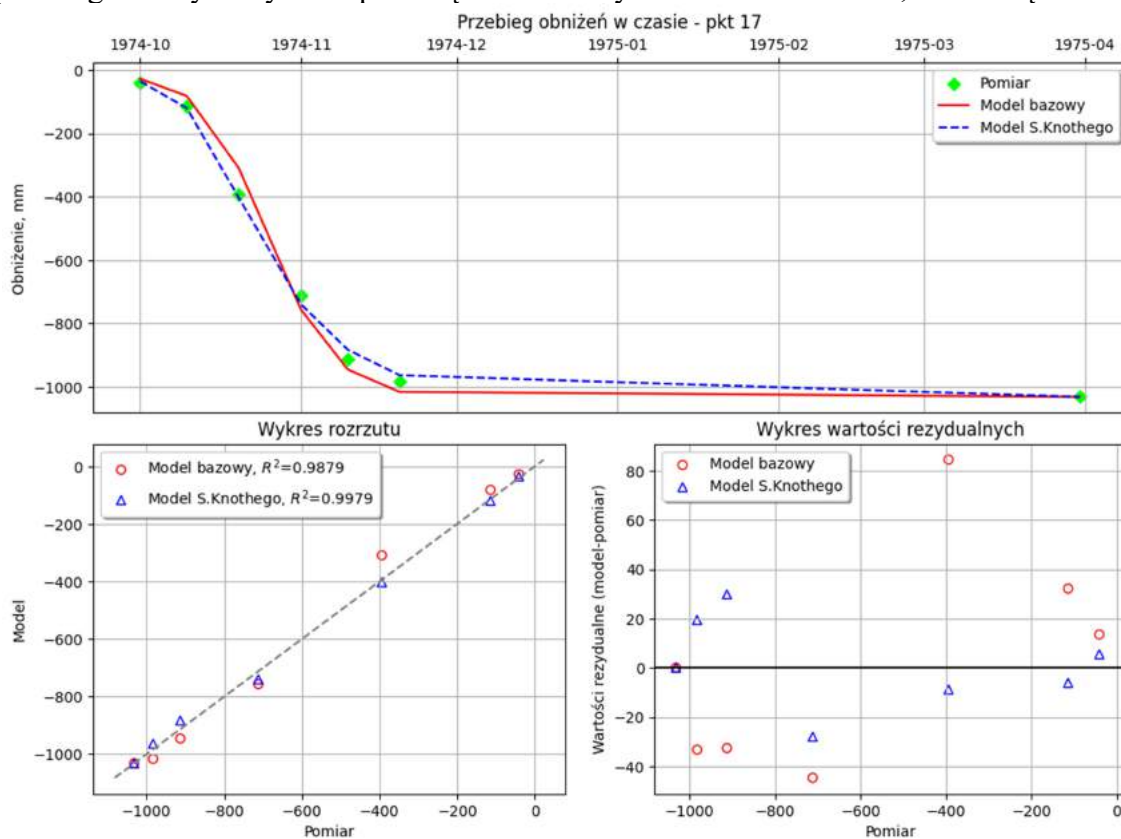
Numer punktu	Model S. Knothe'go					Model bazowy				
	c	M_s	M_k	M_p	R^2	r_t	M_s	M_k	M_p	R^2
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
9	0.029	11.19	13.31	3.19	0.8684	30.25	18.66	21.38	5.13	0.6593
11	0.047	37.59	50.11	5.34	0.8639	18.75	26.81	35.71	3.81	0.9305
13	0.053	46.56	70.86	7.13	0.9154	15.00	55.97	64.99	6.54	0.9289
15	0.074	31.32	42.42	4.17	0.9838	10.00	45.15	51.57	5.07	0.9761
17	0.078	13.97	17.72	1.72	0.9979	10.00	34.39	42.29	4.10	0.9879
18	0.077	43.83	54.57	5.34	0.9816	10.00	31.10	37.26	3.65	0.9914
19	0.086	43.10	61.34	5.96	0.9772	9.00	35.41	44.70	4.35	0.9879
20	0.100	36.54	52.47	5.08	0.9828	7.50	28.81	37.84	3.66	0.9904



Rys.6.13a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 13 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębniński.



Rys.6.13b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębieńsko.



Rys.6.13c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 17 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębieńsko.

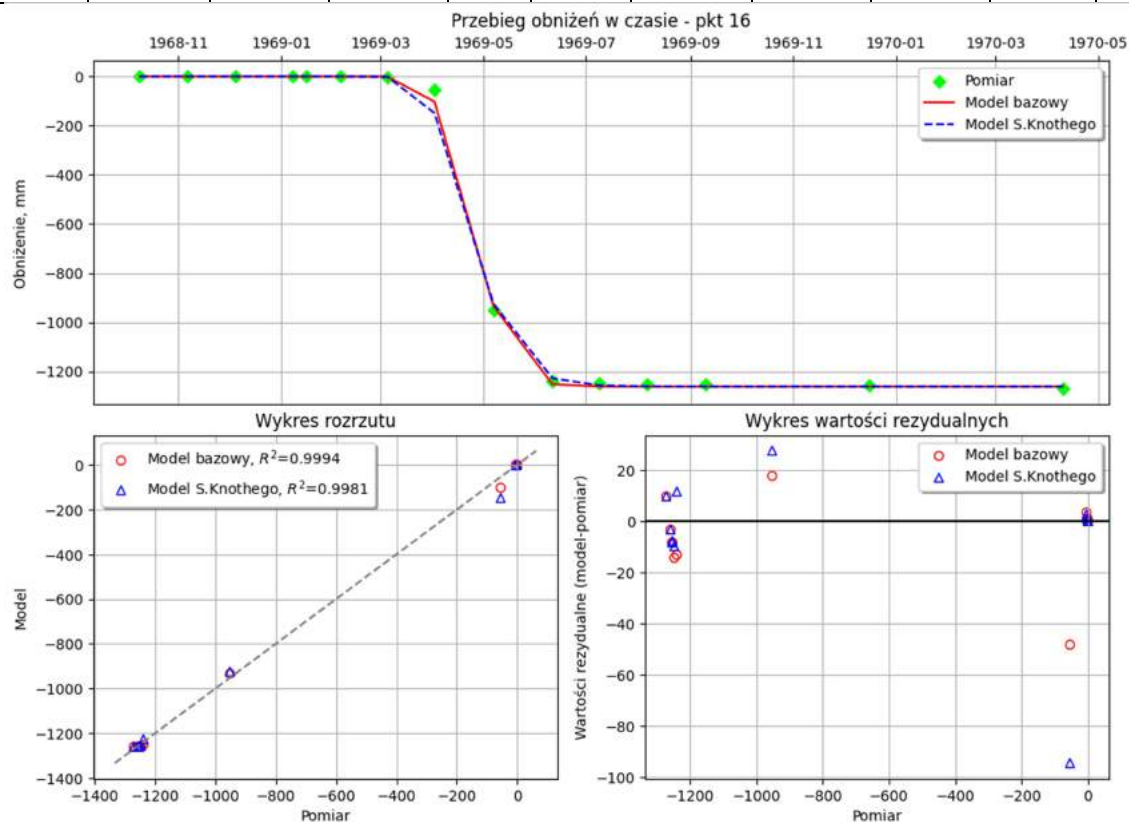
Wyniki obliczeń dla linii 2 z terenu KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.4. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.2, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.14a - 6.14c.

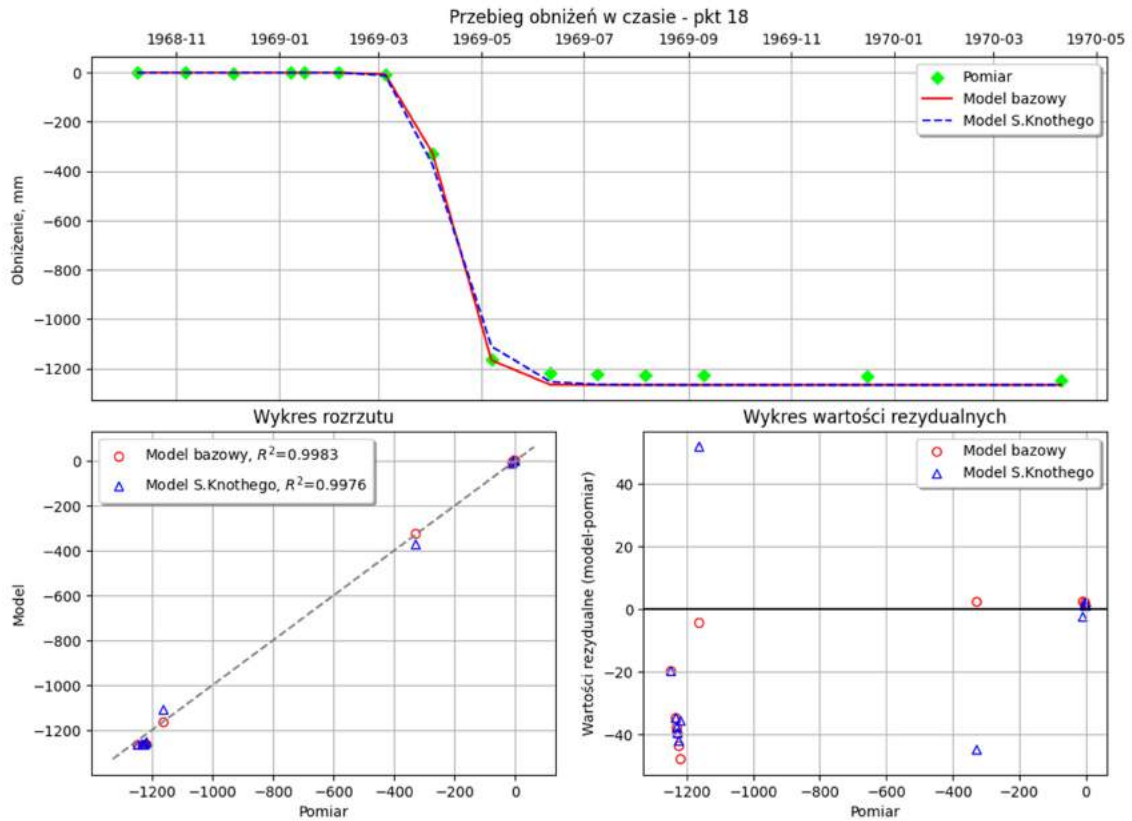
Tabela 6.2

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knotheego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 2, KWK Jan Kanty.

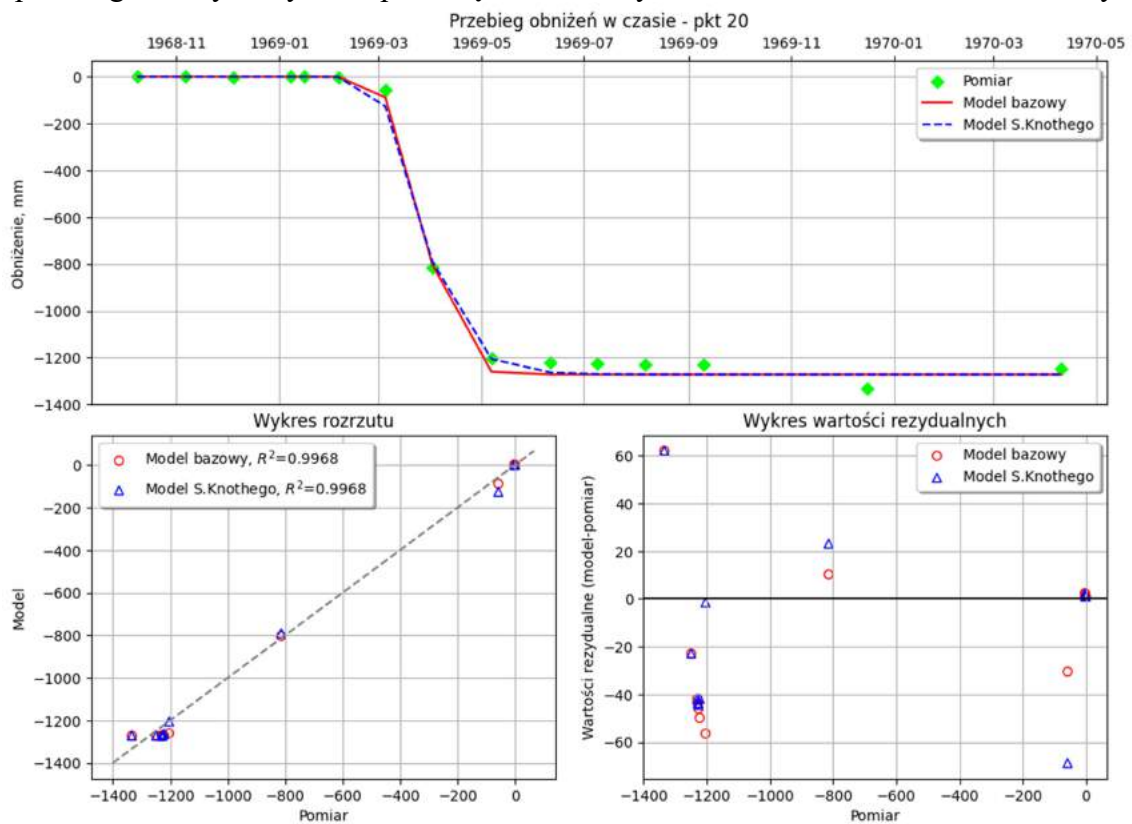
Numer punktu	Model S. Knotheego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
14	0.054	27.46	40.04	3.34	0.9949	14.3	21.75	29.42	2.46	0.9972
16	0.072	11.81	26.04	2.05	0.9981	11.2	8.57	14.78	1.16	0.9994
18	0.073	21.10	28.75	2.31	0.9976	10.2	16.02	24.35	1.95	0.9983
20	0.060	23.87	33.70	2.53	0.9968	12.1	24.83	33.57	2.52	0.9968
22	0.068	15.13	25.91	2.02	0.9921	11.6	7.87	11.46	0.89	0.9942
24	0.077	11.94	21.21	1.63	0.9917	10.0	11.67	17.14	1.31	0.9924
26	0.063	25.16	43.87	3.42	0.9858	10.6	19.50	33.25	2.59	0.9900
28	0.060	27.92	50.85	3.93	0.9795	13.0	18.82	32.86	2.54	0.9844



Rys.6.14a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.



Rys.6.14b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 18 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.



Rys.6.14c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 20 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.

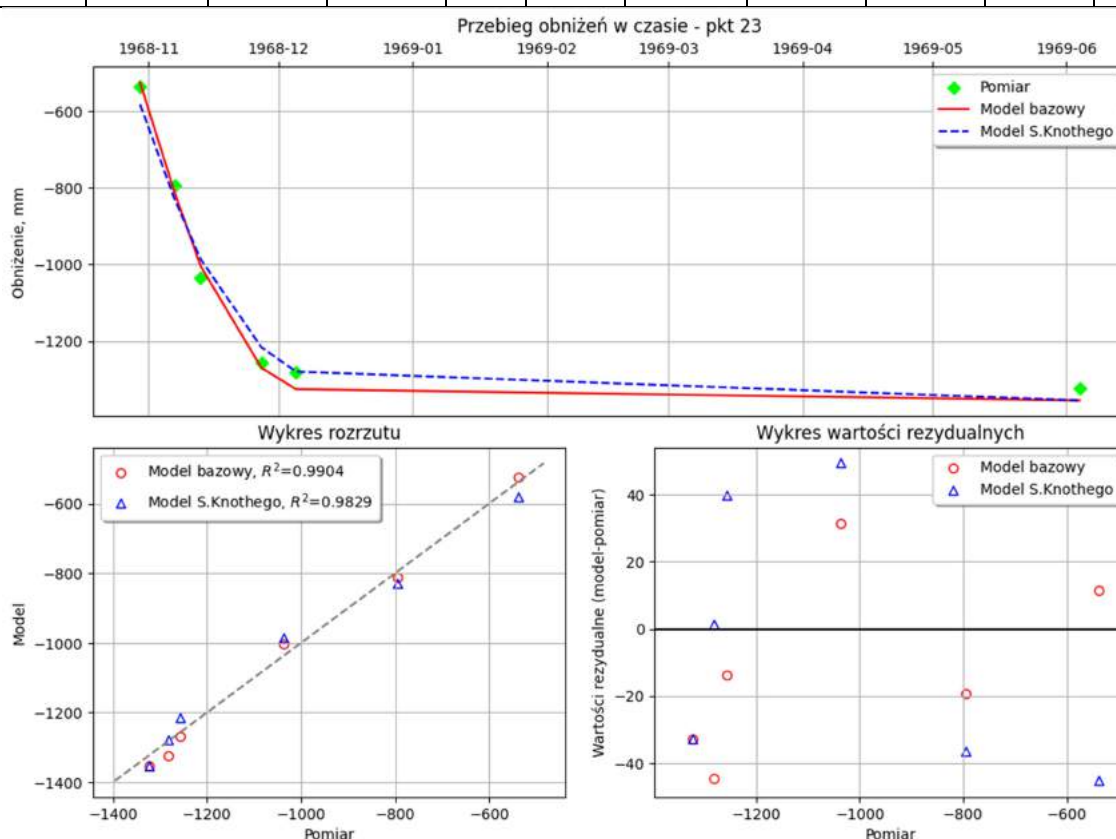
Wyniki obliczeń dla linii 4a z terenu KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 23, 24, 25, 30, 33, 34, 35. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.4. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.3, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.15a - 6.15c.

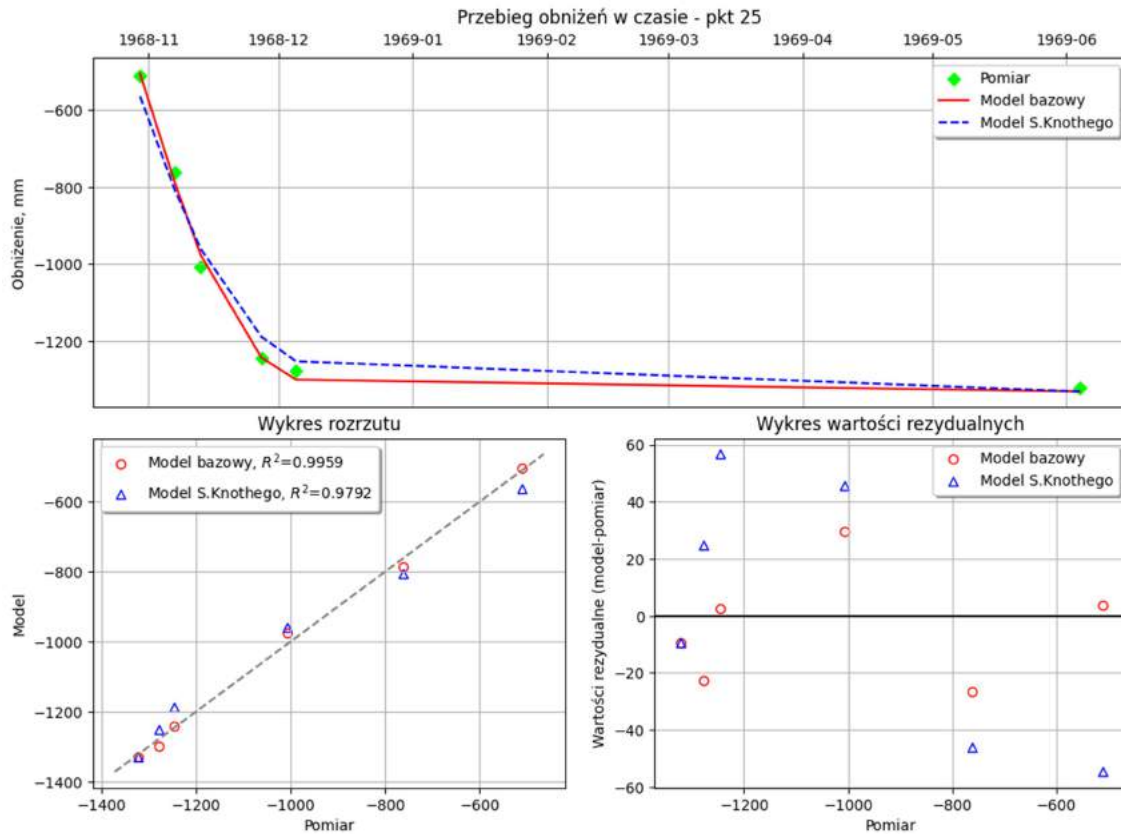
Tabela 6.3

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 4a, KWK Jan Kanty.

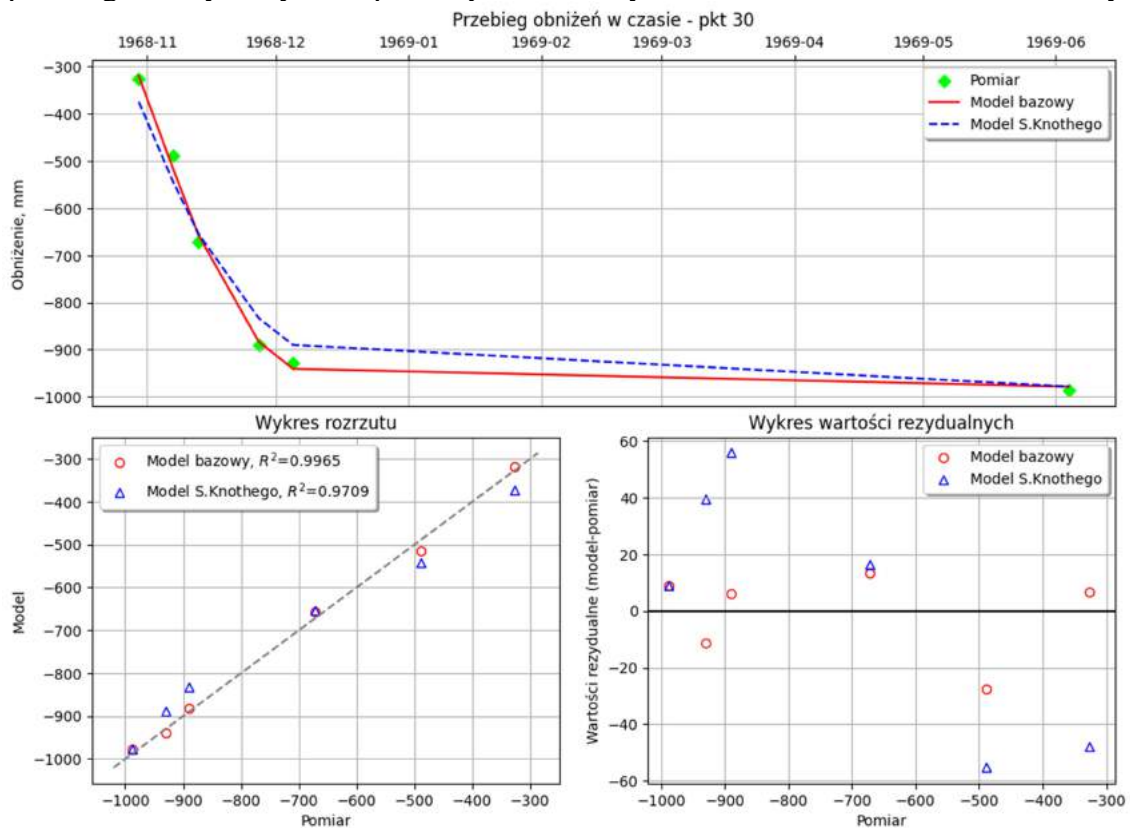
Numer punktu	Model S. Knothego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
23	0.079	34.22	37.65	2.85	0.9829	10.00	25.63	28.21	2.13	0.9904
24	0.076	38.24	40.98	3.11	0.9807	10.25	23.69	26.92	2.04	0.9917
25	0.077	39.60	43.07	3.26	0.9792	10.25	15.76	19.21	1.45	0.9959
30	0.063	37.18	41.51	4.21	0.9709	12.25	12.23	14.29	1.45	0.9965
33	0.043	19.41	21.98	4.16	0.9736	16.75	20.36	23.81	4.51	0.9690
34	0.039	14.34	17.31	4.37	0.9712	18.00	18.01	20.83	5.26	0.9583
35	0.039	8.58	10.24	3.48	0.9817	18.75	12.25	13.35	4.54	0.9689



Rys.6.15a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 23 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



Rys.6.15b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 25 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



Rys.6.15c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 30 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.

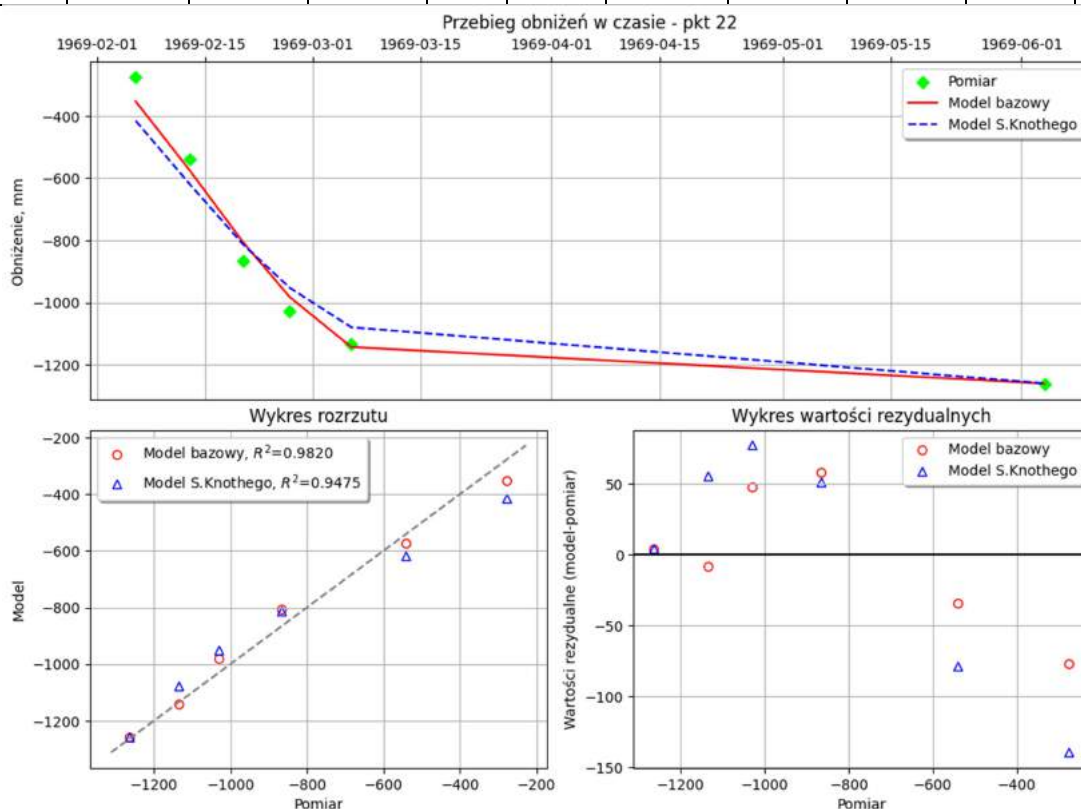
Wyniki obliczeń dla linii 5a z terenu KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 20, 22, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 33. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.4. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.4, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.16a - 6.16c.

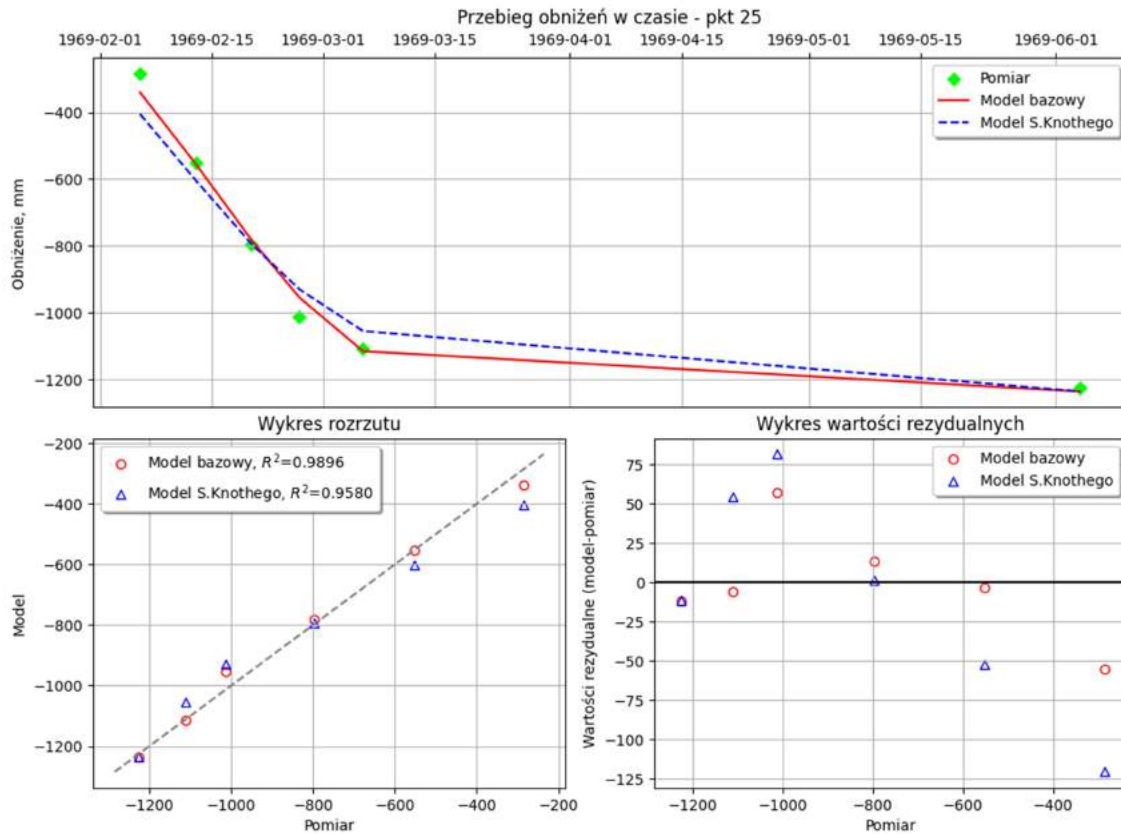
Tabela 6.4

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knotheho wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 5a, KWK Jan Kanty.

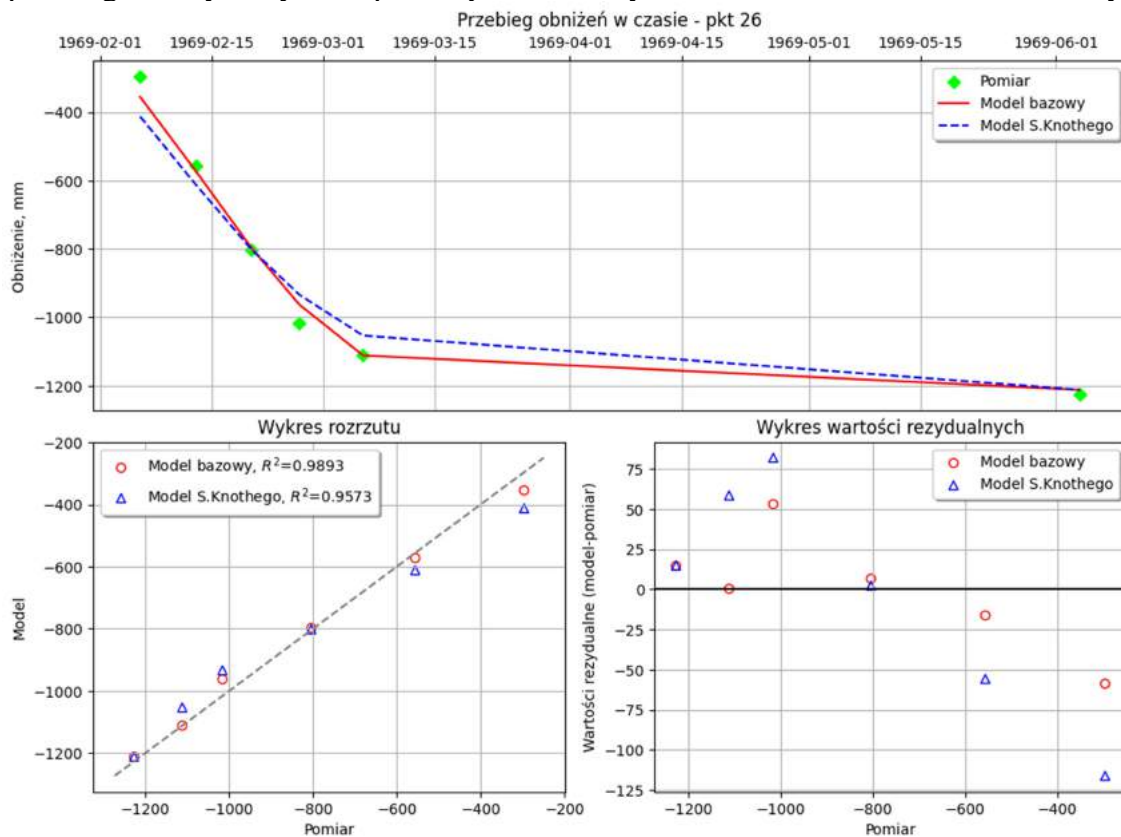
Numer punktu	Model S. Knotheho					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
20	0.072	67.95	78.71	6.17	0.9481	10.75	36.73	43.75	3.43	0.9840
22	0.070	67.49	78.74	6.23	0.9475	11.00	38.11	46.16	3.65	0.9820
25	0.069	53.67	67.20	5.49	0.9580	11.25	24.64	33.41	2.73	0.9896
26	0.074	54.97	67.10	5.47	0.9573	10.50	24.96	33.65	2.74	0.9893
27	0.078	58.23	68.69	5.71	0.9532	10.25	31.17	37.56	3.13	0.9860
29	0.086	68.30	76.27	6.91	0.9323	9.40	46.17	52.59	4.77	0.9678
30	0.087	65.72	73.08	7.40	0.9235	9.25	46.21	52.81	5.34	0.9601
32	0.070	32.22	38.29	5.66	0.9550	11.00	15.43	20.50	3.03	0.9871
33	0.063	18.17	23.13	4.53	0.9703	12.00	8.49	10.51	2.06	0.9939



Rys.6.16a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 22 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



Rys.6.16b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 25 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



Rys.6.16c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 26 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.

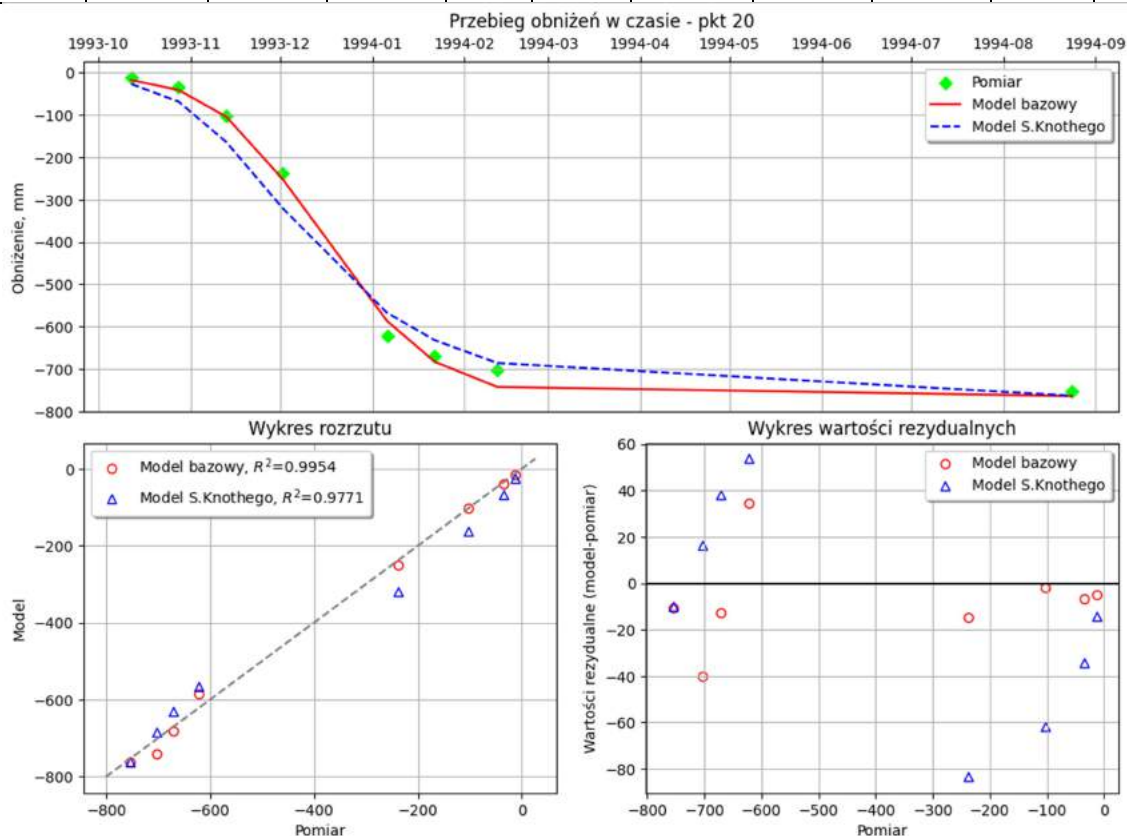
Wyniki obliczeń dla linii 1 z terenu KWK Czczott.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 18, 20, 50, 52, 54, 56, 58, 60. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.13. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.5, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.17a - 6.17c.

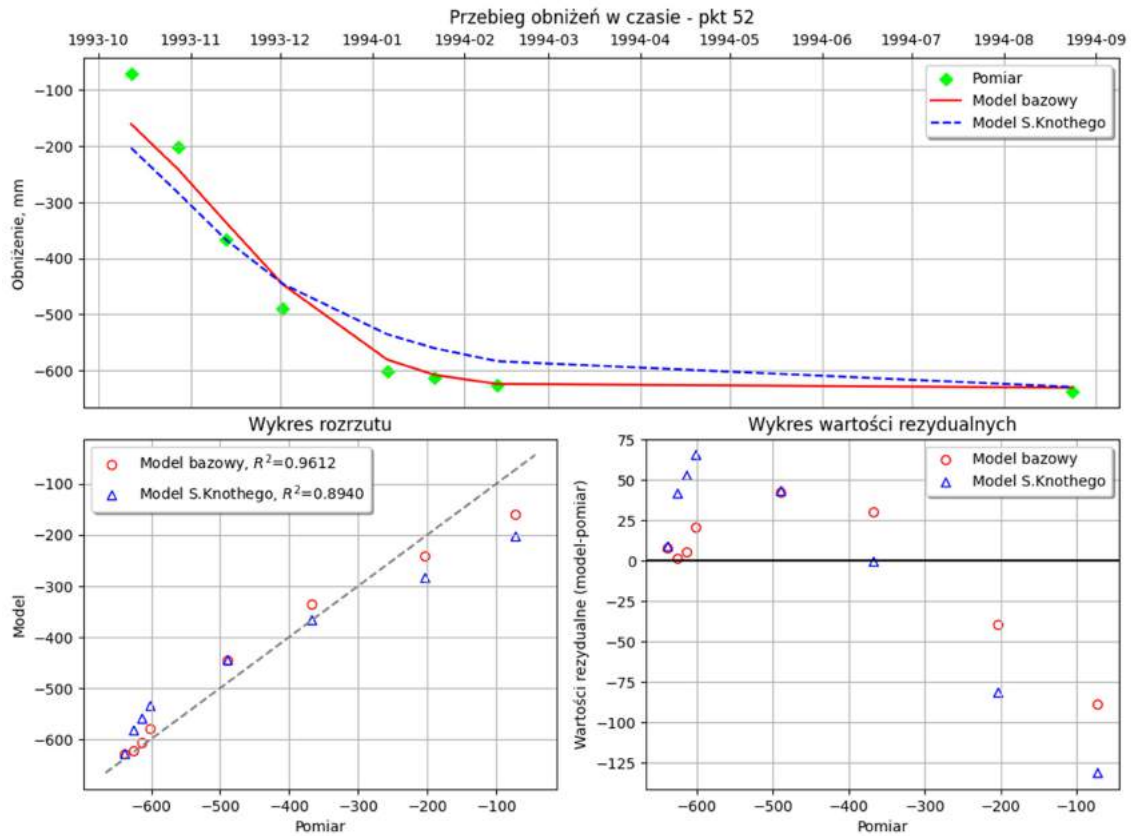
Tabela 6.5

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothe'go wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Czczott.

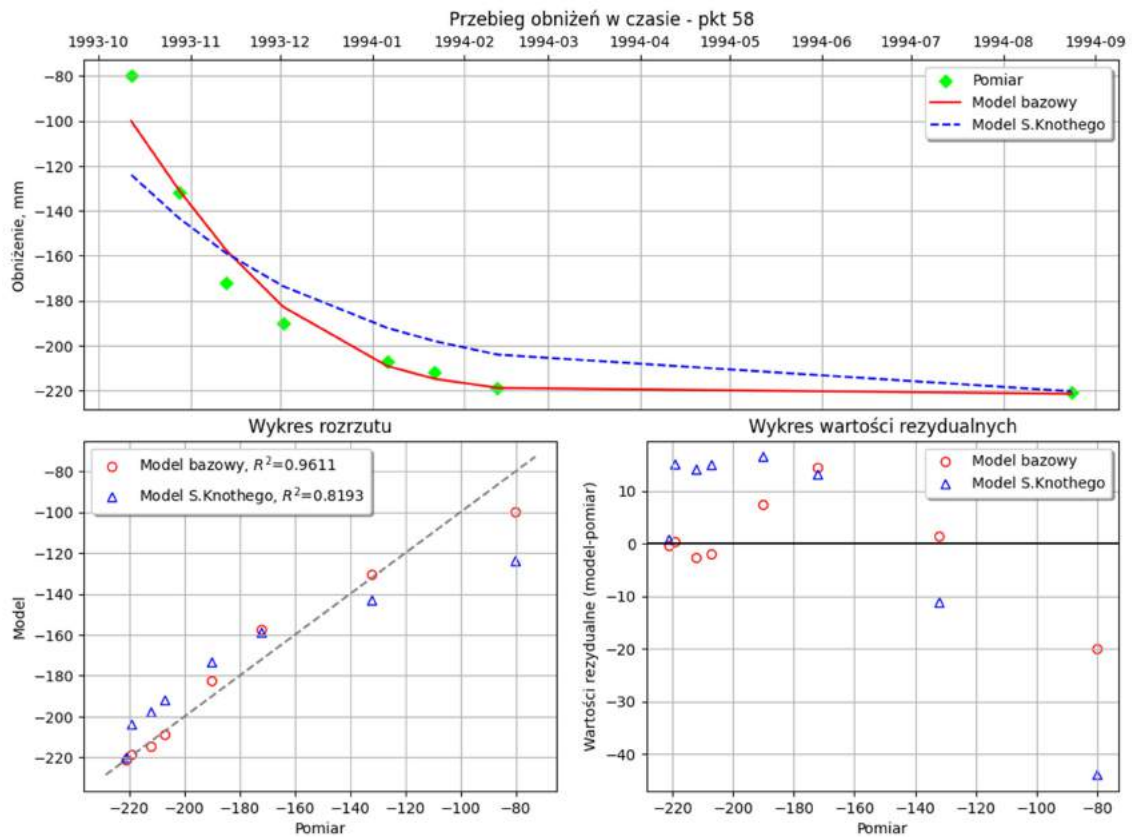
Numer punktu	Model S. Knothe'go					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
18	0.032	47.98	52.90	7.29	0.9641	32.00	15.48	20.13	2.77	0.9948
20	0.025	39.04	45.95	6.10	0.9771	30.75	15.94	20.59	2.73	0.9954
50	0.022	51.77	61.58	8.72	0.9401	34.75	24.14	31.96	4.53	0.9839
52	0.019	53.26	65.89	10.33	0.8940	40.25	29.52	39.84	6.24	0.9612
54	0.015	48.19	56.02	10.79	0.8530	47.75	23.71	33.26	6.41	0.9457
56	0.014	28.47	34.86	9.55	0.8375	54.75	17.71	21.21	5.81	0.9398
58	0.014	16.17	19.84	8.98	0.8193	57.5	6.08	9.20	4.16	0.9611
60	0.020	18.57	20.01	16.14	0.4107	50.00	15.23	16.90	13.63	0.5798



Rys.6.17a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 20 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczott.



Rys.6.17b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 52 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczott.



Rys.6.17c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 58 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczott.

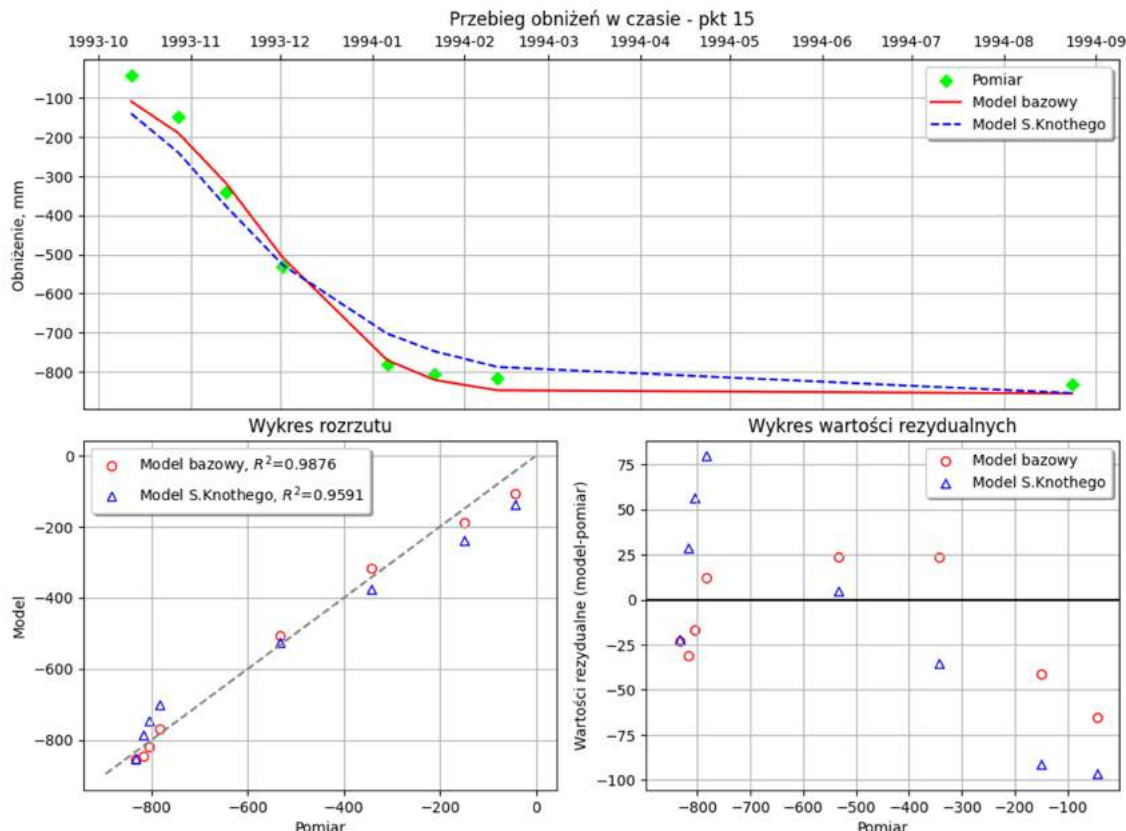
Wyniki obliczeń dla linii 3 z terenu KWK Czczott.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.13. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.6, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.18a - 6.18c.

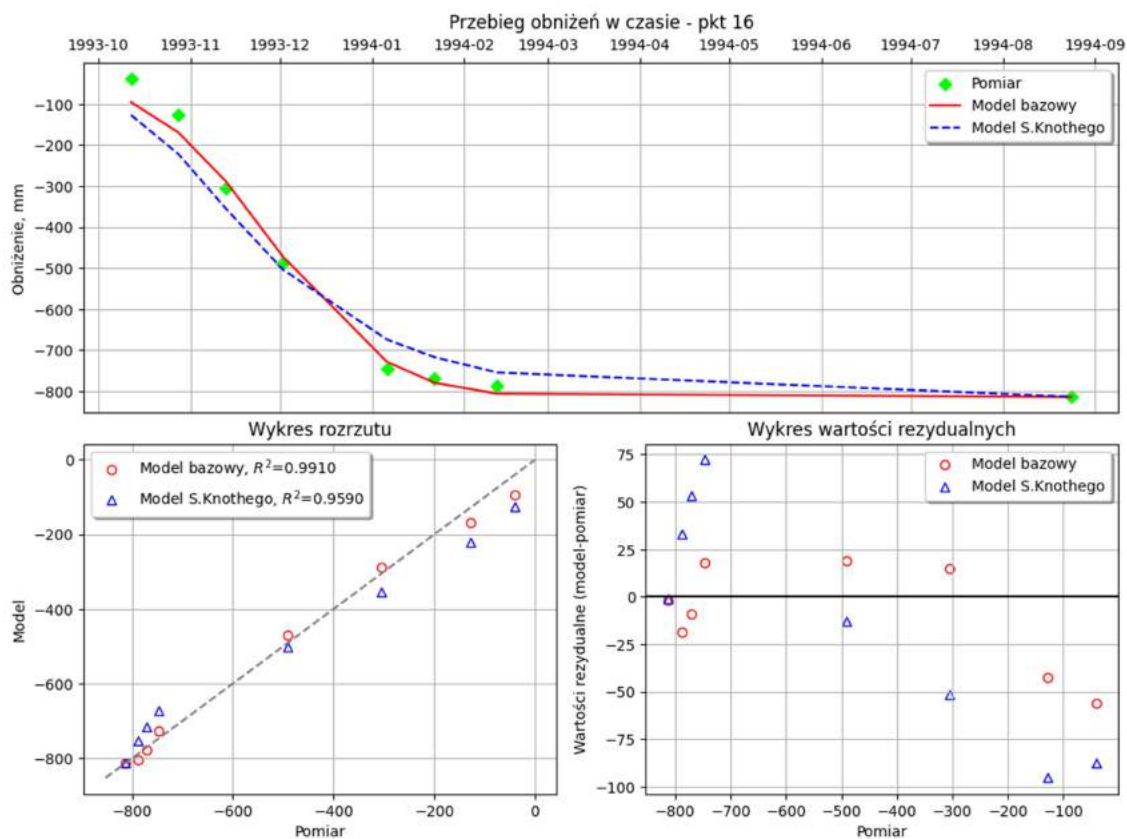
Tabela 6.6

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżeń w czasie do wyników pomiaru. Linia 3, KWK Czczott.

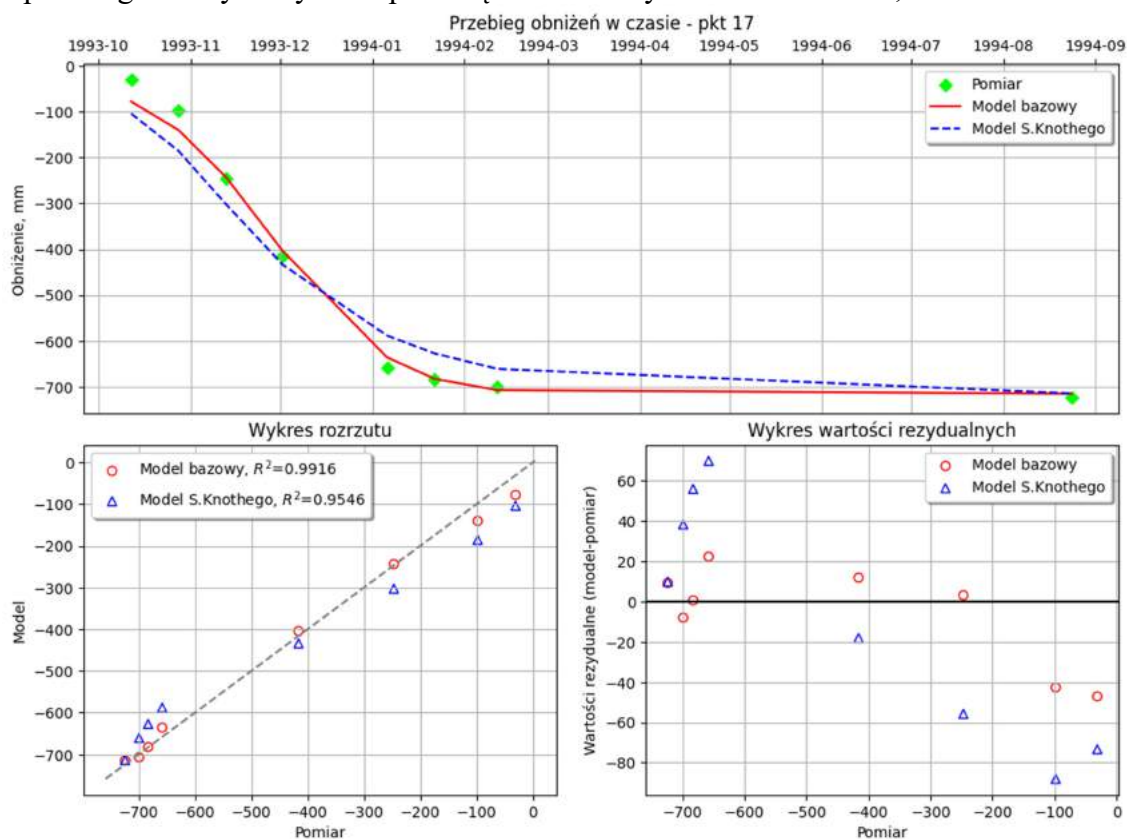
Numer punktu	Model S. Knothego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
11	0.011	31.56	43.00	12.80	0.8352	58.25	50.02	61.65	18.35	0.6612
12	0.014	37.54	46.28	9.48	0.9185	48.00	53.14	63.12	12.93	0.8484
13	0.019	39.94	47.18	7.00	0.9591	37.5	36.66	39.59	5.87	0.9712
14	0.022	48.50	58.51	7.25	0.9582	34.00	30.43	34.34	4.26	0.9856
15	0.023	51.49	61.10	7.34	0.9591	33.25	29.67	33.68	4.05	0.9876
16	0.023	50.94	59.97	7.39	0.9590	33.00	22.37	28.13	3.46	0.9910
17	0.023	51.20	57.20	7.90	0.9546	33.00	18.13	24.59	3.40	0.9916



Rys.6.18a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.6.18b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.6.18c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 17 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czczott.

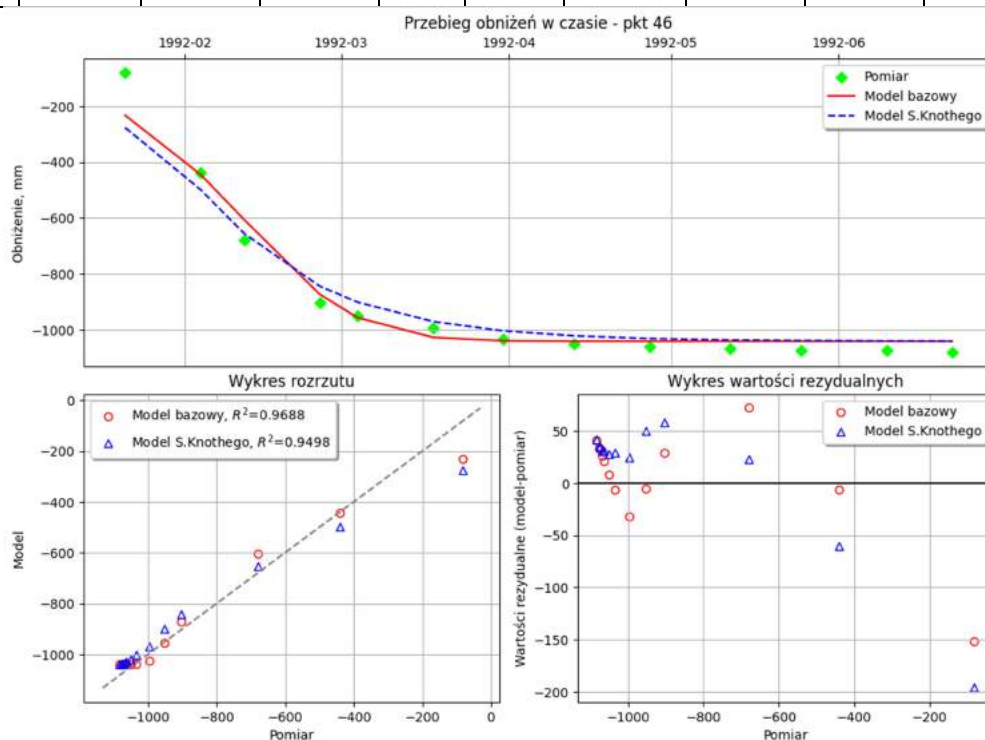
Wyniki obliczeń dla linii 1 z terenu KWK Staszic.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 19, 48, 49, 50. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.19. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.7, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.19a - 6.19c.

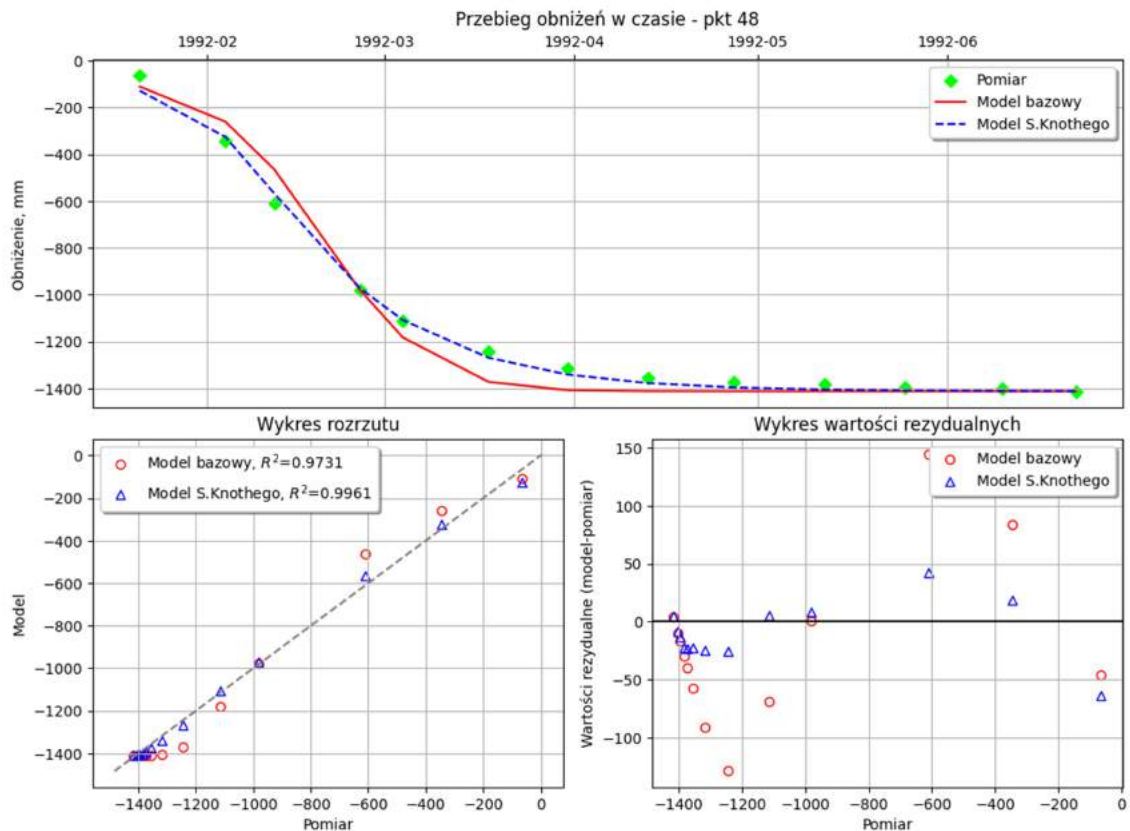
Tabela 6.7

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżzeń w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Staszic.

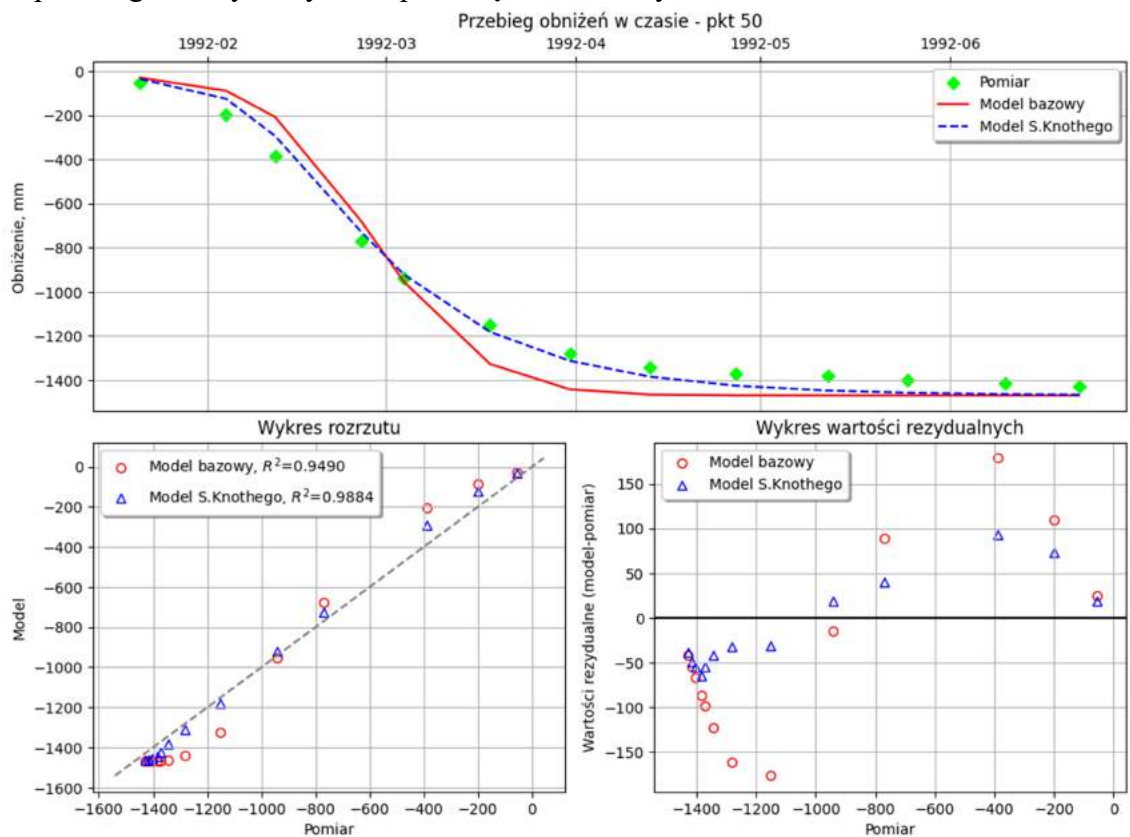
Numer punktu	Model S. Knothego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
40	0.051	23.85	26.14	16.34	0.3961	19.00	21.48	24.57	15.36	0.4665
41	0.031	8.87	10.41	5.31	0.9659	25.00	6.08	7.66	3.91	0.9659
42	0.024	17.14	19.94	6.37	0.9196	28.20	27.34	29.96	9.57	0.8183
43	0.021	37.18	41.23	9.57	0.8325	31.10	59.08	65.05	15.09	0.5832
44	0.030	33.51	43.44	6.92	0.9226	24.00	47.38	49.96	7.96	0.8976
45	0.039	30.38	50.92	6.01	0.9463	19.70	37.63	46.44	5.48	0.9554
46	0.049	49.14	66.00	6.10	0.9498	16.20	35.72	52.05	4.81	0.9688
47	0.054	52.27	66.49	5.33	0.9647	14.70	41.25	55.36	4.44	0.9755
19	0.055	23.21	37.89	2.78	0.9910	13.90	39.67	51.00	3.75	0.9837
48	0.054	21.98	27.15	1.92	0.9961	13.80	55.78	71.35	5.04	0.9731
49	0.053	31.44	36.80	2.55	0.9937	13.30	70.37	88.61	6.14	0.9635
50	0.047	47.27	51.53	3.61	0.9884	14.60	94.71	108.28	7.59	0.9490



Rys.6.19a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 46 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.6.19b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 48 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.6.19c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 50 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.

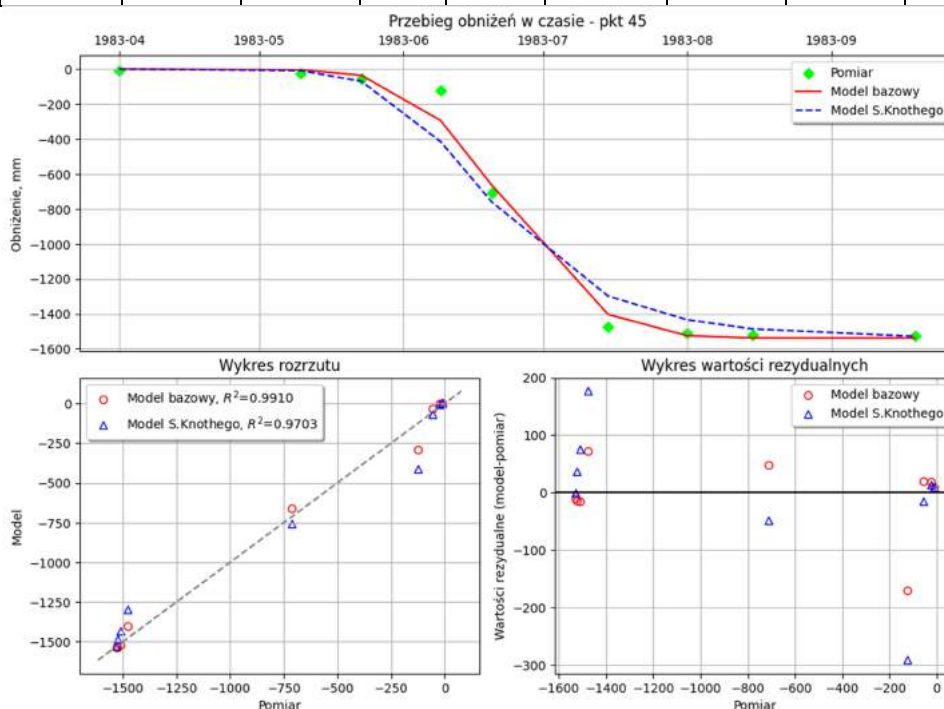
Wyniki obliczeń dla linii 1 z terenu KWK Siersza.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 25, 27, 30, 32, 35, 37, 40, 42, 45, 47, 49, 50, 52. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.22. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.8, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.20a - 6.20c.

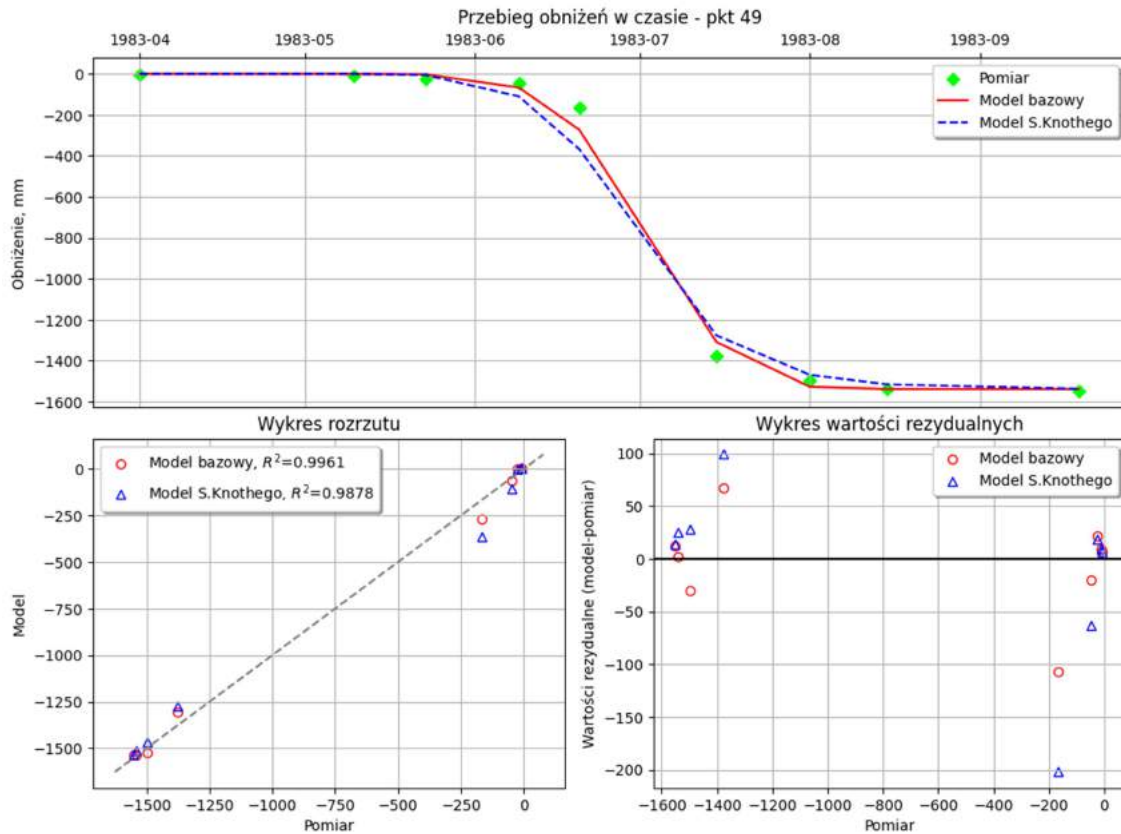
Tabela 6.8

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knotheego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Siersza.

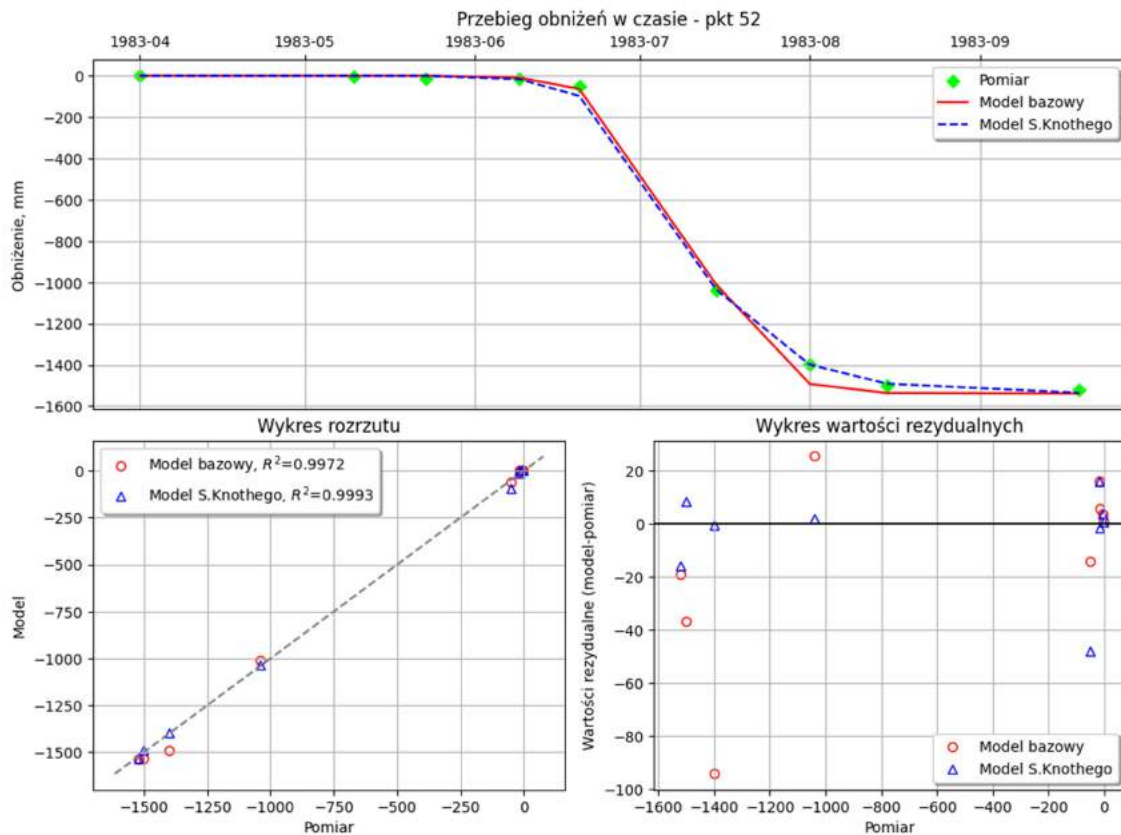
Numer punktu	Model S. Knotheego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
25	0.026	28.63	32.54	4.28	0.8871	26.5	63.43	63.95	8.42	0.5637
27	0.041	86.60	89.88	7.18	0.8444	21.80	55.60	59.54	4.75	0.9317
30	0.021	97.06	106.61	8.35	0.8903	33.90	140.48	155.85	12.21	0.7655
32	0.021	109.10	123.02	9.59	0.8901	32.90	153.89	182.15	14.20	0.7590
35	0.022	115.49	139.76	10.59	0.9087	29.60	143.26	164.70	12.48	0.8732
37	0.028	101.95	122.63	8.97	0.9428	24.00	107.31	126.77	9.27	0.9388
40	0.032	91.30	107.42	7.70	0.9649	21.00	89.84	104.53	7.49	0.9668
42	0.038	97.74	136.67	9.41	0.9535	18.80	81.05	108.03	7.43	0.9710
45	0.049	74.19	118.46	7.76	0.9703	15.60	42.00	65.05	4.26	0.9910
47	0.057	71.19	100.18	6.58	0.9893	13.80	39.43	48.56	3.19	0.9951
49	0.078	51.48	79.40	5.12	0.9878	10.80	30.53	44.82	2.89	0.9961
50	0.100	45.36	59.00	3.67	0.9936	8.90	27.95	37.04	2.30	0.9975
52	0.077	10.73	18.02	1.19	0.9993	10.20	23.98	36.20	2.38	0.9972



Rys.6.20a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 45 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.6.20b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 49 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.6.20c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 52 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.

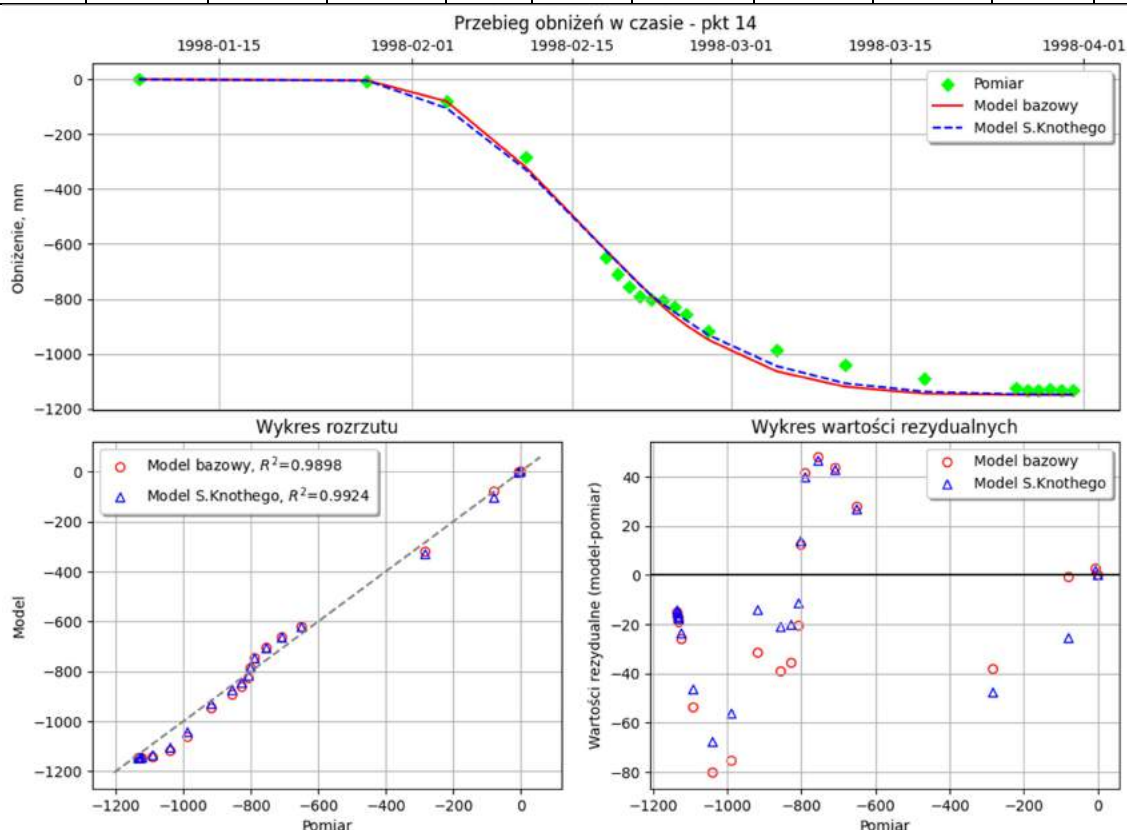
Wyniki obliczeń dla linii ul. Bławatkowa z terenu KWK Jankowice.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18. Szkic rozmieszczenia punktów przedstawiono na rysunku 5.25. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 6.9, zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 6.21a - 6.21c.

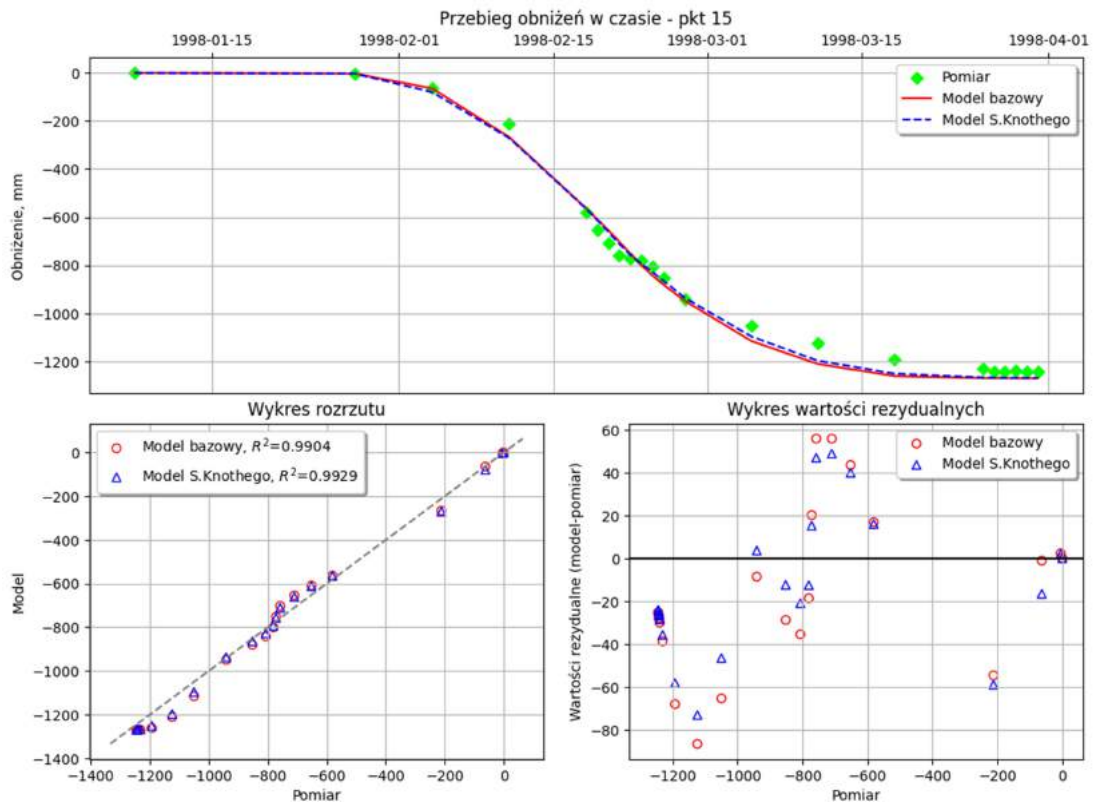
Tabela 6.9

Uzyskane wartości parametrów modelu bazowego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia ul. Bławatkowa, KWK Jankowice.

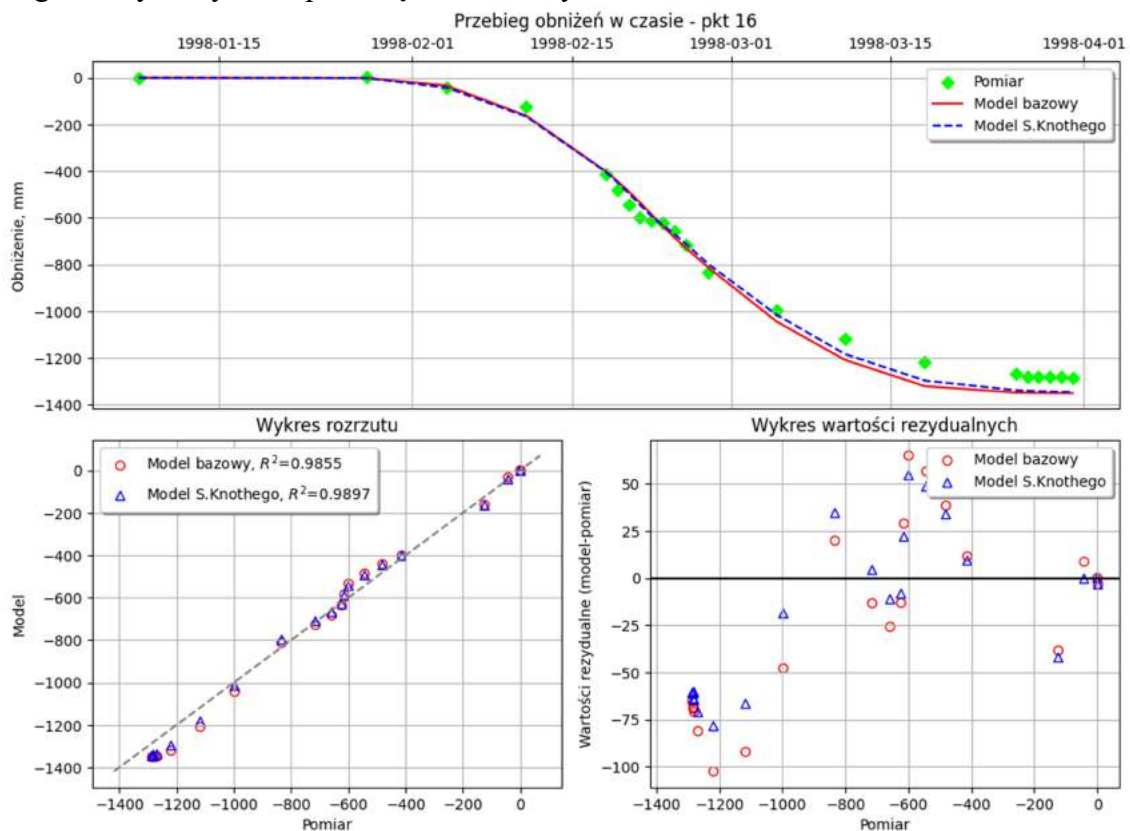
Numer punktu	Model S. Knothego					Model bazowy				
	c	M _s	M _k	M _p	R ²	r _t	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[mm]	[mm]	[%]		[doba]	[mm]	[mm]	[%]	
10	0.031	16.99	19.11	6.92	0.9466	20.30	51.59	57.27	20.75	0.5204
11	0.039	41.22	45.70	10.65	0.8733	14.50	76.26	91.50	21.33	0.4923
12	0.072	50.21	59.21	8.85	0.9164	9.30	73.19	85.25	12.74	0.8267
13	0.133	34.04	40.13	4.29	0.9815	5.80	43.21	50.42	5.39	0.9707
14	0.195	26.65	31.92	2.81	0.9924	4.10	30.22	36.82	3.25	0.9898
15	0.219	28.98	34.88	2.80	0.9929	3.60	33.59	40.50	3.25	0.9904
16	0.191	37.17	45.50	3.54	0.9897	3.90	44.95	54.02	4.20	0.9855
17	0.145	34.65	44.27	3.42	0.9915	4.70	46.99	61.23	4.73	0.9837
18	0.116	27.46	35.22	2.75	0.9951	5.90	48.72	65.83	5.14	0.9829



Rys.6.21a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 14 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia Bławatkowa, KWK Jankowice.



Rys.6.21b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia Bławatkowa, KWK Jankowice.



Rys.6.21c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia Bławatkowa, KWK Jankowice.

6.4 Analiza otrzymanych wyników

Przedstawione w rozdziale 6.3 wyniki weryfikacji modelu bazowego pozwoliły na dokonanie oceny jakości dopasowania przebiegów obniżen w czasie określonych za jego pomocą do przebiegów uzyskanych z pomiarów. Dodatkowo dokonano porównania do przebiegów czasowych osiadań uzyskanych za pomocą modelu S. Knothego.

Analizując wyniki pomiarów pochodzące z linii B-L z terenu KWK Dębieńsko można stwierdzić, że model bazowy wykazuje podobną jakość aproksymacji wyników pomiaru jak w modelu S. Knothego. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 3.65-6.54% w pierwszym przypadku i 1.72 - 7.13% w przypadku modelu S. Knothego. Punkty o numerach: 9, 15, 17 wykazywały lepsze dopasowanie dla modelu S. Knothego, zaś punkty o numerach: 11, 13, 18, 19 oraz 20 lepsze dopasowanie wykazały w przypadku modelu bazowego. Na rys. 6.22 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

Analizując uzyskane wyniki z linii nr 2 z terenu KWK Jan Kanty można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 0.89 - 2.59% w pierwszym przypadku i 1.63 - 3.93% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 6.23 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

W przypadku linii 4a z terenu KWK Jan Kanty można stwierdzić, że model bazowy wykazuje jakość dopasowania do wyników pomiarów również na podobnym poziomie, jak model S. Knothego. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 1.45-5.26 % w pierwszym przypadku i 2.85 - 4.37% w przypadku modelu S. Knothego. Punkty o numerach: 33, 34, 35 wykazywały lepsze dopasowanie dla modelu S. Knothego, zaś punkty o numerach: 23, 24, 25 oraz 30 lepsze dopasowanie wykazały w przypadku modelu bazowego. Na rys. 6.24 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

W przypadku linii 5a z terenu KWK Jan Kanty model bazowy wykazuje lepszą jakość dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 2.06 - 5.34 % w pierwszym przypadku i 4.53 - 7.40% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 6.25 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

Analizując wyniki z linii pomiarowej nr 1 z terenu KWK Czczott można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 2.73 - 13.63% w pierwszym przypadku i 6.10 - 16.14% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 6.26 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

W przypadku linii nr 3 z terenu KWK Czczott, można stwierdzić, że model bazowy wykazuje jakość dopasowania zbliżoną do modelu S. Knothego. Punkty o numerach: 11 oraz 12 wykazywały lepsze dopasowanie dla modelu S. Knothego, zaś punkty o numerach: 13, 14, 15, 16, 17 lepsze dopasowanie wykazały w przypadku modelu bazowego. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 3.40 - 18.35% w pierwszym przypadku i 7.00 - 12.80% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 6.27 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

W przypadku linii nr 1 z terenu KWK Staszic można stwierdzić, że model S. Knothego wykazuje nieco lepsze dopasowanie, lecz generalnie uzyskane wartości błędów procentowych są zbliżone - mieszczą się w przedziale 3.75 - 15.36% w pierwszym przypadku i 1.92-16.34% w przypadku modelu S. Knothego. Punkty o numerach: 42, 43, 44, 19, 48, 48 oraz 50 wykazywały lepsze dopasowanie dla modelu S. Knothego, zaś punkty o numerach: 40, 41, 45, 46, 47 lepsze dopasowanie wykazały w przypadku modelu bazowego. Na rys. 6.28 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

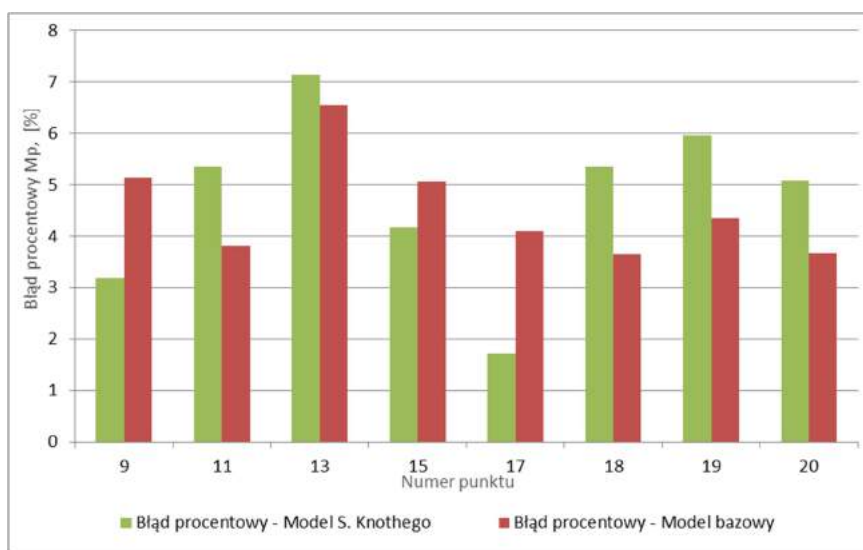
Analizując linię z terenu KWK Siersza, można stwierdzić, że model bazowy wykazuje dopasowanie jakościowo zbliżone do wyników uzyskanych za pomocą modelu S. Knothego. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 2.30 - 14.20% w pierwszym przypadku i 1.19 - 10.59% w przypadku modelu S. Knothego. Punkty o numerach: 25, 30, 32, 35, 37 wykazywały lepsze dopasowanie dla modelu S. Knothego, zaś punkty o numerach: 27, 40, 42, 45, 47, 49, 50 oraz 52 lepsze dopasowanie wykazały w przypadku modelu bazowego. Na rys. 6.29 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

W przypadku linii ul. Bławatkowa z terenu KWK Jankowice można stwierdzić, że model S. Knothego wykazuje lepsze dopasowanie przebiegów obniżenia w czasie do wyników pochodzących z pomiarów niż ma to miejsce w przypadku modelu bazowego. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 3.25 - 21.33% dla modelu bazowego

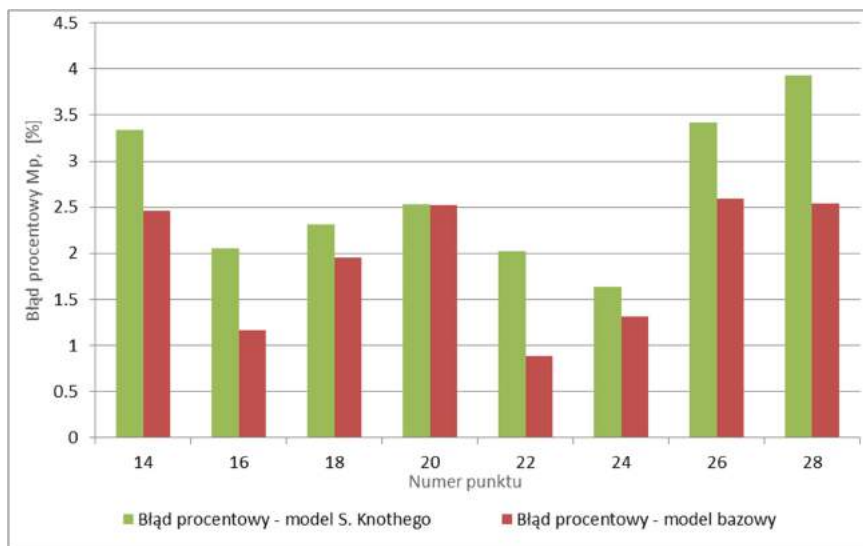
i 2.75 - 10.65% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 6.30 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania obydwu modeli do wyników pomiarów.

Podsumowując przedstawione wyniki weryfikacji proponowanego modelu bazowego należy stwierdzić, że jakość opisu przebiegu osiadania w czasie dla wszystkich analizowanych punktów jest zbliżona do uzyskanej w przypadku klasycznego modelu S. Knothego – jak wynika z rys. 6.31 - w 64% przypadków lepszy opis uzyskano za pomocą opracowanego modelu bazowego, natomiast w 36% przypadków lepszy okazał się model S.Knothego. Stąd należy stwierdzić, że uzyskane wyniki nie są zadowalające – zaproponowany model nie pozwala w znaczącym stopniu poprawić jakości opisu przebiegu procesu deformacji terenu górniczego w czasie.

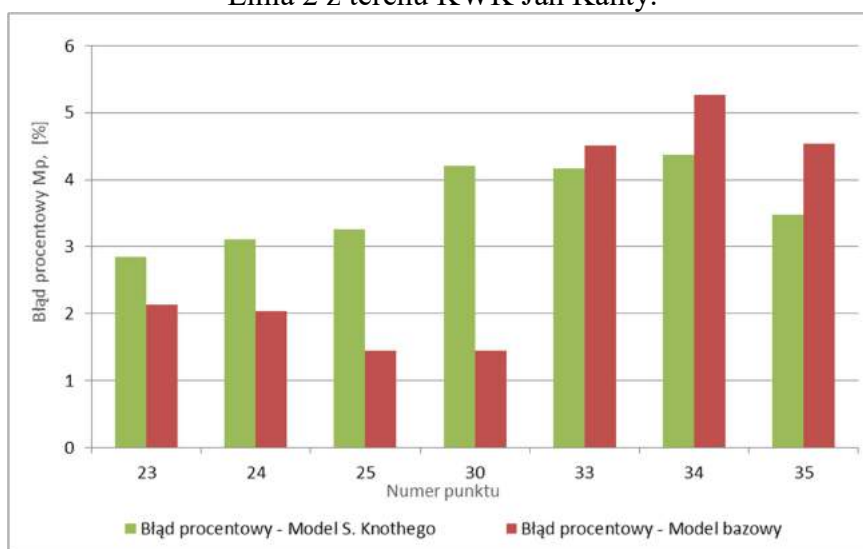
Mając na uwadze powyższe stwierdzenia podjęto dalsze prace nad możliwością modyfikacji modelu bazowego w celu uzyskania lepszego jakościowo rozwiązania. Uzyskane w tym zakresie wyniki zostały przedstawione w następnym rozdziale pracy.



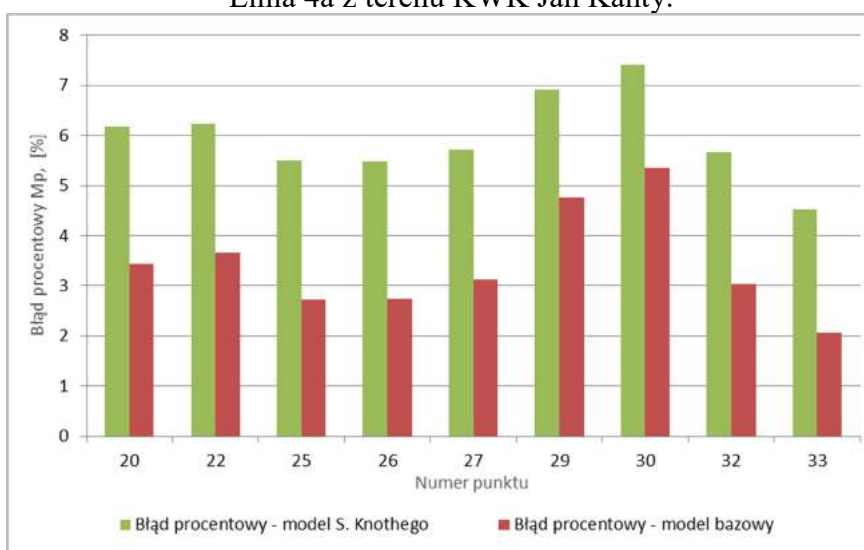
Rys.6.22. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia B-L z terenu KWK Dębieńsko.



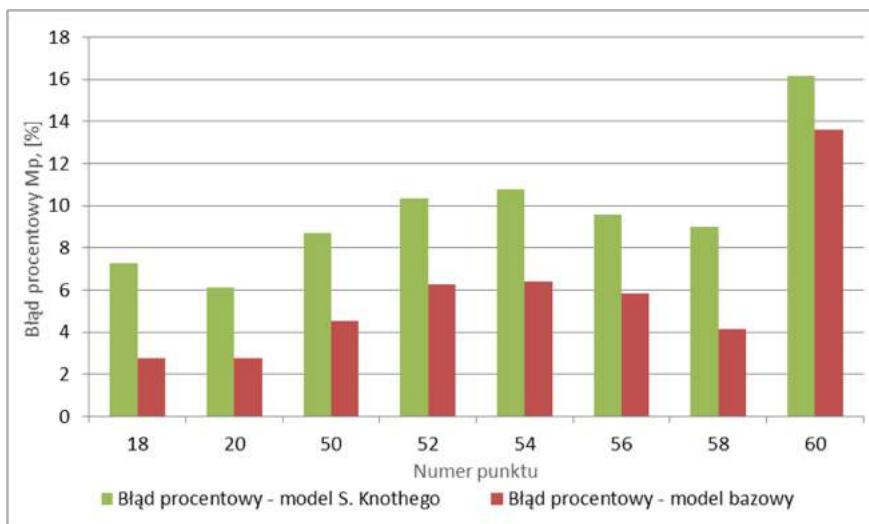
Rys.6.23. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 2 z terenu KWK Jan Kanty.



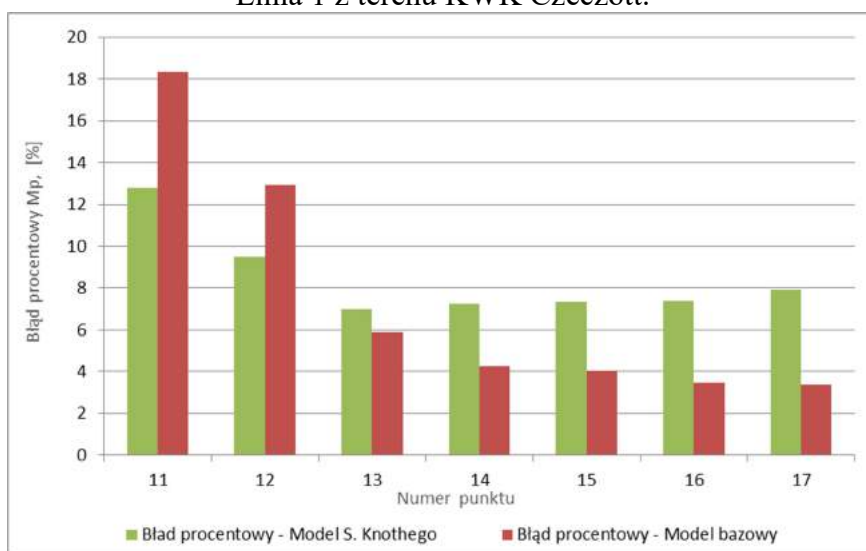
Rys.6.24. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 4a z terenu KWK Jan Kanty.



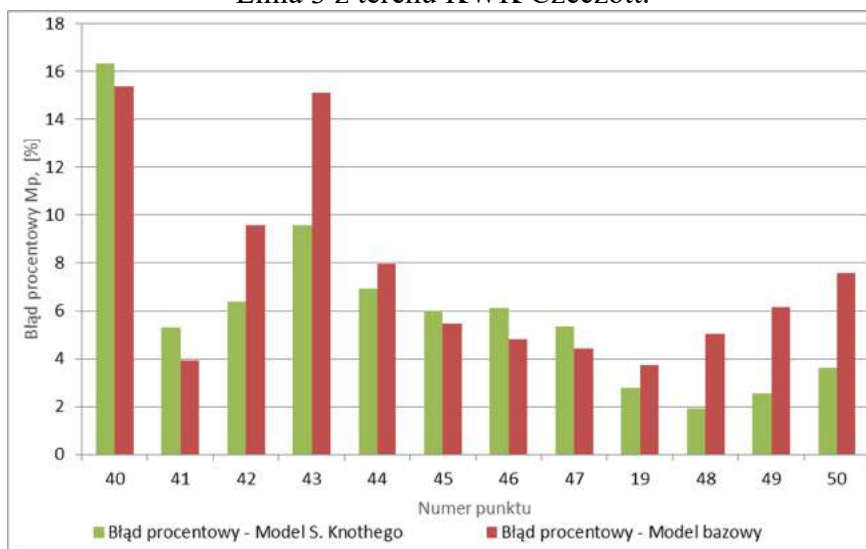
Rys.6.25. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 5a z terenu KWK Jan Kanty.



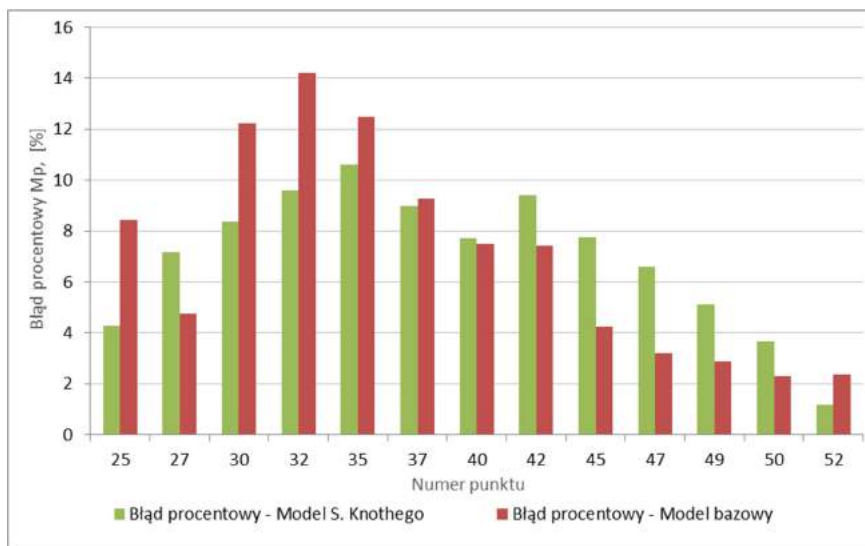
Rys.6.26. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Czczott.



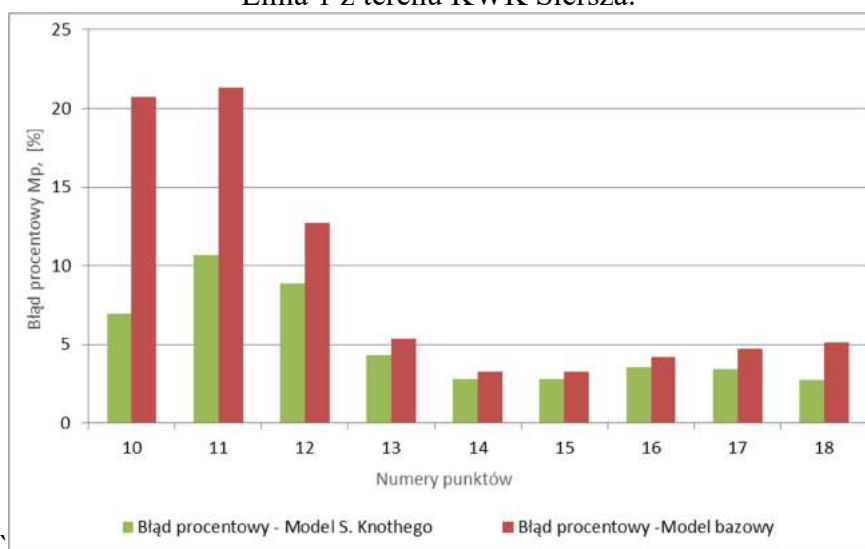
Rys.6.27. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 3 z terenu KWK Czczott.



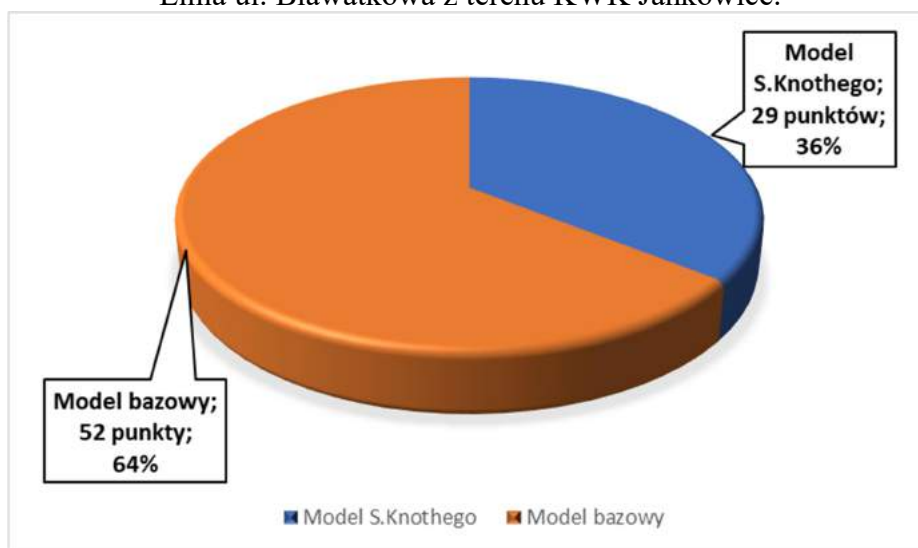
Rys.6.28. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Staszic.



Rys.6.29. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Siersza.



Rys.6.30. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia ul. Bławatkowa z terenu KWK Jankowice.



Rys.6.31. Zbiorcze zestawienie liczebności przypadków, w których dany analizowany model uzyskał lepszą jakość opisu przebiegu obniżen w czasie.

7. KONCEPCJA MODELU ROZSZERZONEGO

Jak to już stwierdzono w zakończeniu rozdziału 6, jakość zaproponowanego tam modelu bazowego określona na bazie porównania teoretycznych przebiegów osiadań w czasie z uzyskanymi z pomiarów geodezyjnych jest zbliżona do modelu S. Knothego. Stąd podjęto dalsze badania mające na celu rozbudowanie modelu bazowego w taki sposób, aby uzyskać rozwiązanie umożliwiające istotną poprawę jakości prognoz nieustalonych deformacji terenu górniczego. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki tych badań, które zaowocowały opracowaniem modelu nazwanego w dalszej części pracy „modelem rozszerzonym”.

7.1. Charakterystyka modelu rozszerzonego

Oprócz podstawowej motywacji przedstawionej powyżej we wstępie do niniejszego rozdziału, do poszukiwania lepszego rozwiązania skłaniała także lektura współczesnej literatury. Wiele pozycji literaturowych (m. in. Kowalski, 1995; Sroka, 1999) wskazuje na fakt, iż proces deformacji terenu górniczego odbywa się szybciej niż to wcześniej stwierdzano.

W szczególności stwierdza się występowanie tzw. "wpływów natychmiastowych" ujawniających się w krótkim czasie kilku- kilkunastu dni oraz "wpływów opóźnionych" obserwowanych na powierzchni w dłuższym okresie (do kilku- kilkunastu miesięcy). Na bazie tego spostrzeżenia proponowane były pewne rozwiązania uwzględniające to zjawisko, np. model zaproponowany przez A. Kowalskiego (Kowalski, 2007).

Mając powyższe na uwadze, zaproponowano rozszerzenie funkcji wpływów zaproponowanej w modelu bazowym. Rozszerzenie to zakłada wykorzystanie rozbudowanej, odpowiednio sparametryzowanej sumy dwóch funkcji PDF Rayleigh'a zdefiniowanych w następujący sposób:

- funkcja $g_1(r_{11})$, opisująca "wpływy natychmiastowe",
- funkcja $g_2(r_{12})$, opisująca "wpływy opóźnione",

przy czym r_{11} i r_{12} to nowe parametry, charakteryzujące odrębnie przebieg każdej z wymienionych dwóch faz procesu deformacji. Zakłada się przy tym, że funkcje g_1 i g_2 są zbudowane na identycznych zasadach, jak to zrealizowano w modelu bazowym.

Odpowiednia kombinacja R_1 funkcji $g_1(\cdot)$ i $g_2(\cdot)$ pozwala na uzyskanie kompleksowego opisu przebiegu osiadania w czasie, w zależności od wartości parametrów r_{11} i r_{12} oraz dodatkowego parametru w_{12} , zdefiniowanych dla odpowiednich funkcji g_1 i g_2 :

$$R_1(\tau, r_{t1}, r_{t2}, w_{12}) = g_1(\tau, r_{t1}) \cdot w_{12} + g_2(\tau, r_{t2}) \cdot (1 - w_{12}) \quad (7.1)$$

gdzie:

r_{t1} – parametr charakteryzujący czas trwania fazy wpływów natychmiastowych,

r_{t2} – parametr charakteryzujący czas trwania fazy wpływów opóźnionych,

w_{12} – parametr charakteryzujący proporcje udziały wpływów natychmiastowych i opóźnionych w procesie obniżenia terenu w fazie nieustalonej ,

τ – czas.

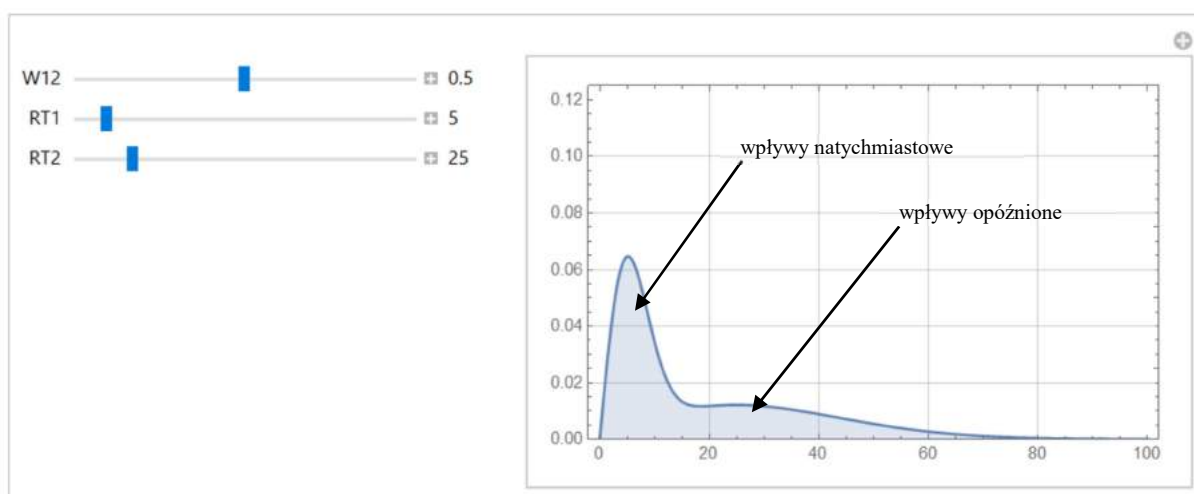
Podstawiając za $g_1(\cdot)$ i $g_2(\cdot)$ odpowiednio sparametryzowane funkcje PDF Rayleigh'a otrzymujemy:

$$R_1(\tau) = \frac{(\tau - t_e)}{r_{t1}^2} \text{Exp}\left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t1}^2}\right) w_{12} + \frac{(\tau - t_e)}{r_{t2}^2} \text{Exp}\left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t2}^2}\right) (1 - w_{12}) \quad (7.2)$$

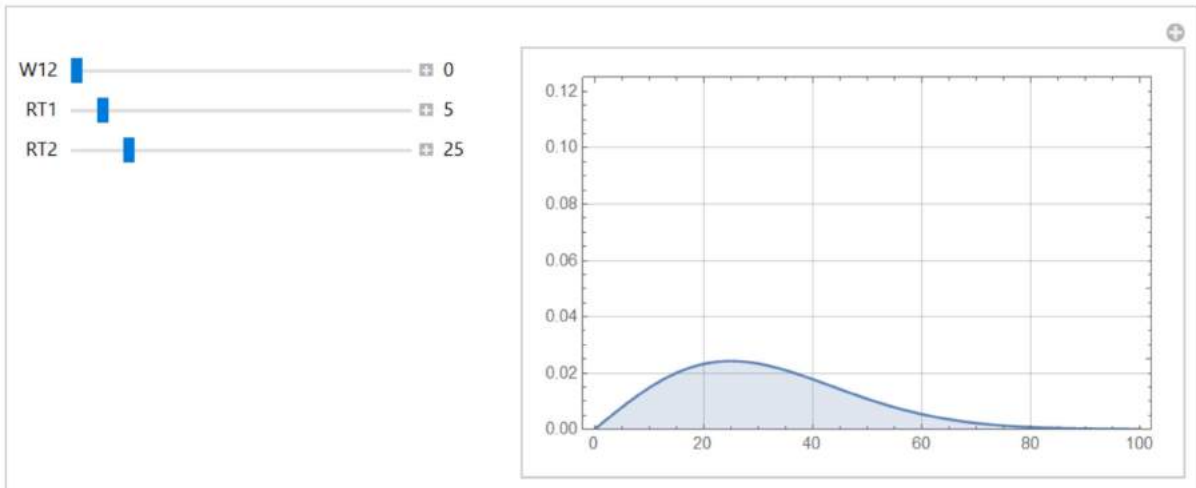
Funkcja (7.2) jest rozszerzonym odpowiednikiem funkcji (6.3) w modelu bazowym.

Należy przy tym przyjąć pewne założenia co do wartości nowych parametrów występujących w zależnościach (7.1) - (7.2), a mianowicie:

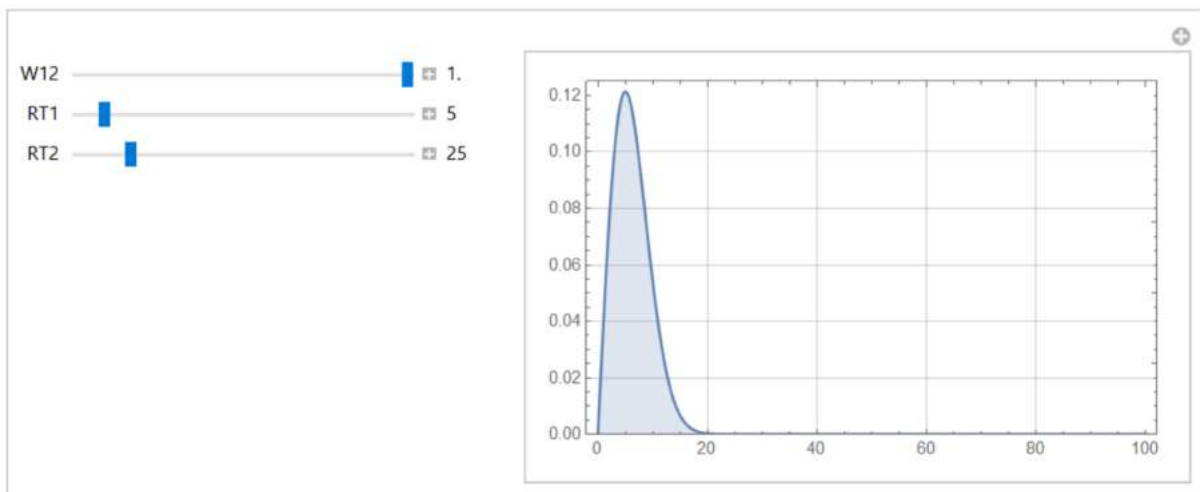
- z uwagi na fakt, iż parametr r_{t1} ma odpowiadać za opis fazy wpływów umownie nazywanych „natychmiastowymi”, należy przyjąć założenie: $r_{t1} < r_{t2}$,
- parametr w_{12} , którego wartość reprezentuje udział wpływów natychmiastowych w całym procesie osiadania punktu w czasie może przyjmować wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Przy czym $w_{12} = 0.0$ oznacza brak wpływów natychmiastowych (rys. 7.2), a $w_{12} = 1.0$ oznacza brak wpływów „opóźnionych” (rys. 7.3). Wartości pośrednie z przedziału pozwalają ująć odpowiedni udział obydwu faz w procesie – rys. 7.1.



Rys.7.1. Przebieg funkcji $R_1(\tau)$ dla przykładowych wartości parametrów $r_{t1}=5.0$, $r_{t2}=25.0$ oraz $w_{12}=0.5$ (50% udziału wpływów natychmiastowych oraz 50% opóźnionych).



Rys.7.2. Przebieg funkcji $R_I(\tau)$ dla przykładowych wartości parametrów $r_{t1}=5.0$, $r_{t2}=25.0$ oraz $w_{12}=0.0$ (brak wpływów natychmiastowych - 100% udziału wpływów opóźnionych).



Rys.7.3. Przebieg funkcji $R_I(\tau)$ dla przykładowych wartości parametrów $r_{t1}=5.0$, $r_{t2}=25.0$ oraz $w_{12}=1.0$ (brak wpływów opóźnionych - 100% udziału wpływów natychmiastowych).

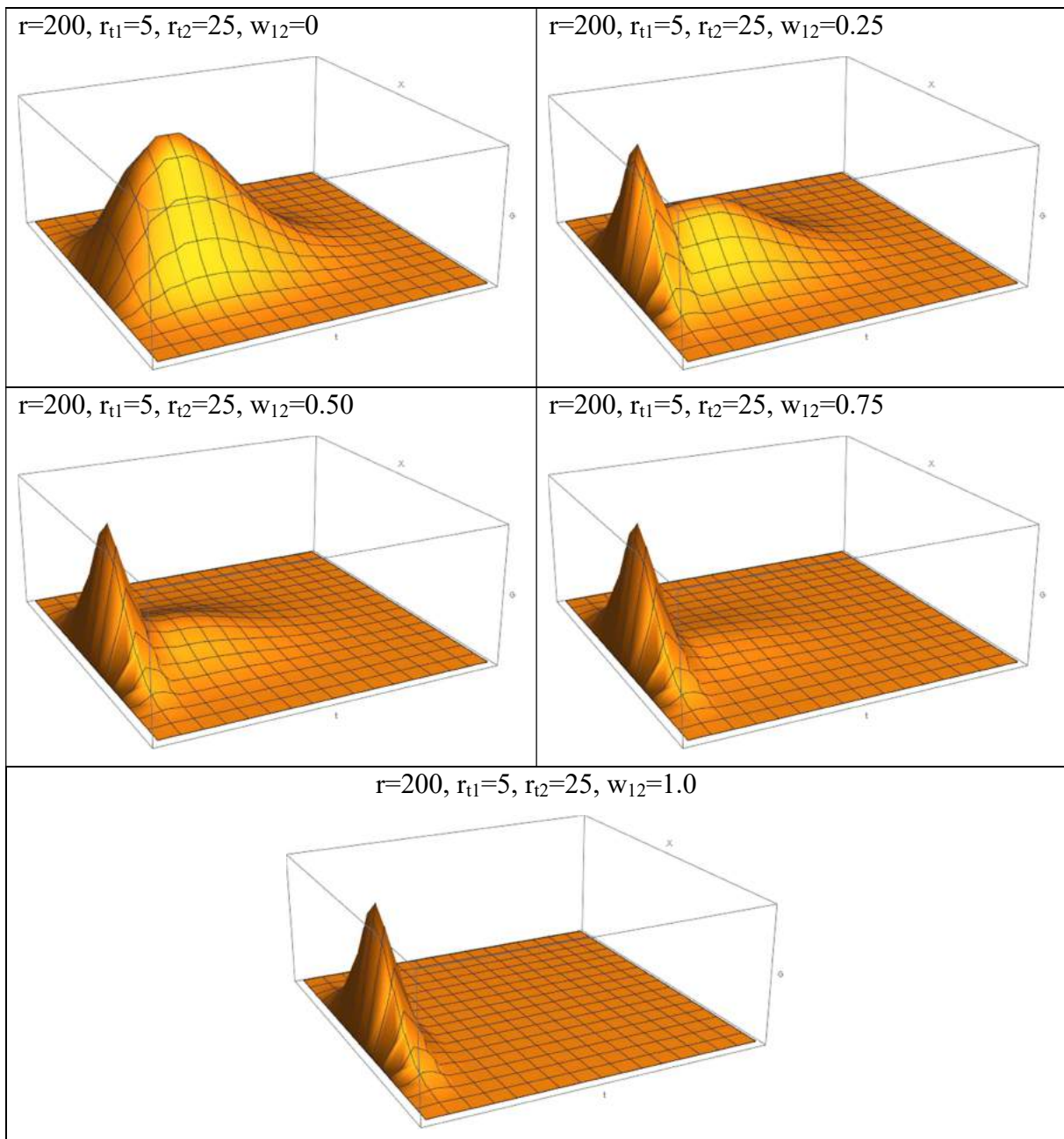
Przyjmując ponownie jak w zależności (6.5), że rozszerzona funkcja wpływów $G(\cdot)$ ma postać iloczynu funkcji $R_I(\tau)$ i klasycznej funkcji wpływów teorii W. Budryka – S. Knothego $f(x, \dots)$, otrzymujemy odpowiednią zależność, która dla przypadku eksploatacji w kształcie nieskończonej półpłaszczyzny przedstawia się następująco:

$$G(x, p, \tau) = \frac{w_{max}}{r} \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x - p)^2}{r^2} \right) \cdot \left[\frac{(\tau - t_e)}{r_{t1}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t1}^2} \right) w_{12} + \frac{(\tau - t_e)}{r_{t2}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t2}^2} \right) (1 - w_{12}) \right] \quad (7.3)$$

Podobnie jak funkcja wpływów (6.6), proponowana jej rozszerzona wersja spełnia zależność:

$$\int_{t_e}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(x, p, \tau) dx d\tau = w_{max} \quad (7.4)$$

Przykładowe rozkłady funkcji G w przestrzeni zmiennych (x, τ) dla wybranych wartości parametrów $\{r, r_{t1}, r_{t2}, w_{12}\}$ przedstawiono na rys. 7.4.



Rys.7.4. Ilustracja do zależności (7.3): przebiegi funkcji wpływów $G(\cdot)$ dla zagadnienia jednowymiarowego przestrzennie (w kierunku zmiennej przestrzennej x) dla wybranych wartości parametrów $\{r, r_{t1}, r_{t2}, w_{12}\}$.

7.1.1. Określenie obniżeń dla przypadku eksploatacji w kształcie „nieskończonego paska”

Identycznie jak w modelu bazowym, obniżenia w dowolnej chwili t w punkcie $A(p)$, przy założeniu, że fragment pokładu w przedziale (a, b) został wybrany natychmiastowo w chwili czasu t_e ($t > t_e$), można określić z zależności:

$$w(x, p, \tau) = w_{max} \int_{t_e}^t \int_a^b G(x, \tau, p) dx d\tau \quad (7.5)$$

Po odpowiednich podstawieniach otrzymujemy:

$$w(x, p, \tau) = \int_{t_e}^t \int_a^b \frac{w_{max}}{r} \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x-p)^2}{r^2} \right) \cdot \left[\frac{(\tau - t_e)}{r_{t1}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t1}^2} \right) w_{12} + \frac{(\tau - t_e)}{r_{t2}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t2}^2} \right) (1 - w_{12}) \right] dx d\tau \quad (7.6)$$

Po dokonaniu całkowania zależności (7.6) otrzymujemy zależność (7.7) pozwalającą na obliczenie elementarnej wartości obniżenia w_e w punkcie $A(p)$ na powierzchni, w dowolnej chwili t pod wpływem „natychmiastowego” wybrania elementarnej pola eksploatacyjnego postaci nieskończonego paska w granicach (a, b) :

$$w_e(p, t) = \frac{w_{max}}{2} \cdot \left[1 - \text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{2r_{t1}^2} \right) w_{12} - \text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{2r_{t2}^2} \right) (1 - w_{12}) \right] \cdot \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(a-p)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(b-p)}{r} \right) \right] \quad (7.7)$$

Całkowita wartość obniżenia $w(..)$ będzie sumą obniżeń elementarnych w_e , pochodzących od kolejnych pól elementarnych, zgodnie z zależnością (6.11)

7.1.2. Określenie obniżeń dla pola eksploatacyjnego w kształcie prostokąta

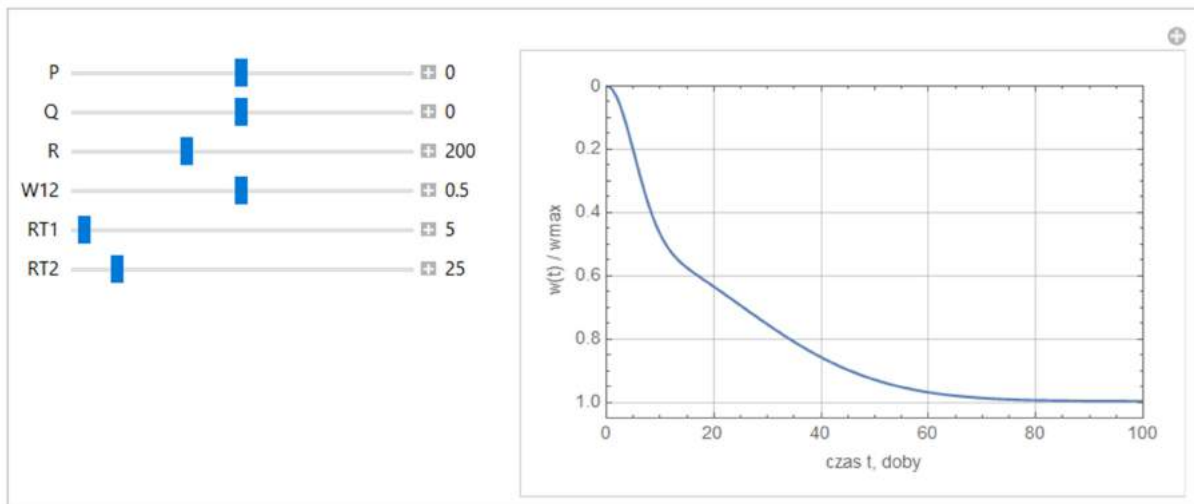
Wykorzystując zależności geometryczne przedstawione na rysunku 6.7, można zapisać postać rozszerzonej funkcji wpływów dla elementarnej pola eksploatacyjnego o kształcie prostokąta:

$$G(x, y, p, q, \tau) = \frac{w_{max}}{r^2} \text{Exp} \left(-\pi \frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{r^2} \right) \cdot \left[\frac{(\tau - t_e)}{r_{t1}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t1}^2} \right) w_{12} + \frac{(\tau - t_e)}{r_{t2}^2} \text{Exp} \left(-\frac{(\tau - t_e)^2}{2r_{t2}^2} \right) (1 - w_{12}) \right] \quad (7.3)$$

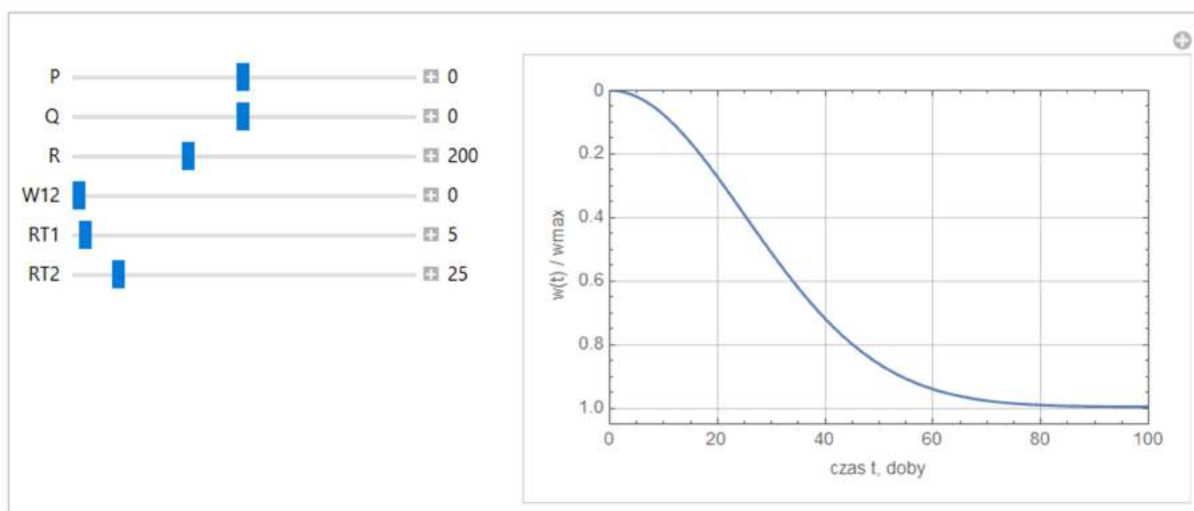
Obniżenie elementarne określamy całkując rozszerzoną postać funkcji wpływów $G(..)$ po obszarze elementarnego prostokątnego pola eksploatacyjnego oraz względem czasu od momentu wybrania danego pola t_e do rozpatrywanej chwili t :

$$w_e(p, q, t) = \int_{t_e}^t \int_c^d \int_a^b G(x, y, p, q, \tau) dx dy d\tau = \frac{w_{max}}{4} \cdot \left[1 - \text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{2r_{t1}^2} \right) w_{12} - \text{Exp} \left(\frac{-(t - t_e)^2}{2r_{t2}^2} \right) (1 - w_{12}) \right] \cdot \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(a-p)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(b-p)}{r} \right) \right] \cdot \left[\text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(c-q)}{r} \right) - \text{Erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}(d-q)}{r} \right) \right] \quad (7.4)$$

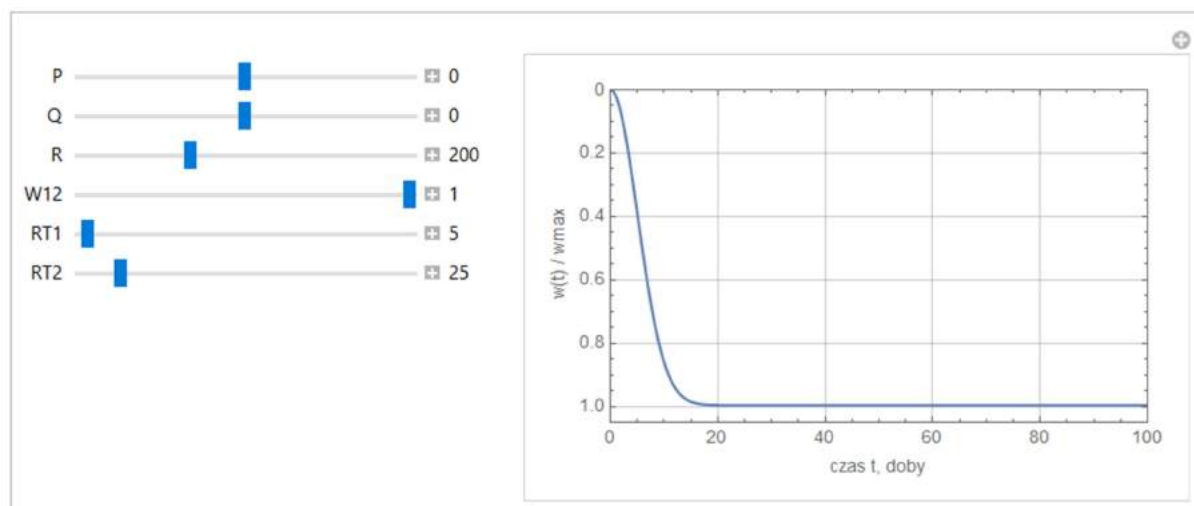
Przykładowe przebiegi osiadania w czasie punktu zlokalizowanego nad środkiem pola o kształcie prostokąta przedstawiono na rys.7.5 – 7.7. Rysunki te zaczerpnięto z opracowanego kolejnego notatnika programu Wolfram Mathematica, przy takich samych założeniach, jak to opisano w rozdziale 6 pracy przy objaśnieniach do rysunku 6.8.



Rys.7.5. Przebieg obniżen w czasie punktu nad środkiem pola dla przykładowych wartości parametrów $r_{t1}=5$, $r_{t2}=25$ oraz $w_{12}=0.5$ (50% udziału wpływów natychmiastowych oraz 50% opóźnionych)



Rys.7.6. Przebieg obniżeń w czasie punktu nad środkiem pola dla przykładowych wartości parametrów $r_{11}=5$, $r_{12}=25$ oraz $w_{12}=0.0$ (brak wpływów natychmiastowych - 100% udziału wpływów opóźnionych).



Rys.7.7. Przebieg obniżeń w czasie punktu nad środkiem pola dla przykładowych wartości parametrów $r_{11}=5$, $r_{12}=25$ oraz $w_{12}=1.0$ (brak wpływów opóźnionych - 100% udziału wpływów natychmiastowych).

Całkowita wartość obniżenia $w(..)$ będzie sumą obniżeń elementarnych w_e , pochodzących od kolejnych pól elementarnych, zgodnie z zależnością (6.15).

Wartości pozostałych wskaźników deformacji: nachylenia, krzywizny pionowej, przemieszczeń i odkształceń poziomych można uzyskać wykorzystując odpowiednie zależności znane z teorii W. Budryka – S. Knothego.

7.2. Weryfikacja modelu rozszerzonego na wybranych liniach pomiarowych

W podrozdziale 6.4 przedstawiono analizę porównawczą modelu bazowego do wyników pochodzących z pomiarów oraz z popularnym i powszechnie stosowanym modelem S. Knothego. Analogicznie przygotowano analizę porównawczą, tym razem wyniki pomiarów oraz wyniki pochodzące z obliczeń modelu S. Knothego porównano z wynikami otrzymanymi w ramach modelu rozszerzonego.

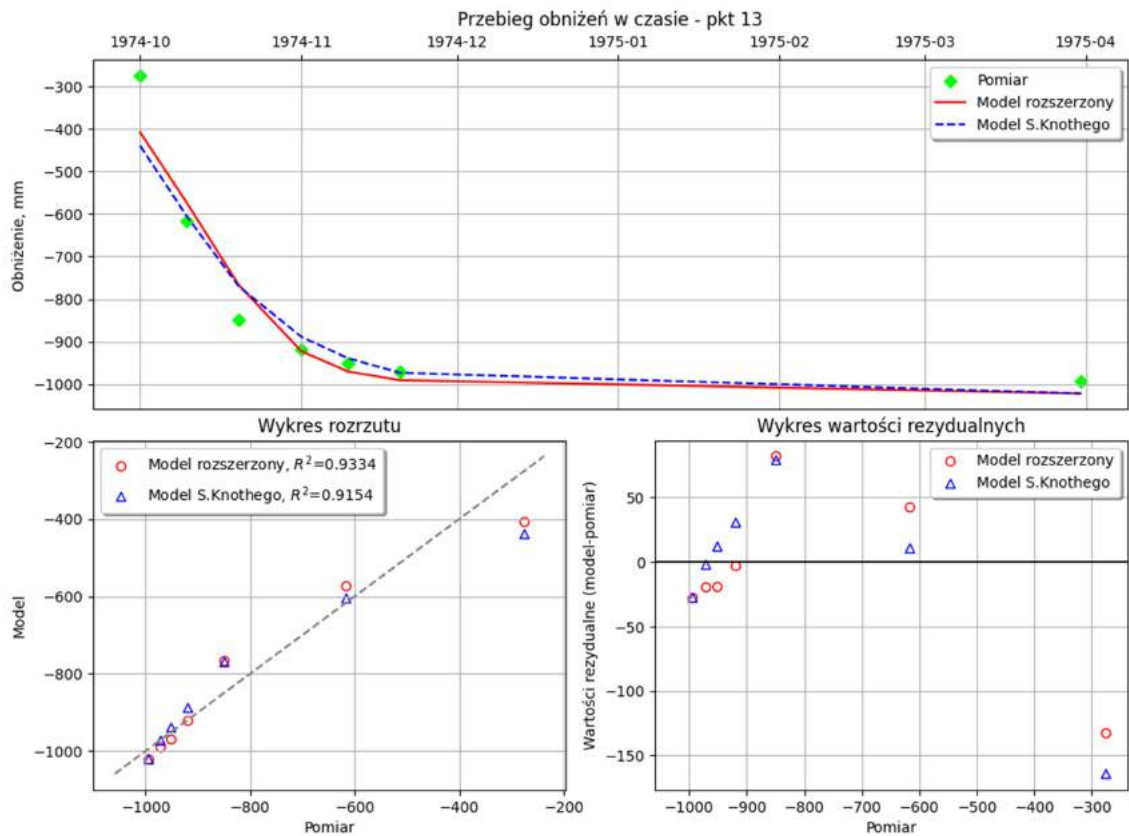
Wyniki obliczeń dla linii BL, KWK Dębieńsko.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.1., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.8a - 7.8c.

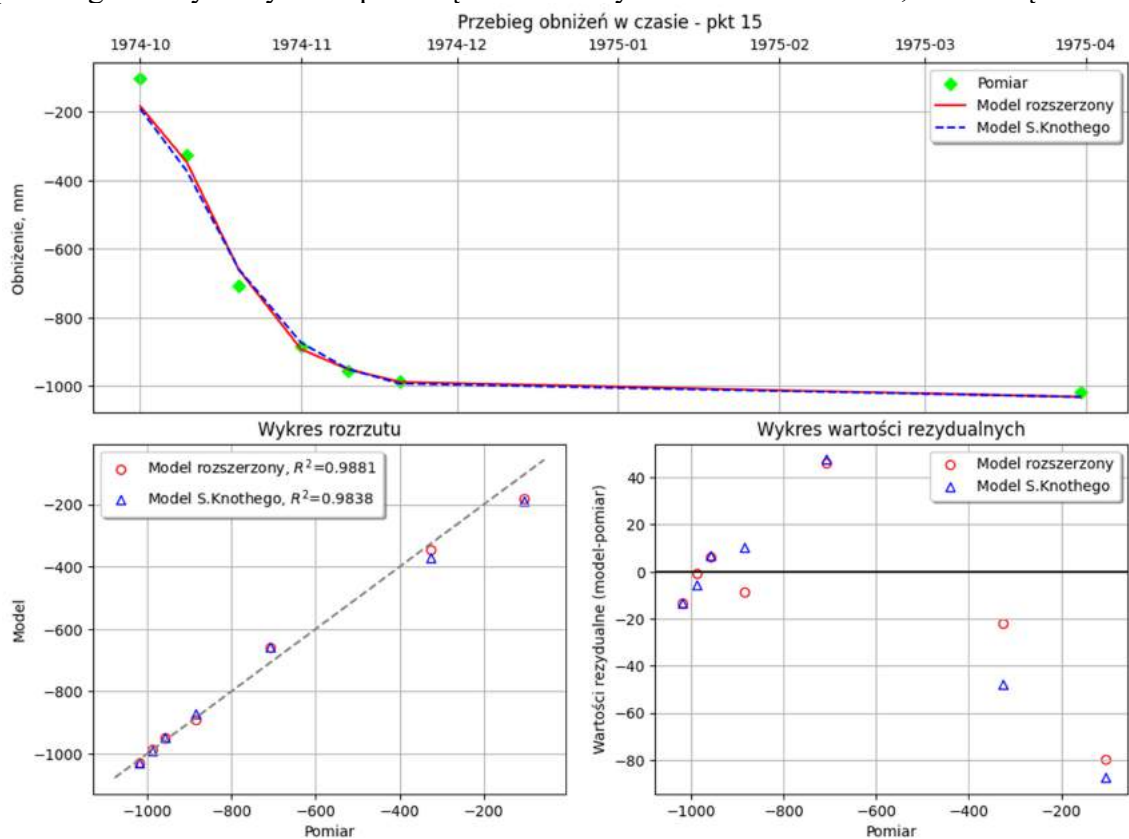
Tabela 7.1

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżen w czasie do wyników pomiaru. Linia B-L, KWK Dębieńsko.

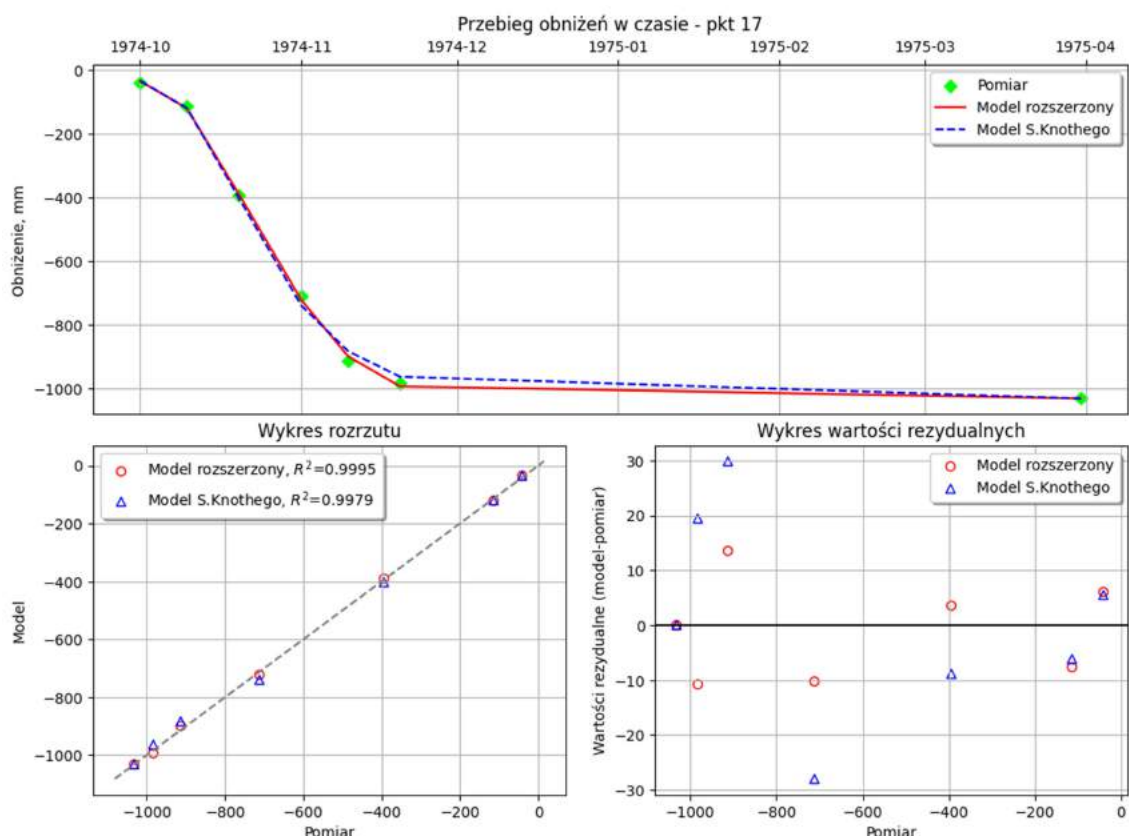
Numer punktu	Model S. Knothego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
9	0.029	3.19	0.8684	24.50	105.00	0.88	6.80	9.05	2.17	0.9392
11	0.047	5.34	0.8639	17.40	23.30	0.76	26.42	36.22	3.86	0.9289
13	0.053	7.13	0.9154	13.25	43.00	0.92	46.77	62.88	6.33	0.9334
15	0.074	4.17	0.9838	7.00	25.00	0.78	25.35	36.42	3.58	0.9881
17	0.078	1.72	0.9979	1.50	13.50	0.31	7.40	8.55	0.83	0.9995
18	0.077	5.34	0.9816	9.80	10.90	0.74	30.95	37.29	3.65	0.9914
19	0.086	5.96	0.9772	8.40	9.50	0.56	34.71	44.85	4.36	0.9978
20	0.100	5.08	0.9828	7.50	7.75	0.71	30.44	37.80	3.66	0.9911



Rys.7.8a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 13 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębieńsko.



Rys.7.8b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębieńsko.



Rys.7.8c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 17 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia B-L, KWK Dębnieśko.

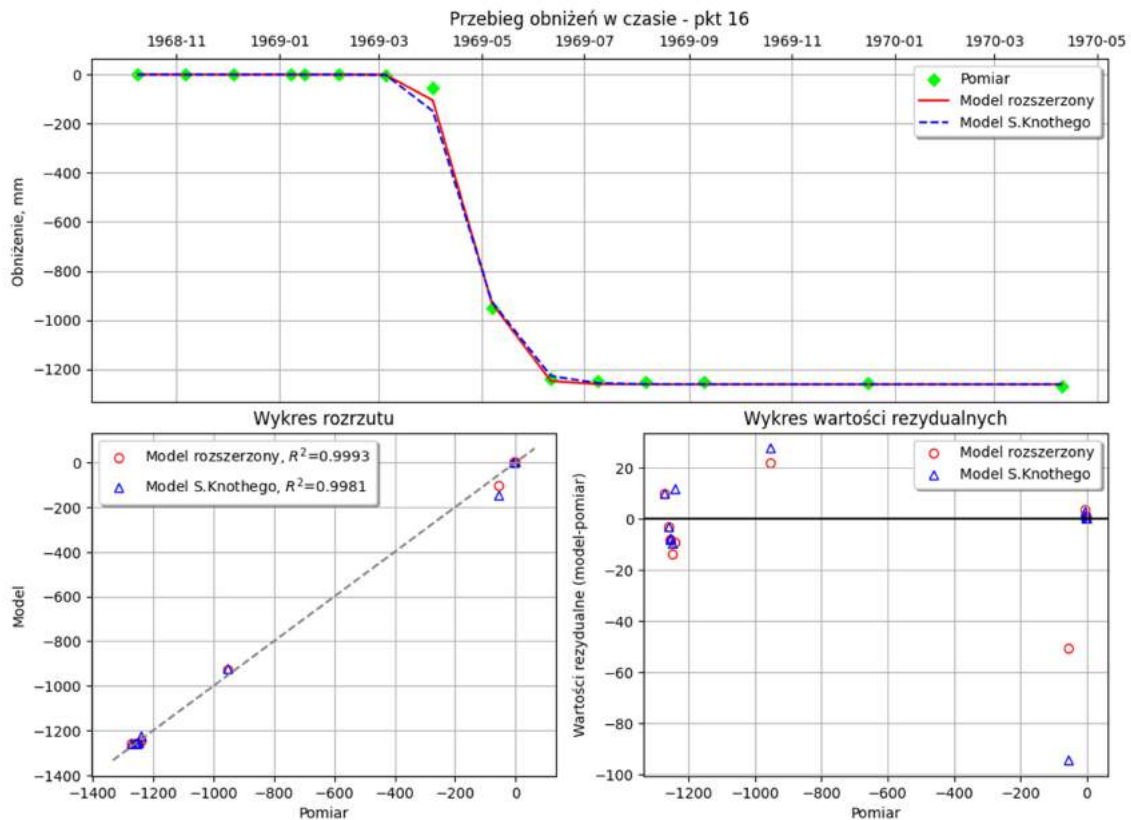
Wyniki obliczeń dla linii 2, KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.1., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.9a - 7.9c.

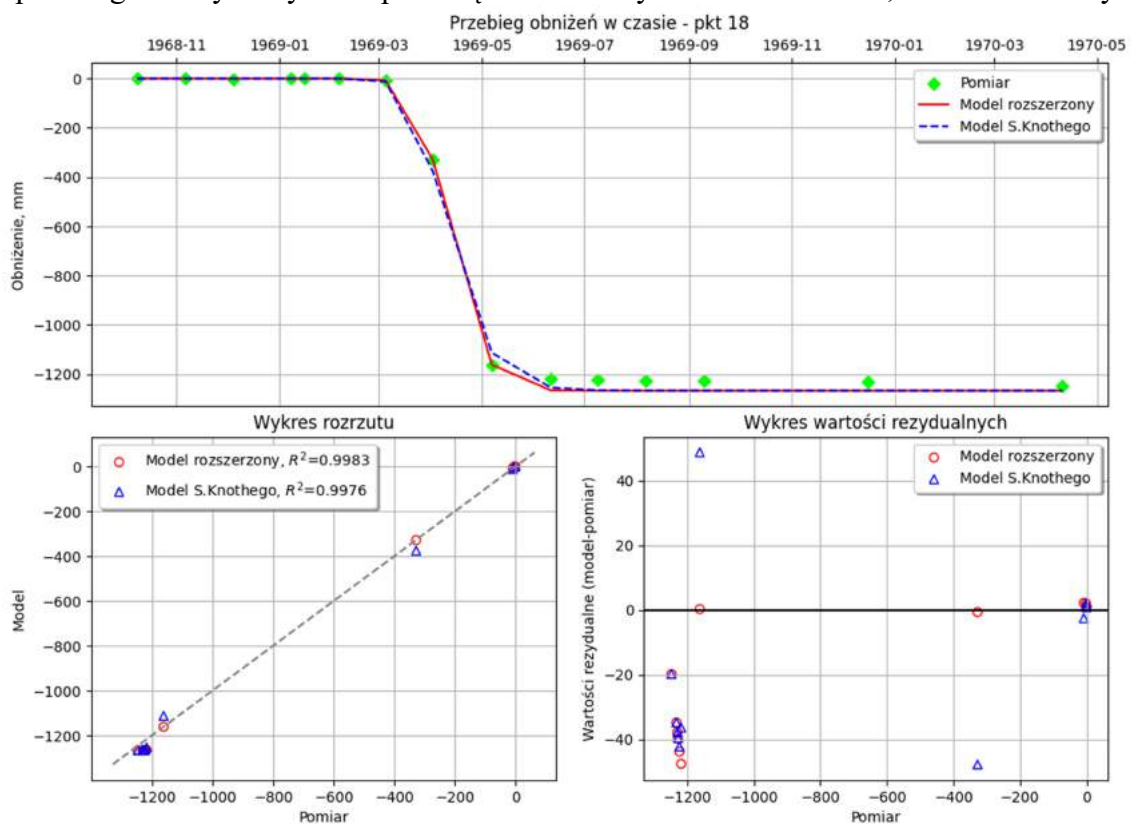
Tabela 7.2

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knotheego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżen w czasie do wyników pomiaru. Linia 2, KWK Jan Kanty.

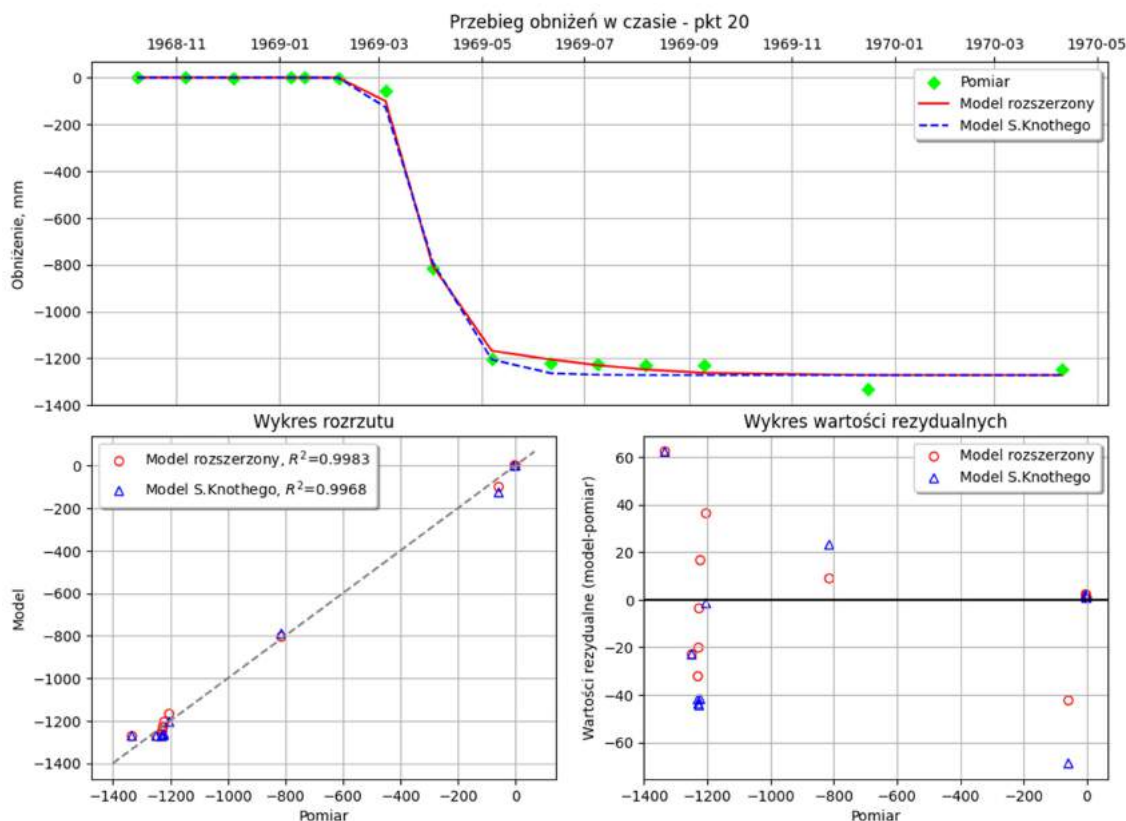
Numer punktu	Model S. Knotheego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
14	0.054	3.34	0.9949	13.8	24.6	0.90	21.97	30.07	2.51	0.9971
16	0.072	2.05	0.9981	10.5	20.7	0.92	8.74	15.49	1.22	0.9993
18	0.073	2.31	0.9976	9.4	14.8	0.84	15.60	24.27	1.95	0.9983
20	0.060	2.53	0.9968	10.0	79.0	0.90	16.92	24.97	1.87	0.9983
22	0.068	2.02	0.9921	10.5	40.0	0.94	8.40	11.32	0.88	0.9996
24	0.077	1.63	0.9917	8.6	28.5	0.90	9.66	16.11	1.23	0.9993
26	0.063	3.42	0.9858	12.3	16.3	0.91	18.51	26.05	2.03	0.9981
28	0.060	3.93	0.9795	12.0	19.7	0.89	19.08	33.27	2.57	0.9967



Rys.7.9a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.



Rys.7.9b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 18 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.



Rys.7.9c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 20 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 2, KWK Jan Kanty.

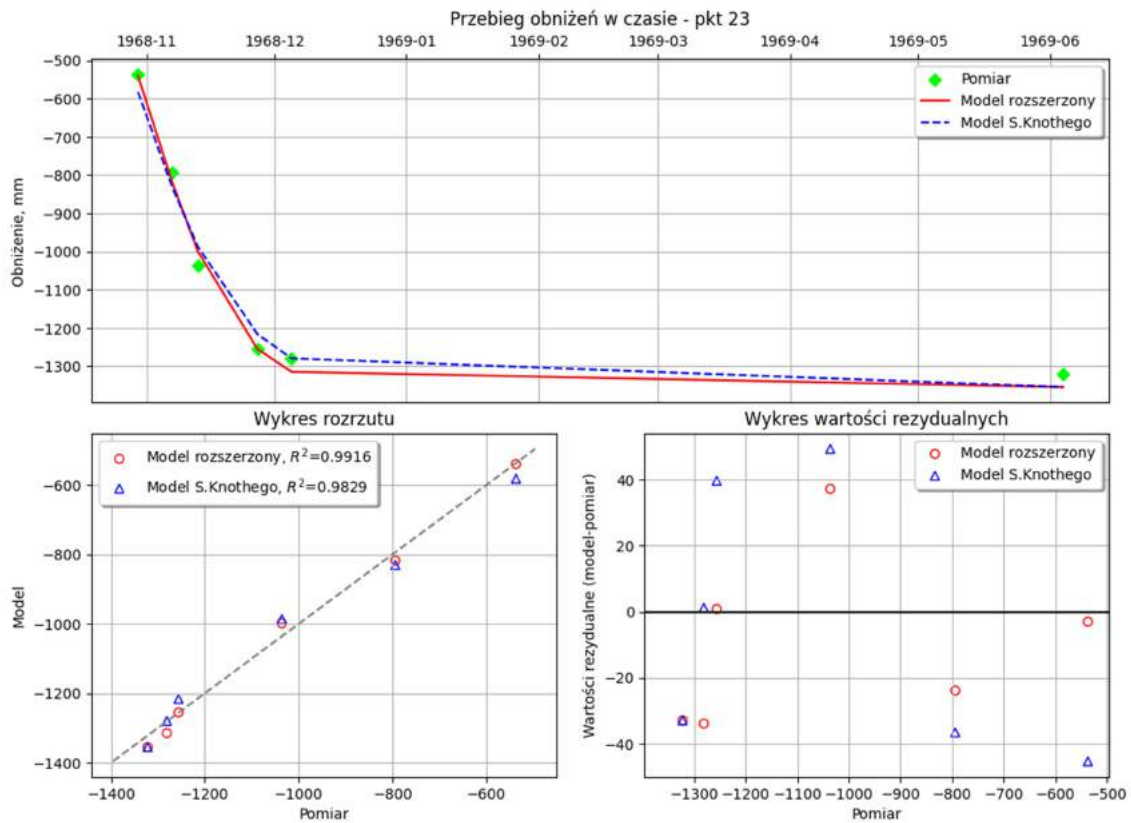
Wyniki obliczeń dla linii 4a, KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 23, 24, 25, 30,33, 34, 35. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.3., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.10a - 7.10c.

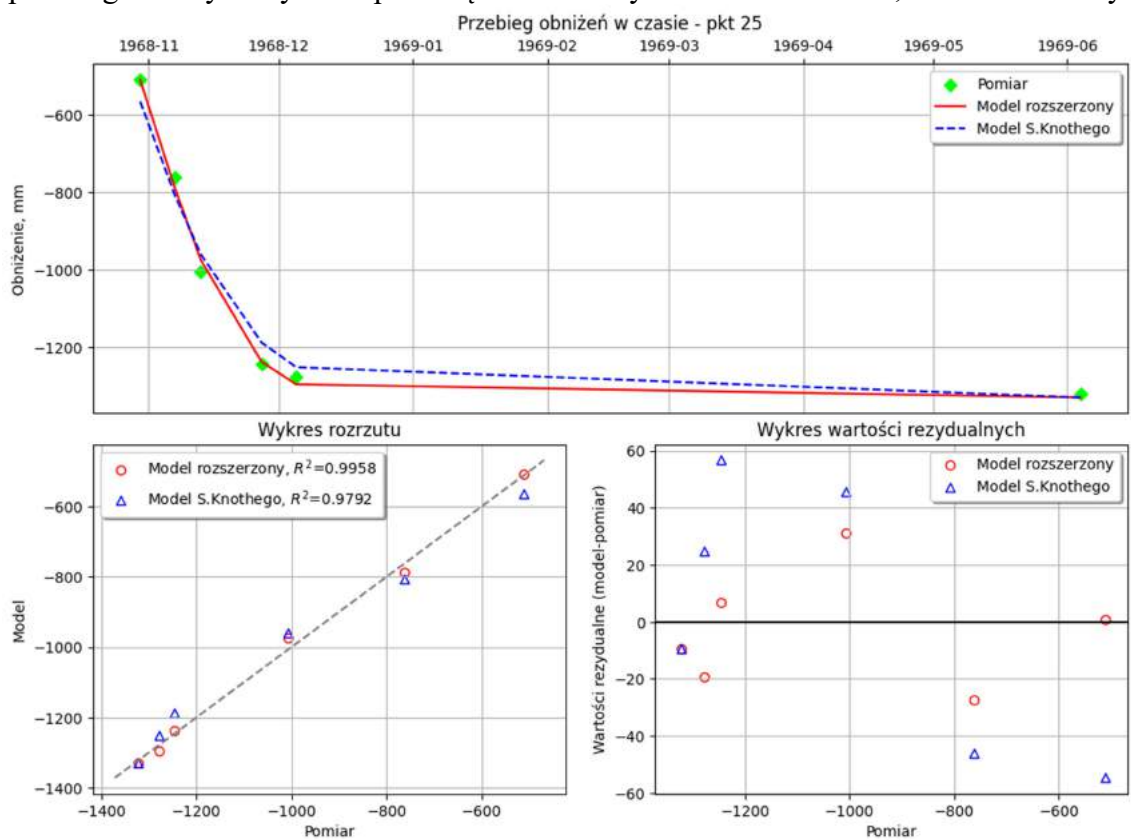
Tabela 7.3

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knotheho wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 4a, KWK Jan Kanty.

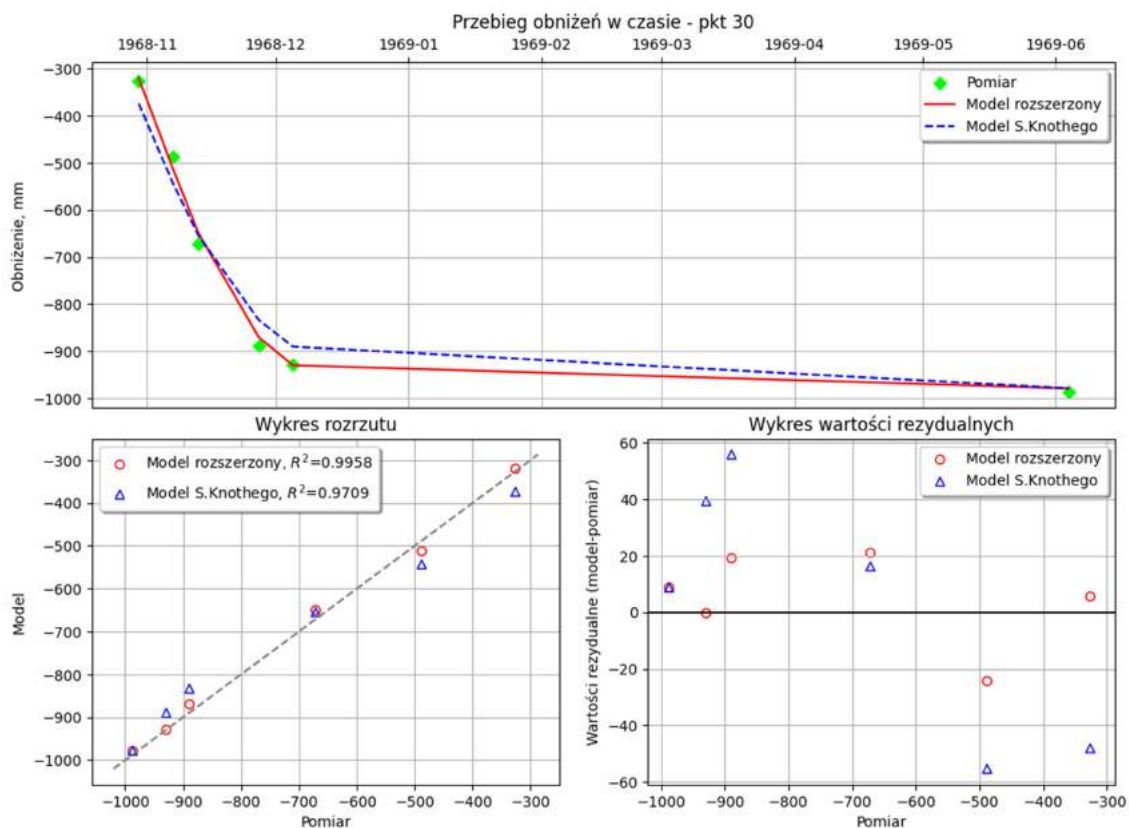
Numer punktu	Model S. Knotheho			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
23	0.079	2.85	0.9829	7.5	14.5	0.64	21.99	26.48	2.00	0.9916
24	0.076	3.11	0.9807	9.2	25.3	0.91	22.09	24.52	1.86	0.9931
25	0.077	3.26	0.9792	9.7	15.5	0.90	15.82	19.31	1.46	0.9958
30	0.063	4.21	0.9709	12.6	11.0	0.84	12.72	14.12	1.43	0.9966
33	0.043	4.16	0.9736	12.5	37.0	0.76	12.46	16.22	3.07	0.9858
34	0.039	4.37	0.9712	13.0	41.0	0.74	10.38	14.16	3.58	0.9856
35	0.039	3.48	0.9817	13.0	42.0	0.72	5.38	5.38	2.38	0.9807



Rys.7.10a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 23 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



Rys.7.10b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 25 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



Rys.7.10c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 30 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 4a, KWK Jan Kanty.

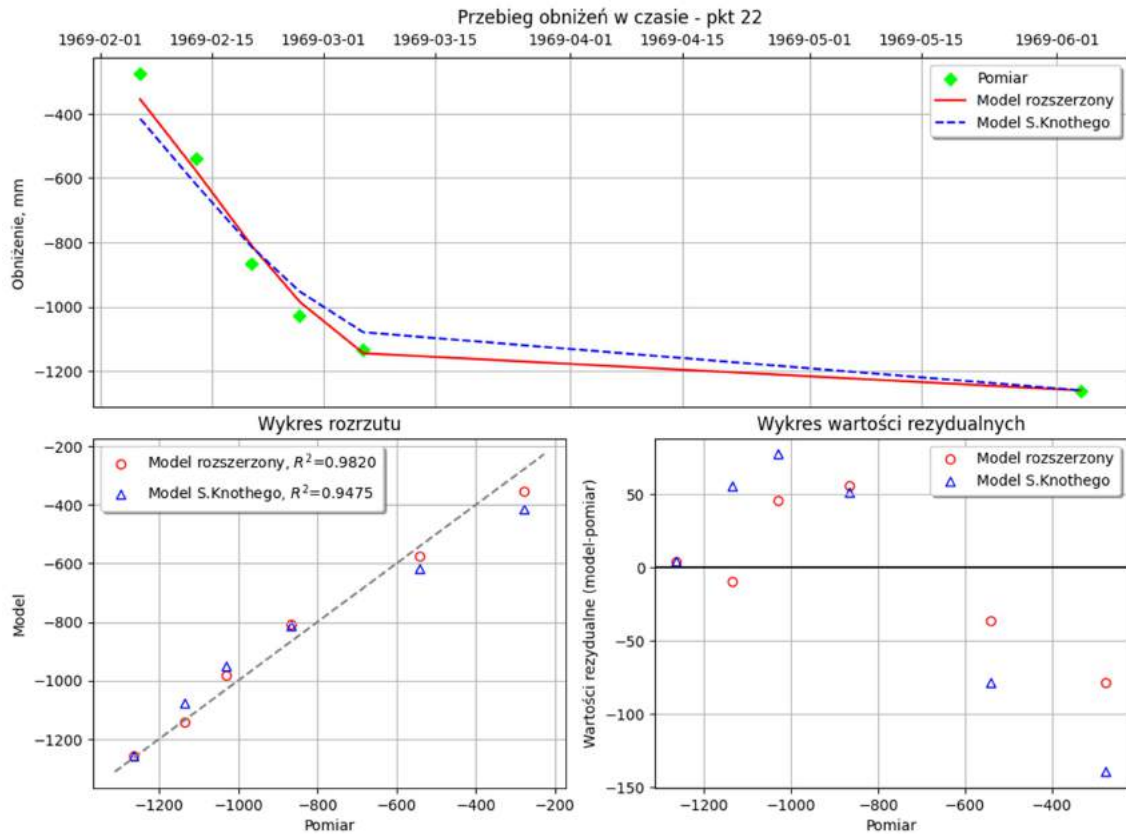
Wyniki obliczeń dla linii 5a, KWK Jan Kanty.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 20, 22, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 33. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.4., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.11a - 7.11c.

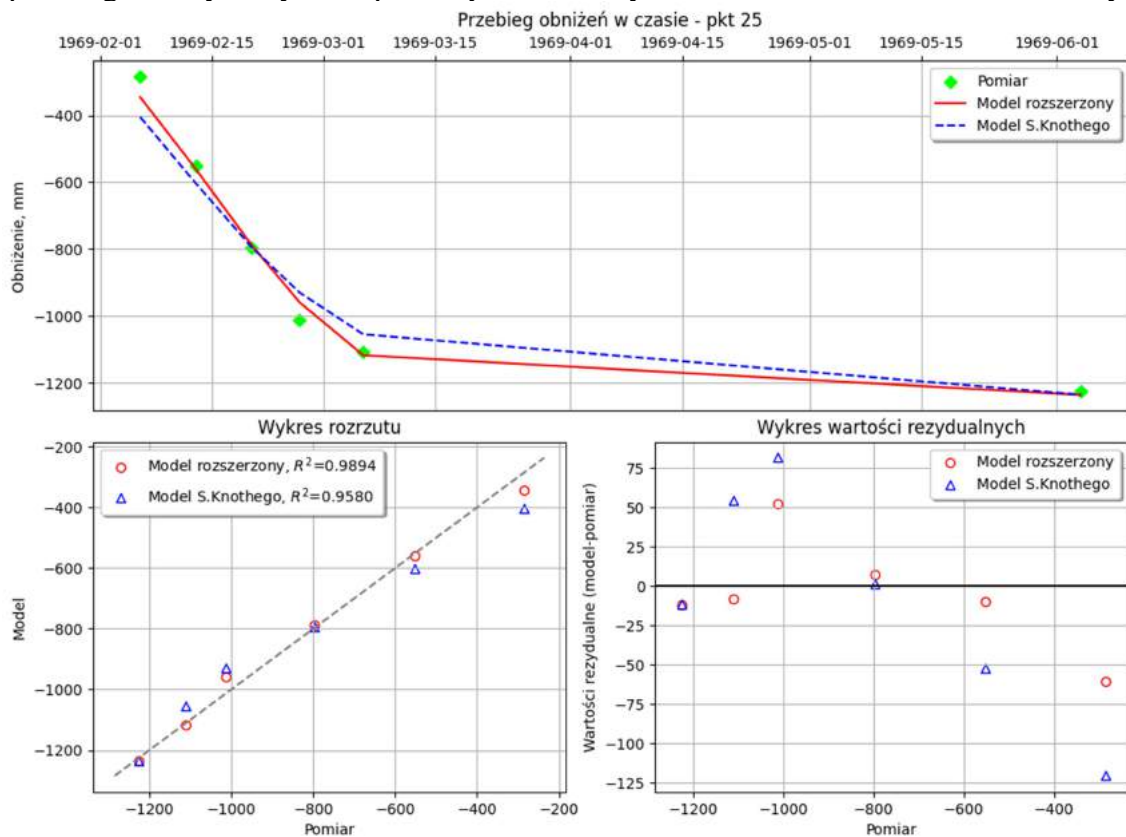
Tabela 7.4

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothe'go wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżeń w czasie do wyników pomiaru. Linia 5a, KWK Jan Kanty.

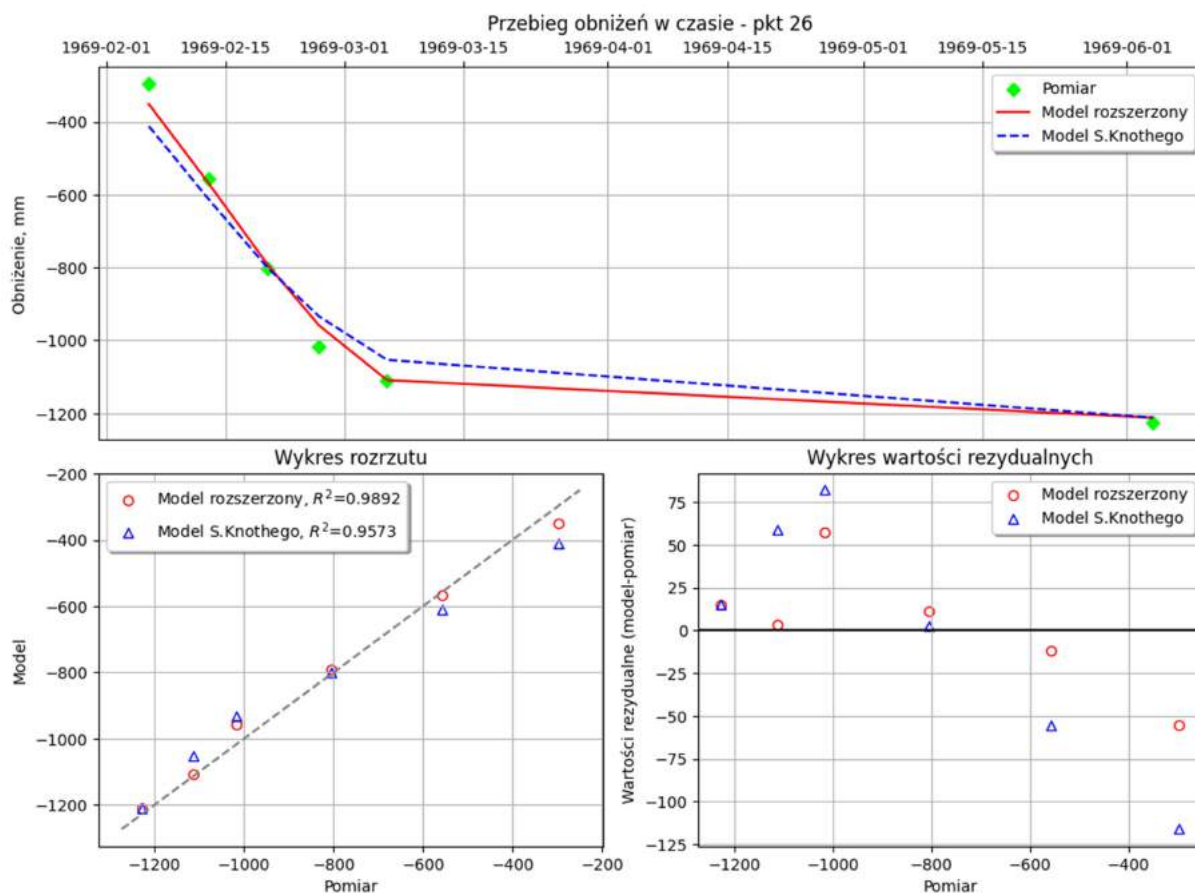
Numer punktu	Model S. Knothe'go			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
20	0.072	6.17	0.9481	10.8	10.40	0.90	36.80	43.75	3.43	0.9840
22	0.700	6.23	0.9475	10.9	11.10	0.78	38.26	46.14	3.65	0.9820
25	0.069	5.49	0.9580	10.8	25.17	0.92	25.17	33.68	2.75	0.9894
26	0.074	5.47	0.9573	10.5	11.70	0.91	25.58	33.76	2.75	0.9892
27	0.078	5.71	0.9532	10.1	10.90	0.91	30.87	37.44	3.12	0.9861
29	0.086	6.91	0.9323	9.4	9.80	0.96	46.22	52.59	4.77	0.9678
30	0.087	7.40	0.9235	9.2	9.50	0.90	46.17	52.82	5.35	0.9601
32	0.070	5.66	0.9550	10.7	11.70	0.74	15.38	20.54	3.04	0.9870
33	0.063	4.53	0.9703	12.2	9.10	0.92	8.26	10.55	2.07	0.9938



Rys.7.11a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 22 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



Rys.7.11b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 25 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



Rys.7.11c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 26 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 5a, KWK Jan Kanty.

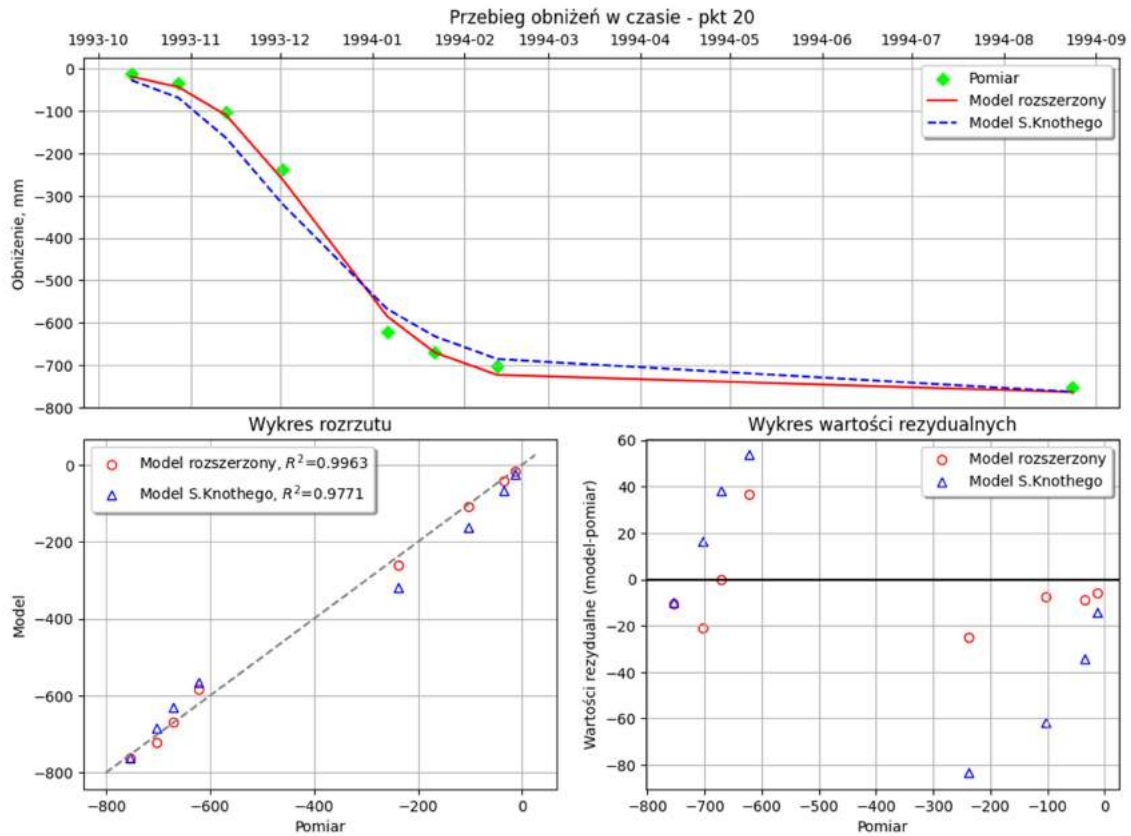
Wyniki obliczeń dla linii 1, KWK Czeczott.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 18, 20, 50, 52, 54, 56, 58, 60. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.5., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.12a - 7.12c.

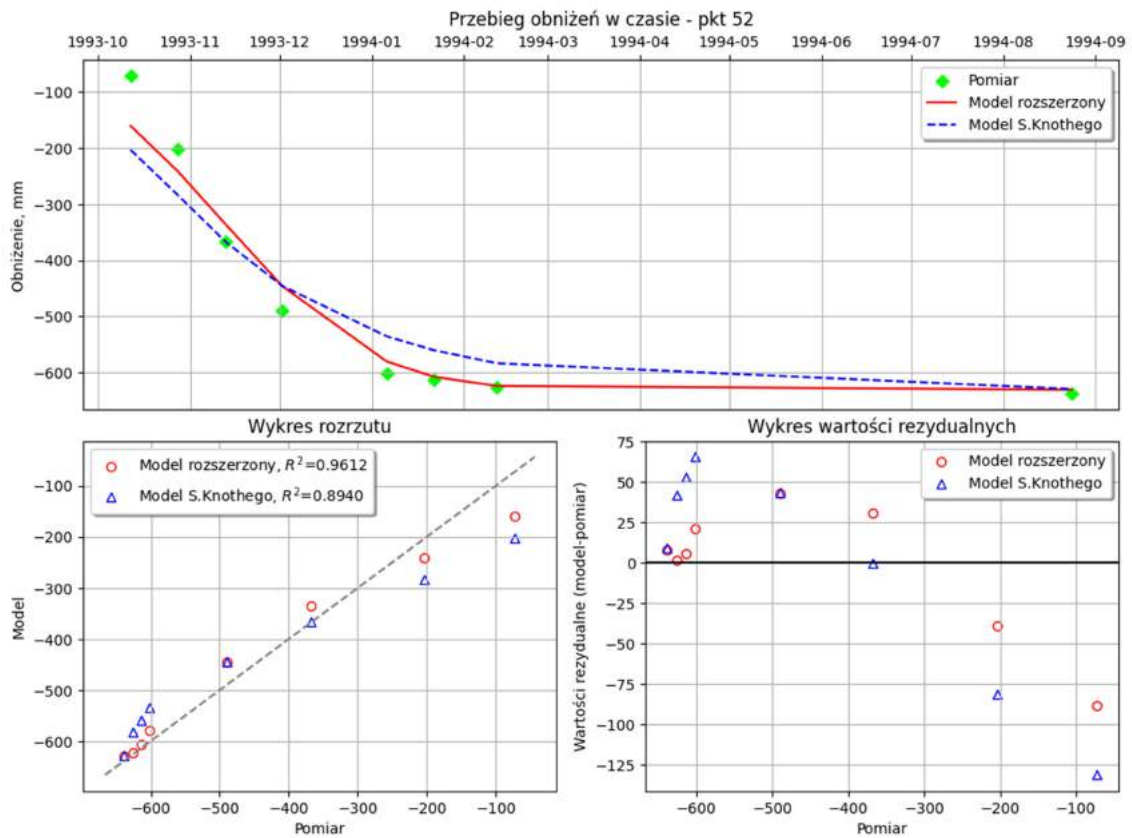
Tabela 7.5

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Czeczott.

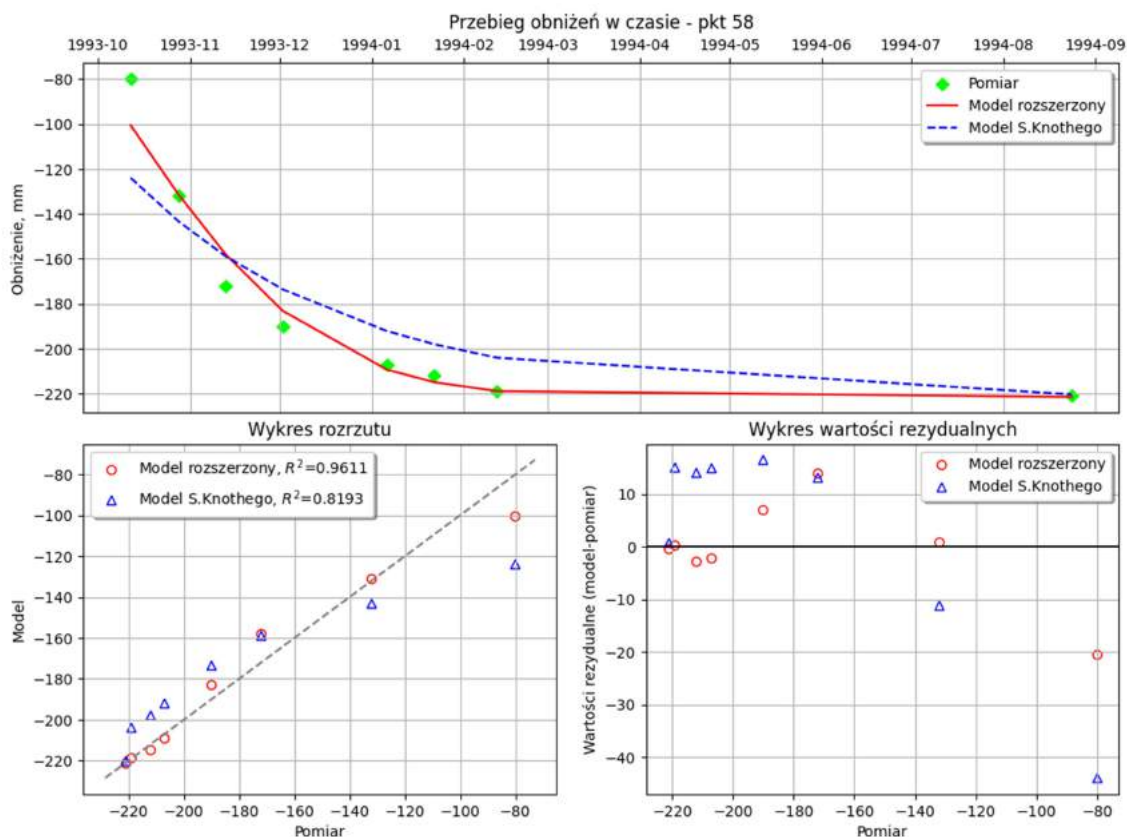
Numer punktu	Model S. Knothego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
18	0.023	7.29	0.9641	32.9	29.9	0.79	15.46	20.07	2.76	0.9948
20	0.025	6.10	0.9771	27.7	69.8	0.90	14.62	18.40	2.44	0.9963
50	0.022	8.72	0.9401	34.6	35.3	0.70	24.27	31.96	4.53	0.9839
52	0.019	10.33	0.8940	40.2	41.4	0.90	29.63	39.84	6.24	0.9612
54	0.015	10.79	0.8530	47.4	49.2	0.90	23.69	33.26	6.41	0.9457
56	0.014	9.55	0.8375	54.7	54.6	0.82	17.68	21.21	5.81	0.9398
58	0.014	8.98	0.8193	56.7	58.9	0.73	5.99	9.20	4.16	0.9611
60	0.020	16.14	0.4107	50.1	47.4	0.89	15.24	16.90	13.63	0.5796



Rys.7.12a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 20 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczott.



Rys.7.12b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 52 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczott.



Rys.7.12c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 58 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Czczcott.

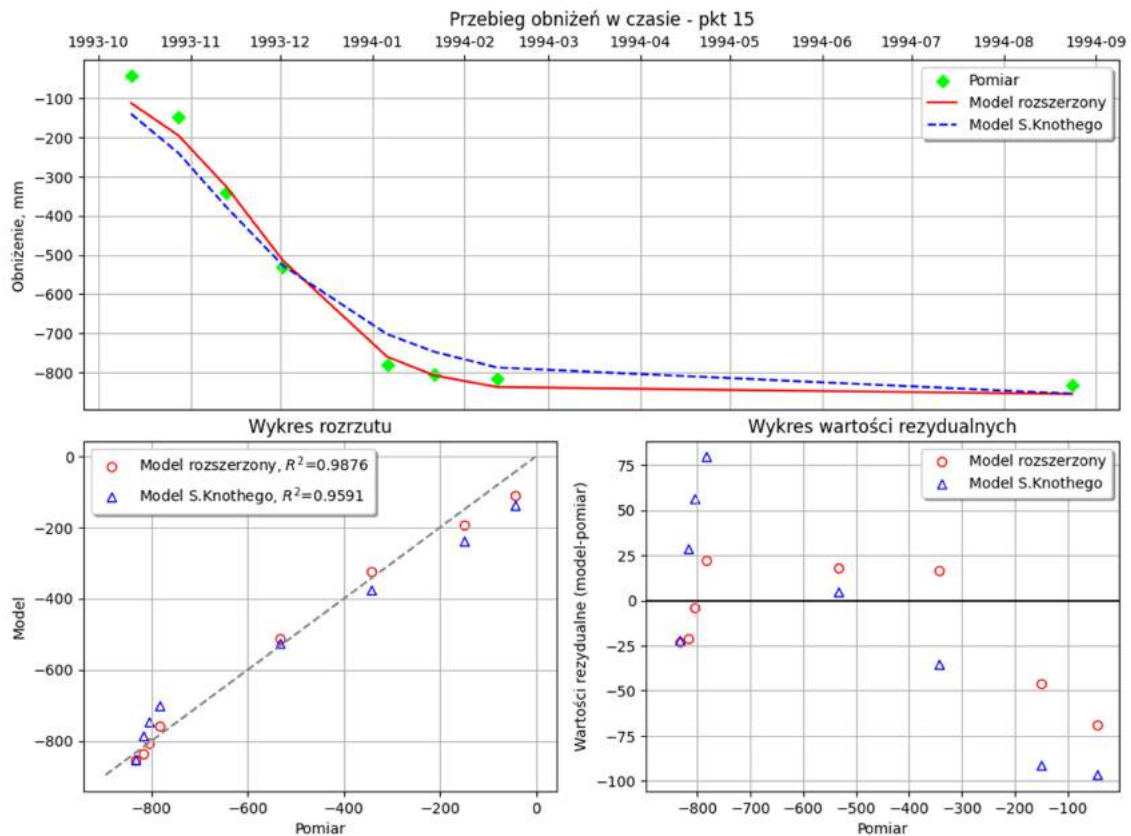
Wyniki obliczeń dla linii 3, KWK Czczcott.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.6., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.13a - 7.13c.

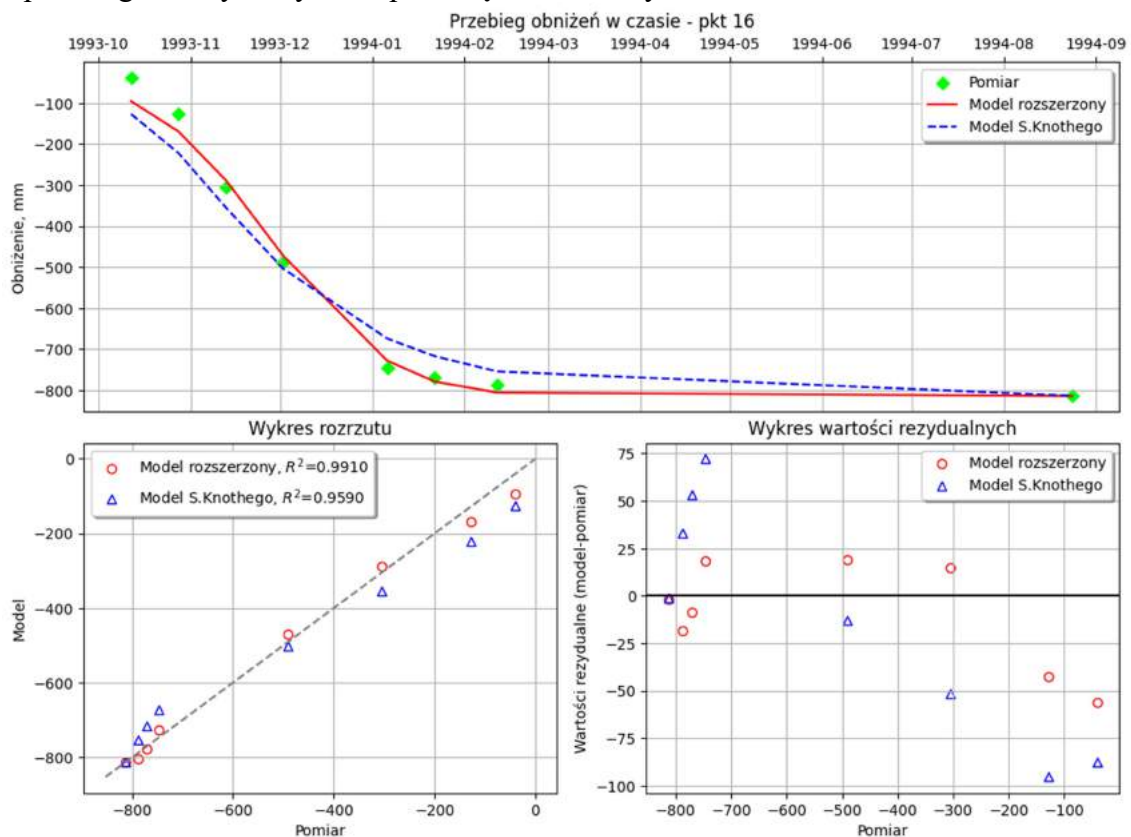
Tabela 7.6

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżeń w czasie do wyników pomiaru. Linia 3, KWK Czczcott.

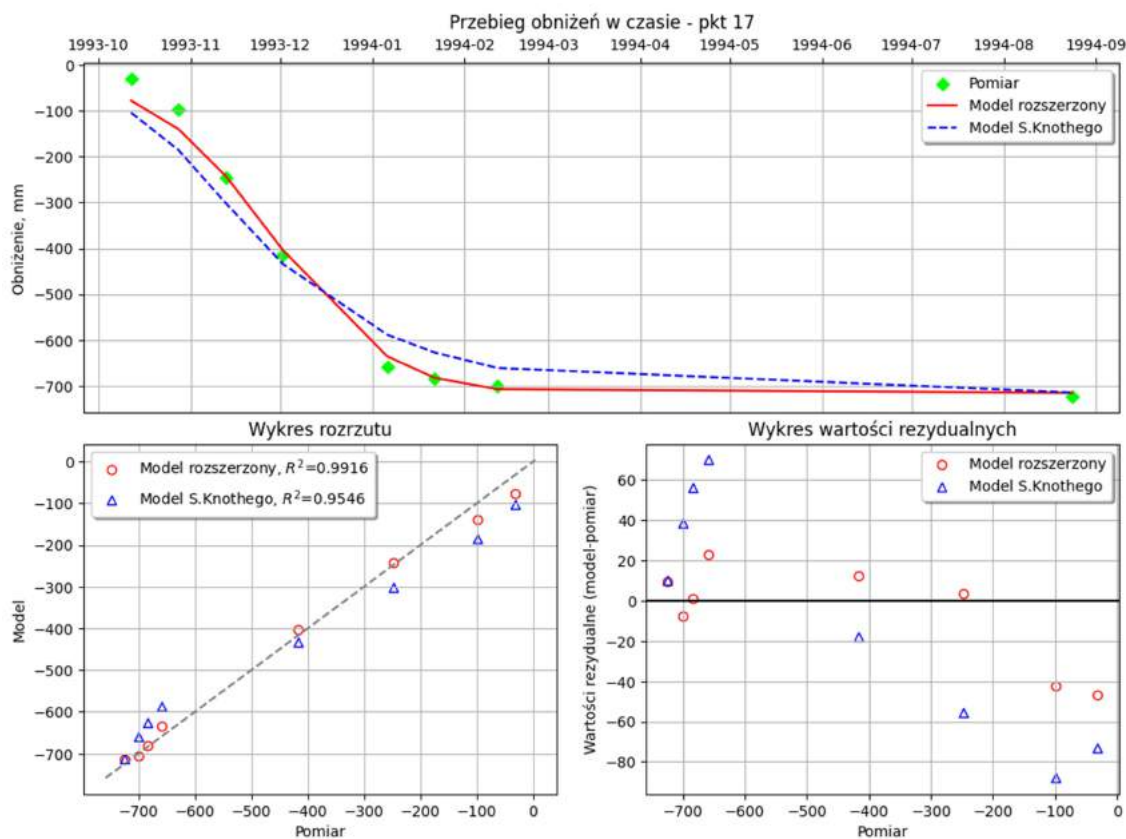
Numer punktu	Model S. Knotheho			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
11	0.011	12.80	0.8352	25.2	118.6	0.55	27.92	42.86	12.76	0.8363
12	0.014	9.48	0.9185	26.7	108.0	0.61	34.89	45.25	9.27	0.9221
13	0.019	7.00	0.9591	33.1	51.9	0.69	34.59	37.34	5.54	0.9744
14	0.022	7.25	0.9582	28.5	44.4	0.65	28.87	34.01	4.21	0.9859
15	0.023	7.34	0.9591	29.0	49.9	0.78	27.58	33.59	4.04	0.9876
16	0.023	7.39	0.9590	32.1	34.8	0.62	22.52	28.13	3.46	0.9910
17	0.023	7.90	0.9546	32.2	33.9	0.51	18.22	24.61	3.40	0.9916



Rys.7.13a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.7.13b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.7.13c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 17 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 3, KWK Czeczott.

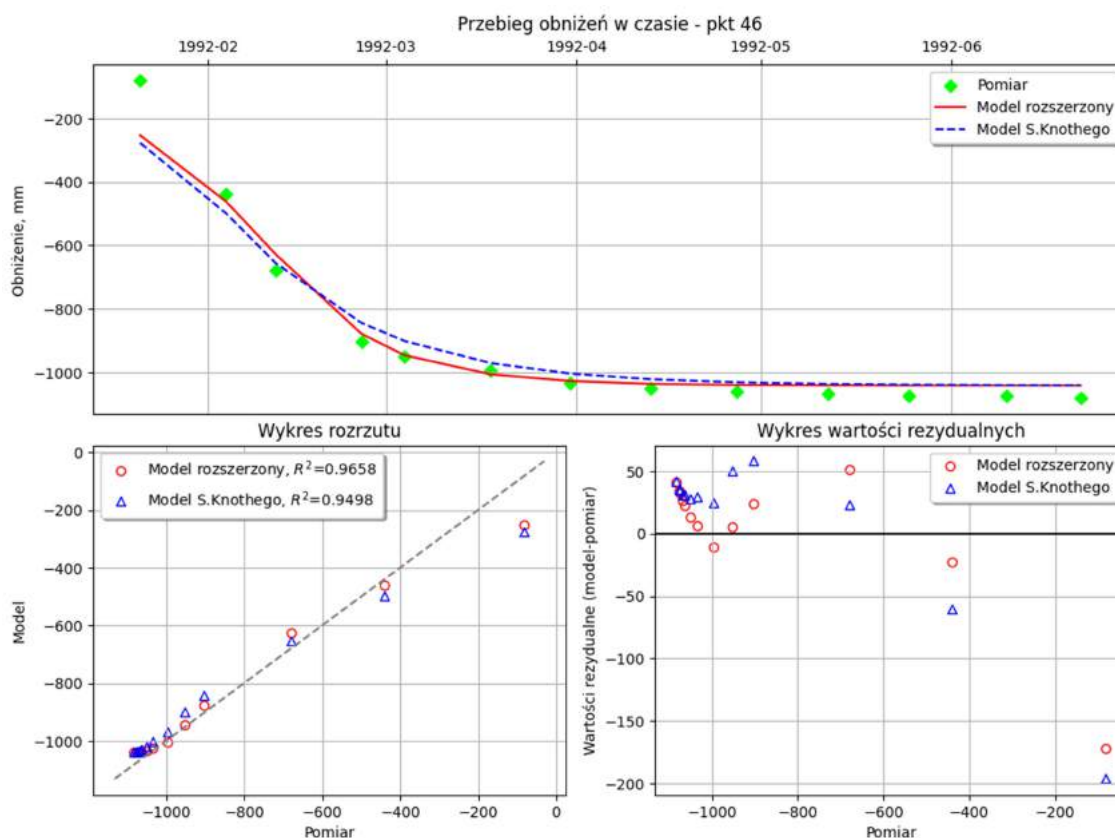
Wyniki obliczeń dla linii 1, KWK Staszic.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 19, 48, 49, 50. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.7., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.14a - 7.14c.

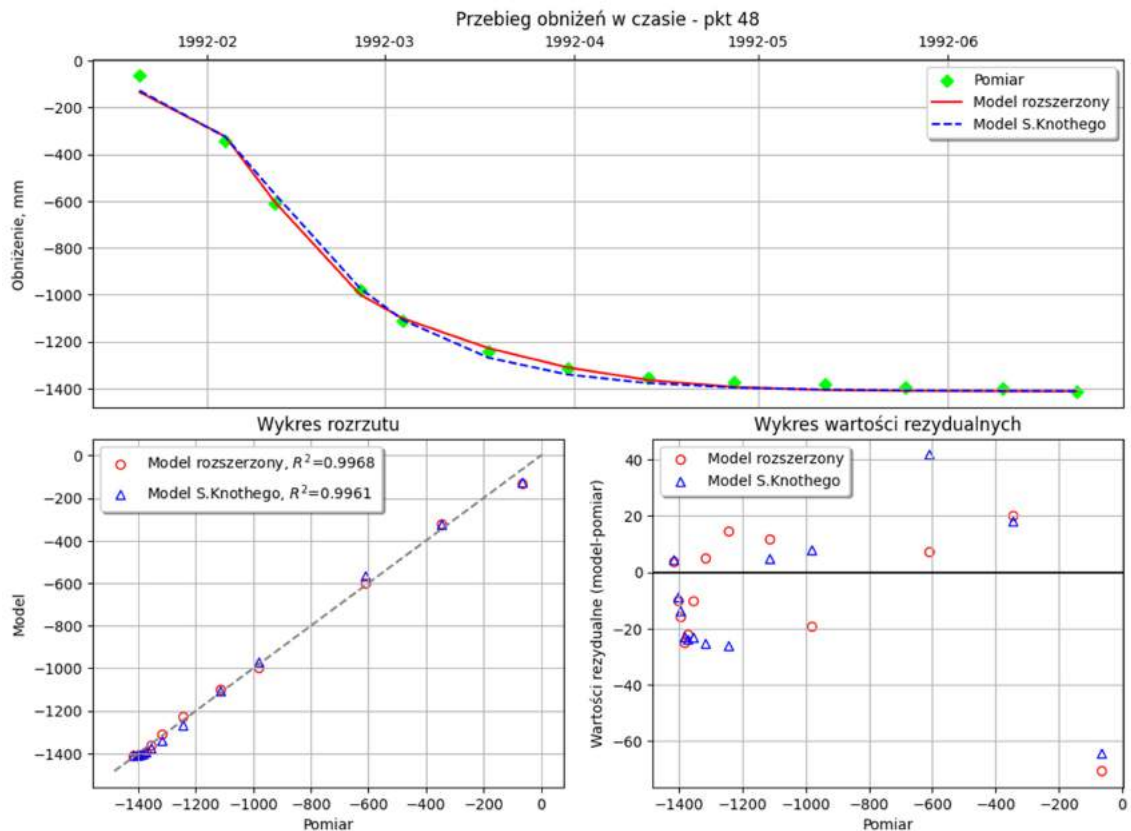
Tabela 7.7

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Staszic.

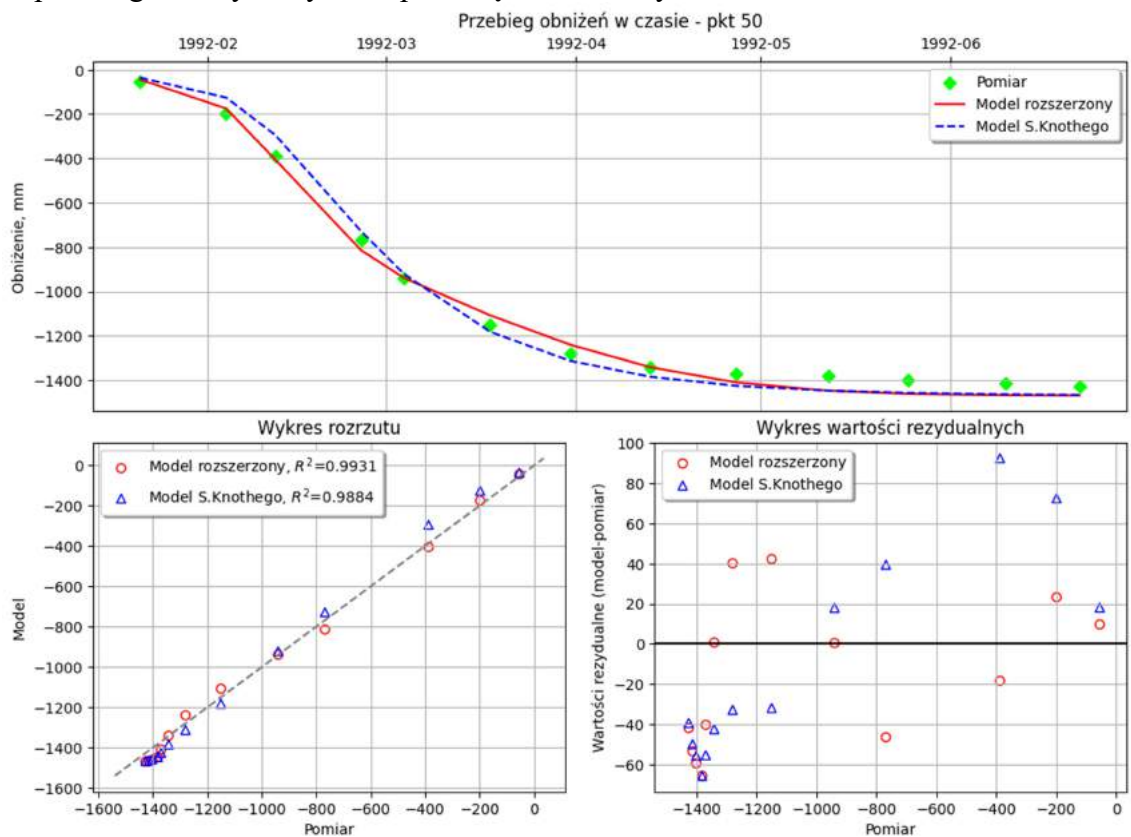
Numer punktu	Model S. Knothego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r ₁₁	r ₁₂	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
40	0.051	16.34	0.3961	18.70	21.00	0.72	21.47	24.57	15.36	0.4328
41	0.031	5.31	0.9659	21.30	31.40	0.54	6.24	7.36	3.76	0.9684
42	0.024	6.37	0.9196	15.60	61.80	0.61	15.96	19.12	6.11	0.9260
43	0.021	9.57	0.8325	15.50	84.90	0.61	28.58	32.29	7.49	0.8973
44	0.030	6.92	0.9226	16.90	69.00	0.78	25.38	35.09	5.59	0.9495
45	0.039	6.01	0.9463	13.00	28.40	0.53	35.32	46.36	5.47	0.9505
46	0.049	6.10	0.9498	12.80	28.50	0.80	35.24	54.51	5.04	0.9658
47	0.054	5.33	0.9647	10.40	21.40	0.60	39.72	55.25	4.43	0.9750
19	0.055	2.78	0.9910	6.60	24.60	0.56	22.33	35.92	2.64	0.9919
48	0.054	1.92	0.9961	5.90	31.70	0.65	18.11	24.47	1.73	0.9968
49	0.053	2.55	0.9937	4.70	34.20	0.65	21.65	25.56	1.77	0.9970
50	0.047	3.61	0.9884	2.70	33.90	0.55	34.05	39.88	2.79	0.9931



Rys.7.14a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 46 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.7.14b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 48 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.7.14c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 50 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Staszic.

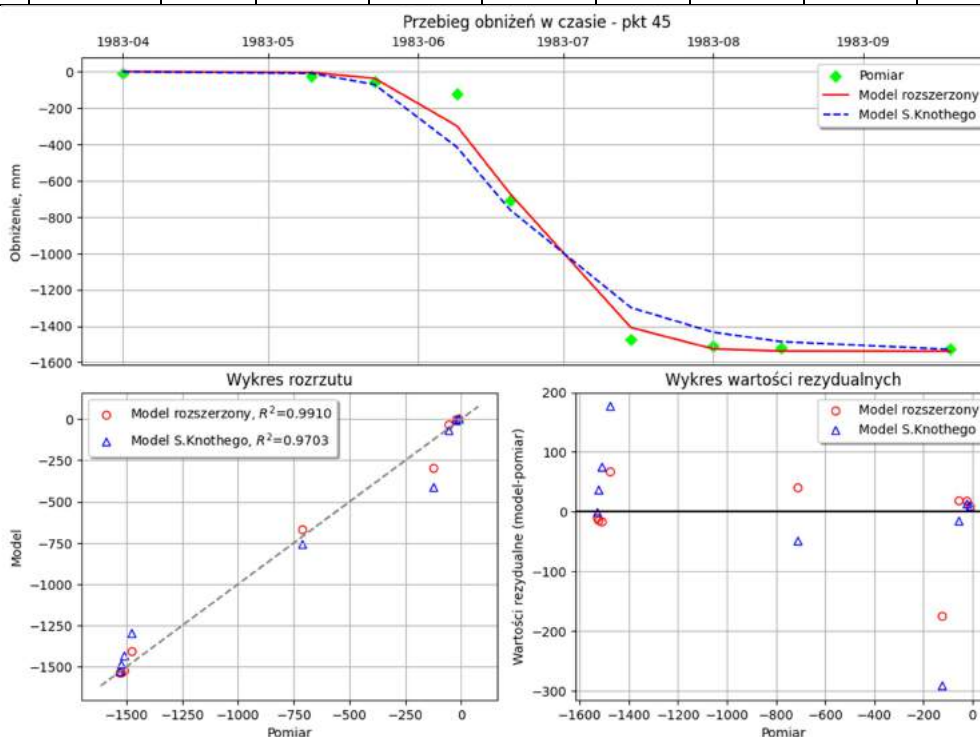
Wyniki obliczeń dla linii 1, KWK Siersza.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 25, 27, 30, 32, 35, 37, 40, 42, 45, 47, 49, 50, 52. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.8., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.15a - 7.15c.

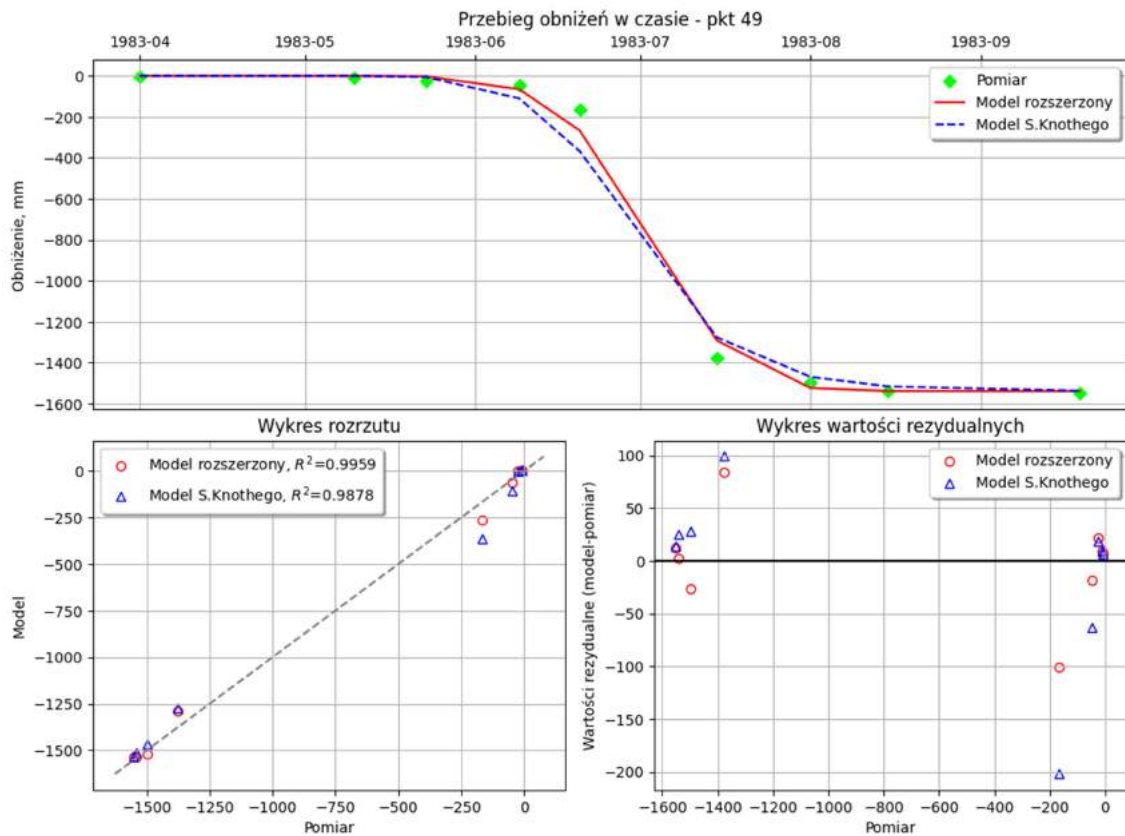
Tabela 7.8

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia 1, KWK Siersza.

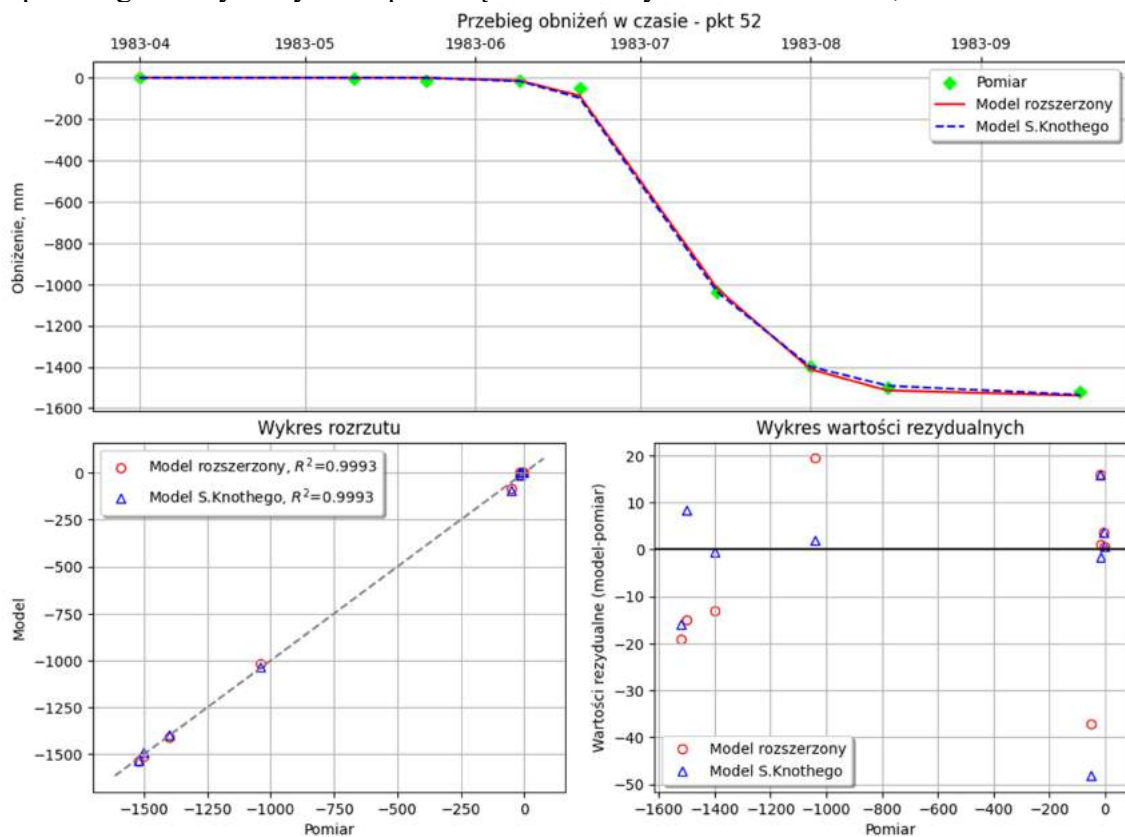
Numer punktu	Model S. Knothego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
25	0.026	4.28	0.8871	19.00	97.00	0.80	16.72	19.14	2.52	0.9609
27	0.041	7.18	0.8444	21.90	21.30	0.75	55.66	59.54	4.75	0.9951
30	0.021	8.35	0.8903	19.80	100.90	0.73	55.82	61.38	4.81	0.9636
32	0.021	9.59	0.8901	18.40	112.40	0.73	61.28	69.28	5.40	0.9651
35	0.022	10.59	0.9087	21.50	115.30	0.78	74.09	96.00	7.28	0.9569
37	0.028	8.97	0.9428	18.90	118.20	0.84	53.30	71.81	5.25	0.9804
40	0.032	7.70	0.9649	16.70	89.20	0.83	55.27	70.98	5.09	0.9847
42	0.038	9.41	0.9535	16.40	52.60	0.87	70.36	105.40	7.25	0.9724
45	0.049	7.76	0.9703	15.40	15.50	0.76	41.15	65.19	4.27	0.9910
47	0.057	6.58	0.9893	13.80	13.90	0.63	39.35	48.56	3.19	0.9951
49	0.078	5.12	0.9878	19.00	97.00	0.80	16.72	19.14	2.52	0.9959
50	0.100	3.67	0.9936	8.80	8.90	0.58	27.84	37.03	2.30	0.9975
52	0.077	1.19	0.9993	4.50	16.50	0.51	13.89	17.64	1.16	0.9993



Rys.7.15a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 45 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.7.15b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 49 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.7.15c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 52 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia 1, KWK Siersza.

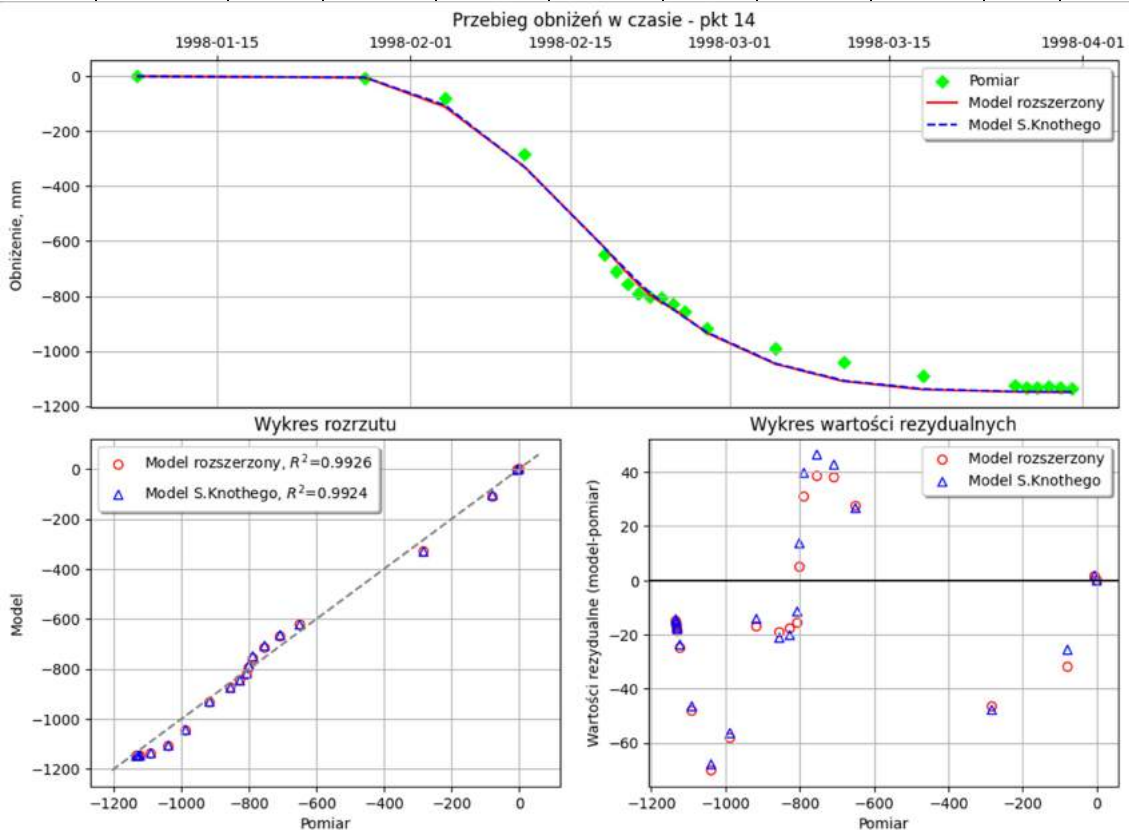
Wyniki obliczeń dla linii ul. Bławatkowa, KWK Jankowice.

Analizę wykonano dla punktów obserwacyjnych: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18. Uzyskane wartości parametrów wraz z błędami dopasowania dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych zaprezentowano w tabeli 7.9., zaś przebiegi osiadań w czasie dla wybranych punktów przedstawiono na rysunkach 7.16a - 7.16c.

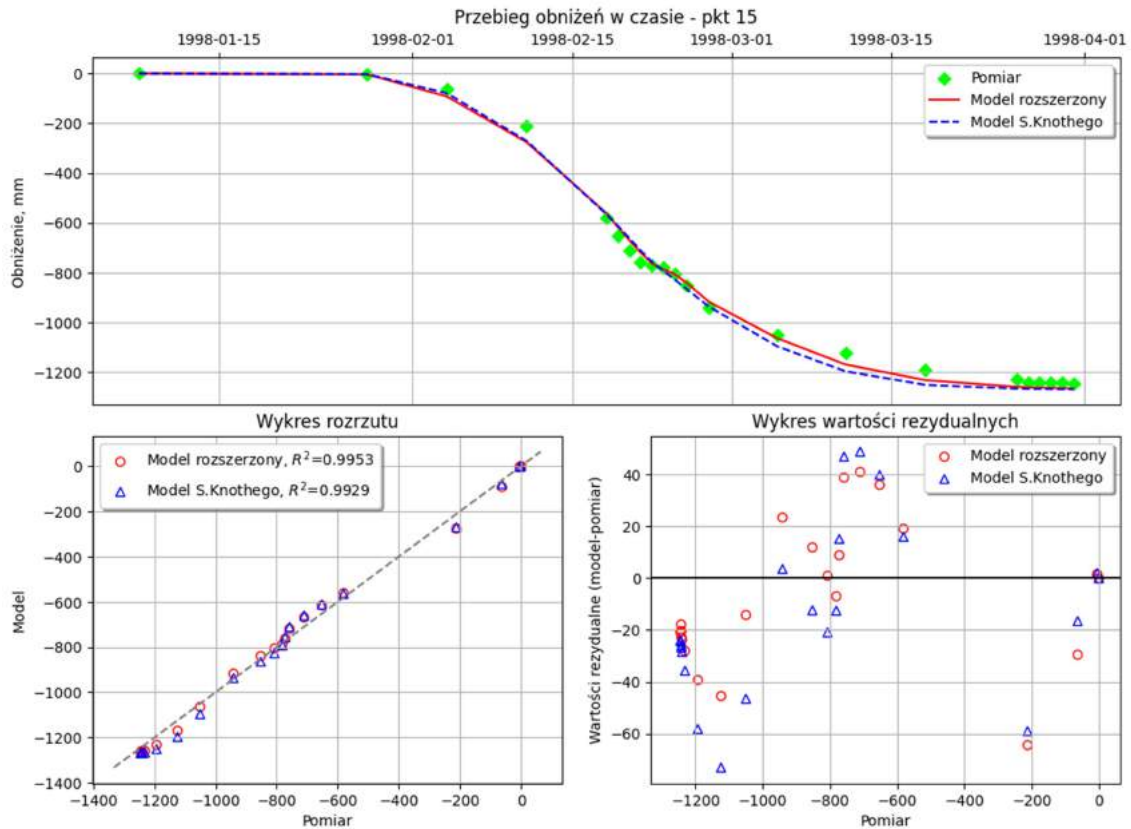
Tabela 7.9

Uzyskane wartości parametrów modelu rozszerzonego i modelu S. Knothego wraz z błędami dopasowania przebiegu obniżenia w czasie do wyników pomiaru. Linia Bławatkowa, KWK Jankowice.

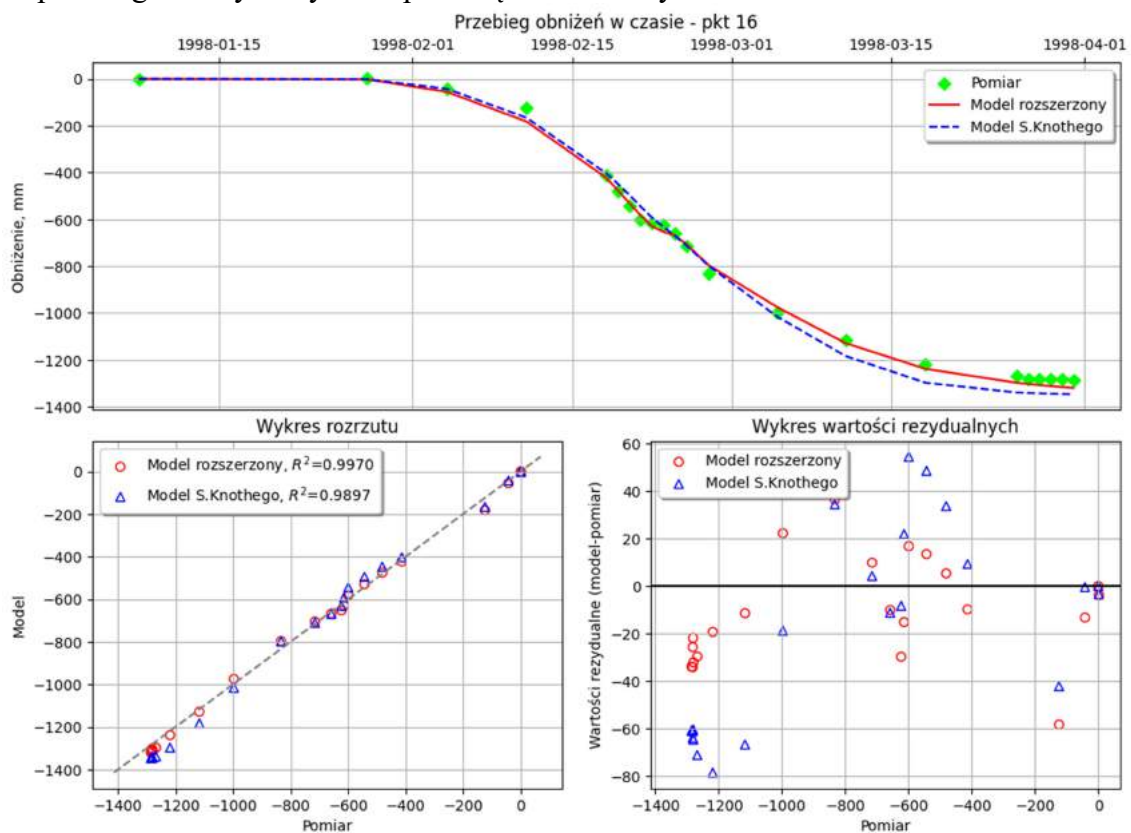
Numer punktu	Model S. Knothego			Model rozszerzony						
	c	M _p	R ²	r _{t1}	r _{t2}	w ₁₂	M _s	M _k	M _p	R ²
	[1/doba]	[%]		[doba]	[doba]		[mm]	[mm]	[%]	
10	0.031	6.92	0.9466	7.4	56.10	0.53	10.04	12.90	4.67	0.9757
11	0.039	10.65	0.8733	6.6	58.90	0.63	10.9	13.98	3.26	0.9881
12	0.072	8.85	0.9164	3.6	37.20	0.70	10.26	11.68	1.75	0.9967
13	0.133	4.29	0.9815	1.4	15.00	0.68	28.26	32.93	3.52	0.9875
14	0.195	2.81	0.9924	1.0	7.30	0.54	26.16	31.45	2.77	0.9926
15	0.219	2.80	0.9929	1.0	10.90	0.71	23.43	28.26	2.27	0.9953
16	0.191	3.54	0.9897	1.0	15.40	0.74	20.56	24.47	1.90	0.9970
17	0.145	3.42	0.9915	1.0	18.70	0.72	20.22	26.12	2.02	0.9837
18	0.116	2.75	0.9951	2.0	17.30	0.68	16.92	21.96	1.72	0.9981



Rys.7.16a. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 14 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia ul. Bławatkowa.



Rys.7.16b. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 15 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia ul. Bławatkowa.



Rys.7.16c. Porównanie rzeczywistych przebiegów osiadania w czasie dla punktu nr 16 z przebiegami uzyskanymi za pomocą analizowanych modeli. Linia ul. Bławatkowa

Analiza otrzymanych wyników

Przedstawione w rozdziale 7.2 wyniki weryfikacji modelu rozszerzonego pozwoliły na dokonanie oceny jakości dopasowania przebiegów obniżen w czasie określonych za jego pomocą do przebiegów uzyskanych z pomiarów. Dodatkowo dokonano porównania do przebiegów czasowych osiadań uzyskanych za pomocą modelu S. Knothego oraz modelu bazowego zaprezentowanego w podrozdziale 6.3.

Analizując wyniki pomiarów pochodzące z linii B-L z terenu KWK Dębieńsko można stwierdzić, że model rozszerzony wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 0.83 - 6.33% w pierwszym przypadku i 1.72 - 7.13% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.17 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując uzyskane wyniki z linii nr 2 z terenu KWK „Jan Kanty” można stwierdzić, że model rozszerzony wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 0.88 - 2.57% w pierwszym przypadku i 1.63 - 3.93% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.18 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując uzyskane wyniki z linii nr 4a z terenu KWK „Jan Kanty” można stwierdzić, że model rozszerzony wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 1.43 - 3.58% w pierwszym przypadku i 2.85 - 4.37% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.19 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując uzyskane wyniki z linii nr 5a z terenu KWK „Jan Kanty” można stwierdzić, że model rozszerzony wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 2.07 - 5.35% w pierwszym przypadku i 4.53 - 7.40% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.20 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując wyniki z linii pomiarowej nr 1 z terenu KWK Czeczott można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 2.44 - 13.63% w pierwszym przypadku i 6.10 - 16.14% w przypadku modelu S. Knothego. Na

rysunku 7.21 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

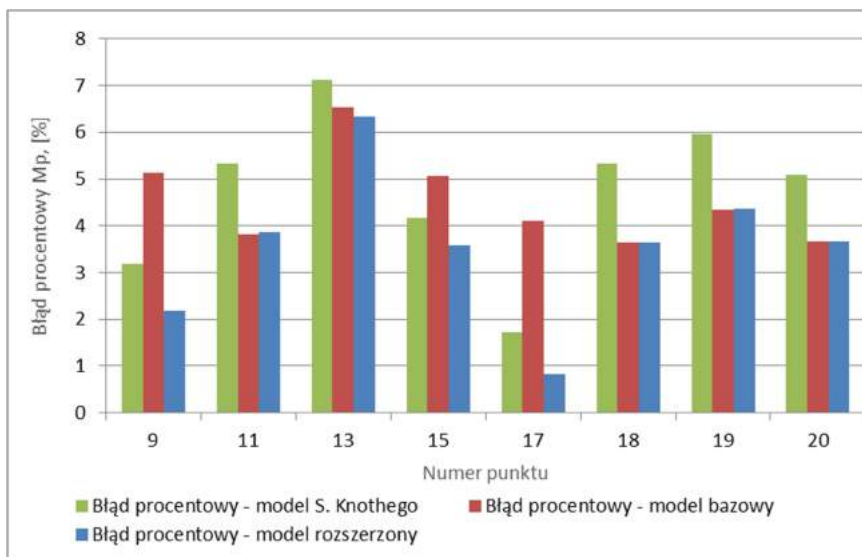
Analizując wyniki z linii pomiarowej nr 3 z terenu KWK Czczott można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 3.40 - 12.76% w pierwszym przypadku i 7.00 - 12.80% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.22 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując wyniki z linii pomiarowej nr 1 z terenu KWK Staszic można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 1.73 - 15.36% w pierwszym przypadku i 1.92 - 16.34% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.23 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

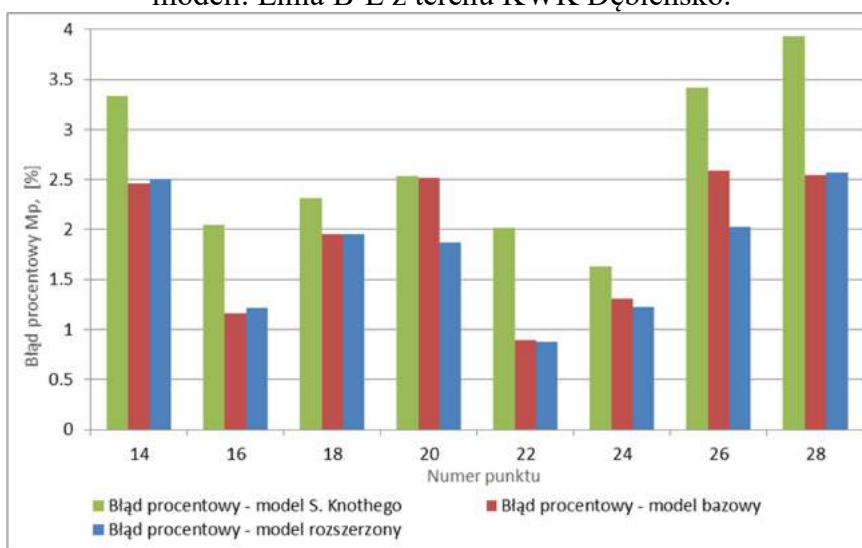
Analizując wyniki z linii pomiarowej nr 1 z terenu KWK Siersza można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 1.16 - 7.28% w pierwszym przypadku i 1.19 - 10.59% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.24 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

Analizując wyniki z linii pomiarowej Bławatkowa z terenu KWK Jankowice można stwierdzić, że model bazowy wykazuje lepszą jakość w stosunku do modelu S. Knothego dla wszystkich analizowanych punktów. Uzyskane wartości błędu procentowego mieszczą się w przedziale 1.72 – 4.67% w pierwszym przypadku i 2.75 - 10.65% w przypadku modelu S. Knothego. Na rys. 7.23 przedstawiono wykres obrazujący wartości błędu procentowego dopasowania modeli do wyników pomiarów.

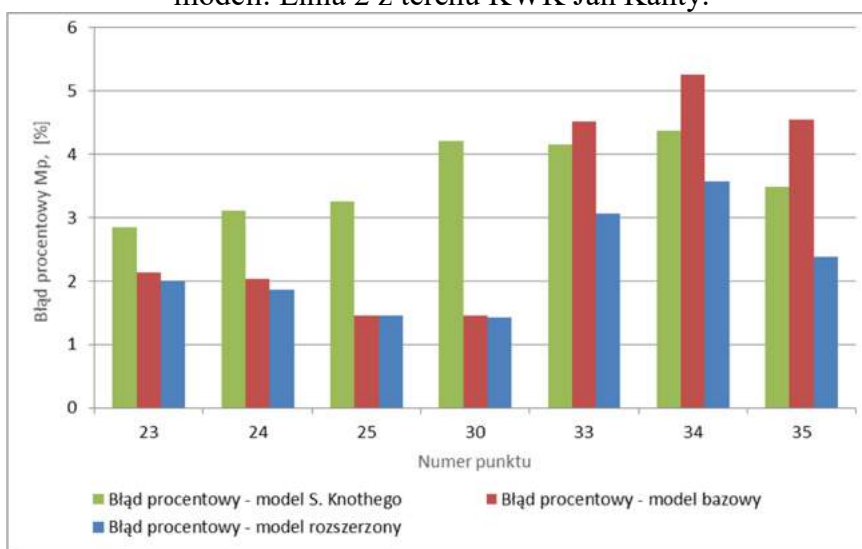
Podsumowując przedstawione wyniki weryfikacji proponowanego modelu rozszerzonego należy stwierdzić, że jakość opisu przebiegu osiadania w czasie dla wszystkich analizowanych punktów wykazuje lepszą jakość dopasowania w stosunku do klasycznego modelu S. Knothego. Można, więc stwierdzić, że uzyskane wyniki są zadowalające, a zaproponowany model pozwala w znaczącym stopniu poprawić jakości opisu przebiegu procesu deformacji terenu górniczego w czasie.



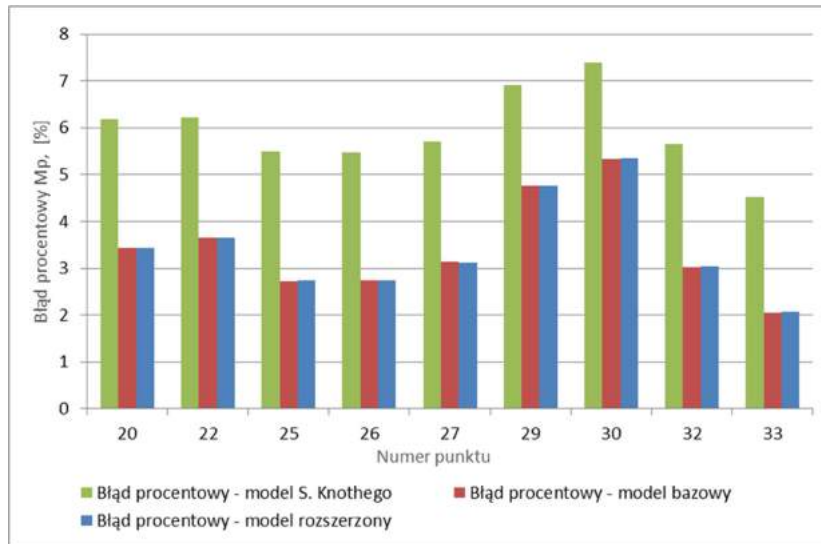
Rys.7.17. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia B-L z terenu KWK Dębieńsko.



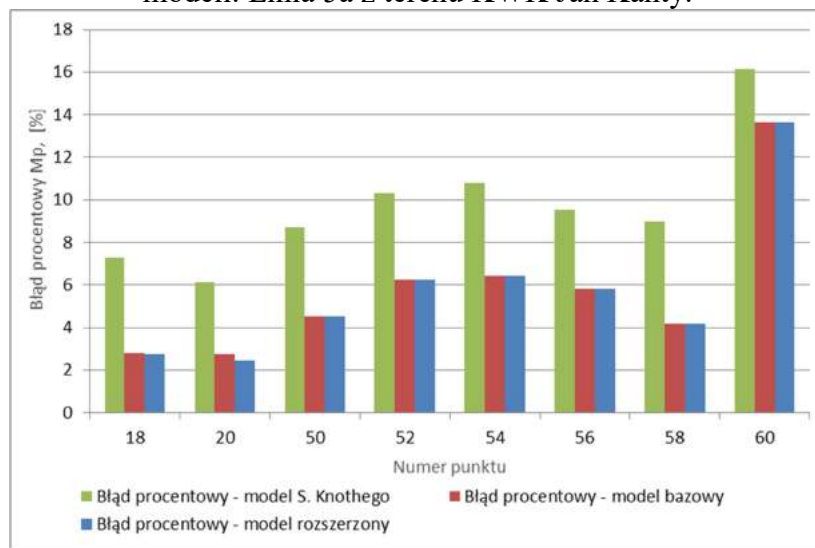
Rys.7.18. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 2 z terenu KWK Jan Kanty.



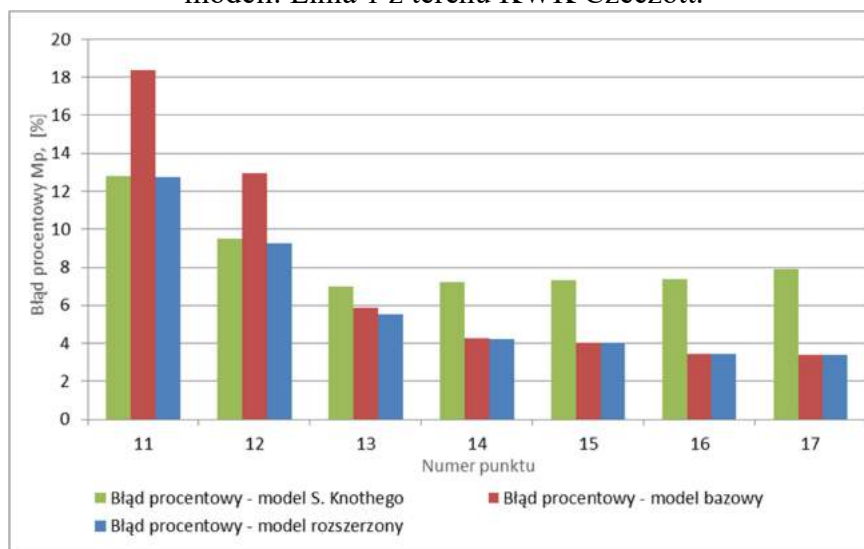
Rys.7.19. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 4a z terenu KWK Jan Kanty.



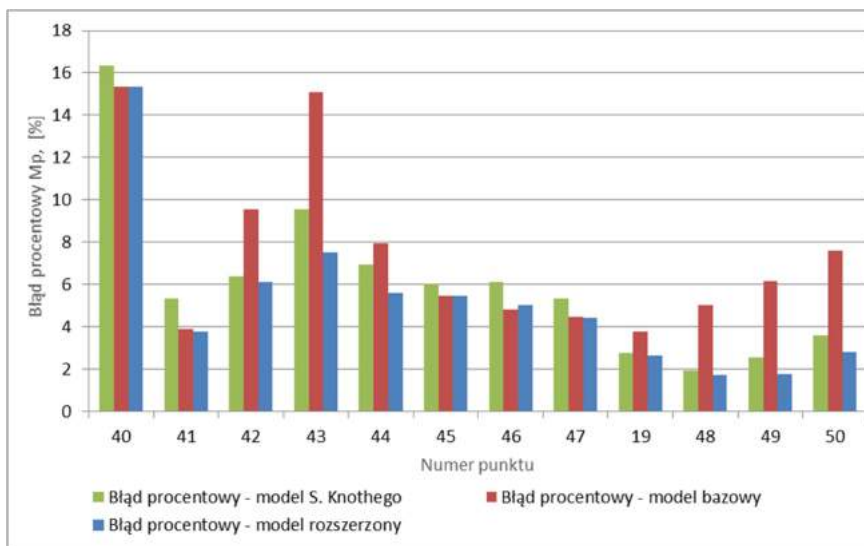
Rys.7.20. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 5a z terenu KWK Jan Kanty.



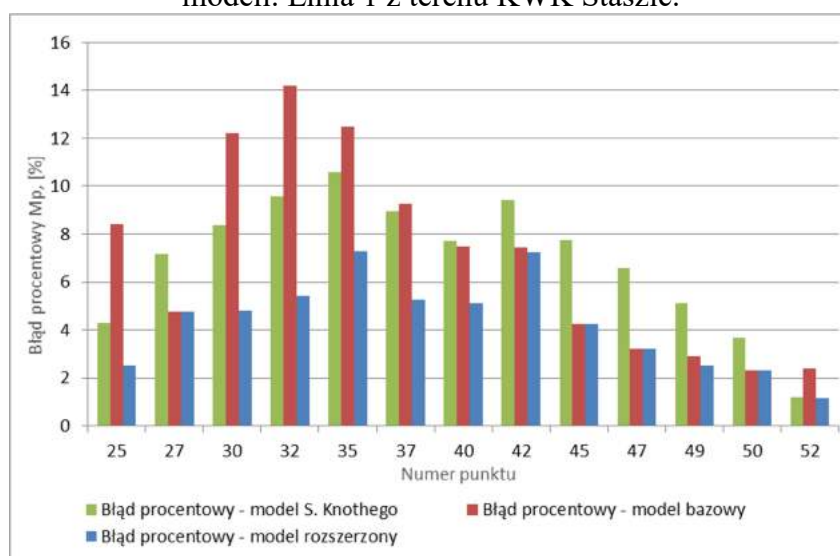
Rys.7.21. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Czeczott.



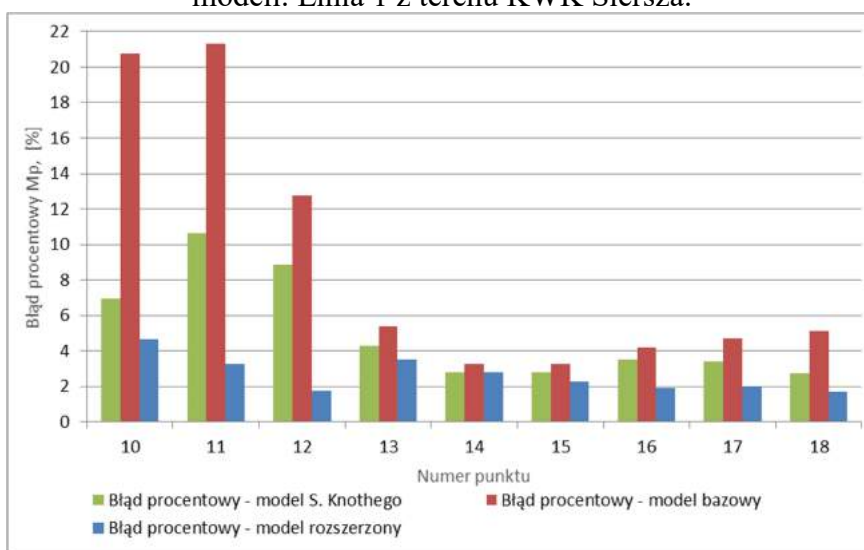
Rys.7.22. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 3 z terenu KWK Czeczott.



Rys.7.23. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Staszic.



Rys.7.24. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia 1 z terenu KWK Siersza.



Rys.7.25. Porównanie uzyskanych wartości błędu procentowego M_p dla analizowanych modeli. Linia Bławatkowa z terenu KWK Jankowice

7.3 Ocena przydatności modelu rozszerzonego do prognozowania anomalii procesu osiadań związanych z przerwami w eksploatacji

Zaproponowane w rozdziale 7.1 rozwiązanie wykorzystujące rozszerzoną koncepcję modelu bazowego opiera się na dwóch członach – równanie (7.1), z których pierwszy związany z parametrem r_{t1} opisuje tzw. „wpływy natychmiastowe”, natomiast drugi – wykorzystujący parametr r_{t2} – tzw. „wpływy opóźnione”. Takie podejście sugeruje pytanie, czy tego typu model pozwala na prognozowanie zjawisk anomalnych towarzyszących krótkotrwałym przerwom w eksploatacji, a mianowicie szybkiemu spadkowi prędkości obniżen na powierzchni po zatrzymaniu frontu eksploatacyjnego, a następnie wzrostowi tej prędkości po wznowieniu wydobywania. W rozdziale 2 pracy wspomniano, że na występowanie tego typu anomalii wskazuje w swoich pracach wielu autorów, między innymi A. Sroka, A. Kowalski, J. Białek. Problem ten dotyczy również zjawisk sejsmicznych generowanych we współczesnych warunkach prowadzenia eksploatacji podziemnej (Butra i in. 2002).

Stąd rodzi się pytanie czy opracowany model rozszerzony pozwala na opisanie tych zjawisk w prognozie rozkładu obniżen w czasie. Aby uzyskać odpowiedź na to pytanie, przeprowadzono obliczenia, w symulowano wystąpienie przerw weekendowych w eksploatacji. Poniżej przedstawiono założenia do wykonanych obliczeń oraz ich wyniki.

Do symulacji przyjęto założenie wybierania hipotetycznego pola ścianowego o kształcie prostokąta i wymiarach: długość ściany 200 m, wybieg 500 m – rys.7.26. Założono średnią prędkość postępu frontu około 10 m/dobę, czyli około 50 m na 5 dni roboczych w tygodniu. Eksploatacja prowadzona od 2 stycznia 2023 r. do 10 marca 2023 r. W harmonogramie eksploatacji założono wystąpienie trzech przerw sobotnio – niedzielnych: 28-29 stycznia, 04-05 lutego, 11-12 lutego. Ściana zlokalizowana na głębokości 300 metrów ppt., wysokość wybieranej warstwy pokładu 2.0, eksploatacja z zawałem stropu. Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów:

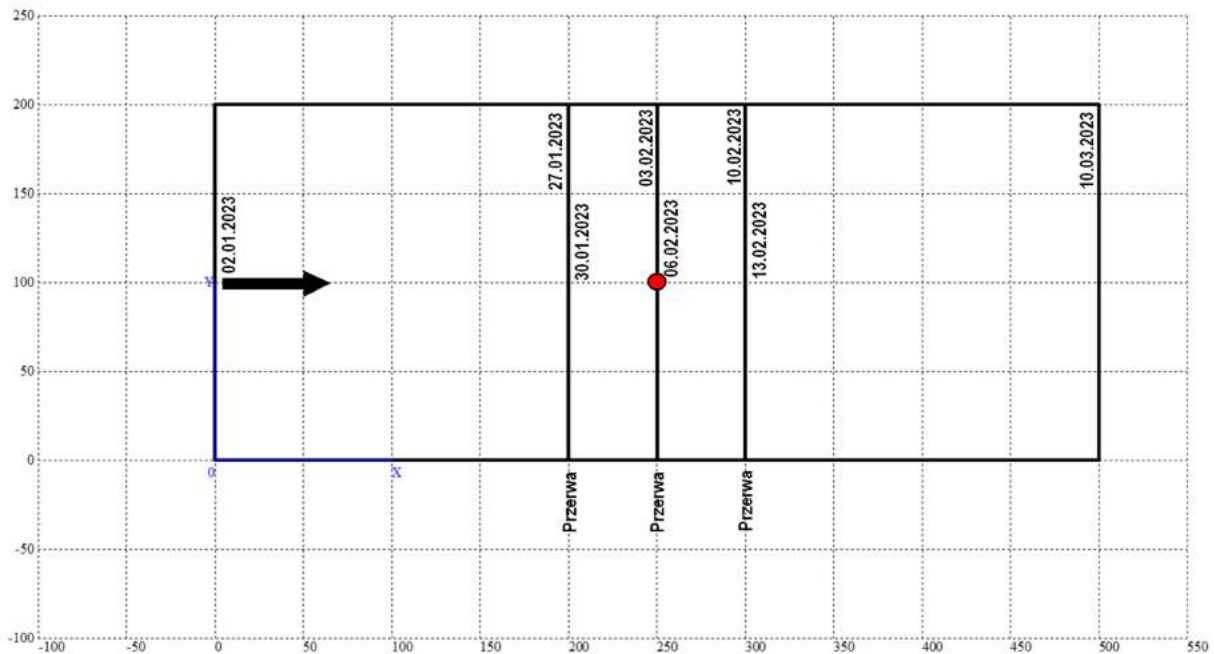
- współczynnik eksploatacji $a = 0.8$,
- parametr $tg\beta = 2.0$,
- obrzeże eksploatacyjne $d = 0$ [m],
- współczynnik prędkości osiadania $c = 0.2$ [1/dobę],
- parametry modelu rozszerzonego:
 - $r_{t1} = 0.50$ [doba]
 - $r_{t2} = 15.00$ [doba]

○ $w_{12} = 0.75$

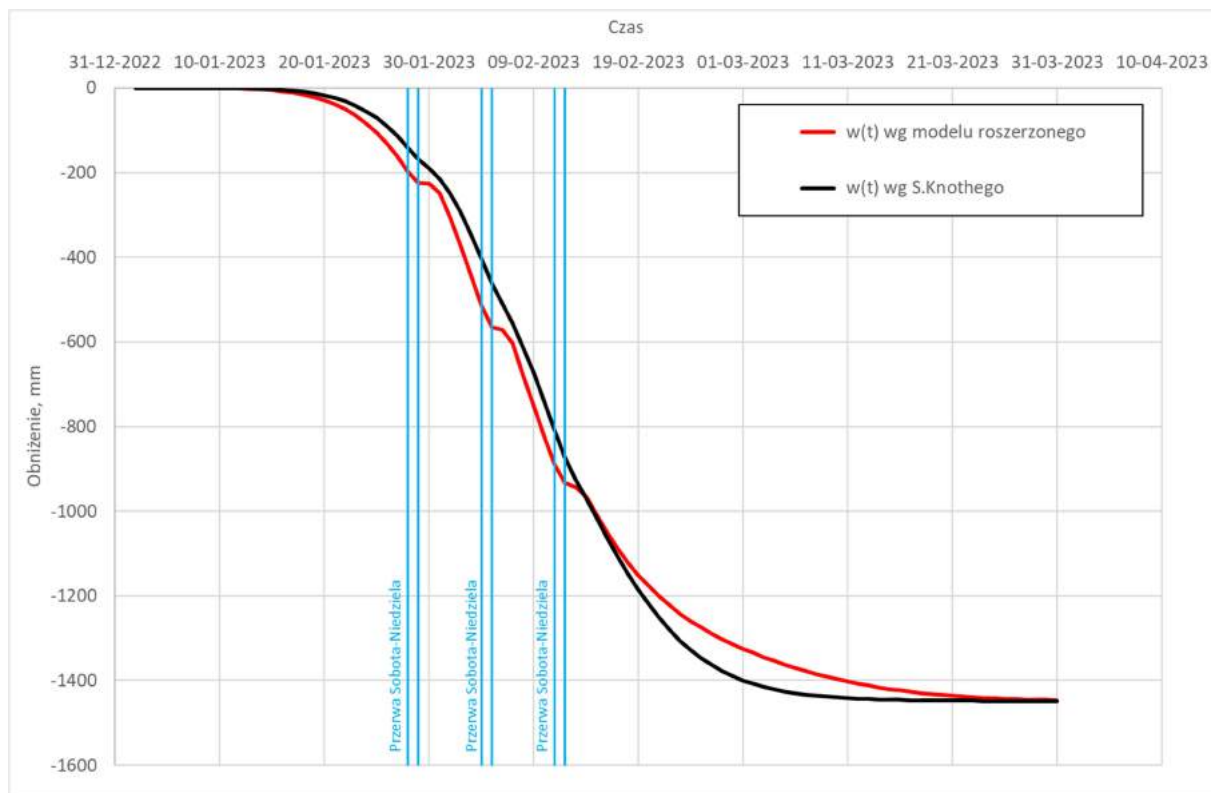
Obliczenia wykonano za pomocą programu Ray - Param dla modelu S. Knothego oraz modelu rozszerzonego w punkcie obliczeniowym zlokalizowanym na powierzchni nad środkiem geometrycznym pola eksploatacyjnego – czerwony punkt na rys.7.26. Wyniki obliczeń w postaci przebiegów osiadania w czasie dla obydwu modeli przedstawiono na rys.7.27.

Analizując rysunek 7.27 można stwierdzić, że w przypadku modelu rozszerzonego (czerwona linia) symulowany przebieg osiadania w czasie zawiera charakterystyczne zaburzenia związane z krótkotrwałym spowolnieniem procesu osiadania wskutek przerwy weekendowej.

W przypadku przebiegu osiadania w czasie wg modelu S. Knothego należy stwierdzić, że brak jest oznak spowolnienia procesu, występuje tylko nieznaczna lokalna zmiana nachylenia krzywej $w(t)$. Należy przy tym zwrócić uwagę, że do obliczeń przyjęto dużą wartość parametru $c = 0.3$ 1/dobę (czyli około 110 1/rok), znacznie wybiegającą poza zakres typowych wartości dla GZW. co spowodowało tylko odpowiednio duże nachylenie krzywej $w(t)$.



Rys.7.26. Geometria pola eksploatacyjnego zastosowana do obliczeń symulacyjnych wraz z lokalizacją punktu obliczeniowego.



Rys.7.27. Teoretyczne przebiegi osiadania w czasie według modelu S.Knotheho i modelu rozszerzonego w przypadku eksploatacji prowadzonej z przerwami.

8. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

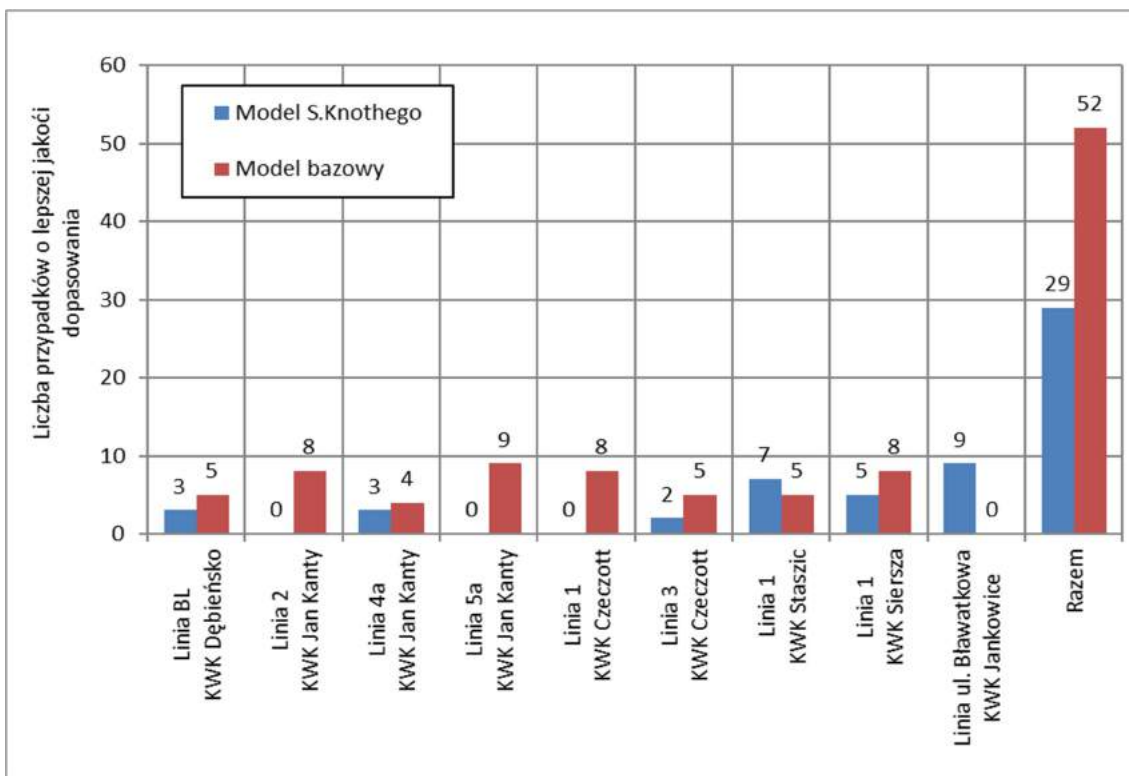
W rozdziałach 6.3 oraz 7.3 niniejszej pracy zaprezentowano wyniki weryfikacji opracowanych modeli prognozowania nieustalonych obniżeń terenu górniczego. Weryfikację przeprowadzono w oparciu o odpowiednie wyniki pomiarów geodezyjnych i w odniesieniu do modelu referencyjnego, jakim był model S. Knothego. W niniejszym rozdziale dokonano analizy otrzymanych wyników z uwagi na dwa aspekty: jakość modelu określoną na podstawie porównania z modelem referencyjnym oraz zmienność parametrów modelu.

8.1. Jakość analizowanych modeli w świetle przeprowadzonej weryfikacji

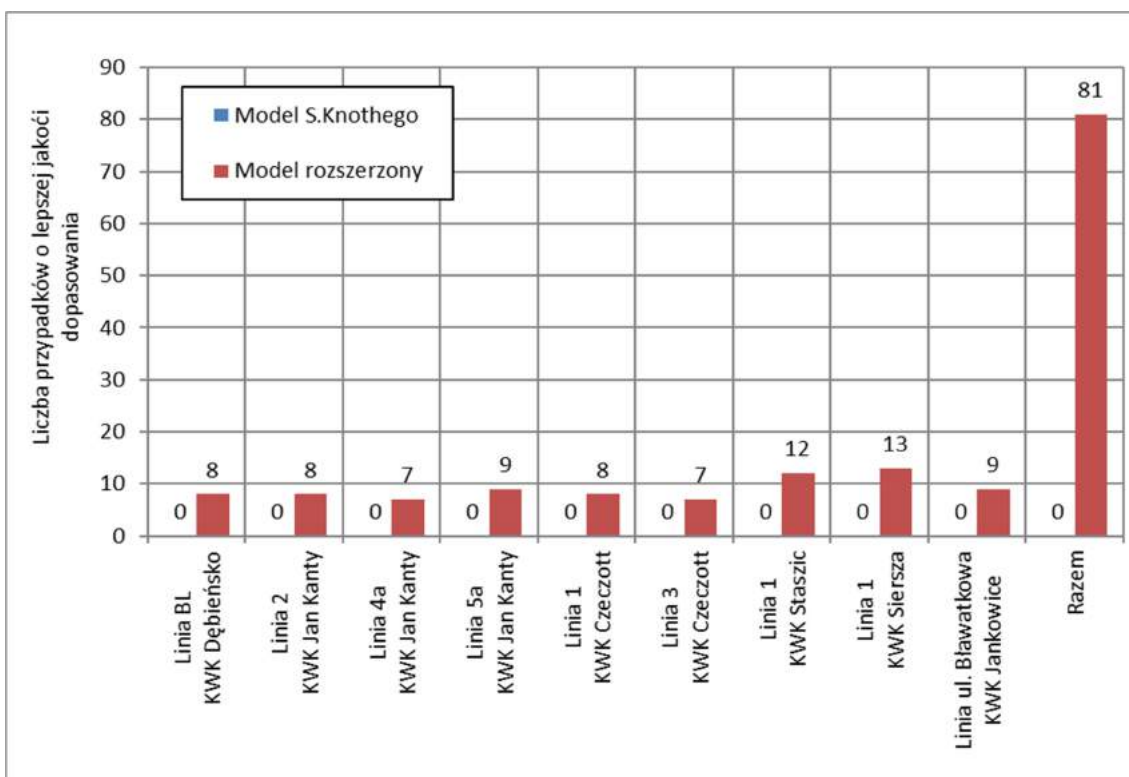
Otrzymane wyniki analizowano w oparciu o wartości błędów procentowych charakteryzujących poziom zgodności aproksymowanych przebiegów czasowych obniżeń, określonych zgodnie z zależnością (11.3).

Analizując jakość aproksymacji uzyskaną w przypadku modelu bazowego w stosunku do modelu S. Knothego należy stwierdzić, że na ogólną liczbę 81 analizowanych punktów obserwacyjnych ze wszystkich rozpatrywanych linii, w 52 przypadkach uzyskano lepszą jakość opisu przebiegu obniżeń w czasie w stosunku do modelu S. Knothego, co stanowi 64 % ogółu przypadku. Natomiast w 29 przypadkach lepszą jakością charakteryzował się model S. Knothego, co stanowi 36 % ogółu przypadków. Analizując rys. 8.1 przedstawiający liczebności tych przypadków dla poszczególnych linii należy stwierdzić, że jakość opisu przebiegu obniżeń w czasie jest zbliżona, model bazowy pomimo sumarycznie większego udziału przypadków lepszej jakości opisu, w skali pojedynczych linii obserwacyjnych trudno jednoznacznie wskazać, że model ten cechuje się istotnie lepszą jakością w stosunku do modelu S. Knothego. Otrzymane wyniki skłoniły do dalszych prac nad końcowym rozwiązaniem i do opracowania modelu rozszerzonego.

W przypadku modelu rozszerzonego, jakość opisu przebiegu obniżeń w czasie była lepsza we wszystkich analizowanych punktach obserwacyjnych (100 %) w stosunku do modelu S. Knothego, co potwierdza rysunek 8.2, zawierający porównanie liczebności przypadków identyczne jak na rysunku 8.1.



Rys.8.1. Porównanie modelu bazowego z modelem S. Knothego z uwagi na liczbę przypadków wykazujących lepsze dopasowanie teoretycznego przebiegu osiadania w czasie do uzyskanego na podstawie wyników pomiarów.



Rys.8.2. Porównanie modelu rozszerzonego z modelem S. Knothego z uwagi na liczbę przypadków wykazujących lepsze dopasowanie teoretycznego przebiegu osiadania w czasie do uzyskanego na podstawie wyników pomiarów.

8.2. Zmienność parametrów uzyskanych w procesie identyfikacji

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki analiz skierowanych na ocenę zmienności wartości parametrów uzyskanych dla poszczególnych linii obserwacyjnych. Z punktu widzenia prognoz, niezależnie od modelowanego zjawiska stosowane rozwiązanie powinno się cechować stabilnością wartości parametrów dla danych warunków geologiczno - górniczych. Oczywistym jest, że w przypadku tak złożonych zjawisk, jak deformacje górotworu i powierzchni wywołane bezpośrednim oddziaływaniem podziemnej eksploatacji górniczej, trudno spodziewać się dużej stabilności parametrów.

W poniższych podrozdziałach dokonano podsumowania analiz przeprowadzonych z uwagi na stabilność wartości parametrów poszczególnych modeli.

8.2.1. Model bazowy

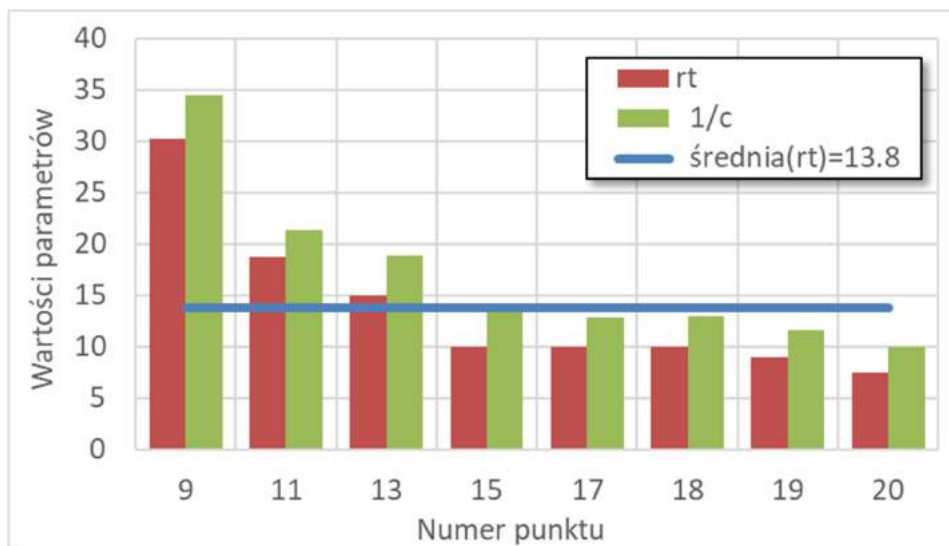
W celu oceny zmienności parametrów obliczono i zestawiono w tabeli 8.1 dla każdej linii obserwacyjnej wybrane miary zmienności, a mianowicie: zakres zmienności określony wartościami minimum i maksimum, średnia s , odchylenie standardowe σ oraz procentowy stosunek odchylenia standardowego do średniej. Ten ostatni parametr traktowano jako miarę porównawczą rozrzutu pomiędzy modelami.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że aby można było zmienność parametru c porównywać ze zmiennością r_t , przyjęto do analizy odwrotność jego wartości: $c' = 1/c$.

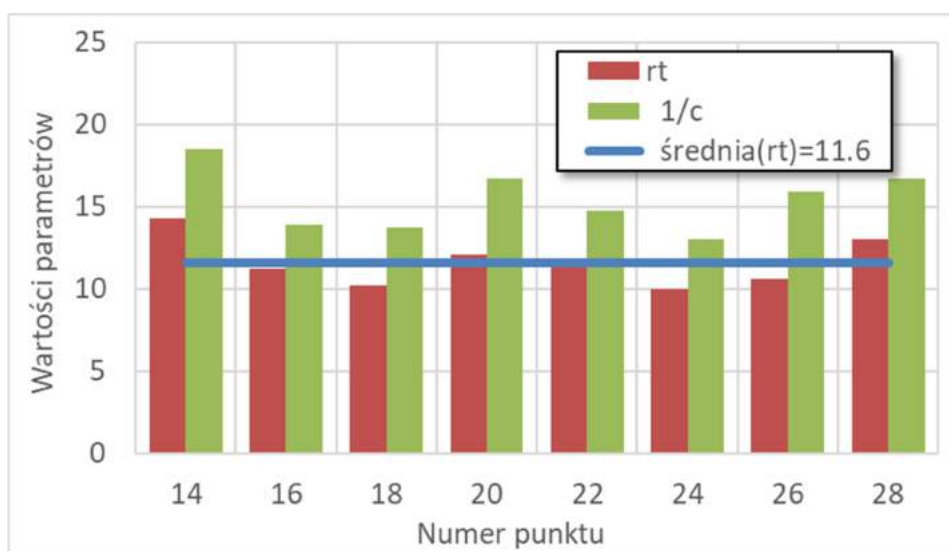
Uzupełnieniem przedmiotowej tabeli jest zestaw wykresów przedstawionych na rysunkach 8.3 – 8.11, gdzie pokazano wartości parametrów dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych oraz wykreślono linię oznaczającą wartość średnią parametru r_t .

Analizując przedstawiony materiał dokumentacyjny należy stwierdzić, że zmienność parametru r_t modelu bazowego jest zbliżona do zmienności parametru c' , a w części przypadków jest mniejsza.

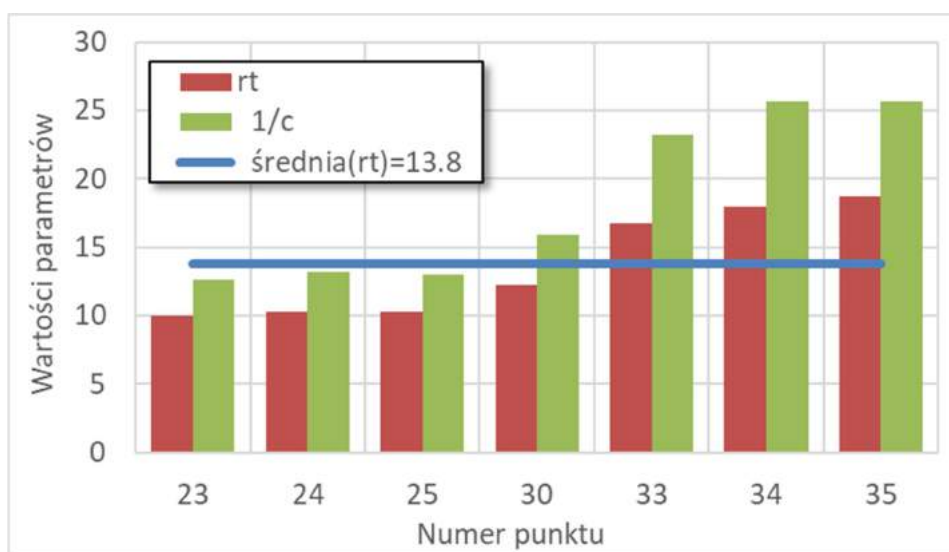
Podsumowując należy stwierdzić, że dla analizowanych linii obserwacyjnych opracowany model bazowy charakteryzuje się zbliżoną zmiennością parametru odpowiedzialnego za opis nieustalonych deformacji w stosunku do modelu S. Knothego.



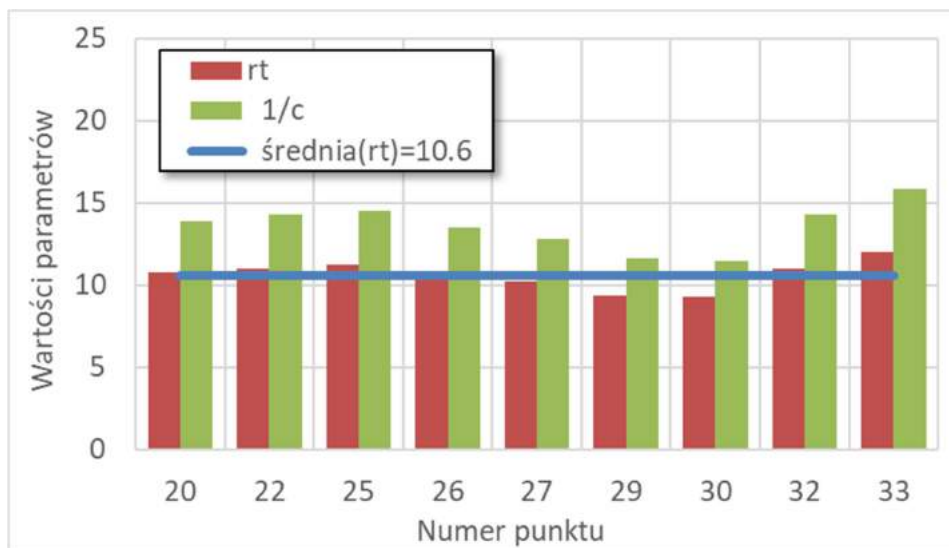
Rys.8.3. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia B-L, KWK Dębieszko.



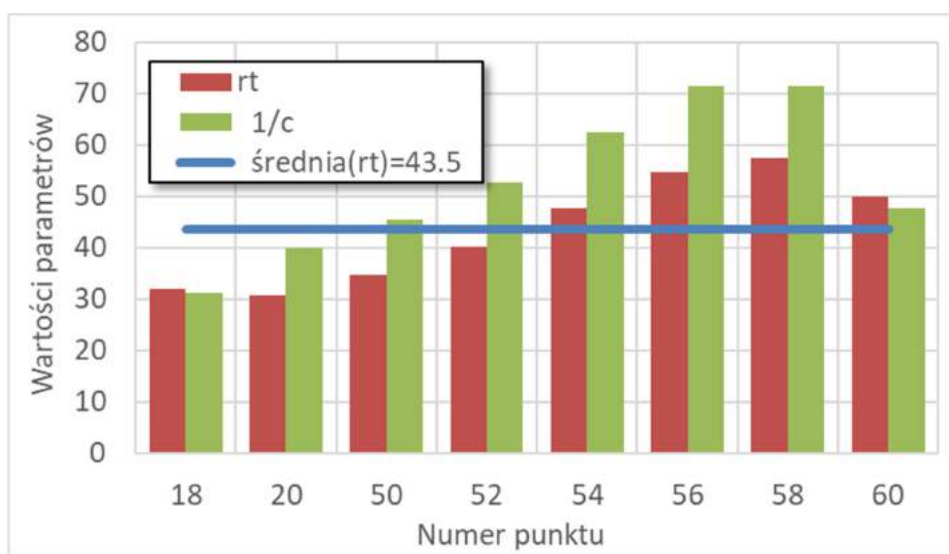
Rys.8.4. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 2, KWK Jan Kanty.



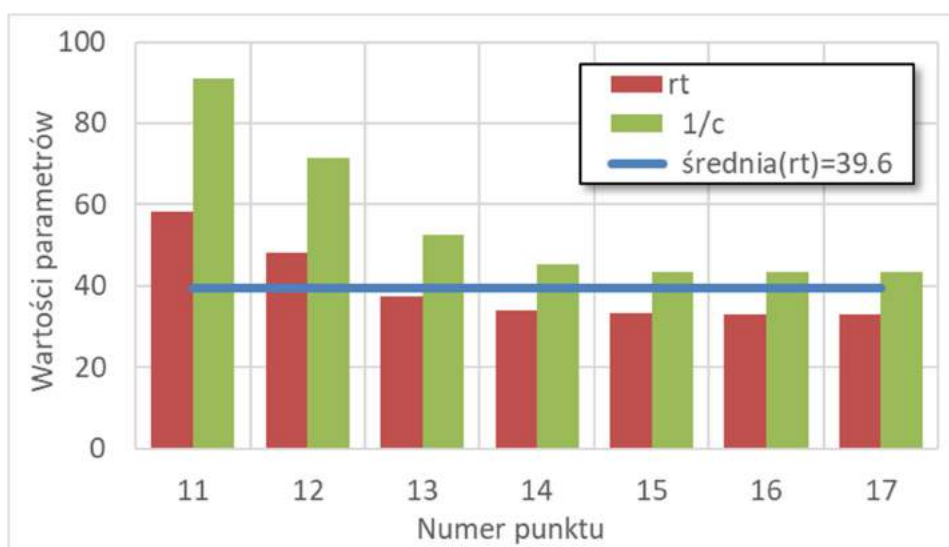
Rys.8.5. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



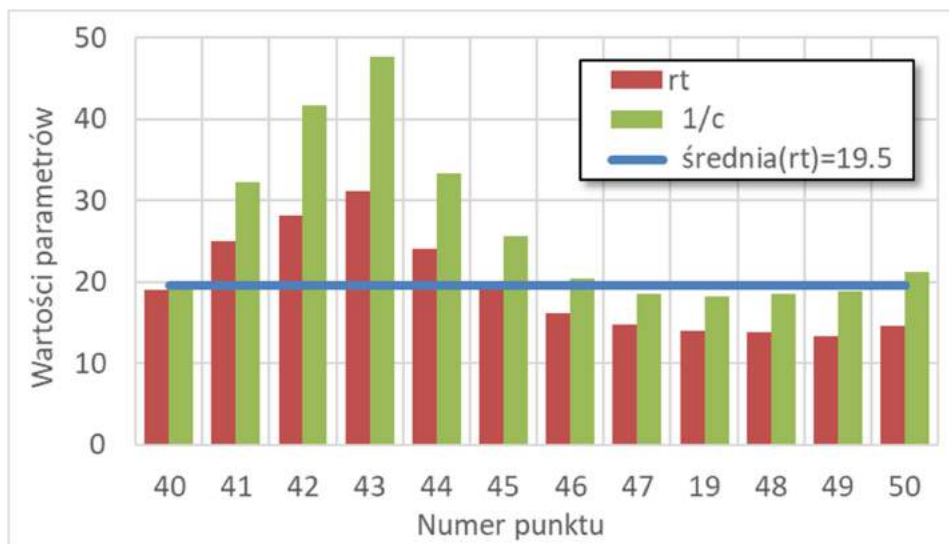
Rys.8.6. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



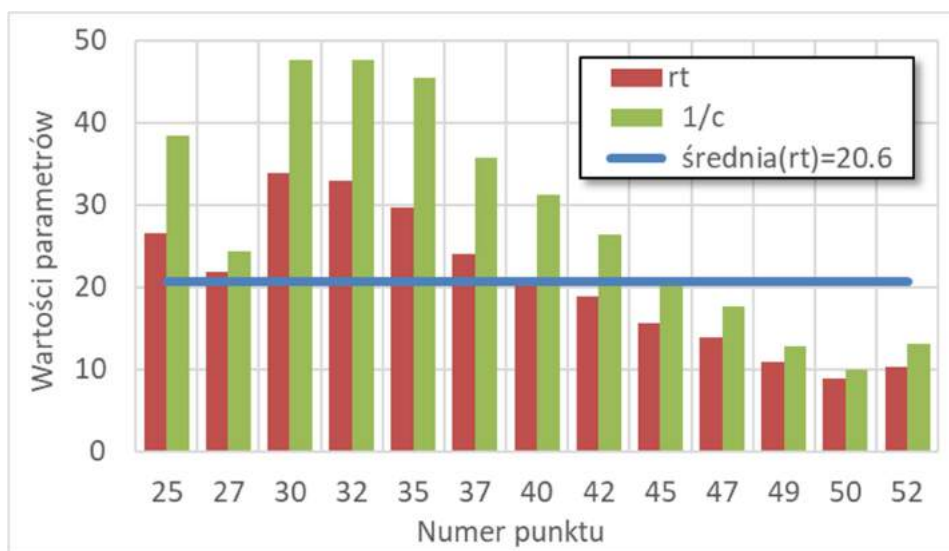
Rys.8.7. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 1, KWK Czczott.



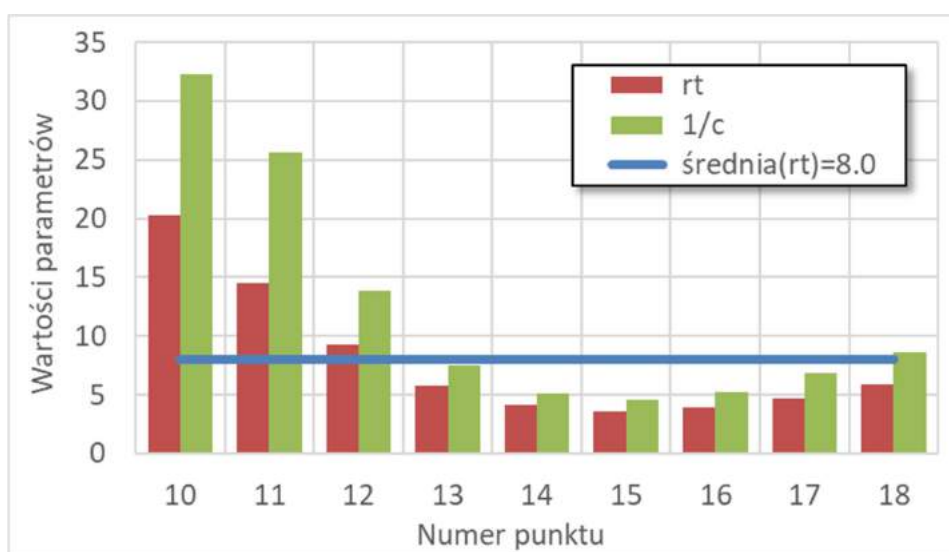
Rys.8.8. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.8.9. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.8.10. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.8.11. Zmienność parametrów dla modelu bazowego i S.Knothego. Linia ul. Bławatkowa.

Tabela 8.1

Zestawienie wartości parametrów uzyskanych w procesie identyfikacji dla modelu S. Knothego oraz modelu bazowego wraz z miarami ich zmienności

Linia	Parametr $c' = I/c$				Parametr r_t			
	Zmienność min – max	średnia s	odchyl. stand. s	$\frac{\sigma}{s} \cdot 100\%$	Zmienność min – max	średnia	odchyl. stand. s	$\frac{\sigma}{s} \cdot 100\%$
B-L Dębińsko	10.00 – 34.48	16.95	8.03	47.4 %	7.50 – 30.25	13.81	7.58	54.9 %
2 Jan Kanty	12.99 – 18.52	15.38	1.88	12.2 %	10.00 – 14.30	11.63	1.47	12.6 %
4a Jan Kanty	12.66 – 25.64	18.46	6.12	33.2 %	10.00 – 18.75	13.75	3.94	28.7 %
5a Jan Kanty	11.49 – 15.87	13.59	1.41	10.4 %	9.25 – 12.00	10.60	0.87	8.2 %
1 Czeczott	31.25 – 71.43	52.79	14.62	27.7 %	30.75 – 57.50	43.47	10.45	24.0 %
3 Czeczott	43.48 – 90.91	55.84	18.48	33.1 %	33.00 – 58.25	39.57	9.85	24.9 %
1 Staszic	18.18 – 47.62	26.32	10.10	38.4 %	13.30 – 31.10	19.46	6.19	31.8 %
1 Siersza	10.00 – 47.62	28.51	13.58	47.6 %	8.90 – 33.90	20.60	8.53	41.4 %
Bławatkowa Jankowice	4.57 – 32.26	12.19	10.03	82.3 %	3.60 – 20.30	8.01	5.77	72.0 %

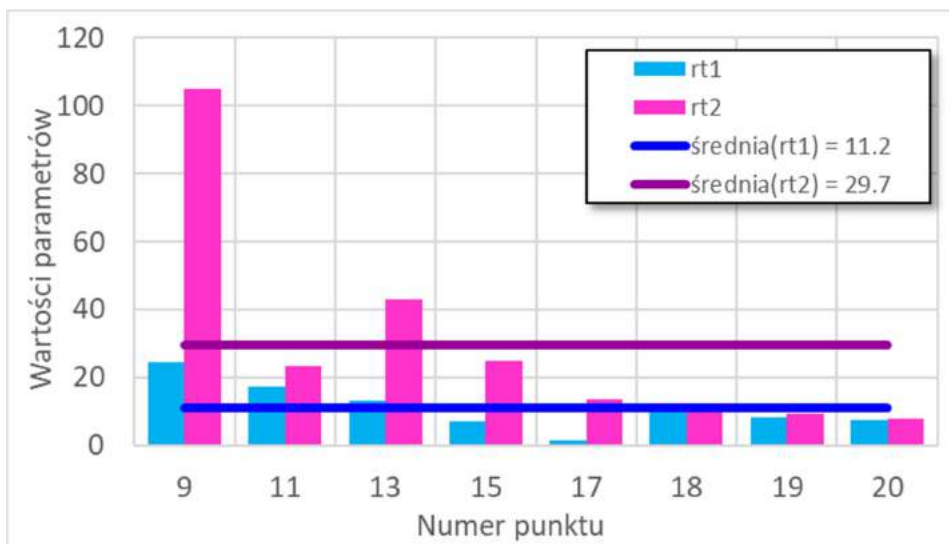
8.2.2. Model rozszerzony

Parametry r_{11} , r_{12}

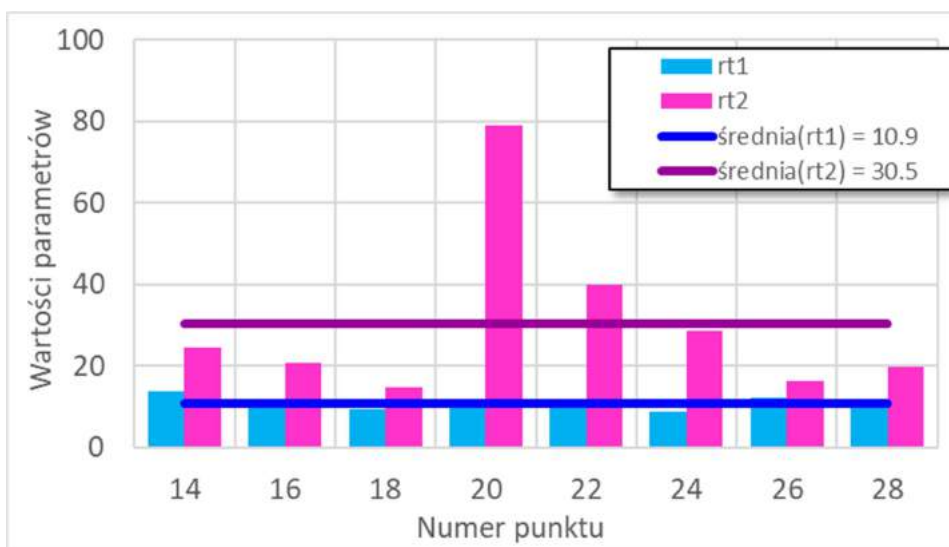
Ocenę zmienności parametrów r_{11} i r_{12} przeprowadzono na tych samych zasadach jak miało to miejsce w przypadku modelu bazowego. Miary zmienności tych parametrów zestawiono w tabeli 8.2 dla każdej linii obserwacyjnej. Również w tym przypadku wykonano odpowiednie wykresy zmienności przedstawione na rysunkach 8.12 – 8.20.

Analizując przedstawione materiały dokumentacyjny należy stwierdzić, że zmienność parametru r_{11} jest zbliżona do zmienności parametrów c' oraz r_t . Natomiast wartości parametru r_{12} charakteryzują się większym rozrzutem dla poszczególnych linii, przy czym należy zauważyć, że podwyższone wartości wskaźników zmienności wynikają zazwyczaj z odosobnionych znacznych odchyleń dla 1-2 punktów na linii obserwacyjnej, które wpływają na obliczone wartości. Efekt ten można wyraźnie zaobserwować na przedstawionych rysunkach 8.12, 8.13, 8.15, 8.17.

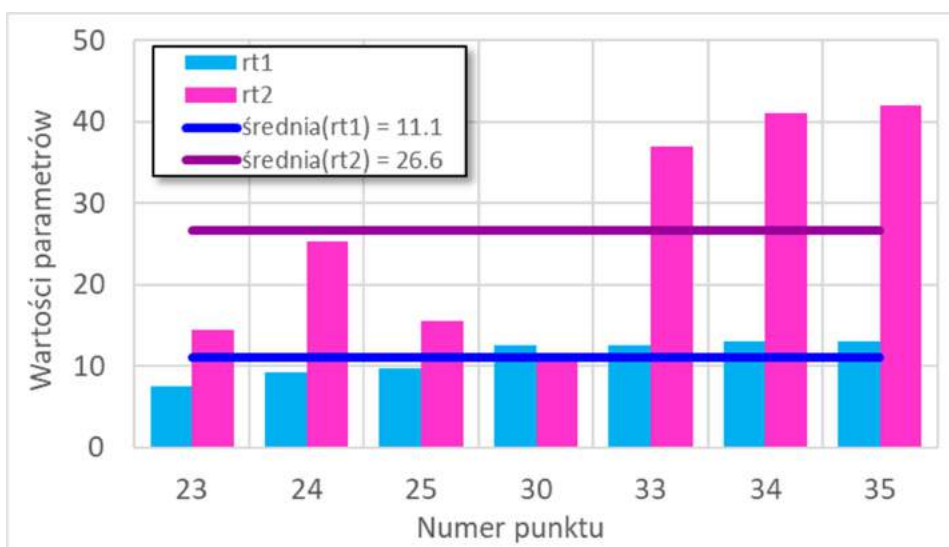
Podsumowując należy stwierdzić, że dla analizowanych linii obserwacyjnych opracowany model rozszerzony charakteryzuje nieco większą zmiennością parametrów odpowiedzialnych za opis nieustalonych deformacji w stosunku do modelu S. Knothego i modelu bazowego. Należy mieć jednak na uwadze, iż jest to model wykorzystujący w sumie 3 parametry, co z natury rzeczy skutkuje większą ich zmiennością.



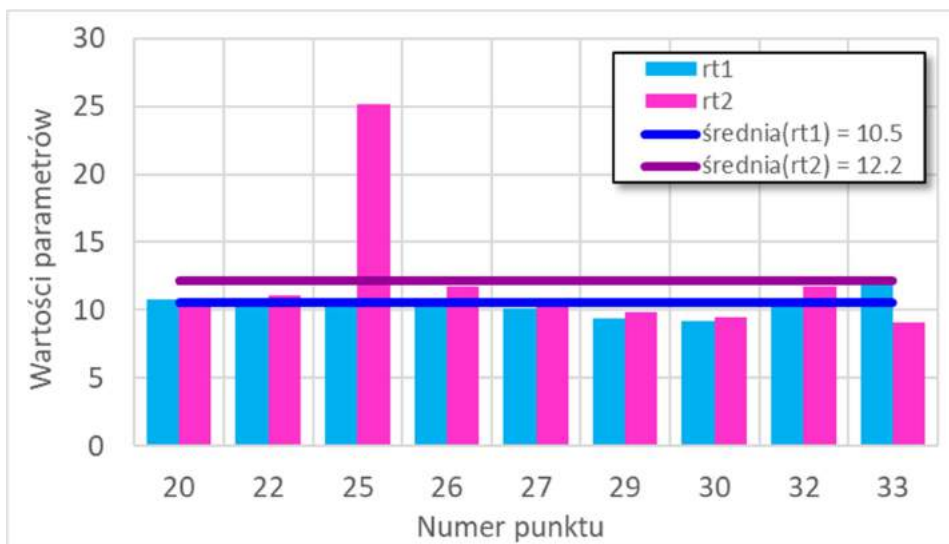
Rys.8.12. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia B-L, KWK Dębieńsko.



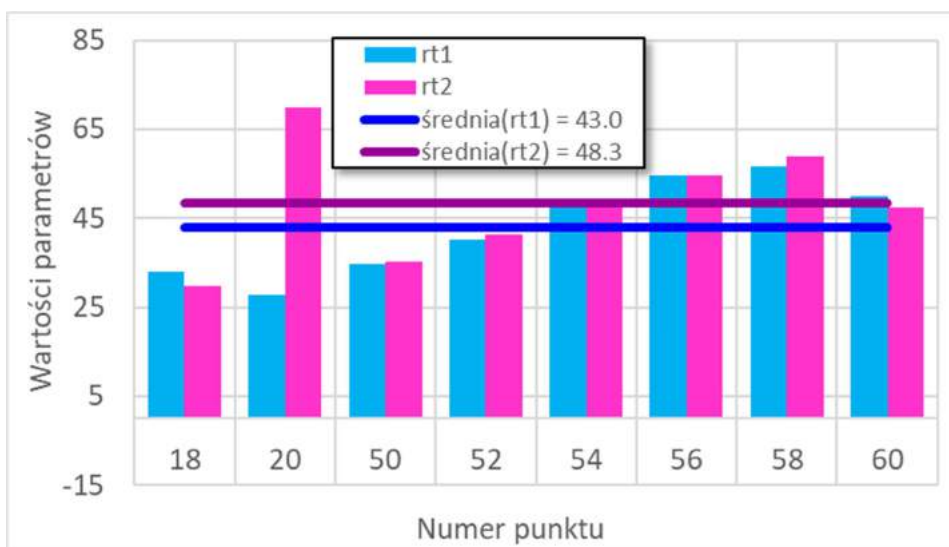
Rys.8.13. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 2, KWK Jan Kanty.



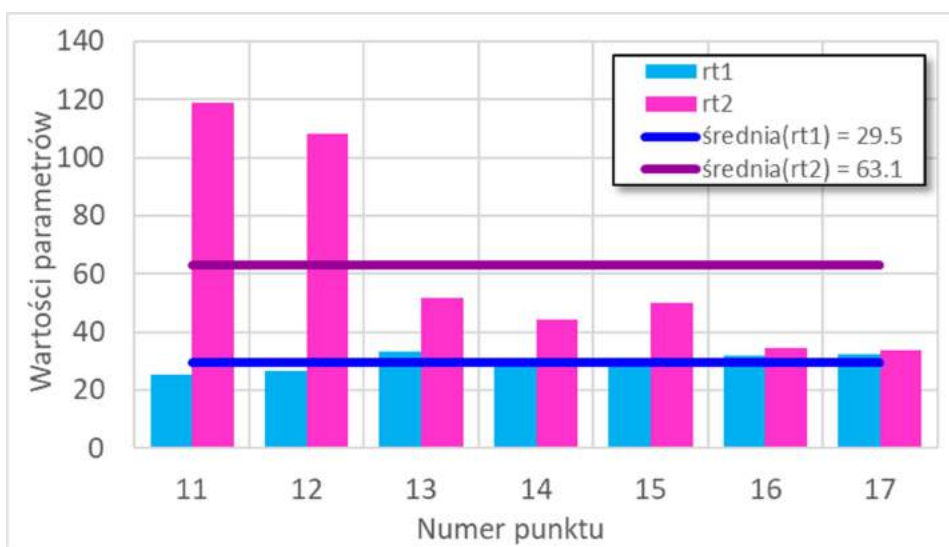
Rys.8.14. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 4a, KWK Jan Kanty.



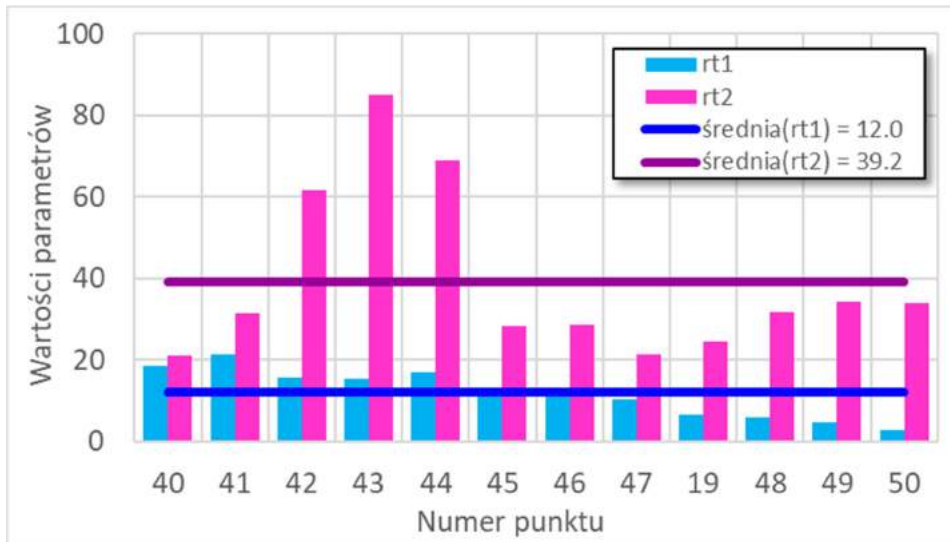
Rys.8.15. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 5a, KWK Jan Kanty.



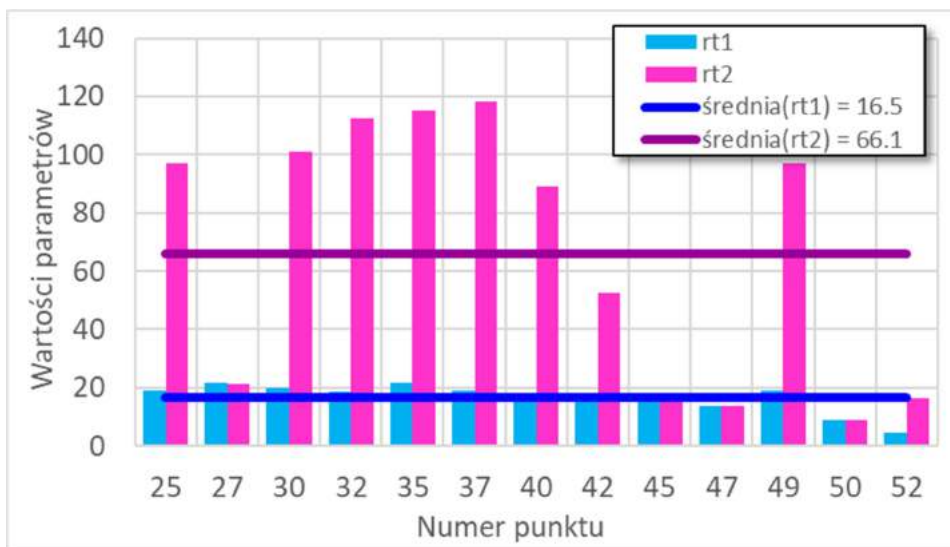
Rys.8.16. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 1, KWK Czczott.



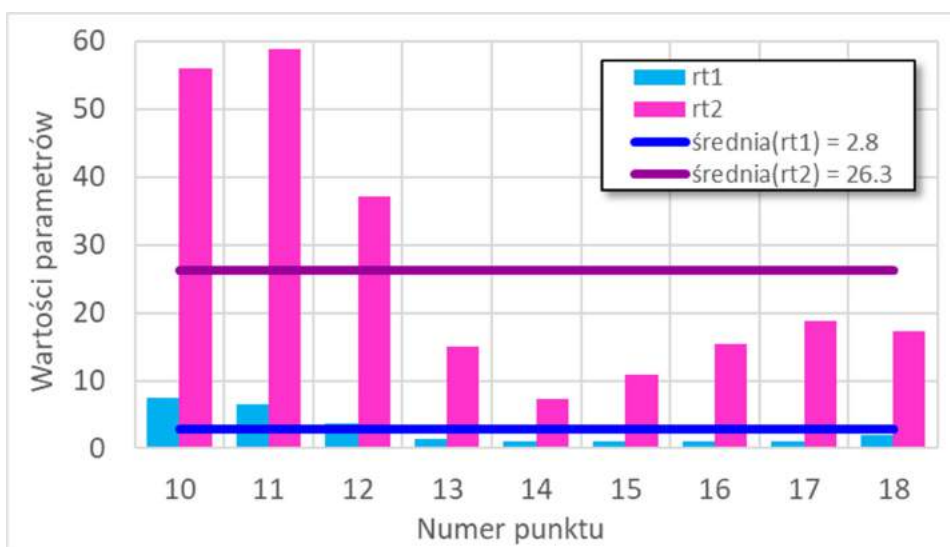
Rys.8.17. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 3, KWK Czczott.



Rys.8.18. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 1, KWK Staszic.



Rys.8.19. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia 1, KWK Siersza.



Rys.8.20. Zmienność parametrów dla modelu rozszerzonego. Linia Bławatkowa.

Tabela 8.2

Zestawienie wartości parametrów uzyskanych w procesie identyfikacji
dla modelu rozszerzonego wraz z miarami ich zmienności

Linia	Parametr r_{11}				Parametr r_{12}			
	Zmienność min – max	średnia s	odchyl. stand. s	$\frac{\sigma}{s} \cdot 100\%$	Zmienność min – max	średnia	odchyl. stand. s	$\frac{\sigma}{s} \cdot 100\%$
B-L Dębieńsko	1.50 – 24.50	11.17	7.12	63.7 %	7.75 – 105.00	29.74	32.55	109.4 %
2 Jan Kanty	8.60 – 13.80	10.89	1.70	15.6 %	14.80 – 79.00	30.45	21.19	69.6 %
4a Jan Kanty	7.50 – 13.00	11.07	2.23	20.1 %	11.00 – 42.00	26.61	13.34	50.1 %
5a Jan Kanty	9.20 – 12.20	10.51	0.89	8.5 %	9.10 – 25.17	12.15	4.97	40.9 %
1 Czczott	27.70 – 56.70	43.04	10.75	25.0 %	29.90 – 69.80	48.31	12.93	26.8 %
3 Czczott	25.20 – 33.10	29.54	3.02	10.2 %	33.90 – 118.6	63.07	35.12	55.7 %
1 Staszic	2.70 – 21.30	12.01	5.96	49.6 %	21.00 – 84.90	39.23	20.78	53.0 %
1 Siersza	4.50 – 21.90	16.47	4.99	30.3 %	8.90 – 118.2	66.05	44.85	67.9 %
Bławatkowa Jankowice	1.00 – 7.40	2.78	2.54	91.4 %	7.30 – 58.90	26.31	19.54	74.3 %

Parametr w_{12}

Z uwagę na specyfikę parametru w_{12} , analizę jego zmienności przeprowadzono odrębnie, wykorzystując jednakże te same miary zmienności jak w poprzednich przypadkach. Wyniki obliczeń zawarto w tabeli 8.3. Z uwagi na ograniczoną objętość niniejszej pracy nie zamieszczono wykresów zmienności tego parametru.

Analizując wyniki zawarte w tabeli 8.3 należy stwierdzić, że parametr w_{12} charakteryzuje się największą stabilnością spośród wszystkich parametrów tego modelu – obliczone wartości odchylenia standardowego oraz współczynnika σ/s jednoznacznie na to wskazują.

Można także stwierdzić, że uogólniona wartość średnia parametru w_{12} określona na podstawie wszystkich linii obserwacyjnych wynosi 0.74. Wskazuje to na fakt, iż w sensie parametrów modelu rozszerzonego, większy udział w procesie osiadania na analizowanych liniach miały wpływy "natychmiastowe" – około 75 %.

Podsumowując przedstawione analizy dotyczące parametrów modelu rozszerzonego należy stwierdzić, że w analizowanych przypadkach linii obserwacyjnych cechuje się on wystarczającą stabilnością wartości parametrów.

Tabela 8.3

Zestawienie wartości parametru w_{12} uzyskanych w procesie identyfikacji
dla modelu rozszerzonego wraz z miarami jego zmienności

Linia	Parametr w_{12}			
	Zmienność min – max	średnia s	odchyl. stand. s	$\frac{\sigma}{s} \cdot 100\%$
B-L Dębińsko	0.31 – 0.92	0.71	0.19	26.8 %
2 Jan Kanty	0.84 – 0.94	0.90	0.03	3.3 %
4a Jan Kanty	0.64 – 0.91	0.79	0.10	12.7 %
5a Jan Kanty	0.74 – 0.96	0.88	0.07	8.9 %
1 Czeczott	0.70 – 0.90	0.83	0.08	9.6 %
3 Czeczott	0.51 – 0.78	0.63	0.09	14.3 %
1 Staszic	0.53 – 0.80	0.63	0.09	14.3 %
1 Siersza	0.51 – 0.87	0.74	0.11	14.9 %
Bławatkowa Jankowice	0.53 – 0.74	0.66	0.08	12.1 %

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań w zakresie prognozowania nieustalonych obniżeń powierzchni terenu górniczego. Dokonany przegląd literatury, którego podsumowanie zamieszczono w rozdziale 2 pracy wskazuje na fakt, iż w Polsce najszersze zastosowanie znalazł model opracowany przez S. Knothego w latach 50 - tych XX wieku. Od momentu opublikowania tego rozwiązania, był on przedmiotem wielu modyfikacji mających na celu uzyskanie jak najlepszej jakości opisu deformacji w stanie nieustalonym.

Pomimo niewątpliwej użyteczności prognoz wykonywanych za pomocą modelu S. Knothego, wielu badaczy wskazywało na pewne jego niedostatki, wśród których najczęściej podnoszone to nieadekwatność opisu profilu niecki obniżeniowej w przypadku dużych prędkości postępu frontu, charakteryzującą się wypłaszczeniem jej profilu oraz generalnie gorszą jakością prognoz w przypadku eksploatacji prowadzonej z dużą, zmienną prędkością postępu frontu i przerwami w eksploatacji.

W ramach pracy podjęto próbę modyfikacji modelu S. Knothego polegającą na zmianie postaci funkcji wpływów w taki sposób, aby uwzględnić jej zmienność w czasie. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych w ramach pracy badań przedstawiają się następująco:

1. Rozwiązanie zaproponowane w niniejszej pracy zakłada, że wpływ czasu na wartości funkcji wpływów zostanie opisany za pomocą odpowiednio dobranej i sparametryzowanej funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, zintegrowanej z oryginalną funkcją wpływów teorii W. Budryka – S. Knothego. Do ostatecznego rozwiązania zastosowano funkcję Rayleigh'a. Dzięki takiemu podejściu unika się konieczności wykorzystania równania różniczkowego (2.5) opisującego prawo ograniczonego wzrostu, a stanowiącego podstawę rozwiązania w modelu S. Knothego.
2. W ramach pracy opracowano w pierwszym etapie wstępny model przedstawiony w rozdziale 6. Model ten nazwano „modelem bazowym”; w jego rozwiązaniu do opisu wpływu czasu zastosowano jednoparametrową funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa Rayleigh'a opisaną zależnością (6.3). W zaproponowanym modelu występuje parametr r_i charakteryzujący prędkość ujawniania się wpływów na powierzchni. Przeprowadzona weryfikacja jakości opisu przebiegu procesu osiadań

w czasie na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych z 9 linii obserwacyjnych wykazała porównywalną jakość tego rozwiązania z modelem S. Knothego – 64% analizowanych punktów obserwacyjnych wykazało lepszą jakość opisu za pomocą proponowanego rozwiązania, a w 36% przypadków lepsze wyniki uzyskano za pomocą modelu S. Knothego.

3. W rozdziale 7 zaproponowano drugie rozwiązanie nazwane "modelem rozszerzonym", które zbudowano w oparciu o założenie, że do opisu zmian funkcji wpływów w czasie należy zastosować dwuczłonową funkcję Rayleigh'a opisaną zależnością (7.2), gdzie człon pierwszy odpowiada za opis części wpływów ujawniających się w krótkim czasie (tzw. "wpływów natychmiastowych"), a drugi - tzw. "wpływów opóźnionych", występujących w dłuższym okresie, aż do zaniku ruchów na powierzchni. W funkcji tej występują 3 parametry: r_{11} , r_{12} charakteryzujące czas ujawniania się wpływów odpowiednio „natychmiastowych” i „opóźnionych” oraz parametr $w_{12} \in \langle 0, 1 \rangle$ charakteryzujący udział wpływów natychmiastowych w procesie osiadań nieustalonych.
4. Otrzymane wyniki weryfikacji modelu rozszerzonego przedstawione w rozdziale 7.2 wskazują na istotną poprawę jakości opisu osiadań w czasie w stosunku zarówno do modelu S. Knothego, jak i zaproponowanego w rozdziale 6 modelu bazowego. We wszystkich przypadkach analizowanych linii obserwacyjnych uzyskano lepszą jakość opisu osiadań nieustalonych.
5. Stabilność wartości parametrów opracowanych modeli określona dla przypadków analizowanych linii obserwacyjnych jest porównywalna ze stabilnością parametru c modelu S. Knothego. Szczegółowa analiza zmienności parametrów została zawarta w rozdziale 8.2 pracy.
6. Przedstawione w rozdziale 7.3 wyniki symulacji przebiegu osiadań w czasie w przypadku eksploatacji prowadzonej z kilkudniowymi przerwami pozwalają stwierdzić, że zaproponowany model rozszerzony pozwala opisać zjawisko anomalii związanych z przerwami w eksploatacji, powodującymi zaburzenia w przebiegu osiadania w czasie. Potwierdzają to także częściowo wyniki weryfikacji z linii "Bławatkowa", gdzie dla punktów 15 i 16 (rys. 7.16 b, c) uzyskano teoretyczne przebiegi osiadań w czasie wykazujące takie zaburzenia.

7. W ramach pracy opracowane zostało oprogramowanie o nazwie "Ray-Param", które pozwala na identyfikację wartości parametrów zaproponowanych w pracy modeli oraz modelu S. Knothego na podstawie uzyskanych z pomiarów geodezyjnych przebiegów obniżen w czasie punktów obserwacyjnych zlokalizowanych na powierzchni. Za pomocą tego programu można również wykonywać prognozy obniżen w czasie dla punktów zlokalizowanego na powierzchni terenu górniczego. Charakterystykę tego programu, a także innych opracowanych i wykorzystanych w pracy narzędzi informatycznych zawarto w rozdziale 11 pracy.
8. Na podstawie przedstawionych powyżej wniosków można stwierdzić, że teza pracy przedstawiona w rozdziale 4 została udowodniona – opracowany model prognozowania nieustalonych obniżen terenu górniczego pozwala na poprawę jakości opisu tego zjawiska w stosunku do najpopularniejszego w Polsce rozwiązania opracowanego przez S. Knothego.
9. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań mających na celu przede wszystkim określenie zmienności parametrów opracowanych modeli dla zróżnicowanych warunków geologiczno – górnicznych, co pozwoli na praktyczne wykorzystanie zaproponowanego rozwiązania do prognoz nieustalonych deformacji terenu górniczego.

10. LITERATURA WYKORZYSTANA W RAMACH PRACY

- Awierszyn S.G.: Gornyje udary. Wyd. Uglietiechizdat, Moskwa, 1947.
- Batkiewicz W.: Obliczanie wskaźników poeksploatacyjnych deformacji terenu, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1968.
- Białek J.: Opis nieustalanej fazy obniżenia terenu górniczego z uwzględnieniem asymetrii wpływów końcowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo, z. 194. Gliwice, 1991.
- Białek J.: Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice, 2003.
- Budryk W.: Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1 z.1, Kraków, 1953.
- Butra J., Mrozek K., Osadczyk T.: Rozkłady dobowe aktywności sejsmicznej górotworu w aspekcie technologicznych metod ograniczania zagrożenia tąpnięciami oraz bezpieczeństwa prowadzenia robót górniczych w oddziałach eksploatacyjnych kopalń KGHM "Polska Miedź" SA. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, 67-62, Kraków, 2002.
- Butra J., Mrozek K., Osadczyk T.: Aktualny stan zagrożenia tąpnięciami w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, s. Konferencje, t. 76, nr 42, 119-130. Wrocław, 2007.
- Chudek M.: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu. Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice, 2002.
- Chudek M.: Mechanika górotworu z podstawami zarządzania ochroną środowiska w obszarach górniczych i pogórnich. Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice, 2010.
- Chudek M., Stefański L.: Wpływ postępu frontu górniczego na szybkość deformacji terenu na powierzchni. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., seria Górnictwo, zeszyt 145, Gliwice, 1989.
- Drzęzła B.: Wzrost prędkości wybierania – ekonomiczna konieczność, ujemne strony i próba nowego opisu oddziaływania na powierzchnię. Konferencja: „Działalność górnictwa węgla kamiennego w warunkach gospodarki rynkowej i ograniczeń ekologicznych”, Gliwice, 1992.
- Dżęgniuk B., Niedojadło Z.: Zmienność parametrów teorii S. Knothego w trakcie eksploatacji kolejnych pokładów węgla. Polska Akademia Nauk – oddział w Krakowie. Prace Komisji Górniczo- Geodezyjnej. Geodezja 29, Kraków, 1981.
- Dżęgniuk B., Pielok J., Sroka A.: Vorausberechnung von Abbaubedingten dynamischen Deformationskennzifferen der Tagesoberfläche und des Gebirges, Das

- Markscheidewesen 87 nr 1, Essen, 1980.
- Dżegniuk B., Sroka A.: Prędkość i przyspieszenie procesu osiadania w aspekcie przerw w prowadzeniu eksploatacji. Prace Naukowe GIG. Seria Konferencje nr 41. Problemy Ochrony Terenów Górniczych, Katowice, 2002.
- Eichholtz K.: Untersuchung der Auswirkungen der Abbaugeschwindigkeit auf die Oberflaeche. Germany, Duesseldorf, 1995.
- Greń K.: Analog fotoelektryczny jako czasoprzestrzenny model rozchodzenia się wpływów nad eksploatacją górnictwem, Zeszyty Naukowe AGH Geodezja z. 24, Kraków, 1973.
- Gustkiewicz J. i inni: The influence of pauses in longwall working on Surface strains as measured by soil strain measurement devices. Archives of Mining Sciences, t. 48, z. 2, 2003.
- Hejmanowski R.: Modeling of time dependent subsidence for coal and ore deposits. International Journal of Coal Science and Technology 2, 287–292, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0092-z>
- Hejmanowski R.: Kinematyka deformacji górotworu i powierzchni terenu, wydawnictwo AGH, Kraków, 2013.
- Keinhorst H.: Bei Bodensenkungen auftretende Boden verschiebungenn und Bodenspannungen, Glückauf, 1928.
- Knothe St.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1 z.1, Kraków, 1953a.
- Knothe St.: Wpływ czasu na kształtowanie się niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1 z. 1, Kraków, 1953b.
- Knothe St.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górnictwem. Wyd. "Śląsk". Katowice, 1984.
- Kochmański T.: Obliczanie ruchów punktów górotworu pod wpływem eksploatacji górnictwem. PWN Warszawa, 1956.
- Kolmogoroff A.: Über die analitischen Methoden in der Wahrsheinichkeitsrechnung. Mathematische Annalen, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1931.
- Kowalczyk Z.: Określenie wpływów eksploatacji górnictwem metodą przekrojów pionowych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1972.
- Kowalski A.: Deformacje terenu powstałe w wyniku szybkiej eksploatacji górnictwem. Nowe doświadczenia. Materiały Konferencyjne: II Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Ustroń, 1993.
- Kowalski A.: Deformacje powierzchni nad szybko postępującym frontem eksploatacji na podstawie badań na kopalni Staszic. Konferencja naukowo-techniczna. Ochrona

- powierzchni i obiektów budowlanych przed uszkodzeniami górnictwem. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje, nr 3, Katowice, 1995.
- Kowalski A.: Nieustalone górnictwowe deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz, Katowice, GIG, 2007.
- Kratzsch H.: Mining Subsidence Engineering. Springer-Verlag, 1983.
- Kruczkowski M.: Model opisujący stany chwilowe deformacji z uwzględnieniem postępu frontu eksploatacyjnego. Ochrona środowiska w górnictwie podziemnym i odkrywkowym. II Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. Wydawnictwo Politechnika Śląska, Gliwice, 2007.
- Kruczkowski M.: Identyfikacja współczynnika prędkości osiadania c. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, Katowice, 2016.
- Kwiatkiewicz J.: O reologicznych aspektach zagrożenia obiektów budowlanych na terenach górnictwowych. Prace naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Nr 827. Katowice, 1998.
- Jarosław A., Karmis M., Sroka A.: Subsidence development with time – experiences from longwall operations in the Appalachian coalfield. Int. J. Min. Geol. Eng. 8, 1990.
- Litwiniszyn J.: Wpływ czasu na odkształcenia i naprężenia górotworu. W: Wpływ wyeksploatowania pokładu na stan naprężeń i odkształceń w górotworze. Arch. Gór. i Hut. t. 3 z. 4, 1955.
- Lubina T.: Wybrane zagadnienia wpływu czynnika czasu na deformacje górotworu. Praca doktorska. niepublikowana, Politechnika Śląska, Gliwice 1973.
- Mielimąka R.: Wpływ kolejności i kierunku eksploatacji prowadzonej frontami ścianowymi na deformacje terenu górnictwowego. Monografia, nr 217, Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2017.
- Mielimąka R., Orwat J.: Wpływ rozwoju eksploatacji w jednej z kopalń JSW na wartości parametrów teorii wpływów Budryka - Knothe, Przegląd Górniczy, vol. 72, nr 1, s.36-42, 2016.
- Niemczyk O.: Bergschadenkunde. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1949.
- Niemiec T., Radoła W.: Kwantowy model opóźniający i jego zastosowanie do opisywania osiadania w czasie punktu powierzchni terenu pod wpływem eksploatacji górnictwowej. Ochrona Terenów Górniczych nr 56, Katowice, 1981.
- Niemiec T.: Model dyskretny i stochastyczny oddziaływania eksploatacji górnictwowej, Wyd. GIG, Katowice, 2020.
- Perz F.: Der Einfluss der Zeit auf die Bodenbewegung Berg und Abbauen Mitt a.d. Markscheidewesen, 1948.
- Perzyło D., Ścigała R.: Wpływ lokalizacji punktu obserwacyjnego na wyznaczone wartości

- współczynnika prędkości osiadania. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, nr 1, str. 20-27, 2018.
- Pfläging K.: Zur Asymmetrie von Senkungsmulden und ihre dynamischen Zwischenformen bei relativ hohen Abbaugeschwindigkeiten. *Mitt. Markscheider* 81, 1974.
- Piwowski W.: Prognozowanie przemieszczeń pionowych powstałych w procesie rozwijającej się eksploatacji górniczej w oparciu o liniowy model matematyczny zjawiska, Praca doktorska AGH, Kraków, 1977.
- Piwowski W.: Opis przemieszczeń pionowych aktywnego procesu deformacji górotworu w warunkach eksploatacji górniczej, Z.N. AGH nr 1294 Geodezja 106, Kraków, 1989.
- Piwowski W., Dzegniuk B., Niedojadło Z.: Współczesne teorie ruchów górotworu. Wydawnictwo AGH, Kraków, 1995.
- Praca zbiorowa: Sdwiżenie gornych porod i ziemnoj powierzchni pri podziemnych rozrobtkach. Moskwa, Nedra, 1984.
- Sałustowicz A.: Wpływ czasu na wielkość poziomych przemieszczeń górotworu, *Archiwum Górnictwa*, t. II, z. 1-2, 1957.
- Schober F, Sroka A.: Die Berechnung von Bodenbewegungen über Kavernen unter Berücksichtigung des zeitlichen Konvergenz – und Gebirgsverhaltens, *Kali und Steinsalz* 8/10, 1983.
- Sikora P.: Opis obniżen górotworu pod wpływem podziemnej eksploatacji z wykorzystaniem teorii automatów komórkowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2011.
- Skinderowicz B.: Określenie współczynnika czasu dynamicznych niecek osiadania. *Przegląd Górniczy* nr 10, 1971.
- Skinderowicz B.: Wpływ czasu na kształtowanie się dynamicznych niecek osiadania. *Prace GIG*, Komunikat nr 666, Katowice, 1974.
- Sroka A.: Wpływ prędkości postępu frontu eksploatacji górniczej na wskaźniki deformacji górotworu. Praca doktorska, niepublikowana, AGH, Kraków, 1974.
- Sroka A.: Abschätzung einiger zeitlicher Prozesse im Gerbirge. *Schriftenreihe Lagerstättenerfassung und darstellung, Bodenbewegung und Bergschäden, Ingenieurvermessung*, Montanuniversität Leoben, 1984.
- Sroka A.: Przerwy w eksploatacji wyrobisk ścianowych z punktu widzenia szkód górniczych. materiały konferencji nauk.-tech. III Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, str. 257-368, Kraków, 1995.
- Sroka A.: Dynamika eksploatacji górniczej z punktu widzenia szkód górniczych. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 1999.

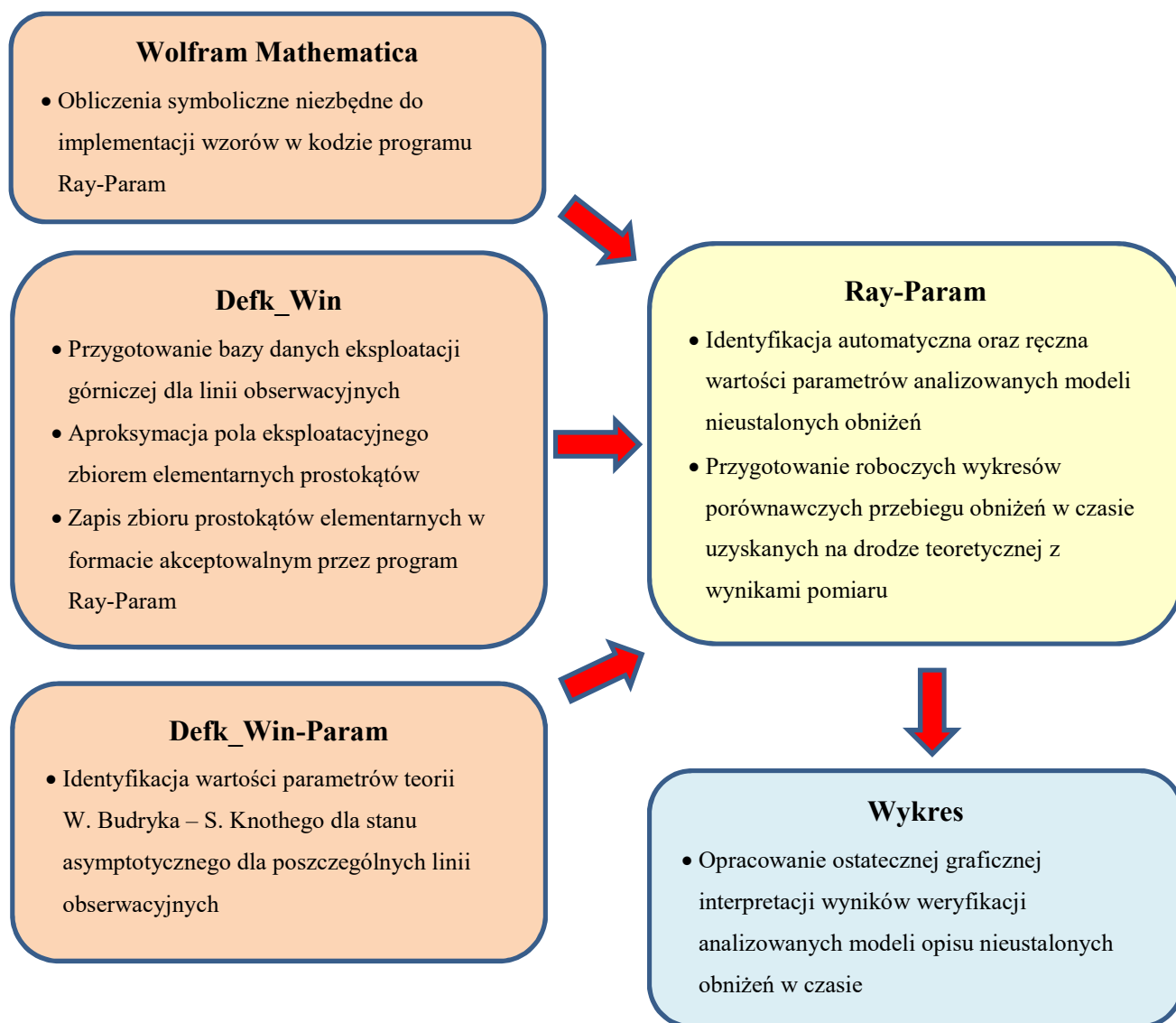
- Strzałkowski P.: Program do wyznaczania parametrów teorii statystyczno-całkowych prognozowania wpływów eksploatacji górniczej. *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 22, str. 29-33, 1988.
- Strzałkowski P.: Model nieustalonych przemieszczeń pionowych górotworu w obszarze objętym oddziaływaniem eksploatacji górniczej. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Górnictwo*, z. 237, Gliwice, 1998.
- Strzałkowski P.: Aktualne kierunki badań w zakresie prognoz chwilowych wartości deformacji ciągłych powierzchni. *Przegląd Górniczy* nr 9, 2002.
- Strzałkowski P.: *Zarys Ochrony Terenów Górniczych*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2015.
- Strzałkowski P., Piwowarski W., Ściagała R.: The influence of extraction speed on the value of the coefficient of subsidence rate. *Acta Montanistica Slovaca* Vol.24, iss. 4, 2019.
- Ściagała R.: *Przemieszczenia i odkształcenia poziome terenu górniczego w funkcji czasu*. Praca doktorska, niepublikowana, Gliwice, 1999.
- Ściagała R.: 2002 Prognozowanie nieustalonych obniżeń powierzchni terenu w przypadku szybko postępującego frontu eksploatacyjnego. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Górnictwo* z.254, Gliwice, 2002.
- Ściagała R.: Forecasting of transient surface subsidence in present underground mining conditions in Poland. *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series*. No 2, str.303-309, Ostrawa, 2007.
- Ściagała R.: Komputerowe wspomaganie prognozowania deformacji górotworu i powierzchni wywołanych podziemną eksploatacją górniczą. Wyd. Pol. Śl, Gliwice, 2008.
- Tajduś K., Sroka A., Misa R., Hager S., Rusek J., Dudek M., Wollnik F.: Analysis of Mining-Induced Delayed Surface Subsidence. *Minerals*, DOI: 10.3390/min1111187, 2021
- Trojanowski K.: Dynamiczne wartości deformacji powierzchni wywołane wpływem podziemnej eksploatacji górniczej, *Przegląd Górniczy* nr 11, 1964.
- Weisstein EW: "Rayleigh Distribution." *MathWorld - A Wolfram Web Resource*, 2014. <http://mathworld.wolfram.com/RayleighDistribution.html>
- Whittaker BN, Reddish DJ: *Subsidence - Occurrence, Prediction and Control, Developments in Geotechnical Engineering* No. 56, str. 358-376 Elsevier, New York, 1989.
- Wolfram Research, Inc.: *Mathematica*, Version 12.0, Champaign-Illinois, 2020.
- Wycisło K.: Wpływ czasu na przebieg procesu obniżeń górotworu spowodowanych eksploatacją górniczą. Praca doktorska. Kraków, 1964.
- Zych J.: *Teorie geometryczno-całkowe w świetle wyników obserwacji geodezyjnych*. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Górnictwo*, z.157, Gliwice, 1987.

11. DODATEK: CHARAKTERYSTYKA OPRACOWANEGO I WYKORZYSTANEGO W RAMACH PRACY OPROGRAMOWANIA

Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano oprogramowanie komputerowe autorstwa R. Ścigały o nazwie Defk_Win oraz Defk_Win - Param (Ścigała 2008), a także opracowano wspólnie z promotorem szereg programów narzędziowych niezbędnych do realizacji założonych celów. Z uwagi na różnorodność zadań realizowanych w pracy, do opracowania tych narzędzi wykorzystano:

- system obliczeniowy Wolfram Mathematica 12.0 (Wolfram 2020), za pomocą którego przeprowadzono analizy i obliczenia symboliczne związane z poszukiwaniem i późniejszą analizą funkcji PDF o cechach wymaganych w związku z przyjętymi założeniami, a następnie wszystkie niezbędne przekształcenia algebraiczne związane z implementacją przyjętej funkcji do funkcji wpływów teorii W. Budryka – S. Knothego.
- środowisko Embarcadero RAD Studio – Delphi. Za pomocą tego narzędzia opracowano główną aplikację o nazwie Ray-Param, która służyła do weryfikacji opracowanych modeli funkcji wpływów na bazie wyników pomiarów geodezyjnych.
- język Python z wykorzystaniem bibliotek: NumPy, Matplotlib, Scikit-learn, Pandas. Za pomocą tego narzędzia opracowano skrypt do przetwarzania wyników identyfikacji parametrów i tworzenia na tej podstawie diagramów zawierających wykresy porównawcze modelowanych i uzyskanych na drodze pomiaru przebiegów czasowych obniżen wraz z określeniem wybranych miar obrazujących jakość opracowanych modeli teoretycznych w kontekście ich zbieżności z wynikami pomiarów.

W poniższych rozdziałach przedstawiono podstawowe opisy opracowanych narzędzi wraz z najważniejszymi fragmentami kodu źródłowego dla poszczególnych rozwiązań. Na rysunku 11.1 przedstawiono schemat współdziałania i przepływu informacji pomiędzy wykorzystanymi w pracy aplikacjami. Należy zwrócić uwagę, że zbudowany system stanowi łańcuch przetwarzania danych, gdzie wyniki pracy danej aplikacji stanowią źródło danych dla następnej.



Rys.11.1. Schemat współdziałania i przepływu informacji pomiędzy wykorzystanymi w pracy aplikacjami

11.1. Narzędzia opracowane w środowisku Wolfram Mathematica

W ramach badań w niniejszej pracy wykorzystano oprogramowanie Wolfram Mathematica, dla którego opracowano szereg notatników obliczeniowych, które służyły do interaktywnych analiz związanych z opracowaniem końcowego modelu będącego właściwym rozwiązaniem zaproponowanym w pracy. Za tego narzędzia pomocą wykonano wszystkie obliczenia symboliczne dotyczące operacji całkowania, różniczkowania, określania granic analizowanych funkcji, badania ich zmienności itd.

Poniżej przedstawiono kody źródłowe opracowanych notatników dla modelu S. Knothego oraz dwóch opracowanych w ramach pracy modeli: „bazowego” i „rozszerzonego”.

11.1.1. Kod źródłowy notatnika dla modelu S. Knotheego

```
In[56]:= Assuming[{{t, te, r} > 0, τ ≥ 0, {wmax, x, a, b, r, rt} ∈ Reals, {r, rt} ≠ 0},
  wk1D = Integrate[gauss1D, {x, a, b}]]
```

$$\text{Out[56]} = \frac{1}{2} w_{\max} \left(-\text{Erf}\left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] + \text{Erf}\left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] \right)$$

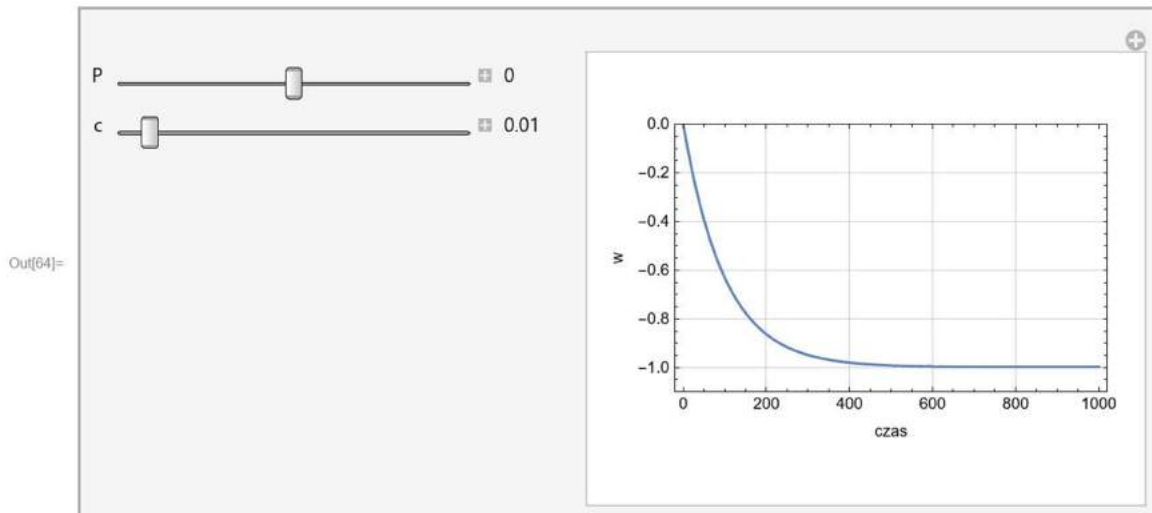
Obniżenia w(t) dla zagadnienia 1D

```
In[57]:= w1D = wk1D * ft
```

$$\text{Out[57]} = \frac{1}{2} (1 - e^{-\text{parC}(-te-\tau)}) w_{\max} \left(-\text{Erf}\left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] + \text{Erf}\left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] \right)$$

Wykres obniżeń w czasie 1D dla punktu o współrzędnej (p)

```
In[64]:= Manipulate[
  Plot[w1D /. {τ → T, te → 0, a → -250, b → 250, parC → c, p → P, r → 200, wmax → -1},
    {T, 0, 1000}, PlotRange → {-1.1, 0}, GridLines → Automatic,
    Frame → True, FrameLabel → {"czas", "w"}],
  {{P, 0}, -500, 500, Appearance → "Labeled"},
  {{c, 0.01}, 0.0001, 0.2, Appearance → "Labeled"},
  ControlPlacement → Left]
```



Rozwiązanie dla zagadnienia 2 D (prostokąt)

Funkcja wpływów Knotheego dla zagadnienia 2D

```
In[59]:= gauss2D = \frac{w_{\max}}{r^2} * Exp[-\pi \left( \frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{r^2} \right)]
```

$$\text{Out[59]} = \frac{e^{-\frac{\pi((x-p)^2 + (y-q)^2)}{r^2}} w_{\max}}{r^2}$$

Sprawdzenie czy całka 2D po całej domenie = 1 (wmax)

```
In[60]:= Assuming[{{wmax, x, y, r, rt} ∈ Reals, {r, rt} ≠ 0},
  Integrate[gauss2D, {y, -∞, ∞}, {x, -∞, ∞}]]
```

```
Out[60]:= ConditionalExpression[wmax, r ≠ 0]
```

Obniżenia w(t) dla zagadnienia 2D

In[61]= `Assuming[{ {x, y, a, b, c, d, r, rt} ∈ Reals, {r, rt} ≠ 0},
wk2D = Integrate[gauss2D, {y, c, d}, {x, a, b}]]`

Out[61]= `ConditionalExpression[
$$\frac{1}{4} w_{\max} \left(\operatorname{Erf} \left[\frac{(a-p) \sqrt{\pi}}{r} \right] - \operatorname{Erf} \left[\frac{(b-p) \sqrt{\pi}}{r} \right] \right) \left(\operatorname{Erf} \left[\frac{\sqrt{\pi} (c-q)}{r} \right] - \operatorname{Erf} \left[\frac{\sqrt{\pi} (d-q)}{r} \right] \right), r \neq 0]$$`

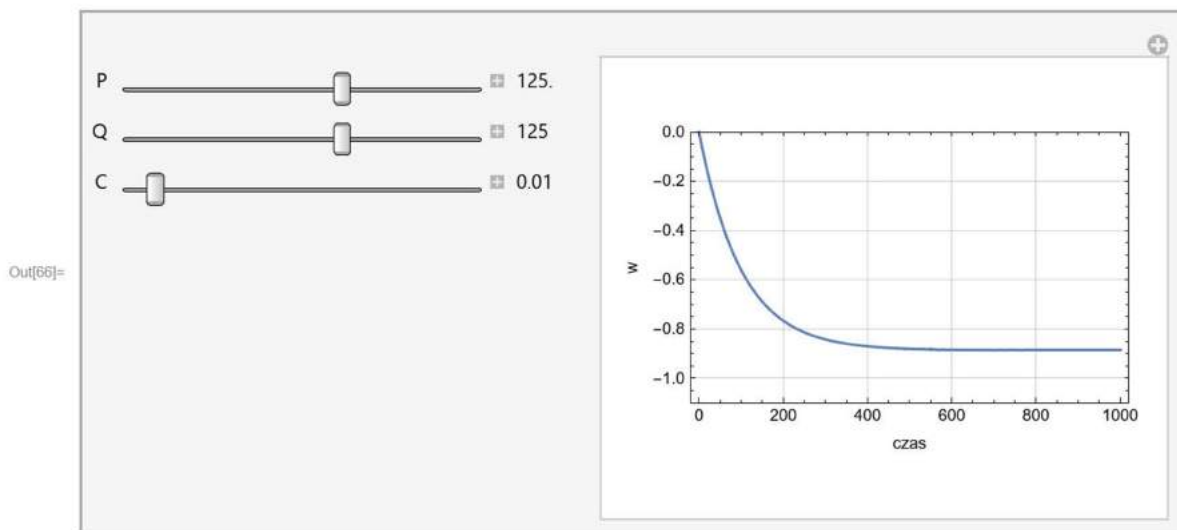
Obniżenia nieustalone dla zagadnienia 2D

In[62]= `w2D = ft * wk2D`

Out[62]= `ConditionalExpression[
$$\frac{1}{4} (1 - e^{-\operatorname{parC} (-te+\tau)}) w_{\max} \left(\operatorname{Erf} \left[\frac{(a-p) \sqrt{\pi}}{r} \right] - \operatorname{Erf} \left[\frac{(b-p) \sqrt{\pi}}{r} \right] \right) \left(\operatorname{Erf} \left[\frac{\sqrt{\pi} (c-q)}{r} \right] - \operatorname{Erf} \left[\frac{\sqrt{\pi} (d-q)}{r} \right] \right), r \neq 0]$$`

Wykres obniżeń w czasie 2D dla punktu o współrzędnej (p,q)

In[66]= `Manipulate[
Plot[w2D /. {τ → T, te → 0, a → -250, b → 250, c → -250, d → 250, parC → C, p → P, q → Q,
r → 200, wmax → -1}, {T, 0, 1000}, PlotRange → {-1.1, 0},
GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"czas", "w"},
{P, 0}, -500, 500, Appearance → "Labeled"},
{Q, 0}, -500, 500, Appearance → "Labeled"},
{C, 0.01}, 0.0001, 0.2, Appearance → "Labeled"},
ControlPlacement → Left]`



11.1.2. Kod źródłowy notatnika dla modelu bazowego

Model bazowy z funkcją PDF Rayleigha

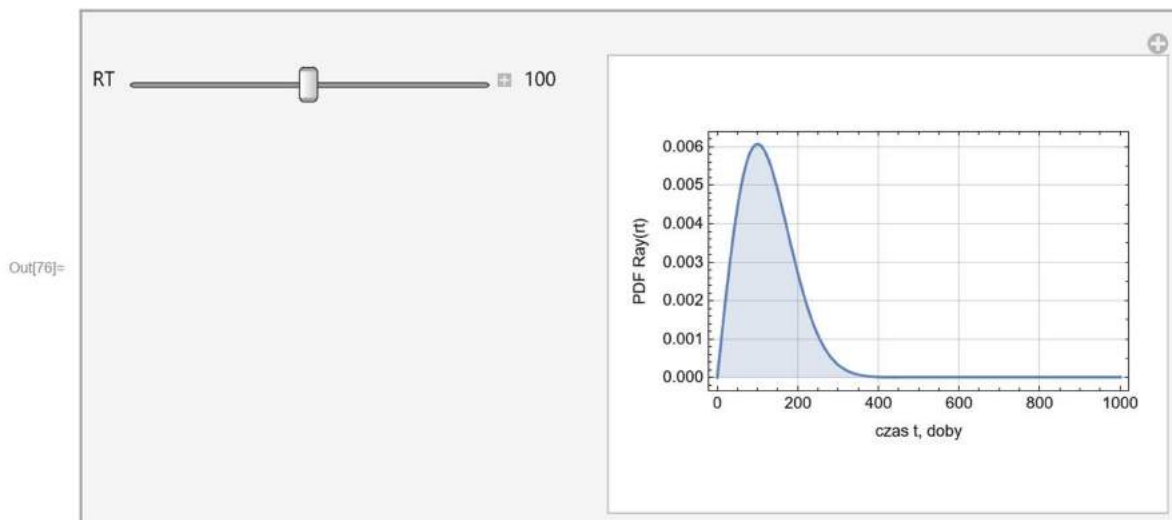
In[74]= `Remove["Global`*"];`

Funkcja Rayleigh'a

In[75]= `ray = $\frac{(\tau - te)}{rt^2} * \text{Exp}\left[-\frac{(\tau - te)^2}{2 rt^2}\right]$`

Out[75]=
$$\frac{e^{-\frac{(-te+\tau)^2}{2rt^2}} (-te+\tau)}{rt^2}$$

In[76]= `Manipulate[
 Plot[ray /. {te -> 0, rt -> RT}, {τ, 0, 1000}, PlotRange -> Full, GridLines -> Automatic,
 Frame -> True, Filling -> Axis, FrameLabel -> {"czas t, doby", "PDF Ray(rt)"},
 {{RT, 50}, 1, 200, Appearance -> "Labeled"},
 ControlPlacement -> Left]`



Sprawdzenie czy całka z PDF Rayleigh'a po całej domenie czasu = 1

In[77]= `Assuming[rt > 0, Integrate[ray /. te -> 0, {τ, 0, ∞}]]`

Out[77]= 1

Rozwiązanie dla zagadnienia 1D (nieskończony pasek)

Funkcja wpływów Knothego dla zagadnienia 1D

In[78]= `gauss1D = $\frac{wmax}{r} * \text{Exp}\left[-\frac{\pi (x - p)^2}{r^2}\right]$`

Out[78]=
$$\frac{e^{-\frac{\pi(-p+x)^2}{r^2}} wmax}{r}$$

Nowa funkcja wpływów dla zagadnienia 1D

In[79]= `newInfl1D = ray * gauss1D`

$$\text{Out[79]= } \frac{e^{-\frac{r(-p-x)^2}{r^2} - \frac{(-te+\tau)^2}{2r\tau^2}} w_{\max} (-te + \tau)}{r r\tau^2}$$

Sprawdzenie czy całka 1D po całej domenie = 1 (wmax)

In[80]= `Assuming[{{t, te, r} > 0, \tau \ge 0, {wmax, x, r, rt} \in Reals, {r, rt} \ne 0},
Integrate[newInfl1D, {\tau, te, \infty}, {x, -\infty, \infty}]`

Out[80]= `wmax`

Obniżenia w(t) dla zagadnienia 1D

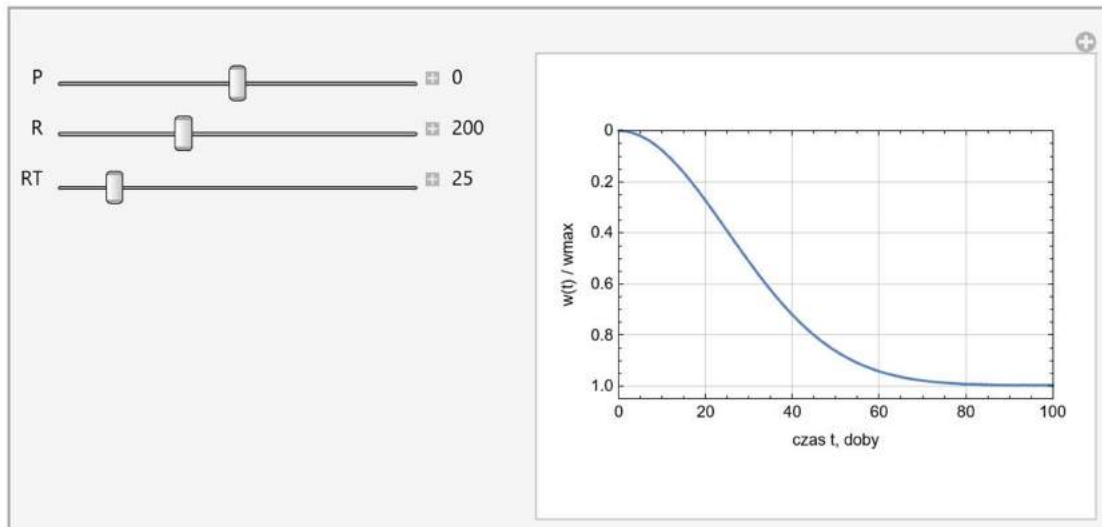
In[81]= `Assuming[{{t, te, r} > 0, \tau \ge 0, {wmax, x, a, b, r, rt} \in Reals, {r, rt} \ne 0},
w1D = Integrate[newInfl1D, {\tau, te, t}, {x, a, b}]`

$$\text{Out[81]= } \frac{1}{2} \left(-1 + e^{-\frac{(t-te)^2}{2r\tau^2}} \right) w_{\max} \left(\text{Erf} \left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r} \right] - \text{Erf} \left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r} \right] \right)$$

Wykres obniżeń w czasie 1D dla punktu o współrzędnej (p)

In[82]= `Manipulate[Plot[w1D /. {t \to T, te \to 0, a \to -250, b \to 250, rt \to RT, p \to P, r \to R, wmax \to 1},
{T, 0, 100}, PlotRange \to {0, 1.05}, GridLines \to Automatic,
Frame \to True, FrameLabel \to {"czas t, doby", "w(t) / wmax"},
PlotRangePadding \to None, ScalingFunctions \to {Identity, "Reverse"}],
{{P, 0}, -500, 500, Appearance \to "Labeled"},
{{R, 200}, 50, 500, Appearance \to "Labeled"},
{{RT, 25}, 1, 200, Appearance \to "Labeled"},
ControlPlacement \to Left]`

Out[82]=



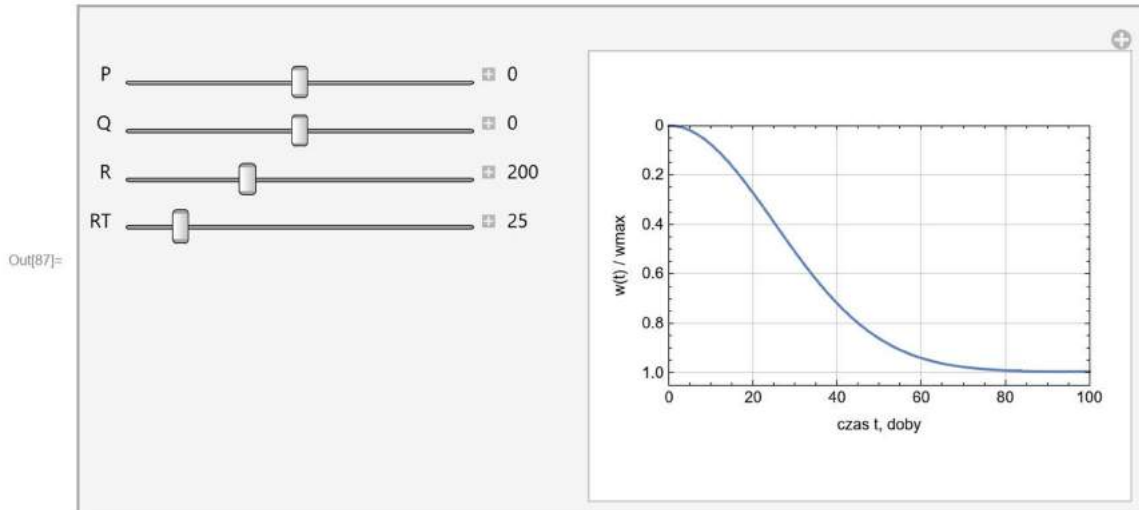
Rozwiązanie dla zagadnienia 2D (prostokąt)

Funkcja wpływów Knothego dla zagadnienia 2D

```

In[87]= Manipulate[Plot[w2D /. {t -> T, te -> 0, a -> -250, b -> 250, c -> -250, d -> 250,
    rt -> RT, p -> P, q -> Q, r -> R, wmax -> 1}, {T, 0, 100}, PlotRange -> {0, 1.05},
    GridLines -> Automatic, Frame -> True, FrameLabel -> {"czas t, doby", "w(t) / wmax"},
    PlotRangePadding -> None, ScalingFunctions -> {Identity, "Reverse"}],
  {{P, 0}, -500, 500, Appearance -> "Labeled"},
  {{Q, 0}, -500, 500, Appearance -> "Labeled"},
  {{R, 200}, 50, 500, Appearance -> "Labeled"},
  {{RT, 25}, 1, 200, Appearance -> "Labeled"},
  ControlPlacement -> Left]

```



Wykres obniżen w czasie dla wybranych wartosci rt

```

In[83]= gauss2D =  $\frac{wmax}{r^2} * \text{Exp}\left[-\pi \left(\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{r^2}\right)\right]$ 

```

```

Out[83]=  $\frac{e^{-\frac{\pi((-p+x)^2 + (-q+y)^2)}{r^2}} wmax}{r^2}$ 

```

Nowa funkcja wpływów dla zagadnienia 2D

```

In[84]= newInf12D = ray * gauss2D

```

```

Out[84]=  $\frac{e^{-\frac{\pi((-p+x)^2 + (-q+y)^2)}{r^2} - \frac{(-te+t)^2}{2rt^2}} wmax (-te + \tau)}{r^2 rt^2}$ 

```

Sprawdzenie czy całka 2D po całej domenie = 1 (wmax)

```

In[85]= Assuming[{{t, te, r} > 0, \tau \ge 0, {wmax, x, y, r, rt} \in Reals, {r, rt} \ne 0},
    Integrate[newInf12D, {\tau, te, \infty}, {y, -\infty, \infty}, {x, -\infty, \infty}]

```

```

Out[85]= wmax

```

Obniżenia w(t) dla zagadnienia 2D

```

In[86]= Assuming[{{t, te, r, rt} > 0, \tau \ge 0, {x, y, a, b, c, d, r, rt} \in Reals, {r, rt} \ne 0},
    w2D = Integrate[newInf12D, {\tau, te, t}, {y, c, d}, {x, a, b}]

```

```

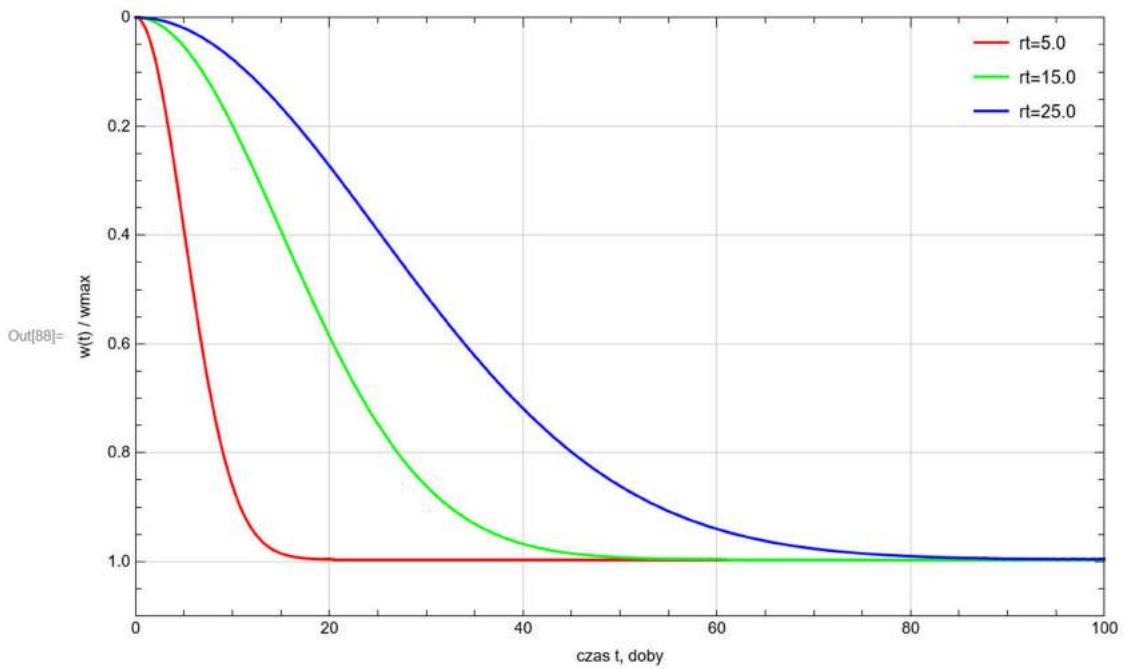
Out[86]=  $\frac{1}{4} \left(1 - e^{-\frac{(t-te)^2}{2rt^2}}\right) wmax \left( \text{Erf}\left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] - \text{Erf}\left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] \right) \left( \text{Erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}(c-q)}{r}\right] - \text{Erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}(d-q)}{r}\right] \right)$ 

```

Wykres obniżen w czasie 2D dla punktu o współrzędnej (p,q)

In[88]=

```
Plot[
  {w2D /. {t -> T, te -> 0, a -> -250, b -> 250,
    c -> -250, d -> 250, rt -> 5, p -> 0, q -> 0, r -> 200, wmax -> 1},
  w2D /. {t -> T, te -> 0, a -> -250, b -> 250, c -> -250, d -> 250,
    rt -> 15, p -> 0, q -> 0, r -> 200, wmax -> 1},
  w2D /. {t -> T, te -> 0, a -> -250, b -> 250, c -> -250, d -> 250,
    rt -> 25, p -> 0, q -> 0, r -> 200, wmax -> 1}
], {T, 0, 100}, PlotRange -> {0, 1.1}, GridLines -> Automatic, Frame -> True,
FrameLabel -> {"czas t, doby", "w(t) / wmax"},
PlotRangePadding -> None, ScalingFunctions -> {Identity, "Reverse"},
PlotStyle -> {Red, Green, Blue}, ImageSize -> Large,
PlotLegends -> Placed[LineLegend[{Red, Green, Blue}], LegendFunction -> "Frame",
{"rt=5.0", "rt=15.0", "rt=25.0"}], {{0.95, 0.995}, {0.75, 1}}]
```



11.1.3. Kod źródłowy notatnika dla modelu rozszerzonego

Model rozszerzony z funkcją Rayleigha 3-parametrową: w12, rt1, rt2)

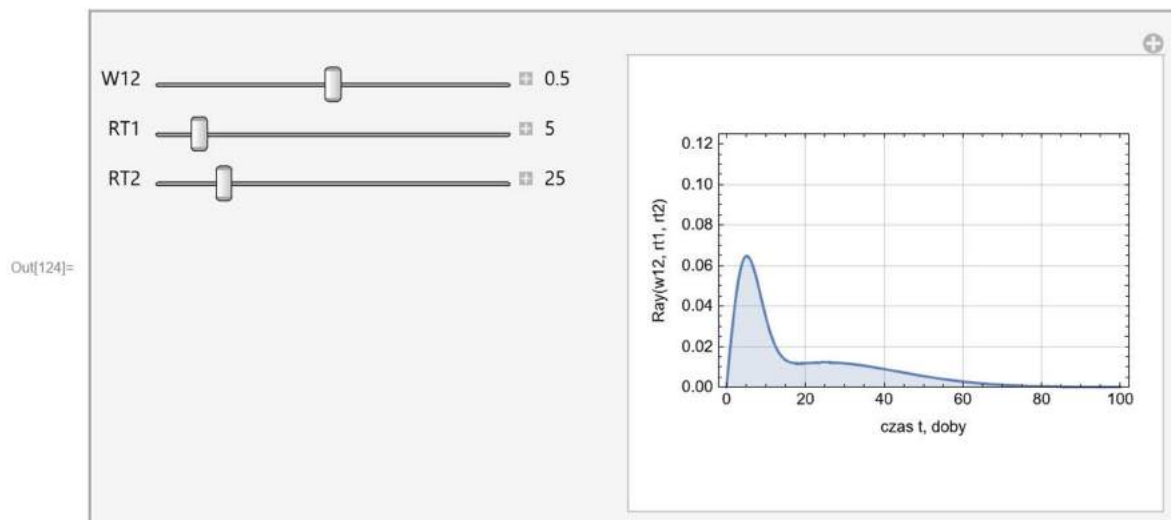
In[122]= `Remove["Global`*"];`

Rozszerzona funkcja Rayleigh'a

In[123]= `rayRozszerz = w12 $\frac{(\tau - te)}{rt1^2} * \text{Exp}\left[\frac{-(\tau - te)^2}{2 rt1^2}\right] + (1 - w12) \left(\frac{(\tau - te)}{rt2^2} * \text{Exp}\left[\frac{-(\tau - te)^2}{2 rt2^2}\right]\right)$`

Out[123]=
$$\frac{e^{-\frac{(-te+\tau)^2}{2 rt2^2}} (1 - w12) (-te + \tau)}{rt2^2} + \frac{e^{-\frac{(-te+\tau)^2}{2 rt1^2}} w12 (-te + \tau)}{rt1^2}$$

In[124]= `Manipulate[Plot[rayRozszerz /. {w12 -> W12, rt1 -> RT1, rt2 -> RT2, te -> 0}, {τ, 0, 100}, PlotRange -> {0, 0.125}, GridLines -> Automatic, Frame -> True, Filling -> Axis, FrameLabel -> {"czas t, doby", "Ray(w12, rt1, rt2)"}, {{W12, 0.5}, 0, 1, Appearance -> "Labeled"}, {{RT1, 5}, 1, 50, Appearance -> "Labeled"}, {{RT2, 25}, 1, 150, Appearance -> "Labeled"}, ControlPlacement -> Left]`



Sprawdzenie czy całka z PDF Rayleigh'a po całej domenie czasu = 1

In[125]= `Assuming[{w12, rt1, rt2} > 0, Integrate[rayRozszerz /. te -> 0, {τ, 0, ∞}]]`

Out[125]= 1

Rozwiązanie dla zagadnienia 1D (nieskończony pasek)

Funkcja wpływów Knothe'go dla zagadnienia 1D

In[126]= `gauss1D = $\frac{wmax}{r} * \text{Exp}\left[\frac{-\pi (x - p)^2}{r^2}\right]$`

Out[126]=
$$\frac{e^{-\frac{\pi (-p+x)^2}{r^2}} wmax}{r}$$

Nowa funkcja wpływów dla zagadnienia 1D

In[127]= newInf11D = rayRozszerz * gauss1D

$$e^{-\frac{r(-p+x)^2}{r^2}} w_{\max} \left(\frac{e^{-\frac{(t-t_e-r)^2}{2rt^2}} (1-w_{12}) (-t_e+r)}{rt^2} + \frac{e^{-\frac{(t-t_e+r)^2}{2rt^2}} w_{12} (-t_e-r)}{rt^2} \right)$$

Out[127]=
$$\frac{\text{[expression]}}{r}$$

Sprawdzenie czy całka 1D po całej domenie = 1 (wmax)

In[128]= Assuming[{{t, te, r, w12, rt1, rt2} > 0, τ ≥ 0, {x, r, rt1, rt2} ∈ Reals, {r, rt1, rt2} ≠ 0}, Integrate[newInf11D, {τ, te, ∞}, {x, -∞, ∞}]]

Out[128]= wmax

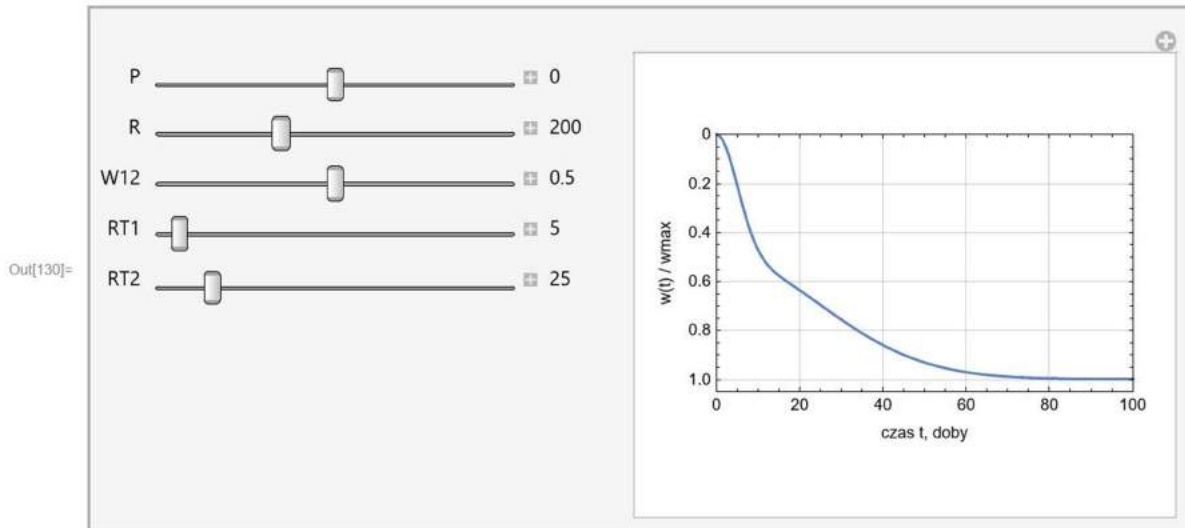
Obniżenia w(t) dla zagadnienia 1D

In[129]= Assuming[{{t, te, r, w12, rt1, rt2} > 0, τ ≥ 0, {x, a, b, r, rt1, rt2} ∈ ℝ, {r, rt1, rt2} ≠ 0}, w1D = Integrate[newInf11D, {τ, te, t}, {x, a, b}]]

Out[129]=
$$\frac{1}{2} \left(1 + e^{-\frac{(t-t_e)^2}{2rt^2}} (-1 + w_{12}) - e^{-\frac{(t-t_e)^2}{2rt^2}} w_{12} \right) w_{\max} \left(-\text{Erf}\left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] + \text{Erf}\left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] \right)$$

Wykres obniżeń w czasie 1D dla punktu o współrzędnej (p)

In[130]= Manipulate[Plot[w1D /. {t → T, te → 0, a → -250, b → 250, w12 → W12, rt1 → RT1, rt2 → RT2, p → P, r → R, wmax → 1}, {T, 0, 100}, PlotRange → {0, 1.05}, GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"czas t, doby", "w(t) / wmax"}, PlotRangePadding → None, ScalingFunctions → {Identity, "Reverse"}], {{P, 0}, -500, 500, Appearance → "Labeled"}, {{R, 200}, 50, 500, Appearance → "Labeled"}, {{W12, 0.5}, 0, 1, Appearance → "Labeled"}, {{RT1, 5}, 1, 200, Appearance → "Labeled"}, {{RT2, 25}, 1, 200, Appearance → "Labeled"}, ControlPlacement → Left]



Rozwiązanie dla zagadnienia 2D (prostokąt)

Funkcja wpływów Knothego dla zagadnienia 2D

In[131]= $\text{gauss2D} = \frac{w_{\max}}{r^2} * \text{Exp}\left[-\pi \left(\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{r^2}\right)\right]$

Out[131]= $\frac{e^{-\frac{\pi((-p+x)^2+(-q+y)^2)}{r^2}} w_{\max}}{r^2}$

Nowa funkcja wpływów dla zagadnienia 2D

In[132]= $\text{newInfl12D} = \text{rayRozszerz} * \text{gauss2D}$

Out[132]= $\frac{e^{-\frac{\pi((-p+x)^2+(-q+y)^2)}{r^2}} w_{\max} \left(\frac{e^{-\frac{(t-te)^2}{2rt_2^2}} (1-w_{12}) (-te+\tau)}{rt_2^2} + \frac{e^{-\frac{(t-te)^2}{2rt_1^2}} w_{12} (-te+\tau)}{rt_1^2} \right)}{r^2}$

Sprawdzenie czy całka 2D po całej domenie = 1 (wmax)

In[133]= $\text{Assuming}[\{ \{t, te, r, w_{12}, rt_1, rt_2\} > 0, \tau \geq 0, \{x, y, r, rt_1, rt_2\} \in \text{Reals}, \{r, rt_1, rt_2\} \neq 0\}, \text{Integrate}[\text{newInfl12D}, \{\tau, te, \infty\}, \{y, -\infty, \infty\}, \{x, -\infty, \infty\}]]$

Out[133]= w_{\max}

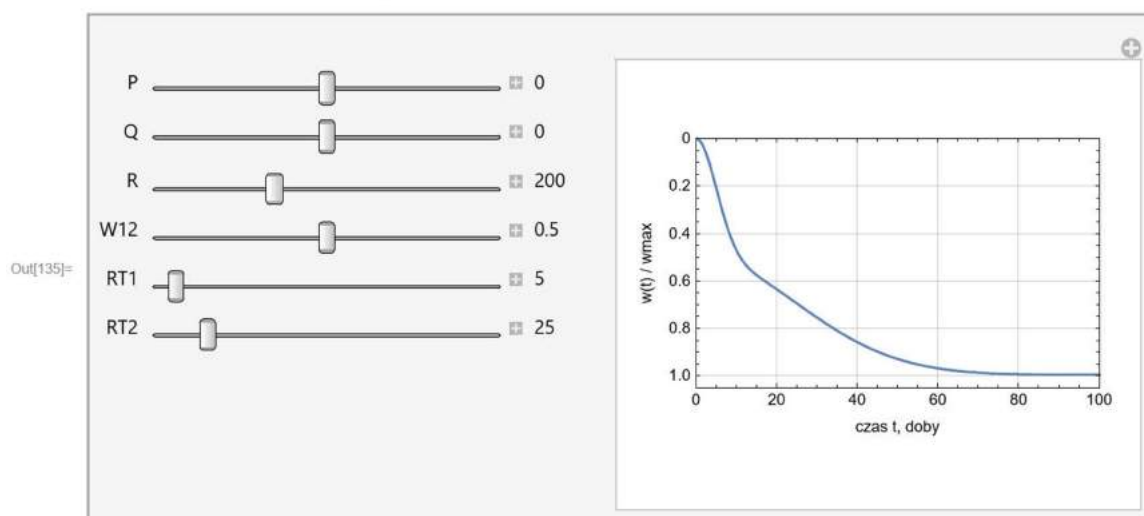
Obniżenia w(t) dla zagadnienia 2D

In[134]= $\text{Assuming}[\{ \{t, te, r, w_{12}, rt_1, rt_2\} > 0, \tau \geq 0, \{x, y, a, b, c, d, r, rt_1, rt_2\} \in \text{Reals}, \{r, rt_1, rt_2\} \neq 0\}, w_{2D} = \text{Integrate}[\text{newInfl12D}, \{\tau, te, t\}, \{y, c, d\}, \{x, a, b\}]]$

Out[134]= $\frac{1}{4} \left(1 + e^{-\frac{(t-te)^2}{2rt_2^2}} (-1 + w_{12}) - e^{-\frac{(t-te)^2}{2rt_1^2}} w_{12} \right) w_{\max} \left(-\text{Erf}\left[\frac{(a-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] + \text{Erf}\left[\frac{(b-p)\sqrt{\pi}}{r}\right] \right) \left(-\text{Erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}(c-q)}{r}\right] + \text{Erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}(d-q)}{r}\right] \right)$

Wykres obniżeń w czasie 2D dla punktu o współrzędnej (p,q)

In[135]= $\text{Manipulate}[\text{Plot}[w_{2D} /. \{t \rightarrow T, te \rightarrow 0, a \rightarrow -250, b \rightarrow 250, c \rightarrow -250, d \rightarrow 250, w_{12} \rightarrow W_{12}, rt_1 \rightarrow RT_1, rt_2 \rightarrow RT_2, p \rightarrow P, q \rightarrow Q, r \rightarrow R, w_{\max} \rightarrow 1\}, \{T, 0, 100\}, \text{PlotRange} \rightarrow \{0, 1.05\}, \text{GridLines} \rightarrow \text{Automatic}, \text{Frame} \rightarrow \text{True}, \text{FrameLabel} \rightarrow \{\text{"czas t, doby"}, \text{"w(t) / wmax"}\}, \text{PlotRangePadding} \rightarrow \text{None}, \text{ScalingFunctions} \rightarrow \{\text{Identity}, \text{"Reverse"}\}, \{\{P, 0\}, -500, 500, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \{\{Q, 0\}, -500, 500, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \{\{R, 200\}, 50, 500, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \{\{W_{12}, 0.5\}, 0, 1, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \{\{RT_1, 5\}, 1, 200, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \{\{RT_2, 25\}, 1, 200, \text{Appearance} \rightarrow \text{"Labeled"}\}, \text{ControlPlacement} \rightarrow \text{Left}]]$



11.2. Program Ray -Param

Program został opracowany w środowisku Embarcadero Rad Studio z wykorzystaniem języka programowania Delphi, przy przyjęciu następujących założeń:

- a) jako dane wejściowe dotyczące frontu eksploatacyjnego w czasie, wykorzystuje się zbiór elementarnych prostokątów o szerokości 1 m, aproksymujących oryginalny kształt pola eksploatacyjnego z uwzględnieniem rozwoju tego frontu w czasie i przestrzeni. Przy tak zdefiniowanej szerokości prostokąta elementarnego można założyć, że dane pole elementarne zostało wybrane natychmiastowo ($t \rightarrow 0$).
- b) jako dane wejściowe opisujące uzyskany na podstawie pomiaru przebieg osiadania wybranego punktu na powierzchni w czasie wykorzystuje się zbiór tekstowy w postaci przedstawionej w tabeli 11.1.

Tabela 11.1

Przykładowa zawartość zbioru danych na potrzeby identyfikacji parametrów analizowanych modeli

9 – Liczba pomiarów					
Nr pkt	Wsp. X	Wsp. Y	Wsp. Z	Data pomiaru	Obniżenie stwierdzone pomiarem, mm
25	21	67	0	11-04-1983	-430.0
25	21	67	0	10-05-1983	-680.0
25	21	67	0	23-05-1983	-716.5
25	21	67	0	09-06-1983	-730.0
25	21	67	0	20-06-1983	-738.5
25	21	67	0	15-07-1983	-742.5
25	21	67	0	01-08-1983	-739.0
25	21	67	0	15-08-1983	-739.5
25	21	67	0	19-09-1983	-760.0

Aby nie komplikować kodu programu, przyjęto że powyżej przedstawione założenie

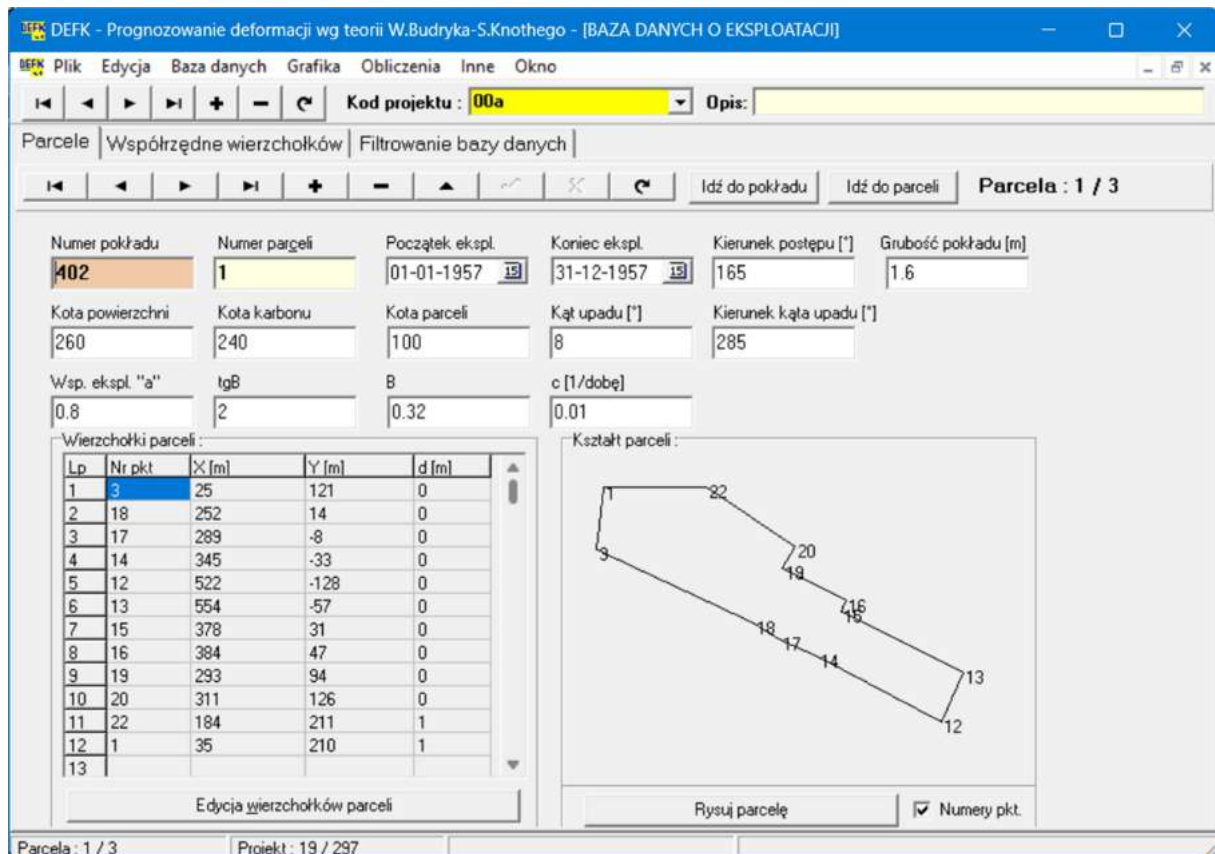
a) zostanie zrealizowane za pomocą istniejącego oprogramowania autorstwa R. Ścigały o nazwie DEFK_Win (Ścigała, 2008). Oprogramowanie to zawiera rozbudowany moduł obsługi bazy danych oraz aproksymacji dowolnego kształtu parceli eksploatacyjnej za pomocą zbioru elementarnych prostokątów o dowolnej szerokości. Główne okno tej aplikacji przedstawiono na rys.11.2.

Aby zrealizować założony cel, do kodu tego programu została dołączona funkcja generująca zbiór elementarnych prostokątów na podstawie zawartej w bazie danych informacji o parceli/parcelach eksploatacyjnych, ich geometrii, głębokości, warunkach zalegania itd. Wygenerowany zbiór jest zapisywany na dysku w postaci, którą bezpośrednio wykorzystuje program Ray-Param. Przykładowy fragment takiego zbioru przedstawiono w tabeli 11.2.

Wiersz pierwszy zbioru zawiera informacje o danej parceli eksploatacyjnej jako całości: nr parceli, nr pokładu, liczba wierzchołków, współrzędne wierzchołków

Od wiersza nr 2 rozpoczyna się sekcja opisująca elementarne prostokąty wygenerowane na podstawie kształtu parceli oraz danych o czasie eksploatacji. W każdym wierszu zawarte są następujące informacje: nr pokładu, nr parceli, czas eksploatacji danego prostokąta przedstawiony jako liczba zmiennoprzecinkowa, czas eksploatacji jako data, współrzędne (x, y) lewego dolnego narożnika danego prostokąta, szerokość i wysokość prostokąta, rzędna powierzchni, rzędna parceli w miejscu lokalizacji prostokąta, miąższość wybieranej warstwy pokładu, parametry teorii: a , $tg\beta$, c .

Powyższa sekcja powtarza się dla kolejnych ewentualnych parcel zawartych w bazie danych.



Rys.11.2. Okno główne aplikacji DEFK-Win

Tabela 11.2

Przykładowa zawartość zbioru danych opisującego czasoprzestrzenny rozwój eksploatacji za pomocą zbioru elementarnych prostokątów

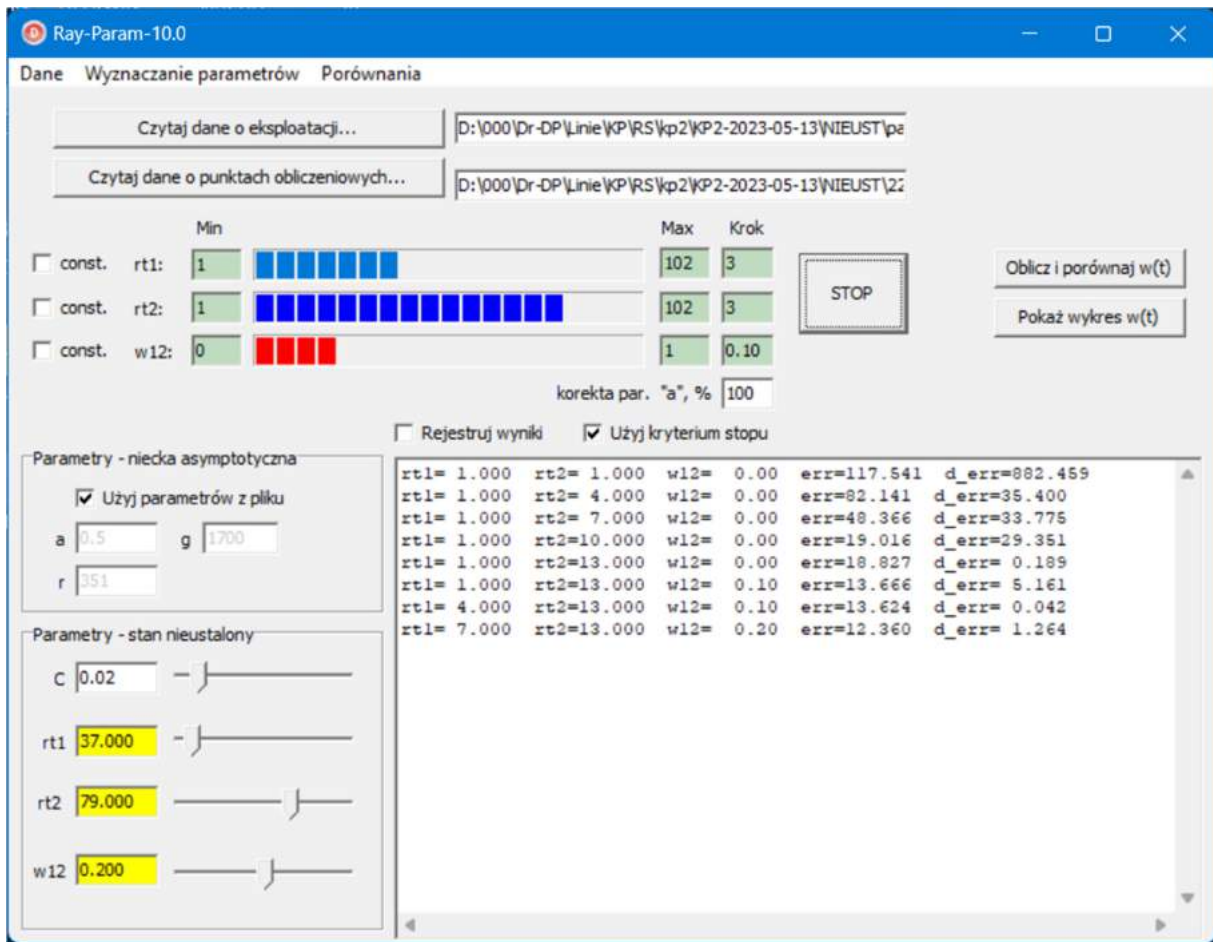
----	1	1	4	30	0	100	0	100	125	-24	125								
1	1	30348.702	(01-02-1983)	0.34116360586473	107.842592592593	1	1.15740740740742	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30349.405	(02-02-1983)	1.34116360586473	105.527777777778	1	3.47222222222224	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30350.107	(03-02-1983)	2.34116360586473	103.212962962963	1	5.78703703703705	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30350.810	(03-02-1983)	3.34116360586473	100.898148148148	1	8.10185185185186	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30351.512	(04-02-1983)	4.34116360586473	98.5833333333333	1	10.4166666666667	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30352.214	(05-02-1983)	5.34116360586473	96.2685185185185	1	12.7314814814815	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30352.917	(05-02-1983)	6.34116360586473	93.9537037037037	1	15.0462962962963	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30353.619	(06-02-1983)	7.34116360586473	91.6388888888889	1	17.3611111111111	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30354.322	(07-02-1983)	8.34116360586473	89.3240740740741	1	19.6759259259259	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
1	1	30355.024	(08-02-1983)	9.34116360586473	87.0092592592593	1	21.9907407407407	0	-130	2.5	0.692	1.8	0.01						
....																			

Interfejs programu

Aplikacja składa się z okna głównego – rys.11.3 oraz okna wykresu – rys.11.4.

Okno główne zawiera wszystkie niezbędne z obliczeniowego punktu widzenia elementy. Najważniejsze z nich to: przyciski czytania danych z plików dyskowych, pola ustawień zakresu poszukiwania optymalnych wartości parametrów z odpowiednimi paskami postępu obliczeń, interaktywnych pól pozwalających na zmianę wartości parametrów „ręcznie” – za pomocą suwaków, z podglądem krzywych czasowych dla aktualnych wartości parametrów, okno tekstowe z bieżącymi wartościami parametrów i miarą jakości aproksymacji.

Okno wykresu zawiera w centralnej części przebiegi osiadania w czasie wg modelu S. Knothego (linia czarna przerywana) oraz wg opracowanych rozwiązań (linia czerwona) a także wartości obniżeń stwierdzone pomiarem – zielone romby. Prawą część okna zajmuje panel sterujący pozwalający na manipulację elementami wykresu.



Rys.11.3. Okno główne aplikacji Ray-Param



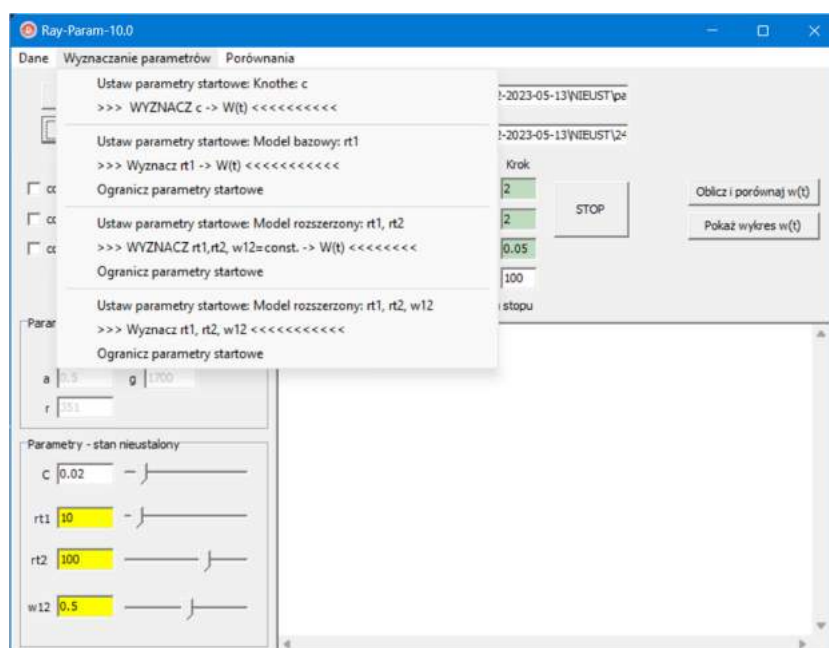
Rys.11.4. Okno wykresu obniżen w czasie w aplikacji Ray-Param

Algorytm obliczeń

Identyfikacja parametrów dla poszczególnych modeli może być przeprowadzona w sposób automatyczny oraz ręczny.

Sposób automatyczny oparty jest na algorytmie iteracyjnym – użytkownik określa przedziały zmienności wartości poszczególnych parametrów oraz kroki iteracji, po czym uruchamia proces obliczeń – rys. 11.5. Program iteruje całą przestrzeń zmienności parametrów wykonując odpowiednie obliczenia przebiegu osiadania w czasie dla danego modelu, przy czym na bieżąco analizuje błąd kwadratowy, przyjmując jako kryterium optymalizacyjne warunek minimalnej wartości tego błędu. Bieżące wartości parametrów wraz z wielkością błędu kwadratowego (na rys.11.3 jest to wartość opatrzona etykietą „err”) są drukowane w oknie tekstowym dla iteracji, w których uzyskano poprawę jakości opisu.

Sposób ręczny (rys.11.6) oparty jest na interakcji pomiędzy manipulatorami (suwakami) pozwalającymi na zmianę wartości parametrów a wykresem $w(t)$ obrazującym natychmiastowo przebiegi czasowe wraz z podaniem miar jakości dopasowania. Ten sposób pozwala analizować trudniejsze przypadki, kiedy sposób oparty na kryterium minimum błędu kwadratowego ma np. słabą zbieżność lub daje niewiarygodne z praktycznego punktu widzenia przebiegi. Jest to narzędzie znakomicie wspomagające sposób automatyczny, który można przyjąć jako etap wstępny, a następnie można poszukiwać ręcznie bardziej odpowiednich z praktycznego punktu widzenia rozwiązań.



Rys.11.5. Menu główne służące do uruchamiania procedur automatycznej identyfikacji wartości parametrów dla poszczególnych modeli



Rys.11.6. Okna aplikacji w trakcie procedury ręcznej identyfikacji wartości parametrów

Sposób określania błędów dopasowania przebiegów obniżenia w czasie według analizowanych modeli z przebiegami uzyskanymi na podstawie pomiarów

Dla oceny jakości opisu przebiegu obniżenia w czasie, w oprogramowaniu wykorzystano trzy miary błędów dopasowania:

- błąd średni - M_s ,
- błąd kwadratowy - M_k ,
- błąd procentowy - M_p

Odpowiednie zależności przedstawiono poniżej.

$$M_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |w(x_i) - w'(x_i)| \quad (11.1)$$

$$M_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w(x_i) - w'(x_i))^2}{n}} \quad (11.2)$$

$$M_p = \frac{M_k}{|w(x_i)_{max}|} \cdot 100\% \quad (11.3)$$

gdzie:

n – liczba analizowanych cykli pomiarowych,

$w(x_i)$ – obniżenie punktu określone w i -tym cyklu pomiarowym,

$w'(x_i)$ – obniżenie punktu określone dla momentu wykonania i -tego pomiaru, określone na drodze teoretycznej z wykorzystaniem danego modelu,

$w(x_i)_{max}$ – maksymalna wartość obniżenia danego punktu pomiarowego określona z wszystkich analizowanych w tym punkcie cykli pomiarowych.

Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń są drukowane w postaci tabeli w oknie głównym oraz graficznie na wykresie. Poniższa tabela 11.3 przedstawia przykładowe wyniki. Nagłówek zawiera informacje o plikach danych oraz wyznaczonych wartościach parametrów. Główna część zawiera tabelę, w której kolejne wiersze opisują wartości obniżenia $w(t)$ uzyskane z pomiaru (kolumna „Pom”), uzyskane za pomocą jednego z opracowanych modeli („Re”) oraz uzyskane za pomocą modelu S. Knothego („Kn”). Pod tabelą drukowane są miary jakości aproksymacji określone za pomocą zależności (11.1) – (11.3).

Tabela 11.3

Przykładowe wyniki identyfikacji parametrów uzyskane za pomocą program Ray-Param

Eksp1: paski-KP2-RS.txt Punkt: 24.txt rt1=3.90 rt2=28.50 w12=0.83 c=0.047							
Pkt	X	Y	Z	data	Pom	Re2	Kn
24	199.3	59.0	0.0	16-01-1969	-5.000	-8.417	-4.423
24	199.3	59.0	0.0	05-02-1969	-42.000	-146.671	-81.376
24	199.3	59.0	0.0	05-03-1969	-816.000	-916.096	-639.279
24	199.3	59.0	0.0	02-04-1969	-1226.000	-1205.777	-1092.437
24	199.3	59.0	0.0	07-05-1969	-1265.000	-1269.453	-1241.408
24	199.3	59.0	0.0	11-06-1969	-1277.000	-1276.826	-1270.187
24	199.3	59.0	0.0	09-07-1969	-1280.000	-1277.064	-1275.224
24	199.3	59.0	0.0	06-08-1969	-1262.000	-1277.070	-1276.575
24	199.3	59.0	0.0	10-09-1969	-1282.000	-1277.070	-1276.975
24	199.3	59.0	0.0	16-12-1969	-1290.000	-1277.070	-1277.069
24	199.3	59.0	0.0	10-04-1970	-1305.000	-1277.070	-1277.070

MsKn =	30.46	MkKn =	59.15	M%Kn =	4.53		
MsRe =	20.47	MkRe =	38.87	M%Re =	2.98		

11.3. Skrypt Wykres

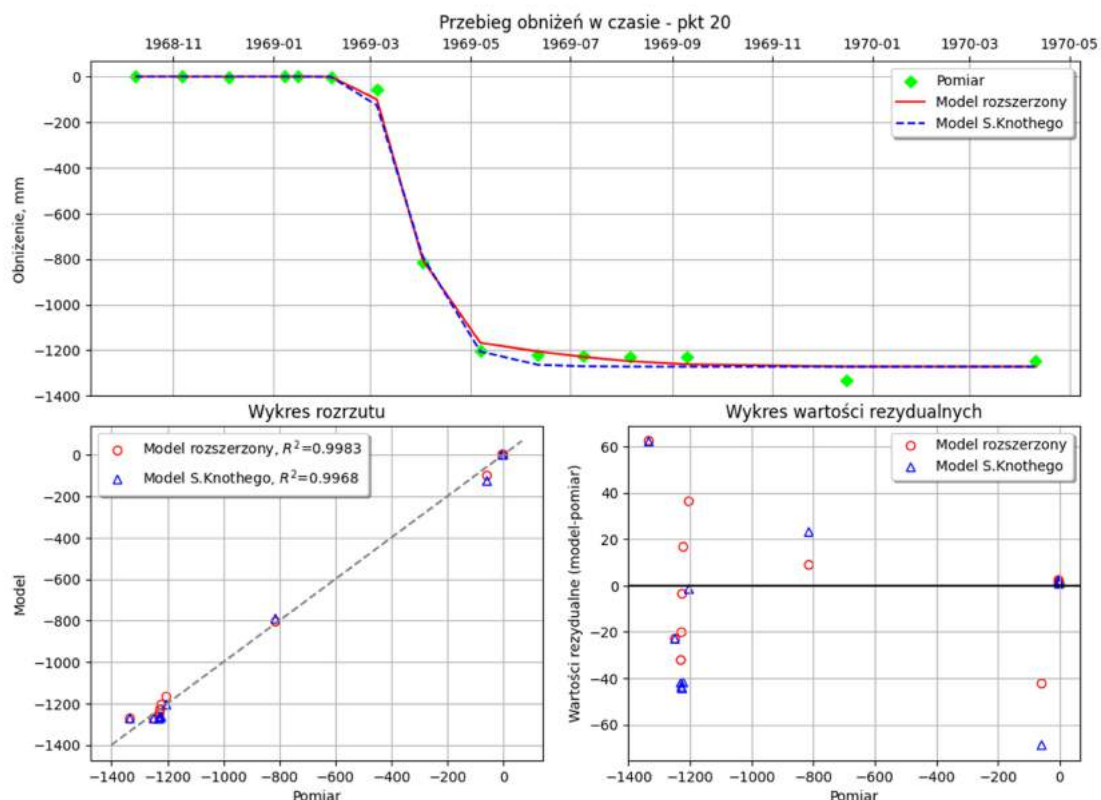
Skrypt o nazwie „Wykres” został opracowany za pomocą języka Python w celu zautomatyzowania i ujednolicenia graficznej analizy wyników identyfikacji parametrów poszczególnych modeli. Przyjęto, że źródłem danych do analizy wykonanej za pomocą tego narzędzia jest skoroszyt w formacie programu Excel, zawierający w poszczególnych arkuszach wyniki dla kolejnych analizowanych punktów. Przedmiotowy skrypt odczytuje zawartość pliku Excela i przygotowuje diagram w postaci zestawu 3 wykresów zawierających następujące informacje (rys.11.7):

- moduł górny przedstawia przebieg osiadania w czasie dla analizowanego punktu obserwacyjnego. Na wykresie linią czerwoną oznaczony jest przebieg osiadania

w czasie określony za pomocą jednego z proponowanych modeli. Linia przerywaną w kolorze czarnym przedstawiono obniżenie w czasie wg modelu S. Knothego. Zielone punkty oznaczają wartości obniżeń nieustalonych określone za pomocą pomiarów geodezyjnych.

- moduł lewy dolny zawiera wykres rozrzutu wartości obniżeń („Model”: $w'(t)$) w czasie uzyskanych za pomocą danego modelu w stosunku do obniżeń uzyskanych z pomiaru („Pomiar”: $w(t)$) dla analizowanego punktu. Wykres ten pozwala ocenić wizualnie jakość aproksymacji modelem względem pomiaru – im większe skupienie punktów wzdłuż prostej tym lepsza jakość opisu przebiegu osiadania w czasie. Na wykresie zamieszczono dodatkowo w legendzie wartości współczynnika determinancji R^2 jako dodatkowej miary jakości aproksymacji.
- moduł prawy dolny zawiera rozkład wartości rezydualnych rozumianych jako bezwzględne wartości różnic: $w_i(t) - w_i'(t)$

Uzyskany diagram jest automatycznie zapisywany jako obraz o określonych rozmiarach, gotowy do załączenia do dokumentacji obliczeń. W tabeli 11.4 zamieszczono kod źródłowy omawianego skryptu.



Rys.11.7. Przykładowy diagram będący wynikiem działania skryptu „Wykres”

Kod źródłowy skryptu „Wykres”

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from sklearn.metrics import r2_score
from datetime import datetime
import pandas as pd

# Czytanie pliku Excel'a za pomocą funkcji modułu Pandas
df = pd.read_excel("dane-do-wykresow.xlsx", sheet_name="d")

# Źródło danych pomiarowych
dates = df['data']
exp_data = df['Pom']

pt_name = str(df.iloc[0, df.columns.get_loc("Pkt")])

# Źródło danych modelu
modelRe_vals = df['Re2']
modelKn_vals = df['Kn']

# Obliczenie wartości współczynnika determinancji R^2
r2_Re = r2_score(exp_data, modelRe_vals)
r2_Kn = r2_score(exp_data, modelKn_vals)

# Obliczanie wartości rezydualnych
residuals_Re = np.array(modelRe_vals) - np.array(exp_data)
residuals_Kn = np.array(modelKn_vals) - np.array(exp_data)

# Tworzenie diagramu składającego się z 3 wykresów

fig = plt.figure(figsize=(11,8))
gs = fig.add_gridspec(2,2)
ax1 = fig.add_subplot(gs[0, :])
ax2 = fig.add_subplot(gs[1, 0])
ax3 = fig.add_subplot(gs[1, 1])
plt.tight_layout(pad=3, h_pad=0)

# -----
# Tworzenie wykresu górnego – przebieg osiadania w czasie: model i pomiar

ax1.scatter(dates, exp_data, color='lime', marker='D', label='Pomiar')
ax1.plot(dates, modelRe_vals, 'r-', label='Model rozszerzony')
ax1.plot(dates, modelKn_vals, 'b--', label='Model S.Knothego')
# ax1.set_xlabel('Czas')
ax1.set_ylabel('Obniżenie, mm')
ax1.set_title('Przebieg obniżeń w czasie - pkt %s' % pt_name)
ax1.legend(shadow="True")

```

```

ax1.grid()
ax1.xaxis.set_ticks_position('top')
ax1.xaxis.set_label_position('top')

# -----
# Tworzenie wykresu rozrzutu

ax2.scatter(exp_data, modelRe_vals, edgecolor='red', facecolor='none', label='Model
rozszerzony,  $R^2 = 0.4f$  % r2_Re)
ax2.scatter(exp_data, modelKn_vals, marker='^', edgecolor='blue', facecolor='none',
label='Model S.Knothego,  $R^2 = 0.4f$  % r2_Kn)

# Dodaj przekątną y=x (linia przerywana) jako linię odniesienia
ymin, ymax = ax1.get_ylim()
ax2.plot([ymin, ymax], [ymin, ymax], color='gray', linestyle='--')

ax2.set_xlabel('Pomiar')
ax2.set_ylabel('Model')
ax2.set_title('Wykres rozrzutu')

ax2.legend(shadow="True")
ax2.grid(True)

# -----
# Tworzenie wykresu wartości rezydualnych

ax3.scatter(exp_data, residuals_Re, color='r', marker='o', facecolor='None', linewidths=1,
label='Model rozszerzony')
ax3.scatter(exp_data, residuals_Kn, color='b', marker='^', facecolor='None', linewidths=1,
label='Model S.Knothego')

# Lina pozioma y=0 jako element odniesienia
ax3.axhline(y=0, color='black', linestyle='-')

ax3.set_xlabel('Pomiar')
ax3.set_ylabel('Wartości rezydualne (model-pomiar)')
ax3.set_title('Wykres wartości rezydualnych')
ax3.legend(shadow="True")
ax3.set_xlim(ymin, ymax)
ax3.grid(True)

# plt.subplots_adjust(wspace=0.3)

# -----
# Zapis diagramu w postaci pliku *.PNG
fname = pt_name + ".png"
plt.savefig(fname, bbox_inches='tight')
plt.show()

```