POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej

ROZPRAWA DOKTORSKA

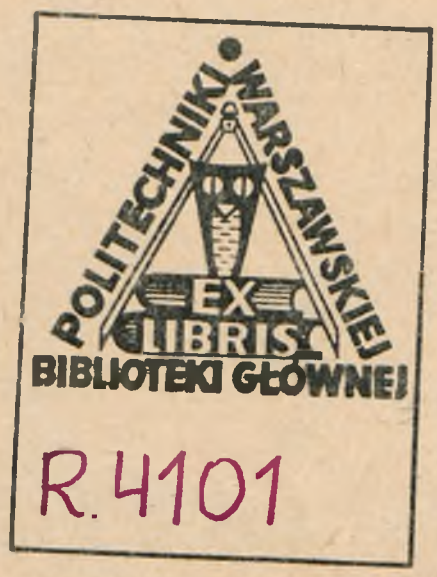
mgr inż. Zbigniewa Franciszka Kledyńskiego

pt. „Wpływ pola temperatury w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych na zastosowanie tensometrycznej aparatury strunowej"

WARSZAWA

1986

389741



R.4101

[531.781.2 : 627.82 : 624.012.4] : 043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII SANITARNEJ I WODNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Zbigniewa Franciszka Kledyńskiego

p.t.

"Wpływ pola temperatury w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych na zastosowanie tensometrycznej aparatury strunowej"

Promotor

Doc. dr inż. Czesław Kempa

Warszawa

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
R. 4101
Biblioteka Główna

133-1/I-860

Spis treści:

1. Wprowadzenie do problematyki pomiarów odkształceń wewnętrznych w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych 5
1.1. Cele pomiarów 5
1.2. Sposoby pomiarów 5
1.3. Zasada tensometrii strunowej 7
1.4. Rys historyczny 8
1.5. Układy pomiarowe czujników 9
1.6. Rozmieszczenie czujników w konstrukcji 12
1.7. Sposoby interpretowania wyników pomiarów 15
1.8. Wewnętrzne odkształcenia fizyko-chemiczne masywnych konstrukcji hydrotechnicznych 27
2. Przedmiot, cel i zakres pracy 33
3. Odkształcalność cieplna betonu hydrotechnicznej konstrukcji masywnej w świetle studiów literaturowych 36
4. Odkształcalność cieplna betonu hydrotechnicznej konstrukcji masywnej w świetle wyników pomiarów prowadzonych "in situ" 51
4.1. Informacje dotyczące zbioru danych pomiarowych 51
4.2. Określenie odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko na podstawie wskazań teletermometrów i tensometrów zerowych. Błąd pomiaru 57
4.3. Statystyczny opis błędów określenia odkształcalności cieplnej betonu zapory na podstawie wskazań tensometrów zerowych i teletermometrów 60

4.3.1. Wprowadzenie 60

4.3.2. Sprawdzenie losowości serii wartości błędu δ_i 63

4.3.3. Parametry statystyczne wartości błędu δ_i i ich związki z temperaturą betonu 65

4.3.4. Rozkład statystyczny błędu pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu wewnątrz masywu 72

4.3.5. Błąd maksymalny 74

4.4. Omówienie wyników analizy statystycznej 78

5. Wpływ właściwości betonu na pomiar jego wewnętrznych odkształceń termicznych 80

5.1. Studia literaturowe 80

5.2. Badania własne nad współpracą czujnika SCOwb-150 z betonem odkształcającym się termicznie /analiza numeryczna/ 85

5.2.1. Podstawy teoretyczne programu 85

5.2.2. Koncepcja metody obliczeń 87

5.2.3. Założenia do obliczeń. Zakres badań 88

5.2.4. Wyniki obliczeń 90

5.3. Omówienie wyników studiów i badań 92

6. Cechy konstrukcyjne naczyń zerowych 94

7. Wpływ cech konstrukcyjnych naczyń zerowych na lokalny rozkład temperatur betonu i wyniki pomiarów odkształcalności cieplnej betonu 99

7.1. Pole temperatur masywnej konstrukcji hydrotechnicznej 99

7.2. Model pomiarów odkształcalności cieplnej betonu w konstrukcji 104

7.3. Porównanie wyników uzyskanych z modelu z wynikami pomiarów wykonanych "in situ" 111

8. Analiza ogólna 115

9. Wnioski 122

10. Literatura 124

Praca zawiera 133 strony tekstu, 17 tablic, 23 rysunki i 4 załączniki /w oddzielnej oprawie/.

1. WPROWADZENIE DO PROBLEMATYKI POMIARÓW ODKSZTAŁCEŃ WEWNĘTRZNYCH W MASYWNYCH KONSTRUKCJACH HYDROTECHNICZNYCH.

1.1. CELE POMIARÓW

Pomiary odkształceń wewnętrznych masywnych konstrukcji hydrotechnicznych spełniają cele kontrolne, naukowo-badawcze bądź też związane z weryfikacją założeń lub metod projektowych. Większość zagadnień inżynierskich znajduje wyraz w wielkościach naprężeń. I choć naprężenie można mierzyć odpowiednimi przyrządami [20], to jednak w praktyce czyni się to sporadycznie.

W większości przypadków realizuje się łatwiejsze i bardziej informatywne pomiary odkształceń. Dopiero analiza wyników takich pomiarów stanowi podstawę wyznaczenia naprężeń.[1/]

1.2. SPOSOBY POMIARÓW

Spośród licznych i różnorodnych metod pomiaru odkształceń [27] część tylko wykazuje przydatność do badań odkształceń wewnętrznych. Ilość ta ulega jeszcze zmniejszeniu, gdy oceniamy przydatność analizowanych sposobów pomiaru w badaniach prowadzonych "in situ".

W pozycji [20] sformułowano kryteria doboru czujników do pomiaru odkształceń wewnętrznych. W konkluzji dokonanego przeglądu aparatury stwierdzono największą przydatność czujników zawierających tensometry elektrooporowe i czujników strunowych.

1/ Wadą opisanego toku postępowania jest konieczność wyboru modelu odkształcalności materiału. Obciąża to uzyskane wartości naprężeń błędami wynikającymi z rozbieżności pomiędzy hipotetycznym modelem ośrodka a rzeczywistym zachowaniem się ciała.

W pracy [67] przeprowadzono analizę przydatności różnych sposobów pomiaru odkształceń w bezpośrednich badaniach odkształceń wewnętrznych masywnych konstrukcji hydrotechnicznych. Wynik tej analizy wskazuje na grupę metod pomiarowych o zdalnym odczycie, w szczególności zaś na tensometrię elektrooporową i strunową, jako najodpowiedniejsze do prowadzenia takich badań.

Analogiczne stwierdzenie zawarto w pracach [53], [55], [79].

Specyfika pomiarów wewnętrznych w szczególności prowadzonych "in situ" sprawia, że rosnącego znaczenia nabiera tensometria strunowa.

Jej zalety - szczególnie cenne w konfrontacji z tensometrią elektrooporową - dotyczą między innymi stabilności cech metrologicznych czujników, stosunkowo znacznej odporności na uszkodzenia przy montażu i tego, że nośnikiem informacji jest częstotliwość. Wielkość ta może być przekazywana bez zakłóceń praktycznie niezależnie od wzajemnej odległości czujnika i miernika. Ułatwia to instalowanie i eksploatację aparatury - zdecydowanie upraszcza prowadzenie pomiarów.

Rosnąca ilość zastosowań aparatury strunowej wynika także z postępu w dziedzinie konstruowania i wykonawstwa czujników oraz wykorzystania nowoczesnych elektronicznych metod pomiaru ich wskazań /strunowe mierniki cyfrowe/. Aparatura strunowa z racji transponowania mierzonych wielkości mechanicznych i fizycznych /nie tylko odkształceń/ na jeden rodzaj sygnału - częstotliwość - stwarza szczególnie korzystne warunki do automatyzacji pomiarów. Nabiera to istotnego znaczenia gdy rośnie liczba wykorzystywanych czujników, a co za tym idzie ilość uzyskiwanej informacji.

Automatyzacja pomiarów kontrolnych prowadzonych na obiektach budownictwa wodnego stwarza realną szansę skutecznego przeciwdziałania awariom i katastrofom oraz ograniczenia ich niekorzystnych skutków. Jest ona nieodzowną cechą operatywnego systemu zbierania, przekazywania i przetwarzania danych o stanie obiektu.

1.3. ZASADA TENSOMETRII STRUNOWEJ

Istotą czujników strunowych jest wykorzystanie - jako zasady konstrukcyjnej - metody tensometrii strunowej, tj. zależności między częstotliwością poprzecznych drgań własnych napiętej struny a panującym w niej naprężeniem. Wyprowadzona w wieku XVII przez Mersena zależność teoretyczna ma postać:

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \qquad /1/$$

gdzie: f - częstotliwość drgań poprzecznych struny

l - długość struny

σ - naprężenie w strunie

ρ - gęstość materiału struny

Zależność /1/ można przekształcić do postaci:

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P}{F\cdot\rho}} \qquad /2/$$

gdzie: P - siła rozciągająca strunę

F - przekrój poprzeczny struny

bądź też, wykorzystując prawo Hooke'a do postaci:

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\varepsilon} \qquad /3/$$

gdzie: E - moduł sprężystości materiału struny

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$ - sprężyste odkształcenia względne struny.

Z konstrukcji czujników strunowych wynika, że wielkości l, F i ρ można uznać za stałe. Zmiany częstotliwości f mogą być wywołane poprzez zmiany naprężeń σ lub siły P.
Pomiar różnorodnych wielkości /np. odkształceń, przemieszczeń, sił, ciśnień, temperatur/ polega na transponowaniu tych wielkości na odpowiednie naprężenia sprężyste struny. To zaś jest kwadratową funkcją częstotliwości jej drgań poprzecznych.
Drgania pobudzonej struny są przetwarzane na impulsy elektryczne i przesyłane od czujników do mierników różnego typu.
Podstawową zasadą pomiaru czujnikami strunowymi jest pomiar przyrostów wielkości mierzonej. Do obliczenia zmiany wartości wielkości mierzonej wykorzystuje się odczyty wskazań aparatury: początkowy i końcowy oraz stałą cechowania struny /lub czujnika jako całości/. Stałe cechowanie określa się empirycznie w powiązaniu z rodzajem i typem stosowanego miernika. Od rodzajuitypu miernika strunowego zależy też postać formuły wg której przelicza się wskazania aparatury na wartości wielkości mierzonej.

1.4. RYS HISTORYCZNY

Pierwsze praktyczne próby wykorzystania tensometrii strunowej przeprowadzono w Niemczech /1919 r./, później w ZSRR, Francji, Anglii i USA. Najintensywniejszy rozwój aparatury pomiarowej i wzrost liczby zastosowań nastąpił po drugiej wojnie światowej.
W chwili obecnej istnieje na świecie kilka renomowanych firm produkujących aparaturę strunową o różnorakim przeznaczeniu. Również w Polsce uruchomiono taką produkcję. Oferty firm są zmienne - odzwierciedlają one postęp techniczny w tej dzie-

dzinie i rosnące doświadczenie producentów. Pełne zestawy informacji o produkowanej aparaturze strunowej zawierają aktualne w danym okresie prospekty i katalogi np. [63] . Przykłady wykorzystania aparatury strunowej w górnictwie, budownictwie lądowym i wodnym, geodezji i przemyśle maszynowym przedstawia pozycja [4] . Praca [67] zawiera omówienie kilkunastu realizacji pomiarów odkształceń wewnątrz masywnych konstrukcji hydrotechnicznych. Polskie doświadczenia w tej dziedzinie przedstawiają pozycje [68] i [38] .

1.5. UKŁADY POMIAROWE CZUJNIKÓW

Odkształcenia wielu konstrukcji - w szczególności betonowych konstrukcji hydrotechnicznych - mogą być, z dostateczną dla praktyki inżynierskiej dokładnością, opisane przez teorię małych odkształceń. Przedstawia ją wiele podręczników mechaniki, a jej podstawy w aspekcie programowania pomiarów odkształceń wewnętrznych podaje pozycja [20] .

Określenie wartości głównych i kierunków głównych tensora odkształcenia wymaga - w najogólniejszym przypadku zagadnienia przestrzennego - pomierzenia odkształceń ośrodka w sześciu różnych kierunkach; przy zagadnieniu płaskim - w trzech. Czujnik tensometryczny daje możliwość pomiaru odkształcenia wzdłuż jednego kierunku. Powoduje to konieczność grupowania czujników tensometrycznych w układy pomiarowe - rozety płaskie lub przestrzenne /sondy/. Budowę tych układów przedstawiono w pozycjach [57] i [20] .

Istotną cechą większości ugrupowań jest obecność czujników nadliczbowych tj. zbędnych z czysto teoretycznego punktu widzenia. Czujniki te pełnią zasadniczą rolę w zakresie oceny

rozrzutu wyznaczanych wielkości, dają możliwość wyeliminowania czujników o błędnych wskazaniach, pozwalają na wyrównanie wskazań czujników w obrębie rozety [57].

Sposób korygowania wskazań czujników w rozecie tensometrycznej przedstawiony w pozycji [57] polega na wykorzystaniu twierdzenia mechaniki o równości sum odkształceń w parach kierunków wzajemnie prostopadłych, przechodzących przez jeden punkt i leżących - wszystkie - w jednej płaszczyźnie.

Prawidłowość tę można opisać równaniem:

$$\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ} = \varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{135^\circ} \qquad /4/$$

w którym indeksy przy symbolu odkształcenia oznaczają kierunki pomiaru tej wielkości w płaszczyźnie, w wybranym układzie współrzędnych.

Rzeczywiste wyniki pomiarów zwykle nie spełniają teoretycznej zależności /4/; różnica stron powyższej zależności bywa różna od zera.

W pracy [57] proponuje się, aby ową różnicę - jeśli nie można jednoznacznie zidentyfikować i wykluczyć z dalszych obliczeń wskazania wyraźnie błędnego - rozdzielić na wskaznia poszczególnych tensometrów.

W pozycji [20] przedstawiono inny sposób wykorzystania czujników nadliczbowych. Otóż ze wskazań tensometrów rozety /sondy/ tworzy się wszystkie możliwe ich kombinacje prowadzące do wartości głównych i kierunków głównych tensora odkształcenia. Uzyskane w ten sposób wartości można opracować statystycznie i określić zakres rozrzutu wynikającego z błędów we wskazaniach poszczególnych tensometrów.

Powyższy sposób wykorzystania wskazań czujników nadliczbowych - - mimo możliwych wobec niego zastrzeżeń natury teoretycznej -

- dostarcza zdecydowanie więcej informacji o pomiarze niż wynika to z analizy równania /4/. Jest on szczególnie cenny w przypadku korzystania z przestrzennych układów czujników - - sond sześcio- i dziewięcioramiennych. W przypadku tej ostatniej sondy skutecznych kombinacji prowadzących do wartości głównych i kierunków głównych tensora odkształcenia jest aż 74. Czujniki nadliczbowe oprócz pełnienia funkcji kontrolnych mają jeszcze i tę zaletę, że mogą zastąpić niesprawne czujniki zestawu podstawowego. Wówczas, mimo ograniczenia możliwości kontrolnych, zasadniczy cel pomiarów będzie realizowany nadal. Powszechne stosowanie układów pomiarowych z większą liczbą czujników nadliczbowych natrafią zwykle na przeszkody natury ekonomicznej.

Czujniki rozety tensometrycznej mierzą całkowite odkształcenie ośrodka, a więc i te jego składniki, które nie zostały wywołane zmianami naprężeń. W celu określenia tych odkształceń obok rozety, złożonej z tzw. tensometrów aktywnych instaluje się tzw. tensometry zerowe /bierne/. Umieszcza się je w naczyniach zerowych.

Pod tym pojęciem rozumie się różnorodne rozwiązania techniczne zapewniające wyodrębnienie próbki betonowej - wraz z pogrążonym w niej tensometrem - z masywu konstrukcji, odseparowanie jej od obciążeń zewnętrznych, swobodę odkształceń i takie warunki dojrzewania betonu jak w otaczającym masywie.

Najczęściej materiał struny i beton posiadają różne współczynniki odkształcalności cieplnej.

Odkształcenie termiczne struny i odkształcenie termiczne ośrodka otaczającego czujnik wywołują przeciwstawne zmiany

naprężeń w strunie. W efekcie obserwowana zmiana częstotliwości drgań struny odpowiada wypadkowej zmian naprężeń.

W pracach [4] i [87] wykazano, że zmiany temperatury od pomiaru do pomiaru oraz różnice temperatur struny i ośrodka w momencie samego pomiaru są najistotniejszymi czynnikami ograniczającymi praktyczną czułość tensometrów strunowych. Wynika stąd konieczność kontrolowania zmian temperatury i uwzględniania ich w formie odpowiednich poprawek. W praktyce zaniedbuje się różnice temperatur czujnika i ośrodka poprzestając na uwzględnianiu różnic temperatur w chwilach kolejnych pomiarów odkształceń.

Jak wynika z wyżej przedstawionych uwag rozecie tensometrycznej towarzyszą z reguły: termometr i tensometr zerowy.

Z analizy dotychczasowych zastosowań aparatury tensometrycznej w pomiarach odkształceń wewnętrznych zapór betonowych - przeprowadzonej w pracy [67] - wynika, że najpowszechniej stosowanym układem czujników aktywnych jest płaska rozeta wchlarzowa. Umieszcza się je zwykle w płaszczyznach prostopadłych od osi zapory, co wynika z charakteru pracy konstrukcji.

1.6. ROZMIESZCZENIE CZUJNIKÓW W KONSTRUKCJI

Rozeta tensometryczna posiada określone wymiary uwarunkowane wielkością bazy budujących ją tensometrów i względami wynikającymi z konstrukcji rozety. Mimo to jest traktowana względem wymiarów konstrukcji masywnej jako punkt pomiarowy. Do tego punktu odnoszone są wskazania tensometrów - także zerowego - - i termometru.

Rozmieszczenie układów czujników w korpusie konstrukcji wynika bezpośrednio z celu podjętych badań. Pod tym kątem typuje się

odpowiednie sekcje zapory, a w nich przekroje pomiarowe. W przekrojach tych rozmieszcza się czujniki.
W pracy [57] zaleca się umieszczanie czujników w pobliżu płaszczyzny /powierzchni/ posadowienia lub w pobliżu zimowego szwu roboczego betonowania jako potencjalnych powierzchni ścięcia.
Układy czujników należy instalować w płaszczyźnie symetrii sekcji, a czasami także przy szczelinach dylatacyjnych, po kilka na szerokości przekroju.
Niezawodność pomiarów można podnieść przez dublowanie układów czujników. Wówczas wzajemnie dublujące się zestawy aparatury umieszcza się symetrycznie względem płaszczyzny przekroju pomiarowego, w niewielkich od niej odległościach.
Rozproszenie punktów pomiarowych w obrębie przekroju poprzecznego zapory uważać należy za niecelowe i nieekonomiczne. Utrudnia ono ocenę prawidłowości wskazań czujników, ekstrapolację pomierzonych punktowo wielkości na większe partie masywu, zmniejsza stopień niezawodności pomiarów i ich informatywność.
Przedstawione wyżej zalecenia sformułowano ponad trzydzieści lat temu. Zbudowano je na założeniu, że zniszczenie budowli stanowi efekt przekroczenia granicznych naprężeń ścinających /hipoteza Coulomba-Mohra/. Z tego względu postulowany rozkład czujników wykazuje silny związek z układem trajektorii tych naprężeń. Czujniki grupuje się więc tam, gdzie naprężenia ścinające mogą być największe /stopa zapory/, bądź też tam gdzie zdolność ich przeniesienia jest najmniejsza /długie przerwy w betonowaniu/.

Nowe wymagania stawiane obiektom budownictwa wodnego /przede wszystkim ich rosnąca wielofunkcyjność/, związany z tym stopień komplikacji konstrukcji oraz wymogi natury ekonomicznej wymuszają postęp w dziedzinie metod obliczania, projektowania, wykonawstwa i kontroli budowli wodnych.
Wszystko to sprawia, że coraz częściej pomiary odkształceń muszą być prowadzone w bardzo różnych miejscach budowli [64], [71]. Zlokalizowanie tych miejsc jest coraz trudniejsze z racji często skomplikowanego charakteru pracy konstrukcji.
Układy pomiarowe czujników umieszcza się przeważnie w miejscach występowania największych naprężeń rozciągających.
Do takiego postępowania skłania niska wytrzymałość betonu na rozciąganie i związana z tym możliwość jej łatwego wyczerpania.
Strefy ściskane masywu są zwykle wytężone w znacznie mniejszym stopniu.
Sprawia to, że pojawienie się granicznych kół naprężeń - - hipoteza wytrzymałościowa Coulomba-Mohra [32] - jest prawdopodobniejsze wówczas gdy beton jest rozciągany [21].
Miejsca występowania naprężeń rozciągających określa się na podstawie obliczeń lub badań modelowych konstrukcji.
Często skomplikowany kształt sekcji zapory /osłabienie przekroju pustkami pomieszczeń, zamknięć, ujęć wody i.t.p./ sprawia, że postulat kontrolowania stref rozciąganych masywu prowadzi do rozproszenia czujników w obrębie przekroju pomiarowego konstrukcji. Maleje wówczas - w myśl uwag sformułowanych w pracy [57] - informatywność pomiarów, ulegają ograniczeniu możliwości kontrolowania działania czujników.

Rozproszenie układów czujników i związana z tym częściowa utrata kontroli nad ich pracą powoduje podniesienie poziomu wymagań stawianych aparaturze. Dotyczy to jej niezawodności i cech metrologicznych.

Krajowe zapatrywania dotyczące projektowania rozmieszczenia urządzeń tensometrycznych wewnątrz konstrukcji hydrotechnicznych znajdują wyraz w wytycznych [79] i [81]. O ile wytyczne [79] reprezentują w omawianej kwestii pełną analogię względem zasad przedstawionych w pracy [57], o tyle najnowsze wytyczne [81] postulują kompromis między zasadą wyznaczania regularnej sieci punktów pomiaru odkształceń, a lokalizowaniem aparatury tylko w miejscach istotnego wytężenia konstrukcji. W myśl zaleceń wytycznych [81] sieć pomiarowa powinna być w miarę możliwości regularna, dostosowana do geometrii konstrukcji. Zagęszczać ją należy w strefach szczególnego wytężenia materiału. Wyróżniającą cechą wytycznych [81] jest zwrócenie uwagi na konieczność dostosowania gęstości sieci punktów pomiarowych do spodziewanej zmienności odkształceń w obrębie przekroju pomiarowego i zdolności rozdzielczej stosowanej aparatury.

1.7. SPOSOBY INTERPRETOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

Pomiary tensometryczne na obiekcie hydrotechnicznym mają charakter eksperymentu biernego. Oznacza to, że większość czynników wpływających na zachowanie się obiektu - a więc i wpływających na mierzone odkształcenia - zmienia się w sposób niezależny od obserwatora.

Zmienność ta może mieć charakter procesu losowego /temperatura, wilgotność/, wynikać z praw zachowania się materiału /cechy mechaniczne ośrodka betonowego, pełzanie itp./, lub też być podporządkowana celom innym niż badanie stanu odkształceń /piętrzenie/.

W zasadzie jedynym w pewnej mierze kontrolowanym parametrem charakteryzującym pomiar jest moment czasowy jego przeprowadzenia.

Wyżej opisany charakter badań sprawia, że znalezienie związków łączących mierzone odkształcenia z wpływającymi nań czynnikami jest trudne. Działanie takie jest jednym z przedmiotów interpretowania wyników pomiarów.

Realizacja większości praktycznych celów, stawianych przed pomiarami odkształceń wewnętrznych, wymaga określenia naprężeń. Te związane są zwykle tylko z częścią odkształcenia mierzonego przez czujniki. W procesie interpretacji wyników pomiarów odkształceń część tę należy wyodrębnić i przeliczyć na wielkość naprężeń. Wiodą to tego różne drogi. W pracach [57], [39], [17], [30], [3], przedstawiono metody stosowane w odniesieniu do badań budowli hydrotechnicznych z betonu. Ich wspólną cechą jest to, iż nie wnikają w warunki współpracy czujnika z ośrodkiem ograniczając się do analizy odkształceń wskazanych przez aparaturę.

Odkształcenia te określa się na podstawie bezpośrednich wskazań przyrządów poprzez przeliczenie ich według odpowiednich formuł matematycznych. Uzyskaną wielkość każda z przytoczonych pozycji traktuje już swoiście. Uważa się ją za złożoną z rozmaicie określanych składników; rozmaicie wylicza się też wartości tychże składników.

Pozycja [30] traktuje wskazanie tensometru aktywnego jako sumę następującej postaci:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_p + \varepsilon_o + \varepsilon_\delta + \varepsilon_\pi \qquad /5/$$

gdzie: ε_p - odkształcenie od sił zewnętrznych,

ε_o - odkształcenie objętościowe, niesk-rępowane, wywołane równomiernymi w całej objętości betonu zmianami temperatury i wilgotności,

ε_δ - odkształcenie wynikające z nierównomiernych zmian temperatury i wilgotności,

ε_π - odkształcenie pełzania od naprężeń wywołanych przez siły zewnętrzne i wewnętrzne.

Przyjmuje się dalej, że wielkość ε_o odpowiada wskazaniu tensometru zerowego umieszczonego obok analizowanego tensometru aktywnego.

Różnica $\varepsilon_u - \varepsilon_o$ odpowiada sumie odkształcenia pełzania ε_π i tzw. sprężystej części odkształcenia $/\varepsilon_p + \varepsilon_\delta/$. Uzyskane wartości odkształceń stanowią podstawę dla obliczeń naprężeń.

W tym celu wykorzystuje się krzywą relaksacji konstruowaną w oparciu o odpowiednie pomiary pełzania i teorię reologiczną Masłowa - Arutiuniana.

W uzasadnionych przypadkach odkształcenia pełzania są zaniedbywalne, a obliczenie naprężeń może się dokonać w oparciu o model ciała sprężystego Hooke'a.

Zasadniczo podobny sposób traktowania wyników pomiarów odkształceń przedstawiono w pracy [57].

Odkształcenie mierzone przez tensometr aktywny wyraża się wzorem:

MB

$$\varepsilon^{s} = \varepsilon^{\sigma} + \varepsilon^{\perp\sigma} + \varepsilon^{\Delta T} + \varepsilon^{x} \qquad /6/$$

gdzie: ε^{σ} - odkształcenie od naprężeń równoległych od osi tensometru,

$\varepsilon^{\perp\sigma}$ - odkształcenie od naprężeń prostopadłych do osi tensometru,

$\varepsilon^{\Delta T}$ - odkształcenie termiczne betonu,

ε^{x} - odkształcenie fizyko-chemiczne betonu o charakterze objętościowym.

Przyjmuje się, że odkształcenie wskazane przez tensometr zerowy odpowiada sumie składników $\varepsilon^{\Delta T}$ oraz ε^{x}.

Różnice odkształceń zmierzonych tensometrami: aktywnym i zerowym traktuje się jako odkształcenie od naprężeń. Na tej podstawie odkształcenia te przelicza się na naprężenia. Uwzględnienie pełzania realizuje się poprzez wykorzystanie odpowiednich zależności odkształceń pełzania betonu pod obciążeniem jednostkowym w funkcji czasu i wieku ośrodka w chwili obciążenia / w pracy [57] sposób ten określa się jako klasyczny/, bądź też poprzez wykorzystanie odpowiedniej krzywej relaksacji.

Gdy możliwe jest pominięcie efektów pełzania, to wówczas wykorzystuje się model ciała Hooke'a.

Przedstawione wyżej prace łączy jednakowy sposób operowania zmierzonymi odkształceniami. W efekcie - mimo różnic w interpretowaniu składników mierzonych wielkości - prowadzi to do jednakowych rezultatów obliczeń.

Pozycja [30] nie wyodrębnia odkształceń od naprężeń prostopadłych do osi tensometru ale jednocześnie ujawnia składową pełzania, która z kolei nie występuje w sposób jawny w meto-

dzie opisanej w pozycji [57] . Według pozycji [30]odkształcenie zmierzone w naczyniu zerowym tożsame jest z sumą swobodnego odkształcenia termicznego i odkształcenia swobodnego wywołanego przez zmiany wilgotności betonu.
W odkształceniu betonu obciążonego /tensometr aktywny/ wyodrębnia się dodatkowo część wywołaną przez nierównomierne zmiany temperatury i wilgotności.
Pozycja [57] nie wprowadza wyżej wymienionego składnika odkształcenia.
Opisane sposoby opracowywania wyników pomiarów nie prowadzą do skutecznego wyodrębnienia wszystkich nazwanych składników zmierzonego odkształcenia betonu.
Obserwowane różnice interpretacyjne wynikają z różnego rozumienia zjawisk zachodzących przy odkształcaniu się konstrukcji betonowej.

Według pracy [39] w odkształceniu betonu obciążonego /zmierzonym przy pomocy tensometru aktywnego /wyodrębnić można sześć składników. Są to:

- swobodne odkształcenie termiczne,
- swobodne odkształcenie wywołane zmianą wilgotności betonu,
- odkształcenie od ciężaru własnego i obciążeń zewnętrznych,
- odkształcenie od sił wywołanych nierównomiernymi zmianami temperatur,
- odkształcenie od sił wywołanych nierównomiernymi zmianami wilgotności betonu,
- odkształcenie pełzania.

Odkształcenie betonu w naczyniu zerowym utożsamiane jest z sumą swobodnego odkształcenia termicznego i swobodnego odkształcenia wywołanego zmianami wilgotności betonu.
Wyodrębnianie poszczególnych składników odkształcenia sumarycznego /w tym także związanych z naprężeniami/ odbywa się generalnie rzecz biorąc, przez porównywanie wyników tych pomiarów, przy których pozostałe składniki zmierzonego odkształcenia były niezmienne. Postępowanie to określa się mianem analizy porównawczej [29] .
Do eliminacji swobodnych odkształceń termicznych i wilgotnościowych służą wskazania tensometru zerowego.
Skuteczność powyższego sposobu obliczania wyników pomiarów tensometrycznych zależy głównie od możliwości wynajdywania grup wyników pomiarów cechujących się zmiennością wybranych składników odkształcenia a stałością /lub zerowaniem się/ pozostałych.
W większości przypadków możliwości te są ograniczone.
Stosowaniu metody sprzyjają: prostota geometrii i charakteru pracy konstrukcji, dobre rozeznanie pola temperatur wewnętrznych, znaczna częstotliwość pomiarów i okresowość ciągów pomiarowych kontrolowanych wielkości.

W pracy [3] przedstawiono statystyczną metodę interpretowania wyników pomiarów odkształceń wewnętrznych.
Zbudowano ją w oparciu o indeterministyczny model obiektu badań.

Przyjęto a priori, że zmiana odkształcenia obliczona na podstawie i - tego oraz i + 1-ego wskazania tensometru aktywnego wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned}\varepsilon = {} & \alpha_1 (H_{i+1} - H_i) + \alpha_2 (H_{i+1}^2 - H_i^2) + \alpha_3 (H_{i+1}^3 - H_i^3) + \\ & + \alpha_4 (t_{i+1} - t_i) + \\ & + \alpha_5 [\cos(\tfrac{2\pi}{365}\tau_{i+1}) - \cos(\tfrac{2\pi}{365}\tau_i)] + \\ & + \alpha_6 [\sin(\tfrac{2\pi}{365}\tau_{i+1}) - \sin(\tfrac{2\pi}{365}\tau_i)] + \\ & + \alpha_7 [\cos(\tfrac{4\pi}{365}\tau_{i+1}) - \cos(\tfrac{4\pi}{365}\tau_i)] + \\ & + \alpha_8 [\sin(\tfrac{4\pi}{365}\tau_{i+1}) - \sin(\tfrac{4\pi}{365}\tau_i)] + \\ & + \alpha_9 \cdot f(\tau_{i+1} - \tau_i) + \\ & + \alpha_{10}\end{aligned} \qquad /7/$$

w którym: H - piętrzenie,

t - lokalna temperatura betonu /w miejscu pomiaru odkształcenia/,

τ - czas,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - współczynniki wpływu piętrzenia wody,

α_4 - współczynnik wpływu lokalnej temperatury betonu,

$\alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$ - współczynniki wpływu temperatury powietrza atmosferycznego,

α_9 - współczynnik przy funkcji wpływu czynnika czasu,

α_{10} - wyraz wolny.

Ponieważ analizowano pomiary bliskie sobie czasowo pominięto wpływ czynnika czasu. Następnie - w zbiorze uzyskanych wyników pomiarów - estymowano nieznane współczynniki przyjętej funkcji /metodą najmniejszych kwadratów/.

Sumę trzech pierwszych składników funkcji /7 / traktowano jako odkształcenie od naprężeń. Obliczone na tej podstawie naprężenia porównano z obliczonymi metodami: analityczną i numeryczną.

O ile przedstawione wyniki rozwiązań analitycznego i numerycznego różniły się od siebie nieznacznie /maksymalnie 1daN/cm^2/, o tyle naprężenia uzyskane w wyniku opracowania pomiarów odkształceń stanowiły - przy normalnym poziomie piętrzenia - - od 45 do 86 procent naprężeń obliczonych; Stopień zgodności zależał od położenia analizowanych punktów w konstrukcji.

Przedstawioną w pracy [3] metodę interpretowania wyników pomiarów odkształceń wewnętrznych konstrukcji cechuje pomijanie wskazań tensometrów zerowych.

Nie uwzględnia się skrępowania odkształceń termicznych i wilgotnościowych betonu, pomija się wpływ nierównomiernych zmian temperatury i wilgotności.

Uznaje się przy tym, że zmiany naprężeń wywoływane są jedynie przez zmiany obciążenia budowli.

Wyróżnikiem indeterministycznego modelu obiektu badań /"black box"/ stojącego u podstaw statystycznych metod interpretacji jest znaczna dowolność w budowaniu związku funkcyjnego pomiędzy wielkościami wejściowymi /tu: piętrzeniem, temperaturą betonu, dniem roku itp./ a wielkością wyjściową /tu: odkształceniem wewnętrznym betonu/. Miarą zgodności proponowanej funkcji i zbioru danych pomiarowych są statystyczne parametry dopasowania /np. współczynniki korelacji wielokrotnej, estymator odchylenia standardowego itp/.

Uzyskanie zadawalającej zbieżności wyników pomiarów i aproksymującej je funkcji jako całości nie daje jednak pewności, że zbieżność taka jest równie zadawalająca w odniesieniu do poszczególnych członów zadanej funkcji. Zastrzeżenie takie jest szczególnie istotne, gdy statystyczna metoda interpretacji ma służyć wyodrębnieniu konkretnego składnika mierzonej wielkości - w tym przypadku odkształcenia od naprężeń. Statystyczne metody interpretacji są z powodzeniem stosowane w analizie przemieszczeń wybranych punktów zapór [29]. W dziedzinie tej rozwinięto je na tyle, że możliwa się stała ocena istotności poszczególnych członów założonej funkcji [25]. Wydaje się celowym aby doświadczenia te wykorzystać w interpretowaniu pomiarów odkształceń wewnętrznych.
Ważną cechą statystycznych metod interpretacji jest ich związek z liczebnością zbioru danych pomiarowych - wraz ze wzrostem liczby pomiarów rośnie pewność wnioskowania statystycznego. Wynika stąd wprawdzie możliwość sukcesywnego "poprawiania" matematycznej egzemplifikacji modelu ale i obawy co do jej adekwatności w początkowym okresie prowadzenia pomiarów.

Analogiczną właściwość posiada metoda zaproponowana w pracy [17]. Można ją stosować gdy pomiary odkształceń prowadzone są w betonie dojrzałym, o ustabilizowanych własnościach mechanicznych i ustalonych krzywych pełzania.
U podstaw metody leży stwierdzenie, które mówi, że odkształcenia termiczne mierzone tensometrami: aktywnym i zerowym są przy identycznych wzrostach temperatury betonu różne - - jedno jest w części skrępowane, drugie swobodne. Zakłada się jednocześnie, iż przy spadku temperatury odkształcenia

termiczne zmierzone przy pomocy tensometru aktywnego i tensometru zerowego będą sobie równe; zdaniem autorów pracy [17] kurczenie się betonu w masywie zapory nie natrafia na istotne przeciwdziałanie.

Dodatkowo założono, że cykliczność zmian temperatury betonu nie wpływa na jego odkształcalność cieplną. Uproszczeniem jest także założenie o równomierności zmian temperatury betonu w otoczeniu tensometrów. Wyżej przedstawione założenia ograniczają ilość możliwych czynników mających wpływ na odkształcenie betonu do dwóch: obciążenia zewnętrznego i temperatury lokalnej betonu. Pierwszy czynnik jest przyczyną odkształceń natychmiastowych i odkształceń pełzania, drugi - odkształceń termicznych.

Według proponowanej w pozycji [17] metody obliczenia odbywają się w dwóch fazach. W fazie I, dla każdej rozety i każdego z jej tensometrów, określa się empirycznie odpowiednie współczynniki. Najistotniejszy z nich to współczynnik dla reakcji przeciw odkształceniu termicznemu betonu α^{R}_{bet} /nazewnictwo i oznaczenia według pracy [17]/. Współczynnik ten jest różny dla każdego z tensometrów rozety i stanowi miarę skrępowania swobodnych odkształceń termicznych betonu w danym miejscu konstrukcji /miejsce zainstalowania analizowanej rozety/ i wzdłuż określonego kierunku /wyznaczonego przez rozpatrywany tensometr rozety/. Co do wartości, współczynnik α^{R}_{bet} odpowiada różnicy odkształceń termicznych zmierzonych tensometrem zerowym i aktywnym, przypadającej na jeden stopień wzrostu temperatury. Oblicza się go na podstawie wyników takich par pomiarów, dla których można uznać niezmienność obciążeń zewnętrznych przy jednoczesnym wzroście temperatury betonu. Uzyskane wyniki opracowuje się

statystycznie.

W fazie II następuje właściwe opracowanie wyników pomiarów. Warunki obciążenia i temperatury mogą być już dowolne.

Na podstawie wyznaczonego w fazie I współczynnika α^R_{bet} oblicza się odkształcenie reakcji betonu ε^R_{Tbet} odpowiadające aktualnie zmierzonej różnicy temperatur.

Odkształcenie reakcji betonu ε^R_{Tbet} służy z jednej strony do obliczenia naprężeń $\sigma(T)$ wywołanych częściowym skrępowaniem swobodnego odkształcenia termicznego, z drugiej stanowi poprawkę odkształcenia ε^o zmierzonego aktualnie tensometrem zerowym. Poprawione odkształcenie tensometru zerowego $\hat{\varepsilon}^o$ odjęte od odkształcenia ε zmierzonego odpowiednim tensometrem aktywnym daje wielkość odkształcenia spowodowanego zmianą obciążeń zewnętrznych. Wielkość ta jest podstawą do określenia naprężeń od obciążeń zewnętrznych $\sigma(H)$, które zsumowane z naprężeniami termicznymi $\sigma(T)$ dają w efekcie wartość naprężeń w danym punkcie konstrukcji i na kierunku wyznaczonym przez oś danego tensometru aktywnego rozety.

W praktyce dysponuje się odkształceniem zmierzonym przy pomocy tensometru aktywnego oraz odkształceniem obliczonym na podstawie ustalonych w fazie I współczynników α^R_{bet} i α^U_{bet}, dla obserwowanych aktualnie warunków obciążenia i temperatury.

Z porównania wartości zmierzonej i obliczonej wynika wartość błędu. Rozdziela się ją równo na składniki odkształcenia całkowitego i oblicza poprawione wartości odkształceń i naprężeń.

Znaczna pracochłonność metody może zostać ograniczona przez wykorzystanie elektronicznej techniki obliczeniowej [19].

Istnieje również możliwość uwzględnienia wpływu pełzania na mierzone odkształcenia i wyznaczane w oparciu o nie naprężenia.

Zagadnienie z tym związane omawiają pozycje [42], [43], [44], [48].

Jeśli dokonać próby klasyfikacji przedstawionych sposobów opracowywania /interpretowania/ wyników pomiarów tensometrycznych, to na jednym biegunie takiej klasyfikacji należy umieścić metodę analizy porównawczej [39], a na drugim metodę interpretacji statystycznej [3]. W tak wyznaczonych granicach mieszczą się zarówno analogiczne względem siebie metody opisane w pracach [57] i [30] /można je z racji szerokiego zakresu stosowania nazwać klasycznymi/, jak również metoda stanowiąca modyfikację klasycznej/według pracy [17] /.
Nieznane są próby porównań ilościowych między zaprezentowanymi metodami obliczeń. Należy jednak sądzić, że różnice liczby i siły założeń, na których metody te budowano czynią je bardziej uzupełniającymi się niż konkurencyjnymi. W świetle pracy [59] można to ująć następująco: w okresie budowy, pierwszego piętrzenia i kilku pierwszych lat eksploatacji podstawowe znaczenie mieć będzie analiza porównawcza [39] i metoda klasyczna [57], [30] - jako modele deterministyczne; później, w miarę zwiększenia się liczby danych pomiarowych i stabilizacji badanych zjawisk rosnącą przydatność wykażą metody statystyczne [3] i mieszane [17].

1.8. WEWNĘTRZNE ODKSZTAŁCENIA FIZYKO-CHEMICZNE MASYWNYCH KONSTRUKCJI HYDROTECHNICZNYCH.

O ile określenie sumy odkształceń fizyko-chemicznych betonu - w pracy [45] odkształcenia te określane są mianem objętościowych - jest stosunkowo proste /odbywa się przez pomiar w tzw. naczyniach zerowych/, o tyle rozdzielenie tej sumy na składniki wywołane różnymi przyczynami stanowi pewną trudność. Z tego względu w odkształceniu fizyko-chemicznym betonu wyodrębnia się pojęciowo tylko najistotniejsze składniki: odkształcenie termiczne i odkształcenie wilgotnościowe. To ostatnie jest najznaczniejszym składnikiem skurczu i pęcznienia, przewyższa też znacznie pomijalnie małe odkształcenia kontrakcji i karbonizacji [54] . Nawet pobieżna analiza wyników pomiarów odkształceń prowadzonych wewnątrz masywnych konstrukcji hydrotechnicznych wskazuje na cykliczny charakter zmian wskazań czujników w czasie. Dotyczy to zarówno tensometrów aktywnych /w rozetach/ jak i zerowych. Zmienność ta wykazuje duże podobieństwo do czasowych przebiegów temperatury lokalnej betonu mierzonej w pobliżu danego układu pomiarowego czujników tensometrycznych. Jednocześnie konfrontacja przebiegu zmian obciążenia konstrukcji /np. wysokości piętrzenia w przypadku zapór/ ze wskazaniami tensometrów aktywnych wykazuje słaby ich związek, zaznaczający się jedynie przy znacznych zmianach sił działających na budowlę.

W pracy [85] analizowano statystycznie związek pomiędzy temperaturą betonu i piętrzeniem a wskazaniem tensometru aktywnego. We wnioskach stwierdzono, że odkształcenia termiczne, zależnie od usytuowania tensometru aktywnego w zaporze, są 5 - 20 razy

większe od odkształceń wywołanych zmianami piętrzenia.
Proporcje między odkształceniami termicznymi i odkształceniami od obciążeń wynikające z analizy wyników pomiarów tensometrycznych znajdują potwierdzenie w wynikach obliczeń numerycznych stanu odkształceń i naprężeń wewnątrz zapór.
W pracy [58] przeprowadzono obliczenia stanu odkształceń i naprężeń zapory Besko /metodą elementów skończonych/ i stwierdzono, że odkształcenia termiczne są kilkanaście i więcej razy większe od wywołanych maksymalną zmianą piętrzenia.
Analogiczne konkluzje zawierają prace [59] i [65].
Według pracy [2] odkształcenia od parcia wody i ciężaru własnego zapory grawitacyjnej stanowią zaledwie 10 - 15% odkształcenia całkowitego. Pozostała część tego odkształcenia wywołana jest przez zmiany temperatury i wilgotności betonu.
Pogląd na wielkość i zmienność odkształceń wilgotnościowych betonu dać może ocena zmian wilgotności masywu.
Według pracy [23] zawartość wilgoci w betonie tych stref konstrukcji, które stale są pogrążone w wodzie wynosi 95 - 97% całkowitej objętości porów. Podobnie kształtuje się i zawartość wilgoci wewnątrz masywu betonowego, gdyż relatywnie szczelny beton /w szczególności zaś beton hydrotechniczny/ wydatnie ogranicza dyfuzję wilgoci ku odpowietrznym powierzchniom konstrukcji.
W zasadzie tylko przypowierzchniowe strefy masywu, kontaktujące się z powietrzem atmosferycznym, obniżają swą wilgotność początkową nadążając za sezonowymi zmianami wilgotności względnej powietrza / w warunkach równowagi higrotermicznej wielkości te są ze sobą związane poprzez krzywe sorpcji i desorpcji [54],[23]/.

Średnia roczna zawartość wilgoci w tej strefie masywu odpowiada średniej rocznej wilgotności względnej powietrza.
Poniżej podano przykładowe dane dotyczące wilgotności względnej powietrza w rejonie zapory Besko. Zaczerpnięto je z pracy [61]. Są one następujące: średnia dobowa wilgotność względna w roku jest większa od 80%, zimą zawiera się w granicach od 86 do 88%, wiosną - od 74 do 76%, latem - powyżej 74%, jesienią - od 82 do 84%. Należy zauważyć, że powyższe informacje opierają się na wynikach pomiarów prowadzonych na stacjach meteorologicznych znajdujących się w pewnym oddaleniu od obiektu. Lokalne wartości wilgotności względnej powietrza, silnie związane z bliskością rzeki i zbiornika, są wyższe [31] .
Przytoczone wyżej informacje wskazują na to, że początkowa, wysoka wilgotność masywu konstrukcji hydrotechnicznej może się zmieniać w bardzo wąskich granicach. Zmiany wilgotności dotyczą przede wszystkim tych stref masywu, które kontaktują się z powietrzem atmosferycznym. Betony pod wodą i we wnętrzu masywu praktycznie nie zmieniają swojej wilgotności - w każdym razie zmiany te są niewielkie i trwają latami.
Wpływ odkształceń wywołanych zmianami wilgotności betonu na wyniki pomiarów tensometrami zerowymi analizowano w pracach [8] i [67] . Badano różnice pomiędzy wartościami współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b wyznaczonymi w oparciu o wskazania tensometru zerowego i termometru przy wzrostach temperatury a wartościami wyznaczonymi przy jej spadkach.
Z zsumowania odkształceń termicznych i odkształceń wilgotnościowych /przy stałym wzroście lub stałym spadku wilgotności betonu/ wynika, że skurcz prowadzi do zawyżenia wartości

współczynnika α_b jeśli wyznacza się go przy spadku temperatury, bądź zaniżenia, gdy określa się go przy wzroście temperatury. Pęcznienie betonu wywołane wzrostem wilgotności ośrodka wpływa na wartości α_b przeciwnie tzn. zaniża je przy spadkach temperatury a zawyża przy wzrostach. Powyższe wnioski pozostają słuszne dla całego zakresu zmian wilgotności, w szczególności więc nie ma znaczenia, czy wilgotność betonu jest większa, czy też mniejsza od tej, przy której współczynnik α_b osiąga maksimum [23] . W referowanej pracy [8] uwzględniono także zmienność wielkości α_b wywołaną przez zmiany wilgotności betonu. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o dane uzyskane na zaporze Besko. Wartości α_b wyznaczano na podstawie par kolejnych wyników pomiarów. Z powodu dużych - trudnych do wyjaśnienia - - rozrzutów wartości α_b analizowano statystycznie istotność różnicy między średnimi dwóch zbiorów wyników: wartości α_b wyznaczonych przy spadkach temperatury oraz wartości α_b wyznaczonych przy wzrostach temperatury.
Wynik testowania hipotezy o równości średnich analizowanych zbiorów był pozytywny /na poziomie istotności 5%/. Nie ma więc podstaw do uznania istotności wpływu odkształceń wywołanych zmianami wilgotności betonu na wynik pomiaru w naczyniu zerowym. Niezależnie od powyższych obliczeń w pracy [67] przeprowadzono dodatkowo analizę wartości współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b wyznaczonych na podstawie par pomiarów: pierwszego i któregoś z kolejnych.
Uzyskany ciąg wartości α_b wykazał związek z czasem: początkowo niskie wartości α_b nieco z czasem wzrastały, by ustabilizować się na nowym, wyższym poziomie. Ponieważ różnice temperatur betonu, przy których wyznaczono wartości α_b były prawie bez

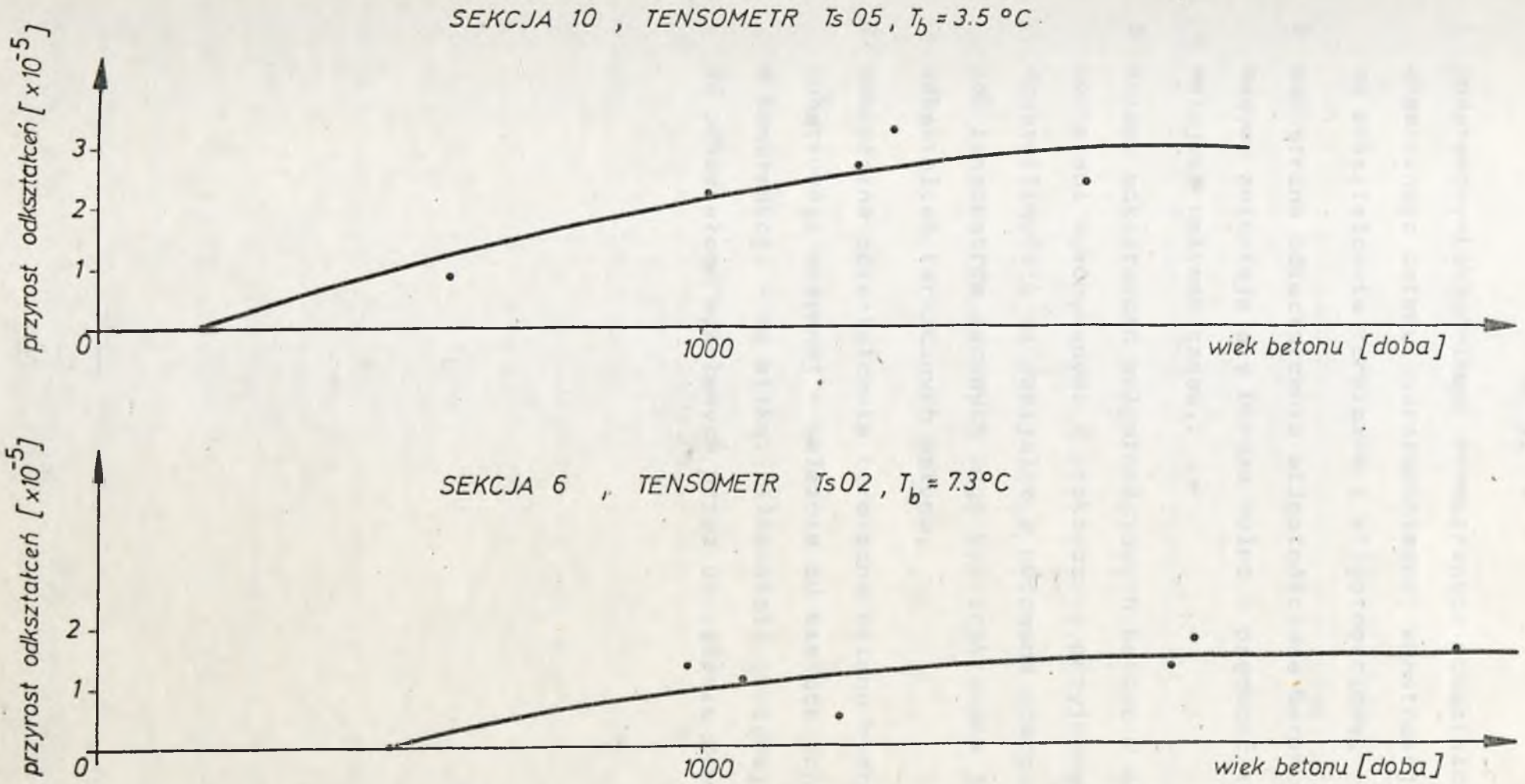
wyjątku ujemne uznano - w świetle wcześniejszych analiz teoretycznych -, że obserwowana zmienność α_b jest wynikiem skurczu wilgotnościowego betonu.

Sposób prowadzenia opisanych wyżej analiz nie daje informacji o wielkości odkształceń wilgotnościowych, co najwyżej mówi o intensywności ich zmian i wpływie na pomiar odkształceń termicznych betonu.

Na podstawie wyników prac [8] i [67] można stwierdzić, że zmiany wilgotności betonu wewnątrz masywu są niewielkie. Najintensywniej przebiegają w pierwszym, kilkumiesięcznym okresie dojrzewania betonu - później zanikają. Ich wpływ na pomiar odkształceń termicznych betonu w naczyniu zerowym ujawnia się tylko wówczas, gdy analizuje się pomiary odległe czasowo, wykonywane w okresie największego nasilenia zmian wilgotności ośrodka.

Wyżej przedstawione wnioski dotyczące wewnętrznych odkształceń wilgotnościowych betonu w konstrukcji masywnej znajdują potwierdzenie w wynikach analizy porównawczej wskazań tensometrów zerowych. Rezultaty takiej analizy przeprowadzonej dla wybranych tensometrów zerowych zapory Besko przedstawiono na rysunku 1. Odkształcenia termiczne betonu eliminowano przez wybór takich pomiarów, które wykonany były w zbliżonych temperaturach ośrodka. Obliczone na podstawie tych wskazań różnice odkształceń traktowano jako przyrosty odkształceń wilgotnościowych betonu, w określonym okresie jego dojrzewania. Łagodne nachylenie krzywych przedstawionych na rysunku 1 wskazuje na znikome zmiany odkształceń wilgotnościowych w czasie.

Podsumowując rozważania tego fragmentu pracy należy stwierdzić, że:



Rys.1 Zmiany odkształceń wilgotnościowych betonu w wybranych naczyniach zerowych zapory Besko.
Opracowanie własne.

1 podstawowymi składnikami wewnętrznego odkształcenia fizyko-chemicznego betonu hydrotechnicznej konstrukcji masywnej są odkształcenia termiczne i wilgotnościowe,

2 wewnętrzne odkształcenia wilgotnościowe betonu wewnątrz masywu zmieniają się bardzo wolno, a prędkość tych zmian maleje z upływem czasu,

3 zmiany odkształceń wilgotnościowych betonu w okresach między pomiarami wykonywanymi z praktycznie przyjmowaną, malejącą częstotliwością są pomijalne, a notowane wówczas zmiany wskazań tensometrów zerowych mogą być traktowane jako efekt odkształceń termicznych betonu,

4 wewnętrzne odkształcenia termiczne betonu hydrotechnicznej konstrukcji masywnej - zależnie od miejsca ich pomiaru w konstrukcji - są kilka, kilkanaście i więcej razy większe od odkształceń wywołanych przez obciążenie zewnętrzne budowli.

2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem rozprawy jest analiza pomiarów wewnętrznych odkształceń termicznych betonu prowadzonych przy użyciu polskich strunowych tensometrów wewnętrznych.

O wadze podjętego zagadnienia decyduje znaczny, często wręcz dominujący, udział odkształceń termicznych ośrodka w całkowitych odkształceniach wewnętrznych betonowych konstrukcji hydrotechnicznych /vide rozdział 1.8/ oraz stosowane sposoby interpretowania wyników pomiarów tensometrycznych /vide rozdział 1.7/. Zdecydowana większość metod interpretowania wyników pomiarów zawiera element określenia i eliminacji odkształceń fizykochemicznych betonu /głównie termicznych/ z odkształcenia całkowitego ośrodka. Jedna z metod interpretacji [17] bazuje na pomiarach jednostkowych odkształceń termicznych betonu i daje szansę określenia naprężeń wywołanych ograniczeniem swobody termicznych odkształceń ośrodka.

W każdym przypadku określenie i eliminacja odkształceń fizykochemicznych betonu są obarczone pewnymi błędami, które przenoszą się na wyniki kolejnych operacji. Skłania to do zwrócenia szczególnej uwagi na sposób i warunki pracy naczyń zerowych i umieszczonych wewnątrz nich tensometrów jako urządzeń powszechnie używanych do określenia wartości odkształceń fizykochemicznych betonu masywnych konstrukcji hydrotechnicznych.

Celem pracy jest określenie błędu pomiaru odkształceń termicznych betonu w naczyniach zerowych, próba identyfikacji jego zasadniczych źródeł oraz sprecyzowanie warunków możliwie najkorzystniejszej pracy naczyń i tensometrów zerowych, w szczególności w świetle wymagań zmodyfikowanej metody oblicza-

nia wyników pomiarów tensometrycznych [17] .
Narzucającym się sposobem realizacji celu pracy jest analizowanie jednostkowych odkształceń termicznych betonu wyznaczanych na podstawie wskazań tensometrów zerowych i zainstalowanych w ich sąsiedztwie termometrów. W ten sposób redukuje się wpływ różnych przebiegów zmian temperatury na analizowaną wielkość odkształcenia termicznego, przez co staje się ona porównywalna niezależnie od wartości różnic temperatur, przy których ją zarejesrtowano. Dodatkową zaletą analizowania jednostkowych odkształceń termicznych betonu /a nie odkształceń termicznych betonu w naczyniu zerowym/ jest możliwość czynienia porównań względnych wskazań czujników z wielkością cechy materiałowej o znanym charakterze /współczynnik odkształcalności cieplnej betonu/. Daje to zawsze cenną możliwość oceny wpływu sposobu pomiaru na badaną wielkość. Analizowanie par kolejnych wskazań czujników pozwala na zaniedbanie odkształceń wilgotnościowych betonu /vide rozdział 1.8/. Uwalnia także od wyboru jednego pomiaru odniesienia /tzw. pomiaru zerowego/ i tym samym zrównuje rangi każdego pomiaru. Dzięki temu każda z wyznaczonych wartości jednostkowego odkształcenia termicznego /współczynnika odkształcalności cieplnej/ jest obciążona błędami zawsze różnej pary pomiarów; eliminuje to ewentualny błąd systematyczny związany z wyborem pomiaru początkowego.
W związku z powyższym zakres pracy obejmuje:

- analizę studialną zjawiska odkształcalności cieplnej betonu, w szczególności w warunkach wnętrza hydrotechnicznej konstrukcji masywnej,
- statystyczny opis błędów /niepewności pomiarowych/ popełnianych przy określaniu jednostkowych odkształceń termicznych

betonu na podstawie wskazań tensometrów zerowych i termometrów pracujących na wybranym obiekcie hydrotechnicznym - - betonowej zaporze ciężkiej w Besku,

- analizę wpływu wybranych czynników na błąd pomiaru odkształcalności cieplnej betonu,
- analizę warunków racjonalnej - z punktu widzenia wyników pomiarów i sposobu ich interpretowania - pracy naczyń zerowych, termometrów i tensometrów umieszczonych wewnątrz masywnej konstrukcji hydrotechnicznej,
- wnioski.

3. ODKSZTAŁCALNOŚĆ CIEPLNA BETONU HYDROTECHNICZNEJ KONSTRUKCJI MASYWNEJ W ŚWIETLE STUDIÓW LITERATUROWYCH.

Przez odkształcenie termiczne ciała określa się wielkość liniowego lub objętościowego odkształcenia wywołanego zmianą temperatury ciała - równomierną w całej jego objętości. Większość materiałów wykazuje odkształcalność termiczną dodatnią tzn. ze wzrostem temperatury zwiększa się i ich odkształcenie. Rozróżnia się liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej α oraz objętościowy współczynnik rozszerzalności cieplnej γ. Wielkości te to względne przyrosty długości i odpowiednio objętości, wywołane przez jednostkowe przyrosty temperatury [35]. Pomiędzy wielkościami α i γ istnieją związki, których postać zależy od cech strukturalnych ciała [23].

Współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu pozostaje w związku z termicznymi współczynnikami odkształcalności jego składników. Zwykle rozpatruje się zaczyn cementowy /lub zaprawę/ i kruszywo - czasami z rozróżnieniem na drobne i grube.

W odniesieniu do zaczynu wprowadza się rozróżnienie: rzeczywiste odkształcenie cieplne /niem. die wahre Wärmedehnung / oraz pozorne odkształcenie cieplne /niem. die scheinbare Wärmedehnung/ i odpowiadające im współczynniki: rzeczywisty współczynnik rozszerzalności cieplnej /niem. der wahre Wärmedehnzahl, ang. true thermal coefficient/ i pozorny współczynnik rozszerzalności cieplnej /niem. der scheinbare Wärmedehnzahl, ang. apparent thermal coefficient/. Pierwsze określenie dotyczy odkształcenia cieplnego wynikającego ze wzmożenia - pod wpływem wzrostu temperatury - - ruchów cieplnych atomów w sieci krystalicznej. Drugie oznacza odkształcenie wywołane również zmianą temperatury, ale pośrednio, bo poprzez zmianę równowagi termodynamicznej pomiędzy wodą zawartą

w żelu i porach kapilarnych zaczynu.
Zjawisko wzajemnego powiązania zmian termicznych i wilgotnościowych [5] obserwuje się szczególnie wyraźnie przy szybkich zmianach temperatury zaczynu, kiedy to odkształcenie zmienia się gwałtownie, a przy kilkugodzinnym utrzymywaniu temperatury końcowej ustala się na poziomie innym niż zarejestrowany tuż po jej osiągnięciu [78] . Z uwagi na zaobserwowaną przy tym wymianę wody z otoczeniem zjawisko to ma raczej charakter skurczu /lub pęcznienia/ wywołanego przez zmianę temperatury [78] , a nie pełzania pod działaniem ciśnienia wody zamkniętej w porach [23] .
Czynnikami wpływającymi na wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej stwardniałego zaczynu cementowego są według pozycji [23] : skład mineralogiczny cementu, stopień jego zmielenia, czas dojrzewania, zawartość wilgoci, wskaźnik cementowo-wodny, dodatki i domieszki, temperatura.
Czynniki te w różnym stopniu oddziaływują na składnik rzeczywisty i pozorny termicznego odkształcenia zaczynu.
Drugim składnikiem betonu /obok zaczynu cementowego/ - istotnym z punktu widzenia cech termicznych - jest kruszywo. W większości przypadków jest to materiał naturalny - otoczakowy lub łamany, o strukturze anizotropowej. Trudno więc posługiwać się współczynnikiem termicznej rozszerzalności liniowej, jako że ten zależy od kierunku. Podobnie z powodu niejednorodnego składu mineralogicznego kruszyw poprawniej jest - a ze względów praktycznych także wygodniej - oznaczać współczynnik objętościowy, a do liniowego /uśrednionego/ przechodzić poprzez odpowiednie zależności.
Obszerne dane dotyczące odkształcalności cieplnej skał kruszyw przedstawiono w pozycji [23] . Pośród czynników wpływających na

wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej skał pozycja ta wymienia: teksturę i strukturę, zawartość wilgoci i temperaturę. Pozycja [86] dodaje jeszcze uziarnienie kruszywa otoczakowego, będące - podobnie jak współczynnik odkształcalności cieplnej - konsekwencją niejednorodności jego składu mineralogicznego.

Próbka betonowa znajdująca się w naczyniu zerowym, czy też beton otaczający rozetę tensometryczną, mają skład ustalony i niezmienny, wynikający z receptury mieszanki i uzyskanego stopnia jednorodności wytworzonego betonu. O wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu w danym miejscu konstrukcji decydują wszystkie te czynniki, które wpływają na odkształcalność cieplną zaczynu cementowego i kruszywa. O możliwej zmienności tego parametru mogą już jednak decydować bezpośrednio tylko te czynniki, które będą się zmieniać i to w sposób istotny dla zjawiska odkształcalności cieplnej ośrodka /pozostałe - - już ustalone - determinują jedynie sposób rejestrowanej zmienności/. Do czynników wpływających na zmienność odkształcalności cieplnej betonu o ustalonym składzie zaliczyć należy: - czas dojrzewania, zawartość wilgoci, temperaturę i szybkość jej zmian.

Kruszywo jest materiałem o ustabilizowanych wartościach współczynnika odkształcalności cieplnej. W szerokim zakresie warunków parametr ten jest praktycznie stały. Tak więc zmienność współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu wynika z obecności i cech zaczynu cementowego. Zmienność tę ogranicza obecność kruszywa i to tym bardziej, im jest go więcej.

W literaturze przedmiotu z reguły nie spotyka się wyników badań betonu w pełnych zakresach zmienności tych wszystkich czynników, którym poddaje się w badaniach zaczyn cementowy i kruszywo. Wynika to przede wszystkim z dążenia do uzyskania wyników, możliwych do wykorzystania w prognozowaniu odkształcalności cieplnej betonów o różnym składzie; realizuje się to poprzez różne formuły obliczeniowe [23], [28], [86].

Z tych względów poniżej opisano wpływ czasu dojrzewania i wilgotności na zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego a następnie, wykorzystując recepturę betonu, w którym pogrążono czujniki tensometryczne w zaporze Besko i formułę obliczeniową Dettlinga [23] oszacowano możliwą maksymalną zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej tego betonu w funkcji wilgotności i czasu dojrzewania jako parametru. Określenie wartości współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory było niemożliwe z powodu braku danych o składzie petrograficznym użytego kruszywa.

Czas dojrzewania o ile niemal wcale nie wpływa na rzeczywisty współczynnik rozszerzalności cieplnej zaczynu cementowego, o tyle znacząco zmienia pozorny. Wiąże się to z przebiegiem procesu hydratacji. Pozorny współczynnik rozszerzalności cieplnej osiąga maksimum po 1 - 2 latach i maleje z czasem, by po około 15 latach przyjąć wartość niewiele większą niż połowa wartości początkowej. Dla okresów kilkudziesięcioletnich pozorny współczynnik odkształcalności cieplnej spada prawdopodobnie do zera, a całkowity sprowadza się do swojej części rzeczywistej. Czas, po którym osiągane jest maksimum pozornej odkształcalności termicznej, jak i wartość tego maksimum zależą od rodzaju cementu i stopnia jego zmielenia, czyli czyn-

ników wpływających na przebieg hydratacji. Informacje powyższe dotyczą zaczynu dojrzewającego w temperaturach dodatnich. Wraz ze zmianą warunków temperaturowych przebieg zmian współczynnika rozszerzalności cieplnej zaczynu może być inny [78]. Silnie oddziaływuje na pozorny współczynnik rozszerzalności cieplnej zaczynu zawartość wilgoci. Ta zaś - w warunkach równowagi - zależy od wilgotności środowiska. Czynnik ten wraz z temperaturą określa stosunek podziału globalnej ilości wody w zaczynie pomiędzy żel a pory kapilarne. Zależność współczynnika rozszerzalności cieplnej zaczynu od wilgotności względnej środowiska posiada ekstremum /maksimum/ będące w istocie maksimum składnika pozornego, który spada do zera przy próbkach całkowicie wysuszonych bądź nawodnionych [23] ; współczynnik rzeczywisty pozostaje stały. Dla młodego zaczynu owo maksimum występuje w przedziale wilgotności względnych powietrza od 60 do 80%, a dla starych zaczynów w przedziale od 40 do 60%.

Dettling [23] zjawisko występowania maksimum współczynnika rozszerzalności cieplnej zaczynu cementowego wiązał z ekstremum "sumarycznej siły kapilarnej". W świetle modelu betonu zaproponowanego przez Wittmanna [77] jest ono związane ze zmianą charakteru oddziaływań międzyfazowych jaka dokonuje się w tych właśnie przedziałach wilgotności.

Według Dettlinga [23] współczynnik odkształcalności cieplnej betonu wyraża się wzorem:

$$\alpha = (\alpha_z - \alpha_k)\cdot C + \alpha_k \qquad /8/$$

gdzie: α_z - współczynnik odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego,

α_k - współczynnik odkształcalności cieplnej kruszywa,

C - stała zależna od zawartości procentowej /% obj./ kruszywa x, obliczana według wzoru

$$C = \left(\frac{100 - x}{100}\right)^n \qquad /9/$$

Opierając się na wynikach badań doświadczalnych uzyskanych przez różnych badaczy Dettling [23] ustalił, że wartość wykładnika n zawiera się w przedziale od 0.8 do 2.6; sam przyjął n = 1.5.

Współczynnik odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego α_z oblicza się według wzoru:

$$\alpha_z = \alpha_R + k \cdot \max \alpha_P \cdot a \qquad /10/$$

w którym: α_R - rzeczywisty współczynnik odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego,

k - współczynnik empiryczny zależny od wilgotności środowiska i czasu dojrzewania betonu,

a - współczynnik empiryczny zależny od czasu dojrzewania betonu,

$\max \alpha_P$ - największa wartość pozornego współczynnika odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego liczona według wzoru:

$$\max \alpha_P = \max \alpha - \alpha_R \qquad /11/$$

gdzie: $\max \alpha$ - największa wartość współczynnika odkształcalności cieplnej zaczynu cementowego,

α_R - jak wyżej.

W przypadku betonu o ustalonym składzie za niezmienne można uznać następujące wielkości występujące we wzorach /8/ - /11/: α_k, C, α_R, max α.

W zależności od czasu dojrzewania i wilgotności środowiska zmieniać się będzie tylko jeden składnik formuły na współczynnik odkształcalności cieplnej betonu. Po odpowiednich przekształceniach wyżej przedstawionych wzorów określić go można następująco:

$$\Delta\alpha = C \cdot a \cdot k \cdot (\max\alpha - \alpha_R) \qquad /12/$$

gdzie: $\Delta\alpha$ - zmienna część współczynnika odkształcalności cieplnej betonu, pozostałe oznaczenia - jak wyżej.

Z informacji zawartych w pracy [33] wynika, iż betony zapory Besko wykonywano - zgodnie z praktyką strefowania masywu - - według dwóch różnych receptur. Beton tych bloków masywu, w których instalowano czujniki tenso - i termometryczne sporządzono na podstawie jednej z mieszanek podstawowych - odpowiednio zaadaptowanej. W recepturze ograniczono maksymalny wymiar ziarn kruszywa do 40 mm, co wywołało nieznaczny wzrost ilości zaczynu cementowego /do 23.7% objętości/ i spadek zawartości kruszywa /do 76.3% objętości betonu/.

W ten sposób zapewniono dobre otulenie czujników i poprawiono stosunek długości bazy tensometrów /150 mm/ do wymiarów największych ziarn kruszywa. Betony zapory Besko wykonywano przy użyciu cementu hutniczego.

Według Dettlinga [23] dla tego rodzaju cementu maksymalna wartość współczynnika odkształcalności cieplnej zaczynu /max α /

waha się od $20 \cdot 10^{-6}/^{o}C$ do $23 \cdot 10^{-6}/^{o}C$, a wartość rzeczywistego współczynnika odkształcalności cieplnej / α_R / od $8.5 \cdot 10^{-6}/^{o}C$ do $10.0 \cdot 10^{-6}/^{o}C$. Ponieważ interesująca jest maksymalna możliwa zmienność wielkości α, dlatego do obliczeń wzięto skrajne wartości maxα i α_R, tak aby ich różnica występująca we wzorze /12/ była największa. Otrzymano:

$23 \cdot 10^{-6}/^{o}C - 8.5 \cdot 10^{-6}/^{o}C = 14.5 \cdot 10^{-6}/^{o}C$.

Dla X = 76.3% i n = 1.5 otrzymano ze wzoru /9/ wartość $C \cong 0.12$. Wartości k zaczerpnięto z tablicy 14 pracy [23]. Podano je tam w zależności od wilgotności względnej środowiska i wieku betonu /do 1 roku i powyżej 15 lat/. Odpowiadające tym czasom dojrzewania wartości parametru a wynoszą odpowiednio: 1.0 oraz 0.7 - 0.5.

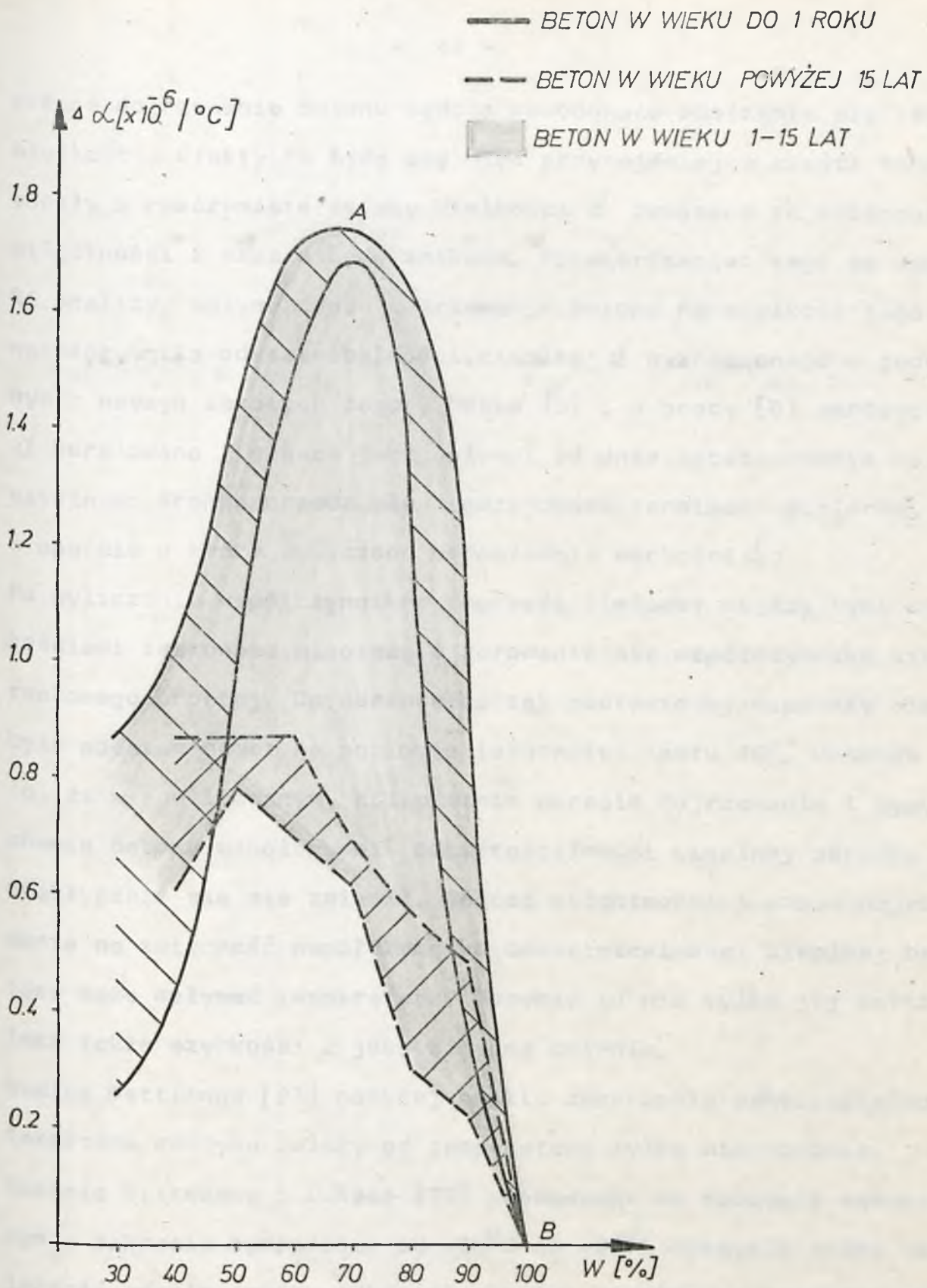
Chcąc określić maksymalną zmienność wielkości α w czasie i w następstwie zmian wilgotności do obliczeń wzięto skrajne wartości parametru k tj. górne i dolne ograniczenia ich zakresu zarówno dla betonu wieku do 1 roku jak i betonu dojrzewającego dłużej niż 15 lat. Z analogicznego powodu dla betonu w wieku powyżej 15 lat wzięto a = 0.5.

Obliczone według wzoru /12/ wartości $\Delta\alpha$ przedstawiono w tablicy 1 oraz wykreślnie na rys. 2.

Analiza uzyskanych wyników wykazuje, że maksymalna możliwa zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej rozpatrywanego betonu wynosi około $1.74 \cdot 10^{-6}/^{o}C$ /różnica rzędnych punktów A i B z rysunku 2/. Jeśli jednak wziąć pod uwagę rzeczywiste warunki wilgotnościowe betonu w masywie /vide rozdział 1.8/, to stwierdzić należy, że o ile postępujące wysychanie masywu i związany z tym spadek wilgotności betonu powodować będzie wzrost współczynnika odkształcalności cieplnej ośrodka, o tyle jedno-

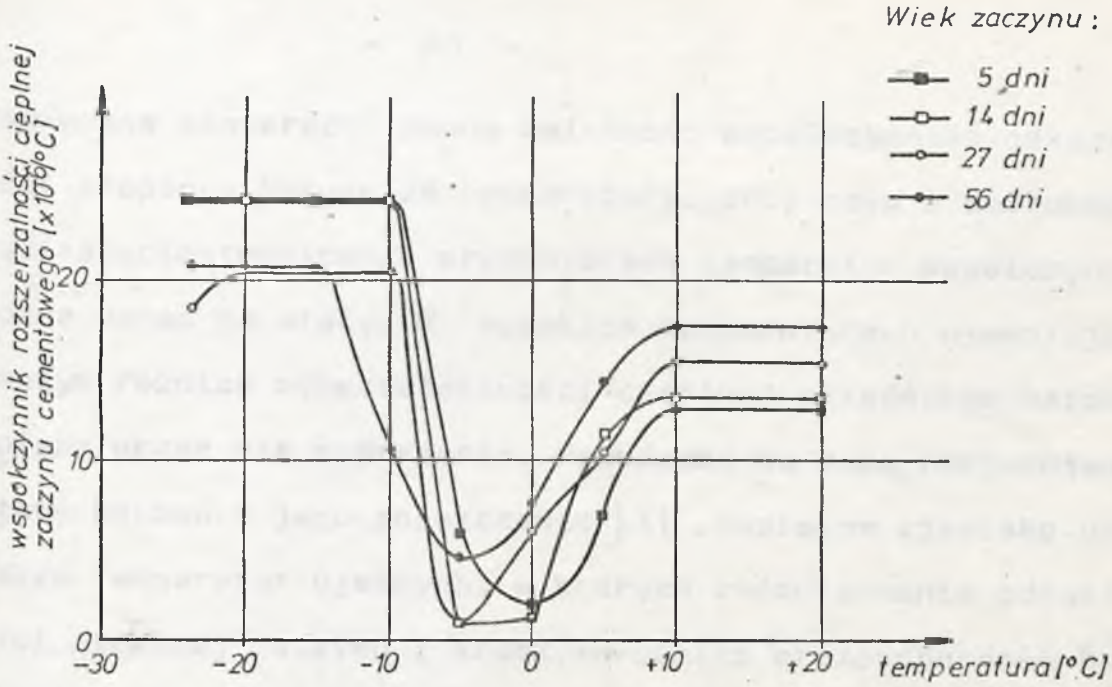
TABLICA 1. Wartości zmiennej części współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko w blokach z tensometrami; / $\cdot 10^{-6}/^{o}C$ /.

Wilgotność środowiska /%/	Wiek betonu: do 1 roku	Wiek betonu: powyżej 15 lat
30	0.26 - 0.87	-
40	0.44 - 1.04	0.61 - 0.87
50	0.96 - 1.43	0.78 - 0.87
60	1.51 - 1.71	0.70 - 0.87
70	1.69 - 1.74	0.61 - 0.70
80	1.30 - 1.65	0.30 - 0.57
90	0.35 - 1.04	0.22 - 0.48
100	0	0



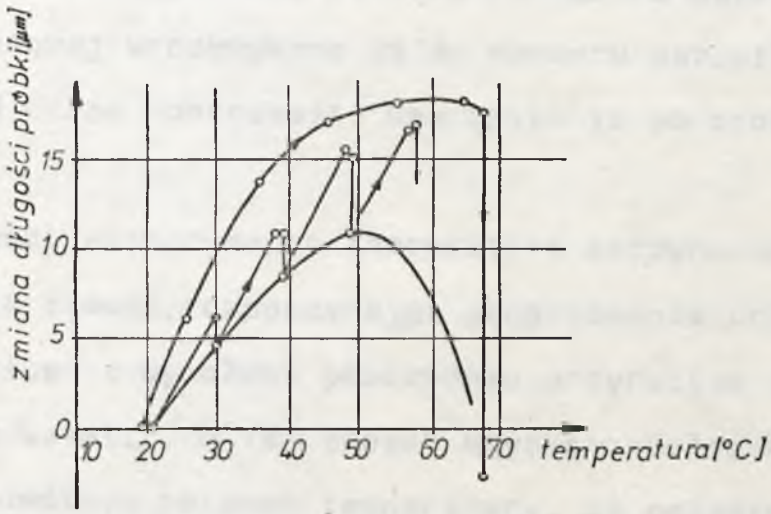
Rys. 2 Zakresy zmiennej części współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko w bloku z tensometrami. Opracowanie własne.

czesne dojrzewanie betonu będzie powodowało obniżanie się tej wielkości. Efekty te będą się więc przynajmniej w części kompensowały, a rzeczywiste zmiany wielkości α związane ze zmianami wilgotności i czasem będą znikome. Potwierdzeniem tego są wyniki analizy wpływu czasu dojrzewania betonu na wielkość jego współczynnika odkształcalności cieplnej α wyznaczonego w jednym z naczyń zerowych zapory Besko [8]. W pracy [8] wartości α korelowano z czasem jaki upływał od dnia zabetonowania naczynia do środka przedziału między dwoma terminami pomiarów, w oparciu o które wyliczono odpowiednie wartości α.
Po wyliczeniu współczynników regresji liniowej między tymi wielkościami testowano hipotezę o zerowaniu się współczynnika kierunkowego prostej. Do odrzucenia tak postawionej hipotezy nie było podstaw nawet na poziomie istotności testu 40%. Oznacza to, że w analizowanym, kilkuletnim okresie dojrzewania i wysychania betonu współczynnik odkształcalności cieplnej ośrodka praktycznie się nie zmienił. Oprócz wilgotności i czasu dojrzewania na zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej betonu może wpływać temperatura. Dotyczy to nie tylko jej wartości lecz także szybkości z jaką się ona zmienia.
Według Dettlinga [23] powyżej punktu zamarzania odkształcalność termiczna zaczynu zależy od temperatury tylko nieznacznie. Badania Wittmanna i Lukasa [78] prowadzone na zaczynie cementowym w zakresie temperatur od -30°C do +20°C wykazały silną zależność współczynnika odkształcalności cieplnej w zakresie temperatur od -10°C do +10°C /rys. 3/. Wielkość ta osiąga minimum w przedziale od -5°C do 0°C, po około 10 dniach hydratacji. Badania opisane w pozycji [86] dotyczyły betonów o różnym składzie i temperatur od +30°C do +180°C. Na podstawie uzyskanych



Rys. 3 Liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej zaczynu cementowego w funkcji temperatury.

Próbki dojrzewały i były badane w powietrzu o wilgotności względnej 100 %. Wiek próbek w chwili badania od 5 do 56 dni. [78]



Rys. 4 Zmiana długości próbki przechowywanej w wodzie w funkcji temperatury.

Wyższą krzywą uzyskano przy prędkości zmian temperatury równej 2°C/min, zależną od czasu kontrakcję zaznaczono linią pionową.

Wykres w kształcie piły otrzymano gdy temperaturę podnoszono etapami po około 10°C utrzymując każdorazowo podniesioną temperaturę do momentu ustania kontrakcji zależnej od czasu. [78]

wyników można stwierdzić pewną zależność współczynnika odkształcalności cieplnej betonu od temperatury, przy czym w szerokich, kilkudziesięciostopniowych przedziałach temperatur współczynnik ten można uznać za stały. W wysokich temperaturach ujawniają swój wpływ różnice odkształcalności cieplnej składników betonu i wywołane przez nie naprężenia. Powodować to może rozluźnienie struktury betonu i jego zniszczenie [1] . Opisane zjawisko dotyczy także temperatur ujemnych, w których zróżnicowanie odkształcalności cieplnej zaczynu i kruszywa obniża mrozoodporność betonu [56] .

Zależność zjawiska odkształcalności cieplnej zaczynu od szybkości zmian temperatury wynika z wzajemnego powiązania zmian temperaturowych i wilgotnościowych. Wyniki badań w tym zakresie przedstawiono w pozycji [78] . Ilustruje je rysunek 4.

Temperaturę próbki z zaczynu cementowego zmieniono od +19.5°C do 67.6°C z szybkością 2°C/min /krzywa górna/. Po osiągnięciu temperatury końcowej utrzymywano ją do momentu ustabilizowania się zależnej od czasu kontrakcji. Nastąpiło to po około 3 godzinach.

W następnej części eksperymentu temperaturę zaczynu zmieniano etapami, o kilka stopni, rozpoczynając podgrzewanie próbki w chwili, gdy odkształcenie wywołane poprzednim przyrostem temperatury zdążyło się już ustalić. W ten sposób uzyskano dolną krzywą odpowiadającą tak powolnym zmianom temperatury, że rejestrowane przy tym odkształcenie nie zależy od czasu.

Na podstawie wyżej przytoczonych danych średnią prędkość takich zmian temperatury można określić jako równą 0.24°C/min.

Powszechnie przyjmuje się, że współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu jest przy rozszerzaniu i kurczeniu się ośrodka taki sam. Jest to pogląd na tyle ugruntowany i praktycznie użyteczny, że uznaje się go mimo zgoła odmiennych wniosków wynikających z badań. I tak pozycja [28], powołując się na wyniki odpowiednich eksperymentów, stwierdza, że współczynnik odkształcalności cieplnej betonu jest wyższy przy ekspansji ośrodka niż przy jego kontrakcji.

Istotnym zagadnieniem dotyczącym odkształcalności termicznej betonu jest wpływ cyklicznych zmian temperatury na jednostkową odkształcalność cieplną tego materiału.

Emanuel i Hulsey [28] przytaczają wyniki badań, w których stwierdzono, że 100 cykli zmian temperatury w zakresie od -9°C do +54°C spowodowało obniżenie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu o 14,1%.

Należy sądzić, że decydujące znaczenie dla uzyskanego rezultatu badań miał zakres zmienności temperatury, w szczególności zamarzanie i odmarzanie betonu. Zjawiska te wywołują istotne zmiany strukturalne związane z rozluźnieniem struktury betonu.

Kolejnym zjawiskiem związanym z wpływem temperatury na odkształcalność cieplną zaczynu cementowego jest nieodwracalność pewnej części odkształcenia termicznego przy cyklicznej zmianie temperatury; po pewnej liczbie cykli wartość odkształcenia rezydualnego ustala się.

Opisane zjawisko występuje przy próbkach nawodnionych oraz częściowo wysuszonych i wiąże się prawdopodobnie z tymi cechami zaczynu, które są odpowiedzialne za pozorną jego odkształcalność [23].

Przy podgrzewaniu betonu do wysokiej temperatury i jego ochłodzeniu pojawia się odkształcenie rezydualne - wywołane zmianami strukturalnymi ośrodka, wynikającymi z różnic odkształcalności cieplnych poszczególnych składników betonu.

Opisane wyżej związki temperatury i współczynnika odkształcalności cieplnej betonu sprowadzić można do wpływu, jaki mogą mieć na rozpatrywaną wielkość następujące czynniki:

- wartość temperatury,
- szybkość zmian temperatury,
- kierunek zmian temperatury,
- cykliczność zmian temperatury.

Poniżej przeanalizowano istotność i wielkość wpływu tych czynników na odkształcalność cieplną betonu w konstrukcji masywnej.

Temperatura betonu hydrotechnicznej konstrukcji masywnej zmienia się w sposób cykliczny. Wynika to z okresowej zmienności temperatur powietrza atmosferycznego, wody i podłoża, z którymi budowla się kontaktuje.

Jak wynika z przedstawionych wyżej informacji może to być źródłem nieodwracalnych odkształceń termicznych.

Należy jednak zaznaczyć, że stosowany w dysertacji sposób analizowania odkształceń cieplnych betonu /zbiory wartości współczynnika odkształcalności cieplnej wyznaczone na podstawie par kolejnych pomiarów/, wyklucza możliwość uchwycenia ewentualnych rezydualnych odkształceń termicznych.

A jeśli nawet odnieść poszczególne pomiary odkształceń w naczyniu zerowym do pomiaru początkowego i sprowadzić pomierzone wartości do jednej temperatury i tym samym wyodrębnić składową odkształcenia w jakiś sposób zależną od czasu, to interpretacja

tej wielkości nie będzie jednoznaczna. Uzyskany wynik można bowiem traktować jako nieodwracalną część odkształceń termicznych lub też jako efekt zmian wilgotności /vide rozdział 1.3. i rys. 1/.

Wpływ znaku zmian temperatury na wartości jednostkowej odkształcalności cieplnej betonu wyznaczane wewnątrz masywu /w naczyniach zerowych/ należy uznać za nieistotny. Świadczą o tym cytowane już wcześniej rezultaty porównań przedstawionych w pracach [67] i [8] .

Analiza zjawisk termicznych zachodzących wewnątrz masywów betonowych [37] , [76] wskazuje, że największe prędkości zmian temperatury betonu występują w okresie tzw "uderzenia termicznego" tj. w czasie intensywnego wydzielania się ciepła hydratacji cementu. Zjawisko to zaczyna się w trakcie betonowania lub tuż po nim i trwa kilkadziesiąt godzin. Temperatura osiąga maksimum w okresie pierwszych 24 - 48 godzin by później wolno opadać. Analiza danych pomiarowych np. [11] i [10] - typowych dla betonowania zapór - wskazuje, że maksymalne prędkości zmian temperatury betonu są zdecydowanie mniejsze od wartości 0.24^{o}C/min /wartość tę określono na podstawie wyników pracy [78]; jej przekroczenie powoduje wystąpienie odkształceń termicznych zaczynu cementowego zależnych od czasu/. To, że graniczna wartość szybkości zmian temperatury betonu wewnątrz konstrukcji nie jest przekraczana świadczy o tym, że szybkość ta nie wpływa na mierzone wartości wewnętrznych odkształceń termicznych. Powyższe uwagi dotyczą wnętrza masywu. W strefach przyściennych narażonych na intensywne nasłonecznienie mogą zachodzić szybsze zmiany temperatury betonu. Z racji krótkiego czasu trwania takiego oddziaływania, zasięg jego jest jednak niewielki.

Zwykle też większość czujników tensometrycznych - szczególnie zerowych - umieszczana jest głębiej.

Wpływ wartości temperatury na odkształcalność cieplną betonu wewnątrz masywu zapory można oszacować na podstawie zakresu jej zmian, danych zawartych na rysunku 3 i receptury betonu. Niżej przedstawiona analiza dotyczy betonu zapory Besko w blokach z czujnikami. Z wykresów zmian temperatur betonu pomierzonych wewnątrz zapory Besko [11] wynika, że zawierały się one w przedziale od $0^{o}C$ do prawie $+30^{o}C$.

Należy zauważyć, że tak szeroki zakres zmian temperatur wnętrza konstrukcji wynika z włączenia do analiz okresu budowy zapory. Wówczas bowiem występuje "uderzenie termiczne" /górna granica przedziału/ i łatwiejsze jest przemarzanie betonu w strefie rozlokowania czujników /dolna granica przedziału/.

W okresie normalnej eksploatacji obiektu /po ostygnięciu bloków i napełnieniu zbiornika/ tak duże /i większe/ wahania temperatur betonu mogą wystąpić tylko tuż przy ścianie odpowietrznej zapory.

W zakresie temperatur od $0^{o}C$ do $+30^{o}C$ zmienność współczynnika rozszerzalności cieplnej zaczynu cementowego - określona na podstawie rysunku 3 - wynosi maksymalnie około $12 \cdot 10^{-6}/\ ^{o}C$ /dla zaczynu w wieku 14 dni/, przy czym koncentruje się cała w przedziale od $0^{o}C$ do $+10^{o}C$.

Właściwości cieplne zaczynu wpływają na cechy cieplne betonu proporcjonalnie do swego udziału objętościowego /vide wzór /8//.

Maksymalna zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko /w blokach z tensometrami/ związana ze zmianami temperatury ośrodka - liczona według przytoczonej już

formuły Dettlinga [23] - wynosi około $1.44 \cdot 10^{-6}/\,^{o}C$ /przy objętościowej zawartości zaczynu 23.7%/.

Oszacowana zmienność współczynnika odkształcalności cieplnej wywołana zmianami wartości temperatury ma charakter ograniczenia górą. W praktyce bowiem wyznacza się sieczny a nie styczny współczynnik odkształcalności cieplnej jak to uczyniono w pracy [78] , z której pochodzi rysunek 3.

Sieczny współczynnik odkształcalności cieplnej wiąże różnicę dwóch wartości temperatury. Z istoty biernego charakteru pomiarów tensometrycznych prowadzonych "in situ" wynika, że wartości te lokują się w obrębie pewnego przedziału zmienności w sposób losowy. Losowo też zmieniać się będzie wartość współczynnika odkształcalności cieplnej. W większości przypadków zmiany te będą mniejsze od wartości granicznej szacowanej na $1.44 \cdot 10^{-6}/^{o}C$.

Na podstawie rozważań i szacunków będących treścią tego rozdziału można stwierdzić, że współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu hydrotechnicznego określony w warunkach higrotermicznych wnętrza konstrukcji masywnej jest wartością praktycznie rzecz biorąc stałą.

4. ODKSZTAŁCALNOŚĆ CIEPLNA BETONU HYDROTECHNICZNEJ KONSTRUKCJI MASYWNEJ W ŚWIETLE WYNIKÓW POMIARÓW PROWADZONYCH "IN SITU".

4.1. INFORMACJE DOTYCZĄCE ZBIORU DANYCH POMIAROWYCH.

Zbiór danych pomiarowych został ograniczony do źródeł polskich. Krajowe doświadczenia w dziedzinie pomiarów odkształceń wewnętrznych w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych ograniczają się do kilku zaledwie obiektów i tylko dwóch rodzajów stosowanej aparatury: elektrooporowej i strunowej [38], [68]. Czujniki strunowe - pozostające w centrum zainteresowania pracy - zainstalowano, jak dotąd, na trzech obiektach hydrotechnicznych - - zaporach w Solinie, Besku i Dobczycach.

Biorąc pod uwagę dalsze zamierzenia realizacyjne związane z instalowaniem polskiej tensometrycznej aparatury strunowej ze zbioru danych pomiarowych wyłączono Solinę, jako że tam zastosowano aparaturę czechosłowackiej firmy KOVO-METRA. Dodatkowym argumentem na rzecz tej decyzji był fakt systematycznego interpretowania wyników tych pomiarów przez zespół IBW PAN z Gdańska. Prace interpretacyjne tego ośrodka zaowocowały licznymi publikacjami: [16] ÷ [19] , [40] ÷ [49]. Są one, obok kilku corocznych sprawozdań [84] , [85], często w dysertacji przytaczane.

Dane pomiarowe z Dobczyc okazały się nieprzydatne dla pracy z racji niewielkiej ich liczby. Ciągi pomiarów są krótkie /montaż czujników zakończono w roku 1984/ i niepełne /przerwy w pomiarach/. Dotychczasowe wyniki tych pomiarów wykazują jednak pełną analogię do odpowiadających im czasowo /licząc od dnia zabetonowania/ wyników uzyskanych w Solinie czy Besku.

Wniosek ten jest oczywisty w świetle porównań wykresów zamieszczanych w pracach [9] , [10] , [12] i [66] z wykresami z pozycji np. [11] . Powyższe względy zdecydowały o sprowadzeniu zbioru analizowanych danych pomiarowych do danych uzyskanych na zaporze Besko.

Obiekt Besko to zapora betonowa typu ciężkiego, zlokalizowana na rzece Wisłoku, w przekroju Sieniawa, jeden kilometr powyżej miejscowości Besko. Powierzchnia zlewni w tym przekroju wynosi 207 km^2, przepływ średni w profilu przegrody 2.25 m^3/s, a przepływ 0.1% - 535 m^3/s.

Maksymalna wysokość sekcji przelewowych wynosi 38 m, szerokość w koronie 9.5 m, a długość wzdłuż osi 174 metry. Całkowita kubatura betonów wynosi 64 000 m^3. Zapora posadowiona jest na fliszu karpackim.

W wyniku wzniesienia przegrody powstał zbiornik o całkowitej pojemności 16 mln m^3 i maksymalnej powierzchni zalewu 131 ha /przy maksymalnej rzędnej piętrzenia 337.00 m n.p.m./.

Umieszczenie wewnątrz korpusu zapory pomieszczeń ujęcia wody i mechanizmów zamknięć spustów sprawiło, że sekcje o numerach 7,8,9 i 10 osłabione są znacznymi względem swoich wymiarów pustkami. Z punktu widzenia charakteru pracy konstrukcji wywołuje to niekorzystne koncentracje naprężeń. Potwierdziły to rezultaty badań elastooptycznych [69] oraz wyniki obliczeń stanu odkształceń i naprężeń przeprowadzone metodą elementów skończonych dla sekcji nr 8 [34] .

Celem pomiarów tensometrycznych miało być określenie naprężeń panujących w newralgicznych dla bezpieczeństwa konstrukcji miejscach masywu. Wytypowano je na podstawie badań modelowych

i obliczeń. Projekt rozmieszczenia czujników [64] przewidywał zainstalowanie ich w trzech sekcjach zapory: nr 6, 8 i 10. Postanowiono wykorzystać polską aparaturę strunową - czujniki tensometryczne typu SCO wb - 150 /rys.5/ oraz czujniki termometryczne typu SCT wb-100 /rys. 6/.

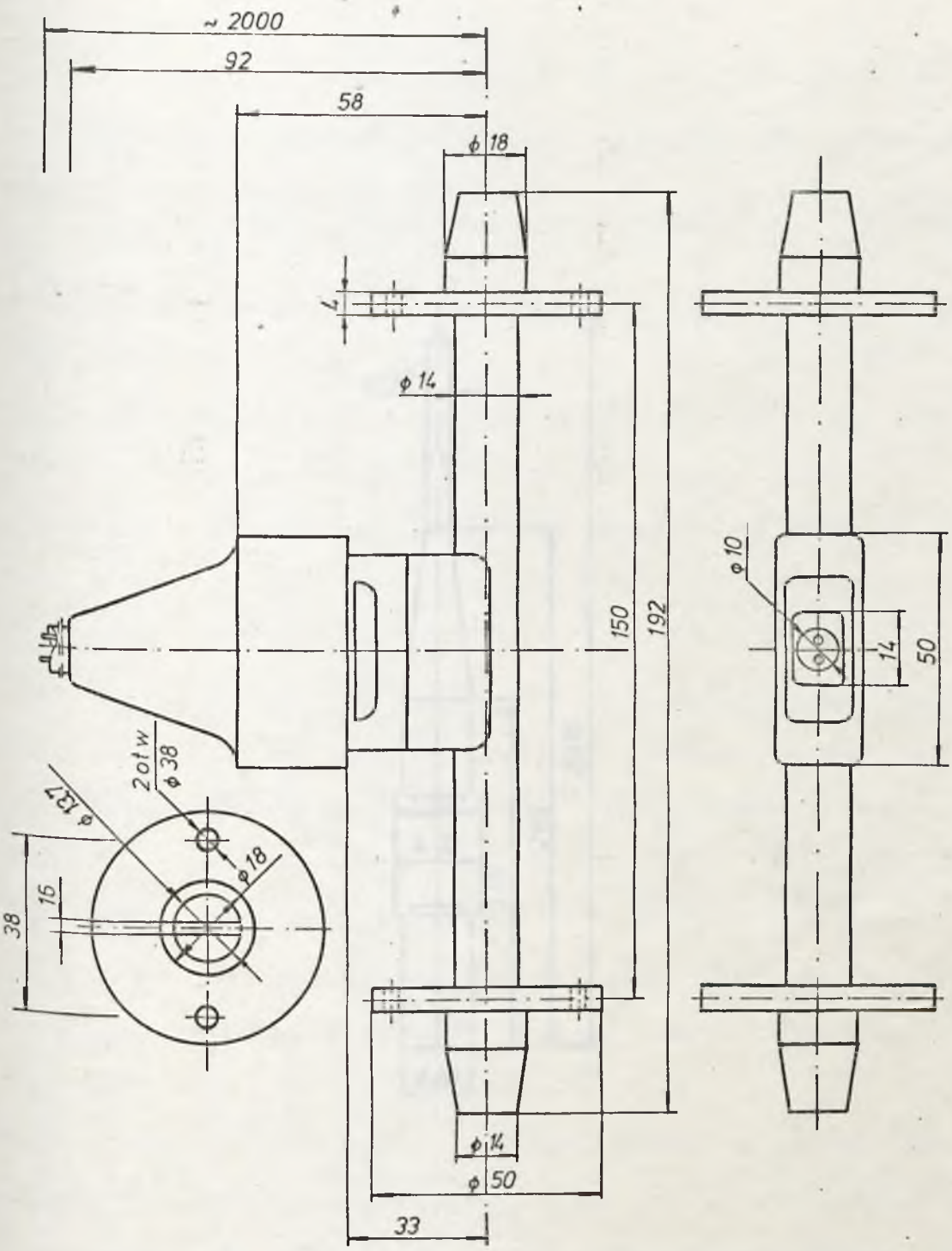
W sekcjach z dużymi otworami /sekcje nr 8 i 10/ tylko najwyższe poziomy pomiarowe potraktowano jako wyłącznie termometryczne; w pozostałych - zlokalizowanych w bliskim sąsiedztwie komory pompowni - zaprojektowano rozety wachlarzowe, termometry i naczynia zerowe.

W każdej z sekcji przewidziano jedno urządzenie do badania bezpośrednio w masywie współczynnika sprężystości i współczynnika Poissona betonu.

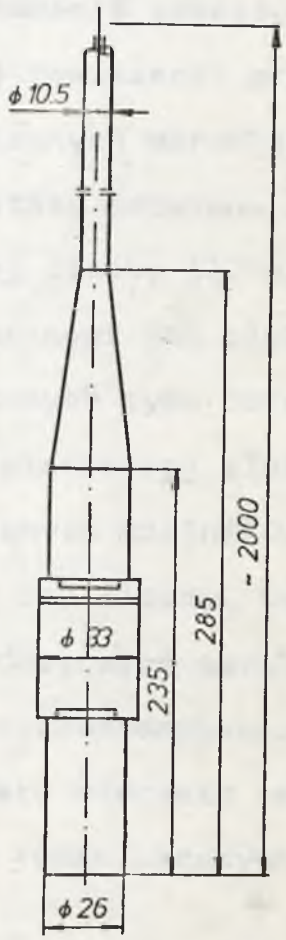
Idea umieszczania czujników temperaturowych w pobliżu korony zapory zrodziła się z doświadczeń solińskich i miała na celu uzupełnienie obrazu pola temperatur konstrukcji, tak istotnego z punktu widzenia interpretacji wskazań aparatury tensometrycznej.

Projekt przewidywał, że obok każdej rozety tensometrycznej umieszczone zostanie naczynie zerowe z tensometrem zerowym /biernym/ i dwa termometry. Dublowanie termometrów - także w najwyższych, termometrycznych poziomach pomiarowych - miało zapewnić wzajemną kontrolę ich wskazań oraz podnieść niezawodność pomiarów.

Na poziomach tensometrycznych każdej z wytypowanych sekcji, w pobliżu ścian: odwodnej i odpowietrznej przewidziano po dwa tensometry - jeden umieszczony poziomo wzdłuż osi zapory, a drugi prostopadle do pierwszego i równolegle do płaszczyzny ściany. Każdej takiej parze tensometrów miały towarzyszyć



Rys. 5 Czujnik strunowy do pomiaru odkształceń wewnątrz betonu konstrukcji MERA-PIAP (Polska) typu SCO wb-150.



Rys. 6 Czujnik strunowy do pomiaru temperatury wewnątrz betonu konstrukcji MERA-PIAP (Polska) typu SCT wb – 100.

dwa termometry.

Już po rozpoczęciu betonowania sekcji zapory okazało się, że ilości dostarczonych na budowę czujników nie zaspokajają wymagań sprecyzowanych w projekcie. Nadto jakość aparatury nie zawsze była dostateczna, a dostawy nie były skoordynowane z harmonogramem betonowania sekcji. Czynniki te sprawiły, że odstąpiono od ścisłej realizacji projektu poprzestając na wykonaniu możliwego w opisanych warunkach zakresu prac instalacyjnych. Przebieg montażu omówiono w pozycji [38] .

W efekcie z planowanej liczby 117 czujników SCOwb-150 zamontowano jedynie 89, co stanowi 76% ilości projektowanej. Z 98 czujników termometrycznych typu SCTwb-100 zainstalowano tylko 7 sztuk tj. około 7% planowanej ilości. Drastyczne ograniczenie ilości zainstalowanych czujników pogłębiła jeszcze zawodność działania pewnej ich liczby. Według pozycji [83] , z której pochodzą dane dotyczące ostatecznego rezultatu prac instalacyjnych, już po zabetonowaniu zepsuło się 8% czujników.

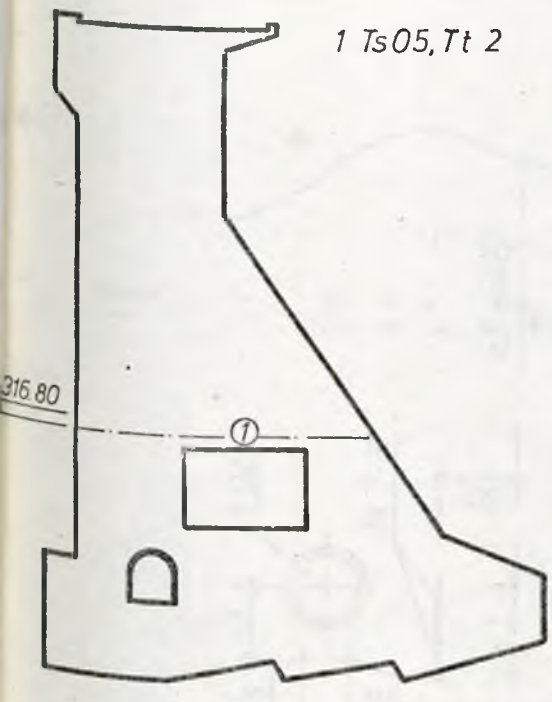
Najistotniejsze z punktu widzenia celu tej pracy, są informacje dotyczące termometrów towarzyszących naczyniom i tensometrom zerowym.

Według pracy [14] w końcu 1982 roku wewnątrz masywu były tylko cztery sprawne termometry. Tym samym można było analizować wskazania tylko tych tensometrów zerowych, w pobliżu których znajdował się któryś ze sprawnych czujników termometrycznych. Zestawienie takich czujników zawiera tablica 2.

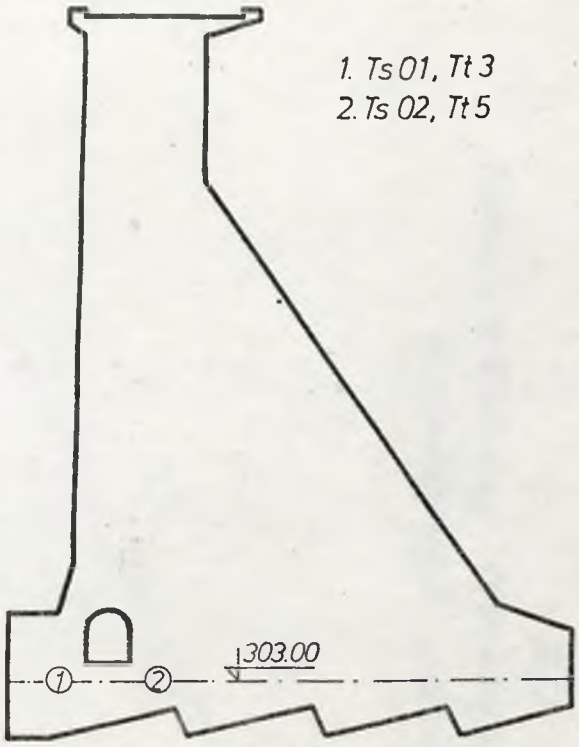
Ich oznaczenia są zgodne z przyjętymi w sprawozdaniach zawierających wyniki pomiarów odkształceń i temperatury betonu w zaporze: [11] , [13] , [14] , [83] .

TABLICA 2. Zestawienie par działających czujników: tensometr zerowy - teletermometr; Zapora Besko; stan z 31 grudnia 1982 roku.

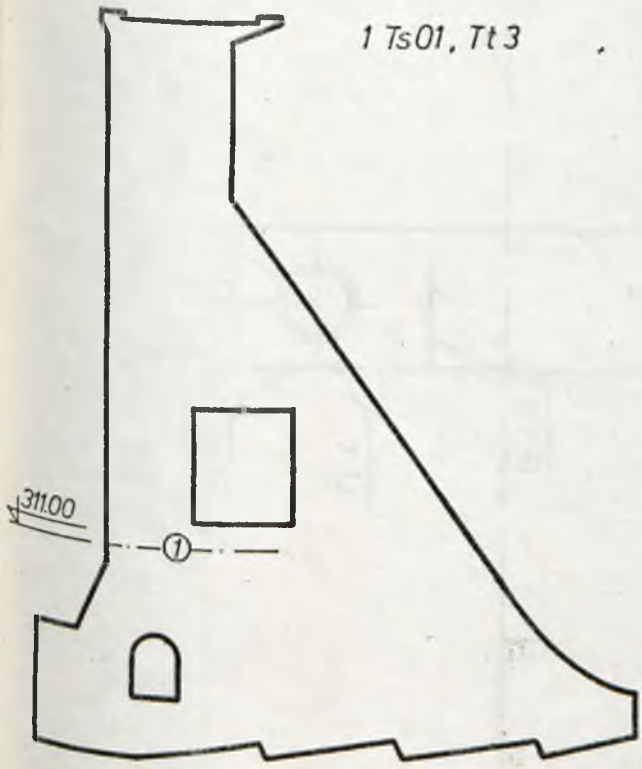
Numer sekcji	Symbol tensometru	Symbol teletermometru	Poziom zainstalowania / m n.p.m. /	Data zabetonowania
6	Ts01	Tt3	303.00	6 - 7.07.1976
6	Ts02	Tt5	303.00	6 - 7.07.1976
8	Ts01	Tt3	311.00	17 - 22.01.1977
10	Ts05	Tt2	316.80	22 - 23.09.1977



SEKCJA Nr 10

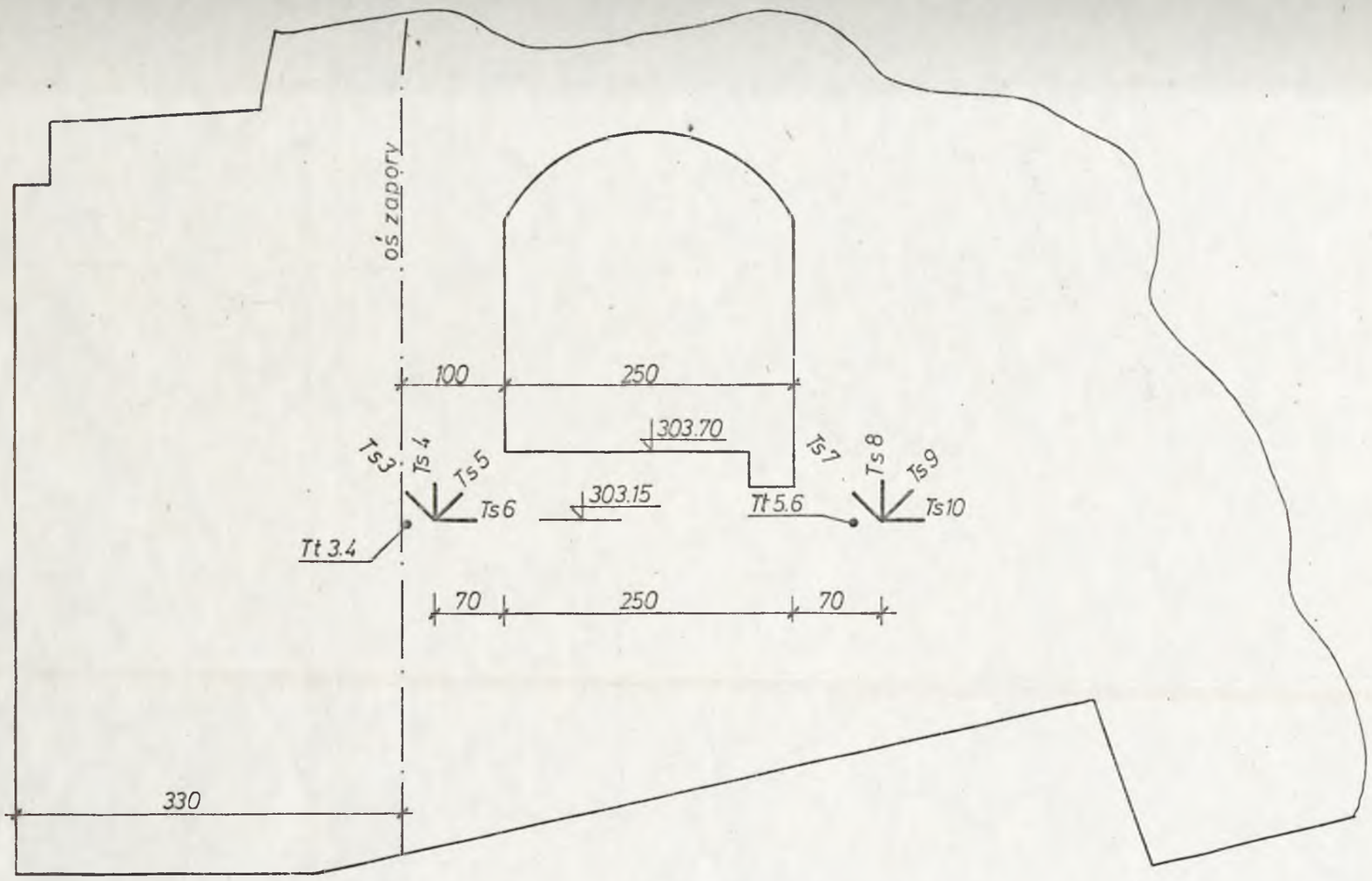


SEKCJA Nr 6

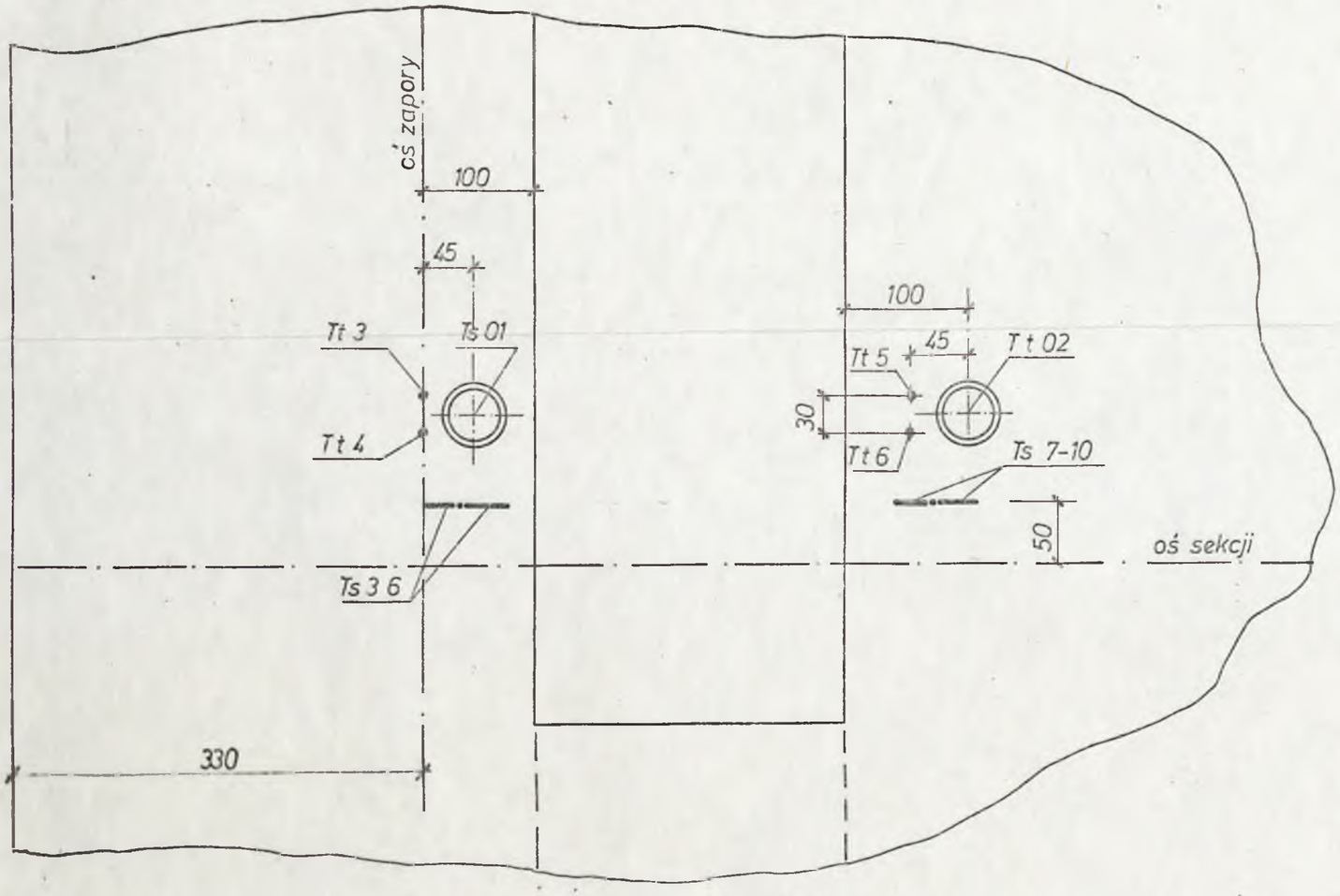


SEKCJA Nr 8

Rys.7 Położenie par działających czujników: tensometr zerowy — teletermometr w przekrojach pomiarowych zapory Besko.

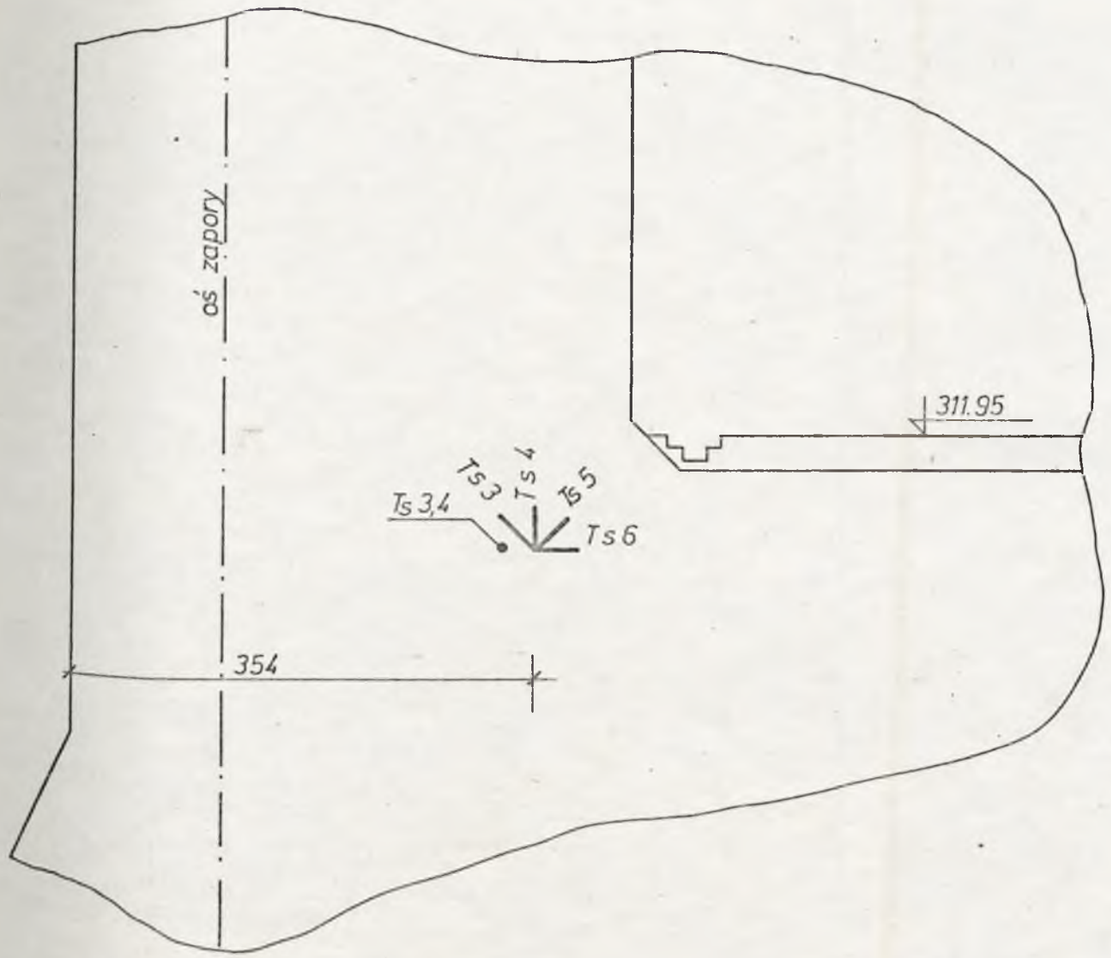


PRZEKRÓJ PIONOWY
skala 1:50

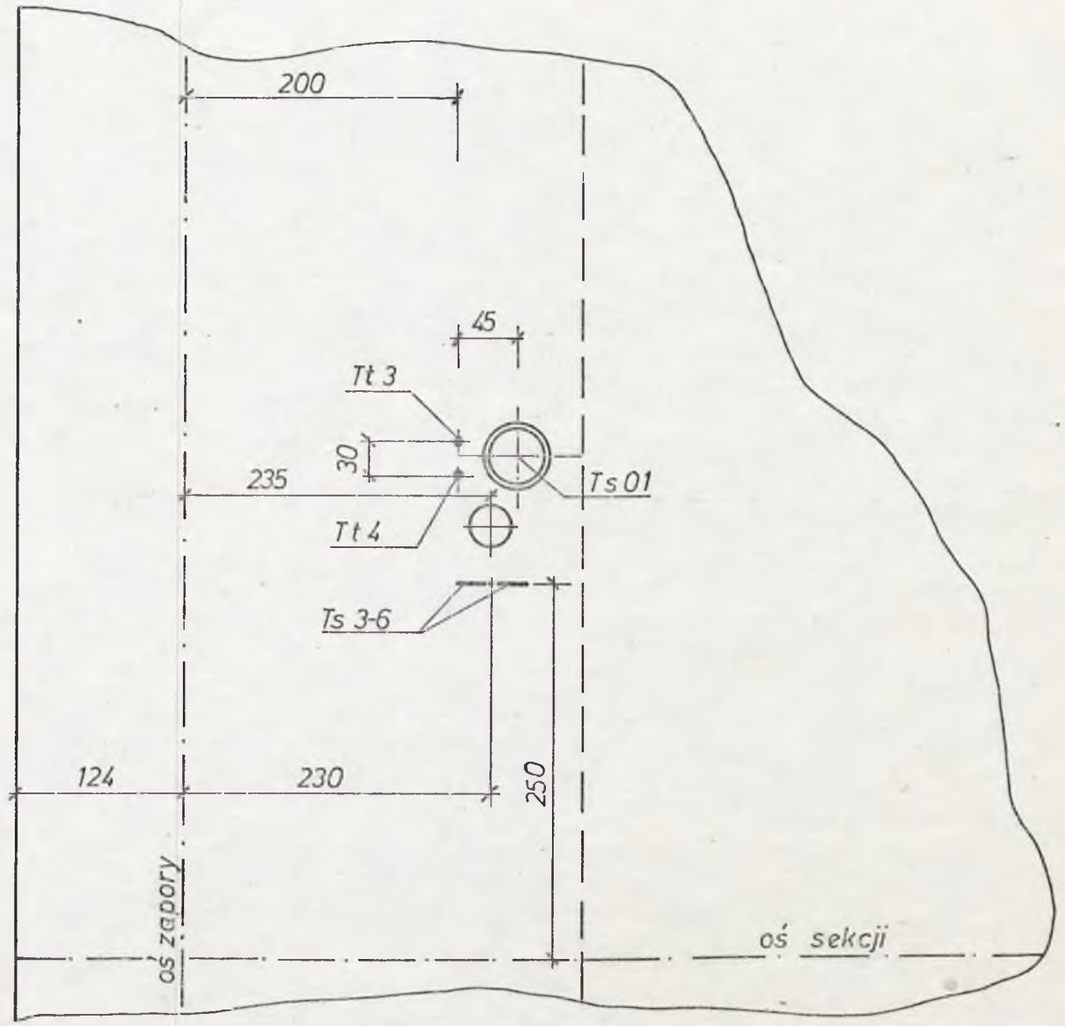


RZUT POZIOMY
skala 1:50

Rys. 8 Wzajemny układ czujników w miejscach zainstalowania tensometru zerowego Ts 01 i teletermometru Tt 3 oraz tensometru zerowego Ts 02 i teletermometru Tt 5.
Zapora Besko. Sekcja 6 [64]

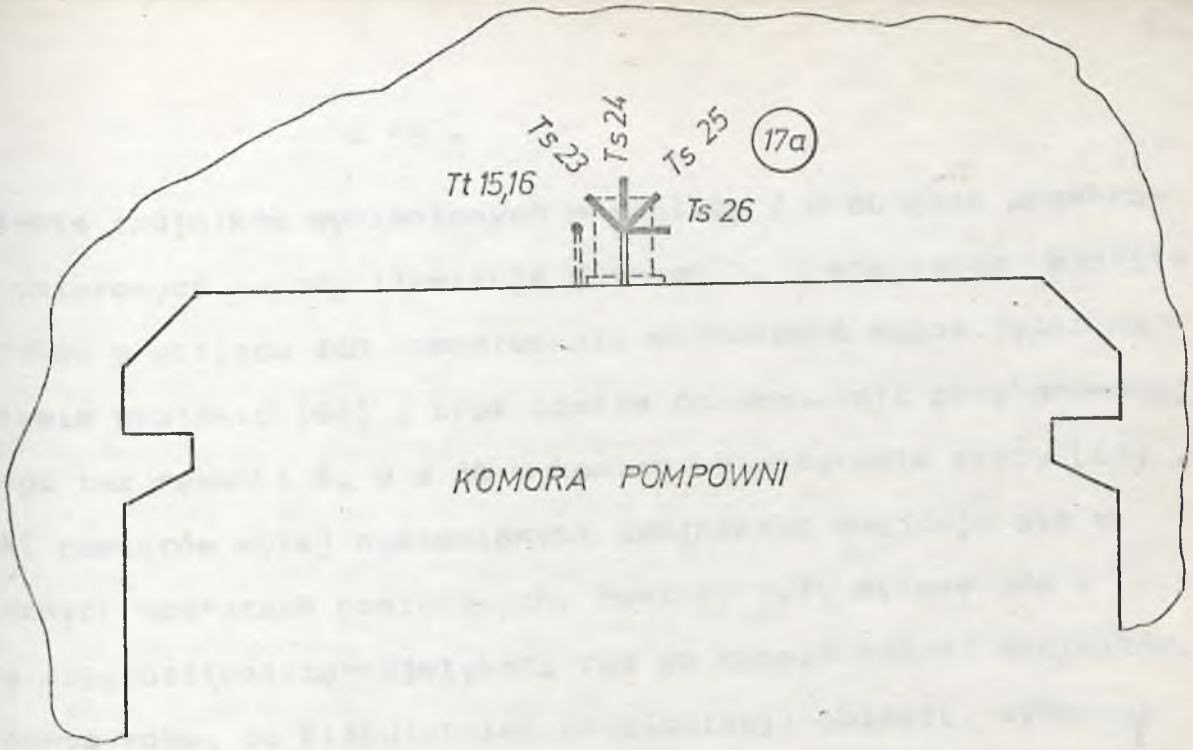


PRZEKRÓJ PIONOWY
skala 1:50

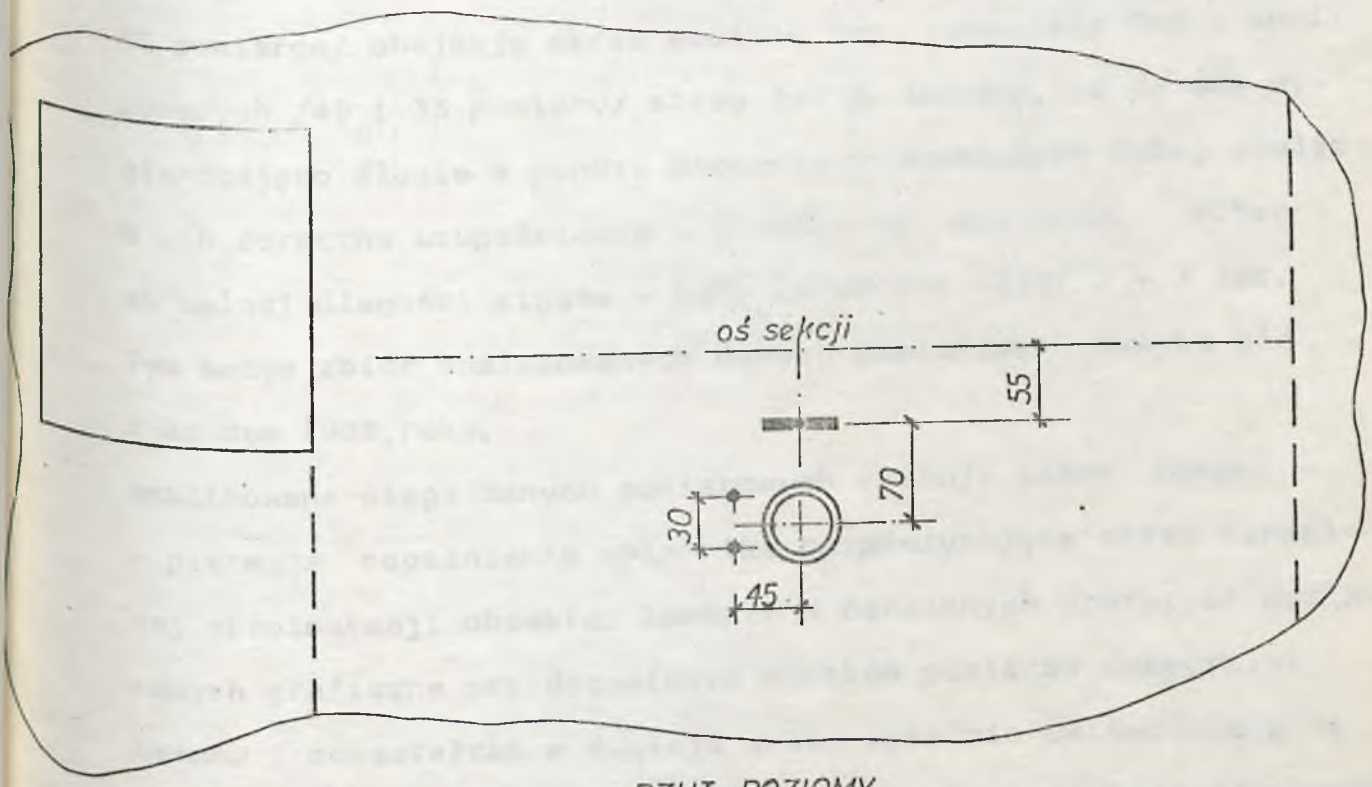


RZUT POZIOMY
skala 1:50

Rys.9 Wzajemny układ czujników w miejscu zainstalowania tensometru zerowego Ts 01 i teletermometru Tt 3. Zapora Besko. Sekcja 8 [64]



PRZKRÓJ PIONOWY
skala 1:50



RZUT POZIOMY
skala 1:50

Rys. 10 Wzajemny układ czujników w miejscu zainstalowania tensometru zerowego Ts 05 i teletermometru Tt 2. Zapora Besko. Sekcja 10 [64]

Położenie czujników wymienionych w tablicy 2 w obrębie przekrojów pomiarowych zapory ilustruje rysunek 7. O wzajemnym układzie czujników w miejscu ich zamontowania wnioskować można tylko na podstawie projektu [64] ; brak bowiem dokumentacji powykonawczej. Dlatego też rysunki 8, 9 i 10 wykonano na podstawie pracy [64] . Wyniki pomiarów wyżej wymienionymi czujnikami znajdują się w corocznych operatach pomiarowych. Pomiary były wykonywane z różną częstotliwością-największą tuż po zabetonowaniu czujników. W typowym roku, po kilkuletniej eksploatacji obiektu, wykonuje się je zaledwie kilkakrotnie.

Podobny reżim pomiarów obowiązywał w Solinie, gdzie teraz - po kilkunastu latach od wzniesienia obiektu - wykonuje się od 4 do 5 pomiarów w roku.

W przypadku Beska dwa najdłuższe ciągi danych pomiarowych / po 56 pomiarów/ obejmują okres sześciu lat, pozostałe dwa z analizowanych /45 i 33 pomiary/ okres lat 5. Uznano, że są one wystarczająco długie z punktu widzenia prowadzonych dalej analiz, a ich coroczne uzupełnienia - z uwagi na szczupłość wobec aktualnej długości ciągów - mało istotne w skali 2 - 3 lat. Tym samym zbiór analizowanych danych pomiarowych zamyka się z końcem 1982 roku.

Analizowane ciągi danych pomiarowych cechuje ważna cezura - - pierwsze napełnienie zbiornika rozpoczynające okres normalnej eksploatacji obiektu. Zawarte w corocznych operatach pomiarowych graficzne przedstawienia wyników pomiarów temperatur betonu i odkształceń w funkcji czasu wyraźnie uwidaczniają tę cezurę. Począwszy od napełnienia zbiornika zmieniają się przede wszystkim przebiegi temperatury nabierając cech okresowej regularności. Okres przed napełnieniem zbiornika cechują wpływy

źródeł ciepła /egzotermia procesu wiązania cementu/ oraz istotna zmienność właściwości mechanicznych betonu.
Rozpoczęcie eksploatacji obiektu oznacza - w przypadku zapory Besko - zakończenie betonowania sekcji, a więc ustalenie obszaru betonu uczestniczącego w wymianie ciepła z otoczeniem.
Periodyczne zmiany temperatury powietrza atmosferycznego, wody i podłoża oddziaływują na już niezmienny geometrycznie obiekt ustalając w każdym jego punkcie charakterystyczne przebiegi zmian temperatury.
Na podstawie informacji o piętrzeniu w zbiorniku Besko /pierwsze piętrzenie rozpoczęto w listopadzie 1978 r/ i graficznych przedstawień wyników pomiarów [11] stwierdzono, że pierwszy okres /okres budowy/ obejmuje dane uzyskane od chwili zabetonowania czujników do końca roku 1978, a drugi /okres eksploatacji/ - pozostałe pomiary tj. dane z lat 1979 - 82. Warunki, na podstawie których można wyodrębnić w analizowanych danych dwie grupy wyników wskazują, że decydować one mogą o przebiegu pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu a nie o jego wartości. Zmiany higrotermiczne we wnętrzu masywu związane z przejściem obiektu do eksploatacji /piętrzenie/ - jak wykazano to w rozdziale 3 pracy - znikomo wpływają na mierzoną wielkość.
W prezentowanym dalej ujęciu wartość współczynnika odkształcalności cieplnej traktuje się jako stałą, a ewentualną jej zmiennością "obciąża się" wielkość błędu pomiaru.
Z tego też względu przytoczona wyżej cezura pojawia się w analizie błędu określenia mierzonej wielkości i pozostaje tam zawsze, gdy brak podstaw do zaniedbania wprowadzonego rozróżnienia.

4.2. OKREŚLENIE ODKSZTAŁCALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU ZAPORY BESKO NA PODSTAWIE WSKAZAŃ TELETERMOMETRÓW I TENSOMETRÓW ZEROWYCH. BŁĄD POMIARU.

Współczynniki odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko wyznaczono w oparciu o wskaznia par czujników: tensometr zerowy - teletermometr, wyszczególnionych w tablicy 2.
Dane takie jak: data pomiaru, wskazanie miernika przy pomiarze odkształcenia, wskazanie miernika przy pomiarze temperatury zaczerpnięto z odpowiednich zestawień tabelarycznych pozycji [11] - dla okresu od zabetonowania czujników do 4.09.1981 r. - oraz pozycji [14] - dla okresu 4.09.1981 r. do 18.10.1982 r.
Ze źródeł tych pochodzą także takie informacje jak:
- data zabetonowania czujników,
- stała cechowania czujnika tensometrycznego,
- stała cechowania czujnika termometrycznego,
- wskazanie czujnika termometrycznego w 20°C,
- typ miernika strunowego.

Wskazania czujników w pozycjach [11] i [14] wyrażono w działkach miernika SAM-10, mimo iż część pomiarów wykonano miernikiem cyfrowym SMC-02. Z rodzajem miernika SAM-10 korespondują też podane stałe dotyczące czujników.
Wyniki pomiarów i obliczeń zamieszczono w tablicach 3,4,5 i 6.
Na podstawie wskazań tensometru i termometru obliczono różnice odkształceń i temperatur między kolejnymi pomiarami wyrażając je w działkach miernika SAM-10; różnice temperatur wyrażono też w stopniach Celsjusza. Kolejne wartości współczynnika

TABLICA NR 3

Zapora Besko; sekcja 6; tensometr SCOwb-150 symbol Ts02; stała cechowania $4.41 \cdot 10^{-6}$/DZ; termometr SCTwb-100 symbol Tt5; stała cechowania 0.543°C/DZ; wskazanie w 20°C: 158 DZ; miernik SAM-10; współczynnik odkształcalności cieplnej struny $11.7 \cdot 10^{-6}$/°C; dzień betonowania 7.07.1976r.;

L.p.	Data pomiaru	Dzień od zabetonowania	Wskazanie SAM-10 przy SCOwb-150	Odkształcenie między pomiarami	Wskazanie SAM-10 przy SCTwb-100	Różnice temperatur między pomiarami	Temperatura betonu	Różnica temperatur	Moduł różnicy temperatur	Odstęp czasowy między pomiarami	Współczynnik odkształcalności cieplnej betonu	Błąd pomiaru
-	-	doba	DZ	DZ	DZ	DZ	°C	°C	°C	doba	$\cdot 10^{-6}$/°C	$\cdot 10^{-6}$/°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	7.07.76	0	447		164		+23.26					
2	8.07.76	1	442	-5	171	+7	+27.06	+3.80	3.80	1	+ 5.90	- 5.69
3	9.07.76	2	445	+3	173	+2	+28.14	+1.09	1.09	1	+23.88	+12.29
4	10.07.76	3	443	-2	169	-4	+25.97	-2.17	2.17	1	+15.76	+ 4.17
5	12.07.76	5	444	+1	166	-3	+24.34	-1.63	1.63	2	+ 8.99	- 2.60
6	13.07.76	6	445	+1	165	-1	+23.80	-0.54	0.54	1	+ 3.58	- 8.01
7	14.07.76	7	446	+1	164	-1	+23.26	-0.54	0.54	1	+ 3.58	- 8.01
8	15.07.76	8	447	+1	165	+1	+23.80	+0.54	0.54	1	+19.82	+ 8.23
9	16.07.76	9	449	+2	164	-1	+23.26	-0.54	0.54	1	- 4.54	-16.13
10	17.07.76	10	450	+1	166	+2	+24.34	+1.09	1.09	1	+15.76	+ 4.17
11	19.07.76	12	450	0	168	+2	+25.43	+1.09	1.09	2	+11.70	+ 0.11
12	10.08.76	34	454	+4	160	-8	+21.09	-4.34	4.34	22	+ 7.64	- 3.95
13	18.08.76	42	455	+1	159	-1	+20.54	-0.54	0.54	8	+ 3.58	- 8.01
14	21.08.76	45	454	-1	158	-1	+20.00	-0.54	0.54	3	+19.82	+ 8.23
15	23.08.76	47	454	0	156	-2	+18.91	-1.09	1.09	2	+11.70	+ 0.11
16	2.11.76	118	462	+8	153	-3	+17.28	-1.63	1.63	71	- 9.96	-21.55
17	5.11.76	121	461	-1	153	0	+17.28	0.0	0.0	3	-	-
18	9.11.76	125	461	0	152	-1	+16.74	-0.54	0.54	4	+11.70	+ 0.11
19	18.11.76	134	461	0	148	-4	+14.57	-2.17	2.17	9	+11.70	+ 0.11
20	23.11.76	139	459	-2	150	+2	+15.66	+1.09	1.09	5	+ 3.58	- 8.01
21	1.12.76	147	459	0	150	0	+15.66	0.0	0.0	8	-	-
22	9.12.76	155	459	0	147	-3	+14.03	-1.63	1.63	8	+11.70	+ 0.11
23	16.12.76	162	459	0	149	+2	+15.11	+1.09	1.09	7	+11.70	+ 0.11
24	11.01.77	188	461	+2	142	-7	+11.31	-3.80	3.80	26	+ 9.38	- 2.21
25	2.02.77	210	460	-1	143	+1	+11.86	+0.54	0.54	22	+ 3.58	- 8.01
26	10.02.77	218	461	+1	142	-1	+11.31	-0.54	0.54	8	+ 3.58	- 8.01
27	4.11.77	485	465	+4	140	-2	+10.23	-1.09	1.09	267	- 4.54	-16.13
28	25.01.78	567		0		-5		-2.72	2.72	122	+11.70	+ 0.11
29	6.03.78	607	465		135		+ 7.51					
30	14.07.78	737		+1		+2		+1.09	1.09	183	+15.76	+ 4.17
31	5.09.78	790	466		137	+2	+ 8.60	+1.09	1.09	17	+19.82	+ 8.23
32	22.09.78	807	468	+2	139	-3	+ 9.68	-1.63	1.63	11	+19.82	+ 8.23
33	3.10.78	818	465	-3	136	+2	+ 8.05	+1.09	1.09	108	+23.88	+12.29
34	19.01.79	926	468	+3	138	-4	+ 9.14	-2.17	2.17	52	+11.70	+ 0.11
35	12.03.79	978	468	0	134	-2	+ 6.97	-1.09	1.09	52	+15.76	+ 4.17
36	3.05.79	1030	467	-1	132	+2	+ 5.88	+1.09	1.09	33	+13.73	+ 2.14
37	5.06.79	1063	467.5	+0.5	134	-5	+ 6.97	-2.72	2.72	80	+13.32	+ 1.73
38	24.08.79	1143	466.5	-1	129	+3.5	+ 4.25	+1.09	1.09	48	+12.86	+ 1.27
39	11.10.79	1191	467	+0.5	132.5	+2.5	+ 6.15	+1.36	1.36	34	+ 8.45	- 3.14
40	14.11.79	1225	466	-1	135		+ 7.51					
41	5.02.80	1308		+1.5		-2.5		-1.36	1.36	147	+ 6.83	- 4.76
42	9.04.80	1372	467.5		132.5		+ 6.15					
43	14.05.80	1407	468	+0.5	133	+0.5	+ 6.42	+0.27	0.27	35	+19.82	+ 8.23
44	15.07.80	1469	468	0	131.5	-1.5	+ 5.61	-0.81	0.81	62	+11.70	+ 0.11
45	16.09.80	1532	467	-1	131.5	0	+ 5.61	0.0	0.0	63	-	-
46	3.11.80	1580	466.5	-0.5	133	+1.5	+ 6.42	+0.81	0.81	48	+ 8.99	- 2.60
47	17.01.81	1654	467	+0.5	132.5	-0.5	+ 6.15	-0.27	0.27	74	+ 3.58	- 8.01
48	19.03.81	1715	467.5	+0.5	133	+0.5	+ 6.42	+0.27	0.27	61	+19.82	+ 8.23
49	27.05.81	1784	468	+0.5	134	+1	+ 6.97	+0.54	0.54	69	+15.76	+ 4.17
50	2.07.81	1820	469	+1	135	+1	+ 7.51	+0.54	0.54	36	+19.82	+ 8.23
51	4.09.81	1884	467.5	-1.5	133	-2	+ 6.42	-1.09	1.09	64	+17.79	+ 6.20
52	16.10.81	1926		-1		-1		-0.54	0.54	159	+19.82	+ 8.23
53	10.02.82	2043										
54	16.04.82	2108	466.5	+2	132	+2	+ 5.88	+1.09	1.09	152	+19.82	+ 8.23
55	15.09.82	2260	468.5	+0.5	134	+1.5	+ 6.97	+0.81	0.81	33	+14.41	+ 2.82
56	18.10.82	2293	469		135.5		+ 7.78					

TABLICA NR 4.

Zapora Besko; sekcja 6; tensometr SCOwb-150 symbol Ts01; stała cechowania $4.41 \cdot 10^{-6}$/DZ; termometr SCTwb-100 symbol Tt3 ; stała cechowania 0.464°C/DZ; wskazanie w 20°C: 96 DZ; miernik SAM-10; współczynnik odkształcalności cieplnej struny $11.7 \cdot 10^{-6}$/°C; dzień betonowania 7.07.1976r.;

L.p.	Data pomiaru	Dzień od zabetonowania	Wskazanie SAM-10 przy SCOwb-150	Odkształcenie między pomiarami	Wskazanie SAM-10 przy SCTwb-100	Różnice temperatur między pomiarami	Temperatura betonu	Różnica temperatur	Moduł różnicy temperatur	Odstęp czasowy między pomiarami	Współczynnik odkształcalności cieplnej betonu	Błąd pomiaru
-	-	doba	DZ	DZ	DZ	DZ	°C	°C	°C	doba	$\cdot 10^{-6}$/°C	$\cdot 10^{-6}$/°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	7.07.76	0	459		103		+23.25					
2	8.07.76	1	451	-8	109	+6	+26.03	+2.78	2.78	1	- 0.97	-10.70
3	9.07.76	2	454	+3	108	-1	+25.57	-0.46	0.46	1	-16.81	-26.54
4	10.07.76	3	457	+3	105	-3	+24.18	-1.39	1.39	1	+ 2.20	- 7.53
5	12.07.76	5	457	0	96	-9	+20.00	-4.18	4.18	2	+11.70	+ 1.97
6	13.07.76	6	458	+1	95	-1	+19.54	-0.46	0.46	1	+ 2.20	- 7.53
7	14.07.76	7	458	0	95	0	+19.54	0.0	0.0	1	-	-
8	15.07.76	8	459	+1	97	+2	+20.46	+0.93	0.93	1	+16.45	+ 6.72
9	16.07.76	9	461	+2	99	+2	+21.39	+0.93	0.93	1	+21.20	+11.47
10	17.07.76	10	460	-1	100	+1	+21.86	+0.46	0.46	1	+ 2.20	- 7.53
11	19.07.76	12	461	+1	103	+3	+23.25	+1.39	1.39	2	+14.87	+ 5.14
12	10.08.76	34	467	+6	99	-4	+21.39	-1.86	1.86	22	- 2.56	-12.29
13	18.08.76	42	466	-1	98	-1	+20.93	-0.46	0.46	8	+21.20	+11.47
14	21.08.76	45	467	+1	96	-2	+20.00	-0.93	0.93	3	+ 6.95	- 2.78
15	23.08.76	47	468	+1	93	-3	+18.61	-1.39	1.39	2	+ 8.53	- 1.20
16	2.11.76	118	478	+10	84	-9	+14.43	-4.18	4.18	71	+ 1.14	- 8.59
17	5.11.76	121	479	+1	84	0	+14.43	0.0	0.0	3	-	-
18	9.11.76	125	478	-1	84	0	+14.43	0.0	0.0	4	-	-
19	18.11.76	134	477	-1	83	-1	+13.97	-0.46	0.46	9	+21.20	+11.47
20	23.11.76	139	477	0	83	0	+13.97	0.0	0.0	5	-	-
21	1.12.76	147	476	-1	81	-2	+13.04	-0.93	0.93	8	+16.45	+ 6.72
22	9.12.76	155	477	+1	82	+1	+13.50	+0.46	0.46	8	+21.20	+11.47
23	16.12.76	162	479	+2	79	-3	+12.11	-1.39	1.39	7	+ 5.36	- 4.37
24	11.01.77	188	480	+1	77	-2	+11.18	-0.93	0.93	26	+ 6.95	- 2.78
25	2.02.77	210	479	-1	73	-4	+ 9.33	-1.86	1.86	22	+14.08	+ 4.35
26	10.02.77	218	479	0	72	-1	+ 8.86	-0.46	0.46	8	+11.70	+ 1.97
27	4.11.77	485	480	+1	80	+8	+12.58	+3.71	3.71	267	+12.89	+ 3.16
28	25.01.78	567	481	+1	72	-8	+ 8.86	-3.71	3.71	82	+10.51	+ 0.78
29	6.03.78	607	482	+1	70	-2	+ 7.94	-0.93	0.93	40	+ 6.95	- 2.78
30	14.07.78	737	482	0	77	+7	+11.18	+3.25	3.25	130	+11.70	+ 1.97
31	5.09.78	790	481	-1	78	+1	+11.65	+0.46	0.46	53	+ 2.20	- 7.53
32	22.09.78	807	483.5	+2.5	79.5	+1.5	+12.34	+0.70	0.70	17	+27.54	+17.81
33	3.10.78	818	480.5	-3	79	-0.5	+12.11	-0.23	0.23	11	+68.73	+59.00
34	19.01.79	926	484	+3.5	75	-4	+10.26	-1.86	1.86	108	+ 3.38	- 6.35
35	12.03.79	978	484	0	70.5	-4.5	+ 8.17	-2.09	2.09	52	+11.70	+ 1.97
36	3.05.79	1030	482	-2	73	+2.5	+ 9.33	+1.16	1.16	52	+ 4.10	- 5.63
37	5.06.79	1063	483	+1	74.5	+1.5	+10.02	+0.70	0.70	33	+18.04	+ 8.31
38	24.08.79	1143	484	+1	75	+0.5	+10.26	+0.23	0.23	80	+30.71	+20.98
39	11.10.79	1191	482.5	-1.5	76	+1	+10.72	+0.46	0.46	48	- 2.56	-12.29
40	14.11.79	1225	481.5	-1	74	-2	+ 9.79	-0.93	0.93	34	+16.45	+ 6.72
41	5.02.80	1308	486	+1.5		-3.5		-1.62	1.62	147	+ 7.63	- 2.10
42	9.04.80	1372	483	-0.5	70.5	+1	+ 8.17	+0.46	0.46	35	+ 6.95	- 2.78
43	14.05.80	1407	482.5	-1.5	71.5	+2.5	+ 8.63	+1.16	1.16	62	+ 6.00	- 3.73
44	15.07.80	1469	481	-1	74	+0.5	+ 9.79	+0.23	0.23	63	- 7.31	-17.04
45	16.09.80	1532	480	+2.5	74.5	-0.5	+10.02	-0.23	0.23	48	-35.82	-45.55
46	3.11.80	1580	482.5	+2.5	74	-1	+ 9.79	-0.46	0.46	74	- 12.06	-21.79
47	17.01.81	1654	485	-1.5	73	-2	+ 9.33	-0.93	0.93	61	+18.83	+ 9.10
48	19.03.81	1715	483.5	-2	71	+1.5	+ 8.40	+0.70	0.70	69	- 0.97	-10.70
49	27.05.81	1784	481.5	+1.5	72.5	+0.5	+ 9.10	+0.23	0.23	36	+40.21	+30.48
50	2.07.81	1820	483	-1	73	+3	+ 9.33	+1.39	1.39	64	+ 8.53	- 1.20
51	4.09.81	1884	482	-1.5	76	-2.5	+10.72	-1.16	1.16	42	+17.40	+ 7.67
52	16.10.81	1926	480.5	+4	73.5	-2.5	+ 9.56	-1.16	1.16	117	- 3.51	-13.24
53	10.02.82	2043	484.5	-1	71	-1	+ 8.40	-0.46	0.46	65	+21.20	+11.47
54	16.04.82	2108	483.5	-2	70	+3.5	+ 7.94	+1.62	1.62	152	+ 6.27	- 3.46
55	15.09.82	2260	481.5	-1	73.5	+1.5	+ 9.56	+0.70	0.70	33	+ 5.36	- 4.37
56	18.10.82	2293	480.5		75		+10.26					

TABLICA NR 5.

Zapora Besko; sekcja 8; tensometr SCOwb-150 symbol Ts01; stała cechowania $4.41 \cdot 10^{-6}$/DZ; termometr SCTwb-100 symbol Tt3; stała cechowania 0.592°C/DZ; wskazanie w 20°C: 220 DZ; miernik SAM-10; współczynnik odkształcalności cieplnej struny $11.7 \cdot 10^{-6}$/°C; dzień betonowania 22.01.1977r.;

L.p.	Data pomiaru	Dzień od zabetonowania	Wskazanie SAM-10 przy SCOwb-150	Odkształcenie między pomiarami	Wskazanie SAM-10 przy SCTwb-100	Różnice temperatur między pomiarami	Temperatura betonu	Różnica temperatur	Moduł różnicy temperatur	Odstęp czasowy między pomiarami	Współczynnik odkształcalności cieplnej betonu	Błąd pomiaru
-	-	doba	DZ	DZ	DZ	DZ	°C	°C	°C	doba	$\cdot 10^{-6}$/°C	$\cdot 10^{-6}$/°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	24.01.77	2	453		211		+14.67					
2	1.02.77	10	459	+6	199	-12	+ 7.57	-7.10	7.10	8	+ 7.97	- 2.66
3	2.02.77	11	457	-2	196	-3	+ 5.79	-1.78	1.78	1	+16.67	+ 6.04
4	10.02.77	19	459	+2	199	+3	+ 7.57	+1.78	1.78	8	+16.67	+ 6.04
5	17.02.77	26	459	0	197	-2	+ 6.38	-1.18	1.18	7	+11.70	+ 1.07
6	2.03.77	39	459	0	196	-1	+ 5.79	-0.59	0.59	13	+11.70	+ 1.07
7	5.04.77	73	458	-1	201	+5	+ 8.75	+2.96	2.96	34	+10.21	- 0.42
8	26.04.77	94	456	-2	199	-2	+ 7.57	-1.18	1.18	21	+19.15	+ 8.52
9	17.05.77	115	455	-1	208	+9	+12.90	+5.33	5.33	21	+10.87	+ 0.24
10	24.05.77	122	454	-1	206	-2	+11.71	-1.18	1.18	7	+15.43	+ 4.80
11	1.06.77	130	455	+1	205	-1	+11.12	-0.59	0.59	8	+ 4.25	- 6.38
12	8.06.77	137	455	0	206	+1	+11.71	+0.59	0.59	7	+11.70	+ 1.07
13	28.09.77	249		+3		0		0.0	0.0	148	-	-
14	3.11.77	285	458		206		+11.71					
15	22.11.77	304	471	+13	195	-11	+ 5.20	-6.51	6.51	19	+ 2.89	- 7.74
16	25.01.78	368	463	-8	192	-3	+ 3.42	-1.78	1.78	64	+31.57	+20.94
17	6.03.78	408	463	0	191	-1	+ 2.83	-0.59	0.59	40	+11.70	+ 1.07
18	20.04.78	453	463.5	+0.5	198.5	+7.5	+ 7.27	+4.44	4.44	45	+12.20	+ 1.57
19	14.07.78	538	459.5	-4	203	+4.5	+ 9.94	+2.66	2.66	85	+ 5.08	- 5.55
20	5.09.78	591	458	-1.5	207	+4	+12.30	+2.37	2.37	53	+ 8.91	- 1.72
21	22.09.78	608	458.5	+0.5	203	-4	+ 9.94	-2.37	2.37	17	+10.77	+ 0.14
22	3.10.78	619	460	+1.5	203	0	+ 9.94	0.0	0.0	11	-	-
23	19.01.79	727	464	+4	190	-13	+ 2.24	-7.70	7.70	108	+ 9.41	- 1.22
24	12.03.79	779	466.5	+2.5	187	-3	+ 0.46	-1.78	1.78	52	+ 5.49	- 5.14
25	3.05.79	831	464.5	-2	189	+2	+ 1.65	+1.18	1.18	52	+ 4.25	- 6.38
26	5.06.79	864	465	+0.5	206	+17	+11.71	+10.06	10.06	33	+11.92	+ 1.29
27	24.08.79	944	460	-5	207	+1	+12.30	+0.59	0.59	80	-25.56	-36.19
28	11.10.79	992	459.5	-0.5	203	-4	+ 9.94	-2.37	2.37	48	+12.63	+ 2.00
29	14.11.79	1026	462.5	+3	195.5	-7.5	+ 5.50	-4.44	4.44	34	+ 8.72	- 1.91
30	5.02.80	1109	465.5	+3	191	-4.5	+ 2.83	-2.66	2.66	83	+ 6.73	- 3.90
31	9.04.80	1173	466	+0.5	188.5	-2.5	+ 1.35	-1.48	1.48	64	+10.21	- 0.42
32	14.05.80	1208	466	0	190	+1.5	+ 2.24	+0.89	0.89	35	+11.70	+ 1.07
33	15.07.80	1270	465.5	-0.5	205	+15	+11.12	+8.88	8.88	62	+11.45	+ 0.82
34	16.09.80	1333	462	-3.5	197	-8	+ 6.38	-4.74	4.74	63	+14.96	+ 4.33
35	3.11.80	1381	464	+2	199.5	+2.5	+ 7.86	+1.48	1.48	48	+17.66	+ 7.03
36	17.01.81	1456	465	+1	188.5	-1	+ 1.35	-0.59	0.59	75	+ 4.25	- 6.38
37	19.03.81	1517	465.5	+0.5	189	+0.5	+ 1.65	+0.30	0.30	61	+19.15	+ 8.52
38	27.05.81	1586	467	+1.5	195	+6	+ 5.20	+3.55	3.55	69	+13.56	+ 2.93
39	2.07.81	1622	466.5	-0.5	204	+9	+10.53	+5.33	5.33	36	+11.29	+ 0.66
40	4.09.81	1686	463	-3.5	196.5	-7.5	+ 6.09	-4.44	4.44	64	+15.18	+ 4.55
41	16.10.81	1728	461.5	-1.5	206	+9.5	+11.71	+5.62	5.62	42	+10.52	- 0.11
42	10.02.82	1845	466	+4.5	188	-18	+ 1.06	-10.66	10.66	117	+ 9.84	- 0.79
43	16.04.82	1910	466	0	188.5	+0.5	+ 1.35	+0.30	0.30	65	+11.70	+ 1.07
44	15.09.82	2062	462.5	-3.5	196	+7.5	+ 5.79	+4.44	4.44	152	+ 8.22	- 2.41
45	18.10.82	2095	463	+0.5	199	+3	+ 7.57	+1.78	1.78	33	+12.94	+ 2.31

TABLICA NR 6.

Zapora Besko; sekcja 10; tensometr SCOwb-150 symbol Ts05; stała cechowania $4.41 \cdot 10^{-6}$/DZ; termometr SCTwb-100 symbol Tt2; stała cechowania 0.531 °C/DZ; wskazanie w 20°C: 208 DZ; miernik SAM-10; współczynnik odkształcalności cieplnej struny $11.7 \cdot 10^{-6}$/°C dzień betonowania 10.08.1977r.;

L.p.	Data pomiaru	Dzień od zabetonowania	Wskazanie SAM-10 przy SCOwb-150	Odkształcenie między pomiarami	Wskazanie SAM-10 przy SCTwb-100	Różnice temperatur między pomiarami	Temperatura betonu	Różnica temperatur	Moduł różnicy temperatur	Odstęp czasowy między pomiarami	Współczynnik odkształcalności cieplnej betonu	Błąd pomiaru
-	-	doba	DZ	DZ	DZ	DZ	°C	°C	°C	doba	$\cdot 10^{-6}$/°C	$\cdot 10^{-6}$/°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	28.09.77	49	456		211		+21.59					
2	3.11.77	85	458	+2	207	-4	+19.47	-2.12	2.12	36	+ 7.55	- 3.29
3	22.11.77	104	451.5	-6.5	200	-7	+15.75	-3.72	3.72	19	+19.41	+ 8.57
4	25.01.78	168	465	+13.5	177	-23	+ 3.54	-12.21	12.21	64	+ 6.83	- 4.01
5	6.03.78	208	466	+1	172	-5	+ 0.88	-2.66	2.66	40	+10.04	- 0.80
6	20.04.78	253	467.5	+1.5	174	+2	+ 1.95	+1.06	1.06	45	+17.93	+ 7.09
7	14.07.78	338	464	-3.5	191	+17	+10.97	+9.03	9.03	85	+ 9.99	- 0.85
8	5.09.78	391	462	-2	211	+20	+21.59	+10.62	10.62	53	+10.87	+ 0.03
9	22.09.78	408	462.5	+0.5	194	-17	+12.57	-9.03	9.03	17	+11.46	+ 0.62
10	3.10.78	419	466	+3.5	194	0	+12.57	0.0	0.0	11	-	-
11	19.01.79	527	467	+1	182	-12	+ 6.19	-6.37	6.37	108	+11.01	+ 0.17
12	13.03.79	580	467	0	177	-5	+ 3.54	-2.66	2.66	53	+11.70	+ 0.86
13	3.05.79	631	465	-2	178	+1	+ 4.07	+0.53	0.53	51	- 4.91	-15.75
14	5.06.79	664	472	+7	181	+3	+ 5.66	+1.59	1.59	33	+31.08	+20.24
15	24.08.79	744	467	-5	193	+12	+12.04	+6.37	6.37	80	+ 8.24	- 2.60
16	11.10.79	792	465.5	-1.5	192	-1	+11.50	-0.53	0.53	48	+24.16	+13.32
17	14.11.79	826	467.5	+2	187	-5	+ 8.85	-2.66	2.66	34	+ 8.38	- 2.46
18	5.02.80	909	470	+2.5	178	-9	+ 4.07	-4.78	4.78	83	+ 9.39	- 1.45
19	9.04.80	973	471.5	+1.5	174.5	-3.5	+ 2.21	-1.86	1.86	64	+ 8.14	- 2.70
20	14.05.80	1008	470	-1.5	176.5	+2	+ 3.27	+1.06	1.06	35	+ 5.47	- 5.37
21	15.07.80	1070	468	-2	184.5	+8	+ 7.52	+4.25	4.25	62	+ 9.62	- 1.22
22	16.09.80	1133	472.5	+4.5	190	+5.5	+10.44	+2.92	2.92	63	+18.50	+ 7.66
23	3.11.80	1181	469	-3.5	188	-2	+ 9.38	-1.06	1.06	48	+26.23	+15.39
24	17.01.81	1256	471.5	+2.5	176.5	-11.5	+ 3.27	-6.11	6.11	75	+ 9.89	- 0.95
25	19.03.81	1317	472.5	+1	177	+0.5	+ 3.54	+0.27	0.27	61	+28.31	+17.47
26	27.05.81	1386	469.5	-3	178	+1	+ 4.07	+0.53	0.53	69	-13.22	-24.06
27	2.07.81	1422	467	-2.5	191	+13	+10.97	+6.90	6.90	36	+10.10	- 0.74
28	4.09.81	1486	468.5	+1.5	190	-1	+10.44	-0.53	0.53	64	- 0.76	-11.60
29	16.10.81	1528	467	-1.5	192	+2	+11.50	+1.06	1.06	42	+ 5.47	- 5.37
30	10.02.82	1645	470.5	+3.5	177	-15	+ 3.54	-7.96	7.96	117	+ 9.76	- 1.08
31	16.04.82	1710	470	-0.5	183	+6	+ 6.73	+3.19	3.19	65	+11.01	+ 0.17
32	15.09.82	1862	468	-2	185	+2	+ 7.79	+1.06	1.06	152	+ 3.39	- 7.45
33	18.10.82	1895	467.5	-0.5	190.5	+5.5	+10.71	+2.92	2.92	33	+10.94	+ 0.10

rozszerzalności cieplnej betonu α_b obliczano według wzoru:

$$\alpha_b = A \frac{\Delta W^0}{\Delta W^T} + \alpha_{str} \qquad /13/$$

w którym: A - stosunek stałej cechowania tensometru do stałej cechowania termometru strunowego;

ΔW^0 - różnica wskazań tensometru między dwoma kolejnymi pomiarami wyrażona w działkach miernika SAM-10;

ΔW^T - różnica wskazań termometru strunowego między dwoma kolejnymi pomiarami wyrażona w działkach miernika SAM-10;

α_{str} - $11.7 \cdot 10^{-6}/^oC$, współczynnik rozszerzalności cieplnej struny przyjmowany jak dla stali zgodnie z uwagami producenta aparatury i informacjami literaturowymi [17] ; norma DIN 2076 precyzująca wymagania wobec drutu, z którego wykonywane są struny czujników nie podaje wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału.

Dodatkowo w tablicach 3 - 6 zamieszczono takie dane jak: odstępy czasowe dni pomiarów od dnia zabetonowania czujników, odstępy czasowe między kolejnymi pomiarami /wielkości te wyrażono w dobach/, temperaturę betonu w dniach pomiaru /w stopniach Celsjusza/ oraz moduły różnic temperatur między kolejnymi pomiarami.

Temperaturę betonu T obliczono według wzoru:

$$T = /W^T - W^{20}/C_T + 20 \qquad /14/$$

gdzie: W^T - wskazanie czujnika termometrycznego w działkach miernika SAM-10,

W^{20} - wskazanie czujnika termometrycznego w działkach miernika SAM-10 w 20^oC,

C_T - stała cechowania czujnika termometrycznego.

Dla potrzeb dalszej analizy, dla każdej pary czujników, obliczono wartość średnią współczynnika odkształcalności cieplnej betonu $\bar{\alpha}_b$ oraz błędy kolejnych pomiarów tej wielkości, według wzoru:

$$\delta_i = \alpha_{bi} - \alpha_b^o . \qquad /15/$$

w którym: δ_i - błąd rzeczywisty i-tego pomiaru,

α_{bi} - wynik i-tego pomiaru,

α_b^o - rzeczywista wartość wielkości mierzonej.

Nieznaną wartość α_b^o z racji ustaleń poczynionych w rozdziale 3 pracy uznano za stałą i zgodnie z teorią pomiarów [74] zastąpiono przez wartość średnią z próby.

Obliczone wartości błędów zamieszczono w tablicach 3 - 6, a wartości średnie współczynnika odkształcalności cieplnej betonu w tablicy 7.

TABLICA 7. Podstawowe charakterystyki statystyczne wyników pomiarów odkształcalności cieplnej betonu w zaporze Besko.

Miejsce pomiaru; symbole czujników	Ilość pomiarów n	Wartość średnia $\bar{\alpha}_b$ / $\cdot 10^{-6}/^{o}C$ /	Odchylenie standardowe σ_{n-1} / $\cdot 10^{-6}/^{o}C$ /
sekcja 6; Ts01/Tt3	50	9.73	14.96
sekcja 6; Ts02/Tt5	47	11.59	7.50
sekcja 8; Ts01/Tt3	41	10.63	7.72
sekcja 10;Ts05/Tt2	31	10.84	9.02

4.3. STATYSTYCZNY OPIS BŁEDÓW OKREŚLENIA ODKSZTAŁCALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU ZAPORY NA PODSTAWIE WSKAZAŃ TENSOMETRÓW ZEROWYCH I TELETERMOMETRÓW.

3.1. WPROWADZENIE

Sposób oceny błędów pomiarowych, ich pochodzenia i istotności jest konsekwencją poglądu na charakter mierzonych wielkości i opisywanych przez nie zjawisk. Wyróżnić w tym względzie można podejście deterministyczne i przeciwstawne mu stochastyczne [20] . W metrologii korespondują z nimi dwa modele procesu pomiarowego: klasyczny i probabilistyczny /informacyjny/ [36] . Z porównania tych modeli wynika, że model klasyczny jest szczególnym przypadkiem probabilistycznego. Ten zaś jest najbardziej ogólny i adekwatny wobec większości praktycznych zadań techniki pomiarowej. Wyróżniki probabilistycznego modelu procesu pomiarowego, przytoczone za pozycją [36] to:

- mierzona wielkość fizyczna jest traktowana jak proces losowy zawierający informację o stanie badanego lub kontrolowanego obiektu i opisana jest przez ciąg wartości przypadkowych lub uogólnione charakterystyki tego ciągu /wartość oczekiwaną, wariancję/; rzeczywista /chwilona/ wartość wielkości mierzonej może pozostawać nieokreślona na danym etapie procesu pomiarowego,
- w przypadku ogólnym pomiar uważa się za ciąg operacji o ograniczonym i skończonym czasie trwania, a bezpośredniego porównania wielkości mierzonej z jednostką miary nie dokonuje się wcale,

- właściwości urządzenia pomiarowego mogą zmieniać się w czasie pod wpływem zmiennych z natury czynników zewnętrznych /są to zmiany traktowane jako procesy losowe wpływające na nieokreśloność wyniku pomiaru/."

Podejście informacyjne traktuje proces pomiarowy jako szereg kolejnych operacji przetwarzania realizowanych przez elementy/ kanały i bloki pomiarowe/ informacyjnych systemów pomiarowych.

Przed przystąpieniem do pomiarów obserwator dysponuje zwykle pewną wiedzą o wielkości mierzonej, którą można opisać rozkładem gęstości prawdopodobieństwa. Ponadto winien dysponować podobną informacją dotyczącą innych wielkości skorelowanych z wielkością mierzoną bądź wpływających na proces pomiarowy. W wyniku eksperymentu obserwator uzyskuje inny rozkład gęstości prawdopodobieństwa wielkości mierzonej. Zależy on od poziomu organizacji eksperymentu i stopnia doskonałości pomiaru z uwzględnieniem szumu aparatury, wpływu czynników zewnętrznych, poziomu kwantowania i częstotliwości próbkowania. Wystąpią też niemożliwe do usunięcia czynniki dezinformacyjne związane z charakterem wielkości mierzonej i zniekształceniem jej przez oddziaływanie czujnika.

Naturalnym następstwem opisanego wyżej rozumienia procesu pomiarowego jest przyjęcie takiej charakterystyki wyników pomiarów, która byłaby funkcjonałem rozkładów gęstości prawdopodobieństwa /względnie funkcją parametrów tych rozkładów/ wielkości mierzonej, wielkości skorelowanych z wielkością mierzoną lub też wielkości wpływających na proces pomiarowy, a więc np. funkcjonałem probabilistycznych charakterystyk metrologicznych aparatury.

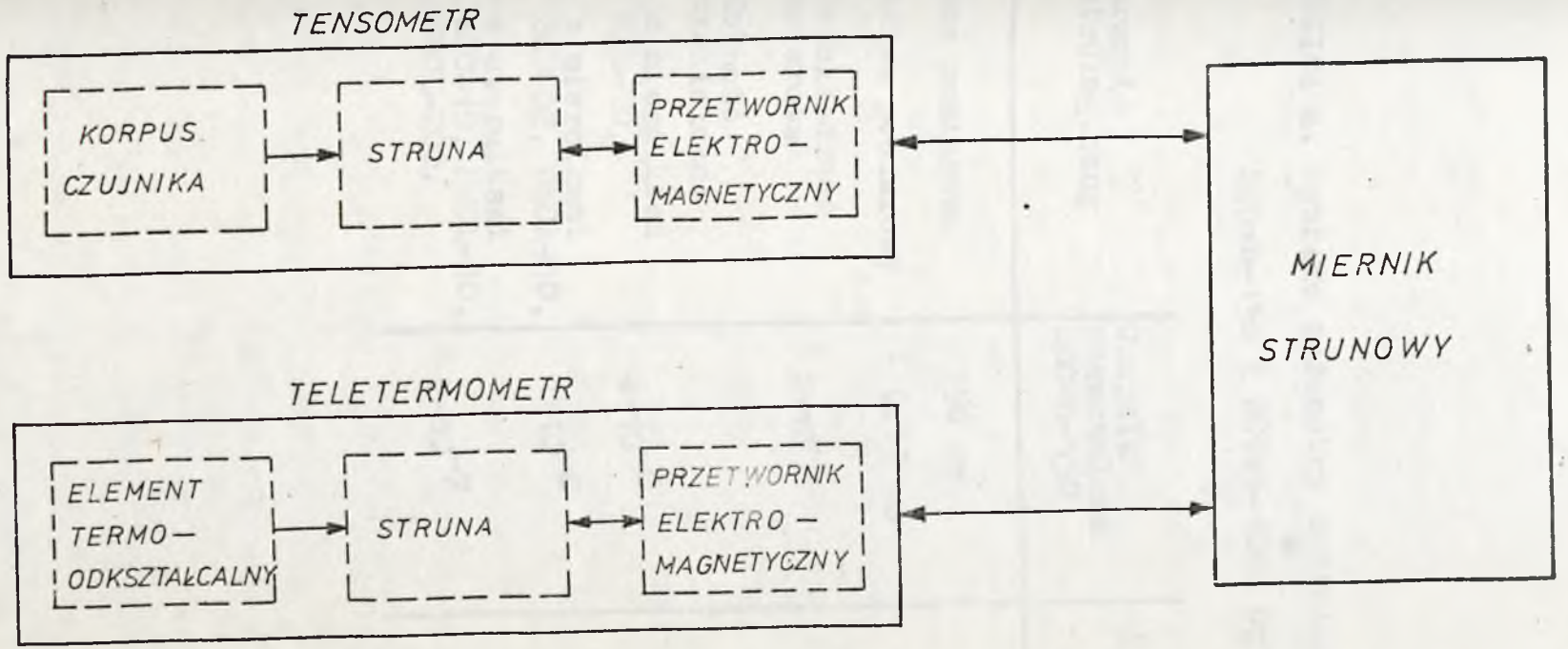
W przypadku pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu prowadzonych wewnątrz masywu przy użyciu tensometru zerowego i teletermometru dysponujemy dwukanałowym systemem pomiarowym o strukturze przedstawionej na rysunku 11.
Jest to system szeregowo-równoległy złożony z dwóch kanałów i jednego wspólnego bloku - miernika strunowego.
W każdym z kanałów - stanowiących połączenie łańcuchowe szeregu przetworników - sygnały pomiarowe ulegają kilkakrotnemu przetworzeniu.
W pierwszym kanale - tensometrycznym - wyróżnić należy trzy przetworniki:

- korpus czujnika przetwarzający odkształcenie betonu na wzajemne przemieszczenie końców zamocowania struny,
- strunę przetwarzającą zmiany własnych odkształceń sprężystych na swoje poprzeczne drgania mechaniczne,
- przetwornik elektromagnetyczny przetwarzający drgania mechaniczne struny na drgania elektryczne.

W drugim kanale - termometrycznym - również są trzy przetworniki:

- element termoodkształcalny przetwarzający zmiany temperatury na wzajemne przemieszczenie końców zamocowania struny,
- struna działająca jak w tensometrze,
- przetwornik elektromagnetyczny działający jak w tensometrze.

W praktyce nie określa się jednak charakterystyk metrologicznych wyżej przedstawionych elementów systemu pomiarowego, które odpowiadałyby wymaganiom informacyjnej teorii pomiarów. Użytkownikowi aparatury strunowej znane są tylko wybrane, klasyczne parametry metrologiczne. W odniesieniu do czujników



Rys. 11 Schemat informacyjnego systemu pomiarowego do pomiaru odkształceń i temperatury betonu. Opracowanie własne.

TABLICA 8. Wybrane parametry metrologiczne czujników SCOwb-150 i SCTwb-100. Opracowanie wg [63].

Parametr metrologiczny	Czujnik odkształceń SCOwb-150	Czujnik temperatury SCTwb-100
baza pomiarowa	150 mm	-
zakres pomiarowy	± 0.15 mm	$-30^{o}C$ ÷ $+70^{o}C$
niedokładność pomiarowa	$2 \cdot 10^{-5}$	$1^{o}C$
zdolność rozdzielcza:		
- z miernikiem SAM-10,	$4 \cdot 10^{-6}$	$0.2^{o}C$
- z miernikami SMC-02, SMCA-10,	$1 \cdot 10^{-6}$	$0.05^{o}C$
- z miernikami SMC-10, SMCL-10, SMCL-200.	$7 \cdot 10^{-7}$	$0.036^{o}C$

SCOwb-150 i SCTwb-100 przedstawiono je w tablicy 8.
Dane zawarte w tablicy obliczono na podstawie informacji zawartych w pozycji [63] .
W pracach [4] i [87] analizowano - w ujęciu metrologii klasycznej - wpływ różnych czynników na wyniki pomiarów czujnikami strunowymi. Stwierdzono, że zmiana wymiarów geometrycznych struny, odchyłka od prawa Hooke'a, sztywność struny, jej tłumienie, amplituda drgań, niedostateczna sztywność zamocowania struny oraz wpływ generatora mogą wywoływać błędy rzędu 10^{-6}. Natomiast "głównym czynnikiem ograniczającym praktyczną czułość czujnika strunowego jest temperatura" [4] .
Z tego względu w dalszej części pracy analizowano wpływ temperatury na błąd pomiaru jednostkowych odkształceń termicznych. Analizę prowadzono w duchu informacyjnej teorii pomiarów akcentując aspekt statystyczny takiego ujęcia.

4.3.2. SPRAWDZENIE LOSOWOŚCI SERII WARTOŚCI BŁĘDU δ_i

W przypadku pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zestaw uzyskanych wyników i błędów ich określenia stanowi pewną reprezentację nieskończonego zbioru wszystkich możliwych do uzyskania rezultatów. Choć uzyskiwanie wyników przedstawionych w tablicach 3 - 6 trudno nazwać losowaniem, to jednak można wykazać, że mają one charakter próby losowej. Służą temu testy losowości.
Poniżej sprawdzono losowość ciągów wartości δ_i w wyodrębnionych wcześniej /rozdział 4.1/przedziałach czasowych. Wykorzystano test serii opisanej w pracy [74] .

W tym celu serie wartości δ_i /istotna jest kolejność uzyskiwania wartości δ_i/ zakodowano przy pomocy znaków + lub - zależnie od tego, czy dana wartość δ_i była większa od mediany próby czy też od niej mniejsza; wartości równe medianie pomija się. Serie wartości δ_i, ciągi rozdzielcze wartości δ_i - na ich podstawie określono mediany - oraz ciągi znaków przedstawiono w tablicach załącznika 1; mają one charakter wyłącznie pomocniczy. W ciągach tych poszczególne serie znaków + i - połączono klamrami co ułatwia zliczanie serii w ciągu.

Jeśli oznaczyć przez R ilość serii znaków różnej liczebności a przez n_1 i n_2 ilość znaków - i + w ciągach, to z teorii serii wynika, że próba może być uznana za losową gdy:

$$R_1(n_1, n_2, \alpha) \leqslant R \leqslant R_2(n_1, n_2, \alpha) \qquad /16/$$

gdzie: R_1, R_2 - krytyczne wartości liczby serii zależne od n_1, n_2 i poziomu istotności testowania α.

Wyniki pośrednie i rezultaty końcowe testu serii przedstawiono: dla danych z okresu budowy w tablicy nr 9, dla danych zakresu eksploatacji w tablicy nr 10.

Wartości krytyczne R_1 i R_2 zaczerpnięto z tablicy IX pracy [74] dla odpowiednich par liczb n_1 i n_2 przy poziomie istotności testu 5%.

Wyniki testu serii analizowanych ciągów wartości błędu δ_i wskazują, że w każdym przypadku ciągi te mają charakter próby losowej.

Uzasadnia to sensowność dalszych opracowań statystycznych.

TABLICA 9. Wyniki testu serii ciągów wartości δ_i / dane z okresu od zabetonowania czujników do końca 1978 roku /. Poziom istotności testu 5%.

Miejsce pomiaru Symbole czujników	Ilość elementów ciągu: mniejszych od mediany n_1	Ilość elementów ciągu: większych od mediany n_2	Krytyczna liczba serii R_1	Liczba serii w ciągu R	Krytyczna liczba serii R_2	Wynik testu
sekcja 6 Ts01; Tt3	14	14	9	17	20	próba losowa
sekcja 6 Ts02; Tt5	13	9	6	10	16	próba losowa
sekcja 8 Ts01; Tt3	9	6	4	9	12	próba losowa
sekcja 10 Ts05; Tt2	4	4	-	6	8	próba losowa

TABLICA 10. Wyniki testu serii ciągów wartości δ_i / dane z lat 1979-82 /.

Poziom istotności testu 5%.

Miejsce pomiaru Symbole czujników	Ilość elementów ciągu: mniejszych od mediany n_1	większych od mediany n_2	Krytyczna liczba serii R_1	Liczba serii w ciągu R	Krytyczna liczba serii R_2	Wynik testu
sekcja 6 TsO1; Tt3	10	10	6	12	15	próba losowa
sekcja 6 TsO2; Tt5	9	9	5	6	14	próba losowa
sekcja 8 TsO1; Tt3	11	11	7	14	16	próba losowa
sekcja 10 TsO5; Tt2	11	11	7	13	16	próba losowa

4.3.3. PARAMETRY STATYSTYCZNE WARTOŚCI BŁĘDU δ_i I ICH ZWIĄZKI Z TEMPERATURĄ BETONU.

Analiza wartości błędu δ_i z jakim określa się wewnątrz masywu współczynnik odkształcalności cieplnej betonu α_b /vide tablice 3 - 6/ wskazuje, że w ogromnej większości przekraczają one możliwą - z teoretycznego punktu widzenia /vide rozdział 3/ - zmienność tego współczynnika.
Z kolei wyniki analiz źródeł błędu pomiarów czujnikami strunowymi [4] , [87] wskazują na temperaturę jako przyczynę najistotniej zaburzającą proces pomiaru. W istocie chodzi tu o różnice temperatur betonu i czujnika w chwili odczytu, jak również różnice temperatur czujnika między terminami kolejnych odczytów. W praktyce zróżnicowanie temperatur czujnika i otaczającego go betonu pomija się, a uwzględnia jedynie różnice temperatur między pomiarami. Utrzymując założenie o stałości współczynnika odkształcalności cieplnej betonu, podstawowej przyczyny błędu w pomiarach tej wielkości upatrywać należy we wpływie różnic temperatur betonu między kolejnymi pomiarami.
Wykorzystując dane zawarte w tablicach 3 - 6 na czterech kolejnych rysunkach załącznika nr 2 przedstawiono punkty o współrzędnych $/\Delta T;\ \delta_i/$. Każda z czterech analizowanych "chmur" punktów doświadczalnych jest - zasadniczo rzecz biorąc - symetryczna względem osi układu współrzędnych. Wynika stąd możliwość zaniedbania znaku różnic temperatur betonu i wiązania statystycznych charakterystyk błędu δ_i z wartościami bezwzględnymi tych różnic.

Biorąc pod uwagę zasadniczą jednorodność grup błędu δ_i określonych w czterech różnych miejscach pomiaru α_b tj. ich losowość i niezależność od znaku różnic temperatur zdecydowano o dalszym nierozróżnianiu wartości δ_i pod względem miejsca ich określenia.

Należy zauważyć, że różnice wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu związane z lokalnymi właściwościami betonu w miejscu pomiaru α_b /wynikającymi z niejednorodności ośrodka/ wyeliminowano już przez wprowadzenie wielkości δ_i /vide wzór 15/. Uzyskane w ten sposób wartości charakteryzują proces pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu niezależnie od wartości wielkości mierzonej.

Zgodnie z powyższymi ustaleniami wartości δ_i pogrupowano zależnie od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$ /załącznik nr 3/. Zachowano przy tym rozróżnienie danych z okresu budowy od danych z okresu eksploatacji obiektu. Dobór wielkości przedziałów $|\Delta T|$ jest wynikiem kompromisu pomiędzy warunkiem dostatecznej i możliwie mało zróżnicowanej liczebności grup wyników, a ilością i wielkością przedziałów $|\Delta T|$.

Dla każdej z grup wartości δ_i wyodrębnionych na podstawie wartości modułu różnicy temperatur betonu i przynależności do jednego z dwóch charakterystycznych okresów istnienia budowli obliczono:

- wartość średnią $\bar{\delta}$ ze wzoru:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \delta_i \qquad /17/$$

w którym: δ_i - wartość błędu w danej grupie wyników;

n - ilość wartości δ_i w grupie;

- odchylenie standardowe **s** według wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\delta_i - \bar{\delta})^2} \qquad /18/$$

- miary kształtu rozkładu:

a/ współczynnik skośności A_3 [1/] według wzoru:

$$A_3 = \frac{m_3}{s^3} \qquad /19/$$

gdzie:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \delta_i^3 - \frac{3}{n} \bar{\delta} \sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 + 2 \bar{\delta}^3 \qquad /20/$$

jest tzw. trzecim momentem centralnym,

s^3 - sześcian oszacowania odchylenia standardowego

b/ współczynnik spłaszczenia A_4 [2/] według wzoru:

$$A_4 = \frac{m_4}{s^4} \qquad /21/$$

1/ Współczynnik skośności $A_3 > 0$ wskazuje na asymetrię dodatnią rozkładu /wartość średnia większa od mediany, a większa część powierzchni pod wykresem funkcji gęstości prawdopodobieństwa leży po lewej stronie wartości średniej/. Z kolei współczynnika $A_3 < 0$ wskazuje na asymetrię ujemną rozkładu.

2/ Wartości współczynnika spłaszczenia $A_4 > 3$ wskazują na większe spłaszczenie wykresu funkcji gęstości rozkładu w porównaniu z rozkładem normalnym; wartości $A_4 < 3$ wskazują na smukłość większą od smukłości rozkładu normalnego.

gdzie:

$$m_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^4 - \frac{4}{n}\bar{\delta}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^3 + \frac{6}{n}\bar{\delta}^2\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2 - 3\bar{\delta}^4 \qquad /22/$$

jest tzw. czwartym momentem centralnym,

s^4 - kwadrat oszacowania wariancji.

Wyniki obliczeń wraz z wartościami pośrednimi przedstawiono: dla danych z okresu budowy w tablicy nr 11, dla danych z okresu eksploatacji w tablicy nr 12.

Obliczone parametry statystyczne $\bar{\delta}$, s , A_3 i A_4 przedstawiono w funkcji $|\Delta T|$ na rysunkach 12,13,14 i 15. Przyjęto, że przedział $|\Delta T|$ reprezentowany jest przez swoją wartość środkową, której odpowiada obliczona wartość parametru statystycznego. Zależność s $/|\Delta T|/$ estymowano związkiem potęgowym uzyskując w każdym przypadku wysoki stopień zgodności. W przypadku pozostałych zależności postać związku regresyjnego nie jest oczywista i z tego względu wybrano najprostszą - liniową.

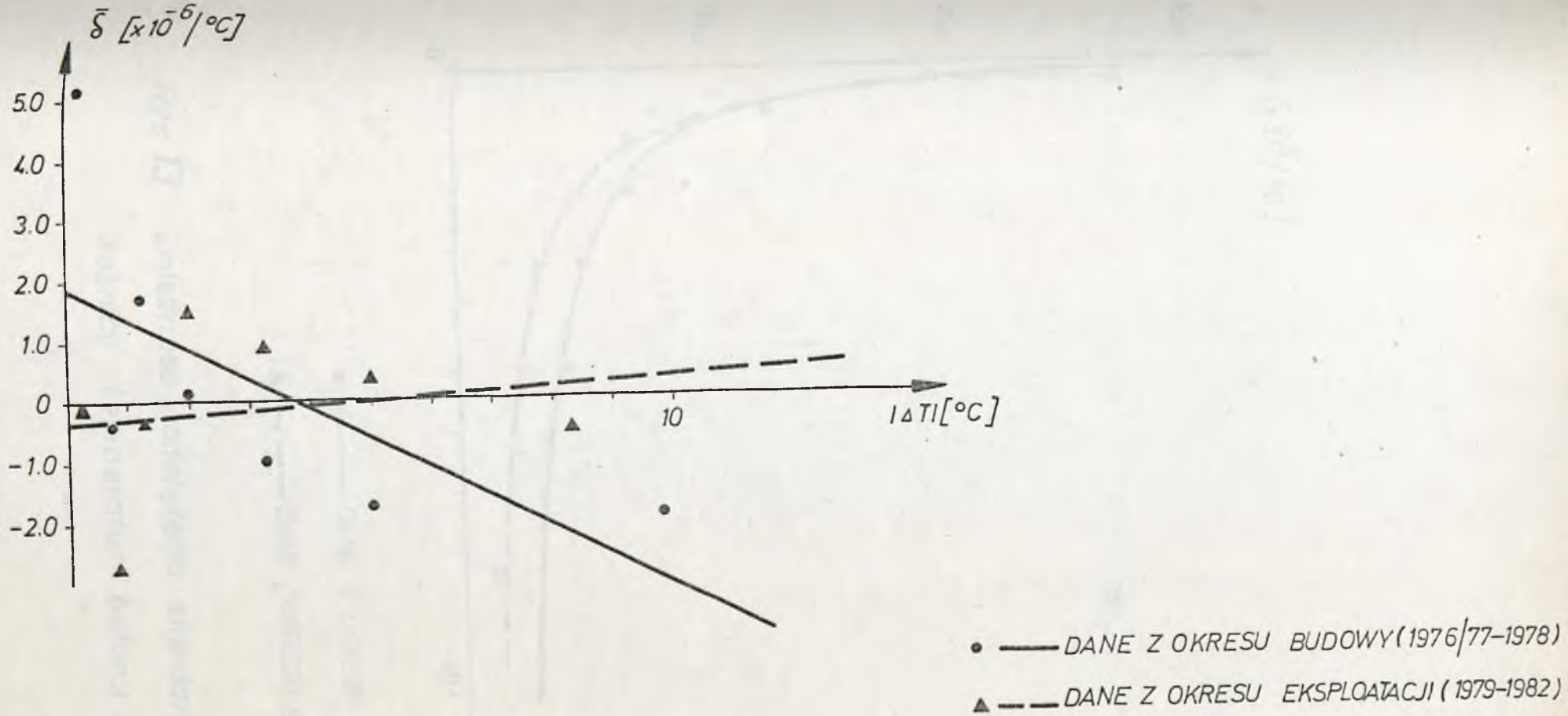
Współczynniki postulowanych związków regresyjnych estymowano metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki obliczeń przedstawia tablica nr 13. W ostatniej kolumnie tablicy 13 określono błąd odrzucenia hipotezy o braku korelacji między analizowanymi zmiennymi. Wykorzystano tu dane zawarte w tablicy 8.2 pracy [75] . Podano w niej - w funkcji stopni swobody od 1 do 50 i dla wartości prawdopodobieństwa od 0.001 do 0.1 - maksymalne bezwzględne wartości współczynnika korelacji r , jakie mogą pojawić się przypadkowo przy braku zależności między zmiennymi.

TABLICA 11. Parametry statystyczne próby wielkości błędu δ_i dla danych z lat 1976/77-1978.

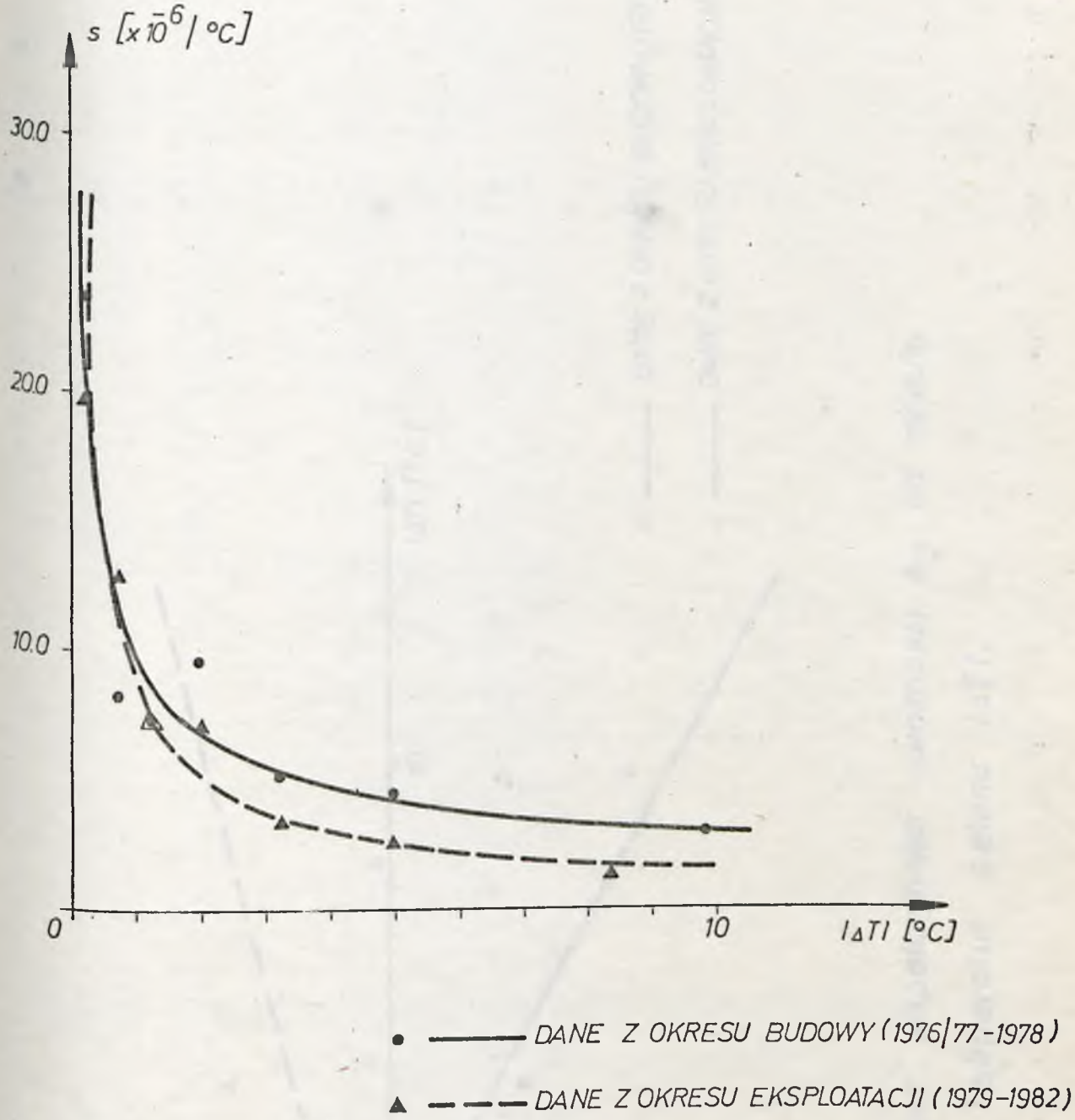
Przedział $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	0.0 ÷ 0.5	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 4.0	4.0 ÷ 6.0	6.0 ÷ 13.62
Wartość środkowa przedziału $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	0.25	0.75	1.25	2.00	3.25	5.00	9.8
Ilość n wartości δ_i [-]	9	20	18	15	11	5	8
$\bar{\delta}$ [$\times 10^{-6}$/°C]	5.139	-0.420	1.714	0.155	-0.980	-1.752	-1.958
s^2 [$\times 10^{-12}$/°C]	564.5455	69.4382	54.5156	92.2489	26.0737	20.1116	7.8620
s [$\times 10^{-6}$/°C]	23.760	8.333	7.384	9.605	5.106	4.485	2.804
$\sum_1^n \delta_i^2$ [$\times 10^{-12}$/°C]	4754.0379	1322.8534	979.6730	1291.8465	271.3010	95.7940	85.6884
$\sum_1^n \delta_i^3$ [$\times 10^{-18}$/°C]	189938.7603	1793.3406	414.9030	-1843.7134	-922.4983	-683.9406	-549.1738
$\sum_1^n \delta_i^4$ [$\times 10^{-24}$/°C]	12675085.2	221290.2665	135237.8248	440459.3800	20638.5583	5709.2621	3900.4402
m_3 [$\times 10^{-18}$/°C]	13232.2170	172.8586	-246.7972	-163.0315	-13.2345	-46.8450	-20.7476
A_3 [-]	0.986	0.299	-0.613	-0.184	-0.099	-0.519	-0.941
m_4 [$\times 10^{-24}$/°C]	1056136.2000	11285.0660	8289.0349	29452.7740	1686.8429	507.8238	152.2590
A_4 [-]	3.314	2.340	2.789	3.461	2.481	1.256	2.463

TABLICA 12. Parametry statystyczne próby wielkości błędu δ_i dla danych z lat 1979-82.

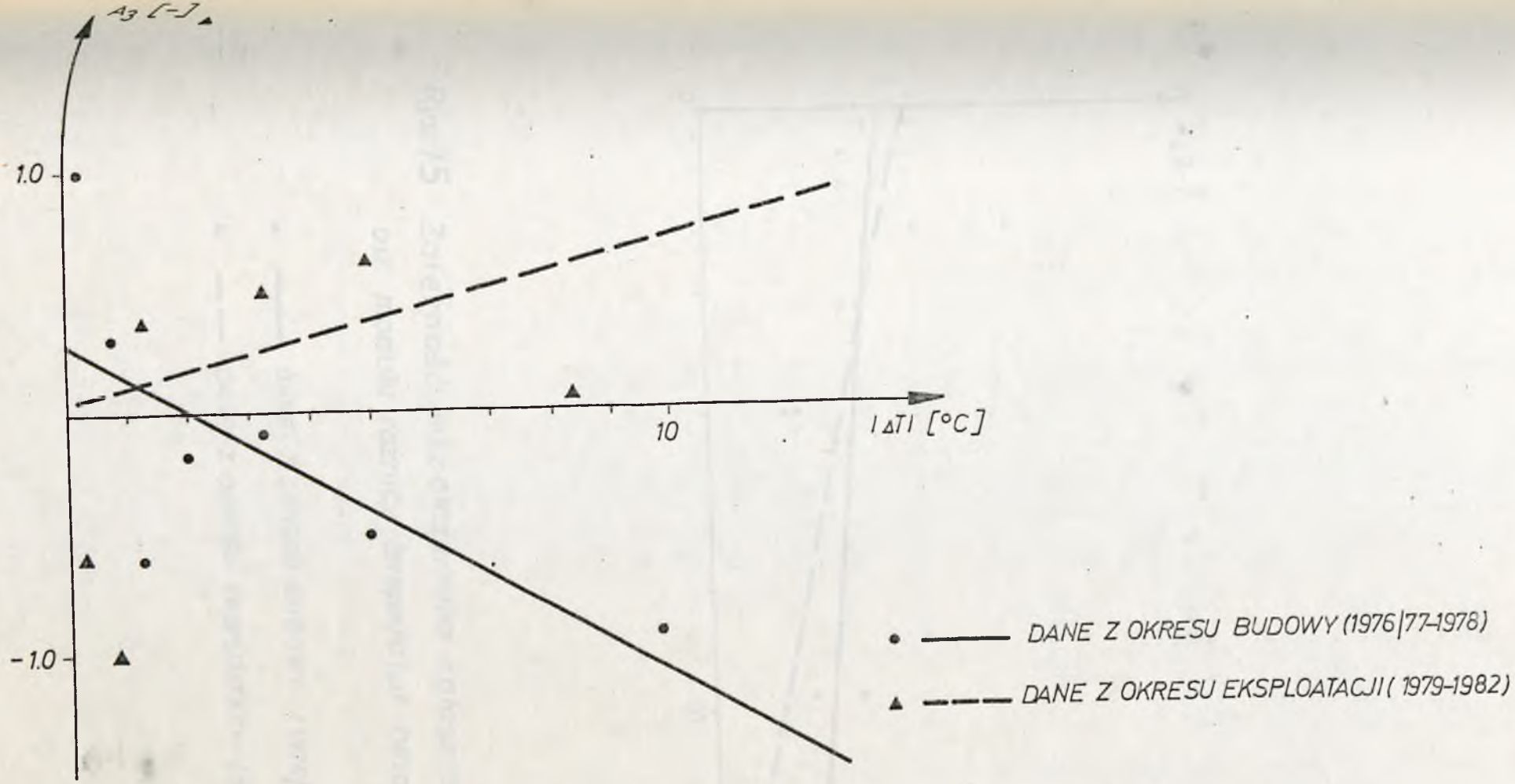
Przedział $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	0.0 ÷ 0.5	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 4.0	4.0 ÷ 6.0	6.0 ÷ 10.66
Wartość środkowa przedziału $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	0.25	0.75	1.25	2.00	3.25	5.00	8.3
Ilość n wartości δ_i [-]	14	18	18	10	8	8	7
$\bar{\delta}$ [$\times 10^{-6}$/°C]	-0.072	-2.754	-0.326	1.450	0.886	0.305	-0.579
s^2 [$\times 10^{-12}$/°C]	390.6140	167.7750	51.7798	50.3962	12.2871	7.4574	1.6656
s [$\times 10^{-6}$/°C]	19.764	12.953	7.196	7.099	3.505	2.731	1.291
$\sum_1^n \delta_i^2$ [$\times 10^{-12}$/°C]	5078.0545	2988.6845	882.1650	474.5908	92.2935	52.9462	12.3371
$\sum_1^n \delta_i^3$ [$\times 10^{-18}$/°C]	-66065.8824	-63175.0065	1647.0859	8115.3288	406.2226	149.8354	-17.8933
$\sum_1^n \delta_i^4$ [$\times 10^{-24}$/°C]	5823285.462	2199965.727	107331.6114	168795.3928	3793.9979	833.9832	51.7833
m_3 [$\times 10^{-18}$/°C]	-4640.5363	-2179.7371	139.3079	611.1831	21.4983	12.7304	0.1157
A_3 [-]	-0.601	-1.003	0.374	1.708	0.499	0.625	0.054
m_4 [$\times 10^{-24}$/°C]	414599.3200	90941.4270	6113.1835	12758.0830	346.7642	85.0660	4.6855
A_4 [-]	2.717	3.231	2.280	5.023	2.297	1.530	1.689



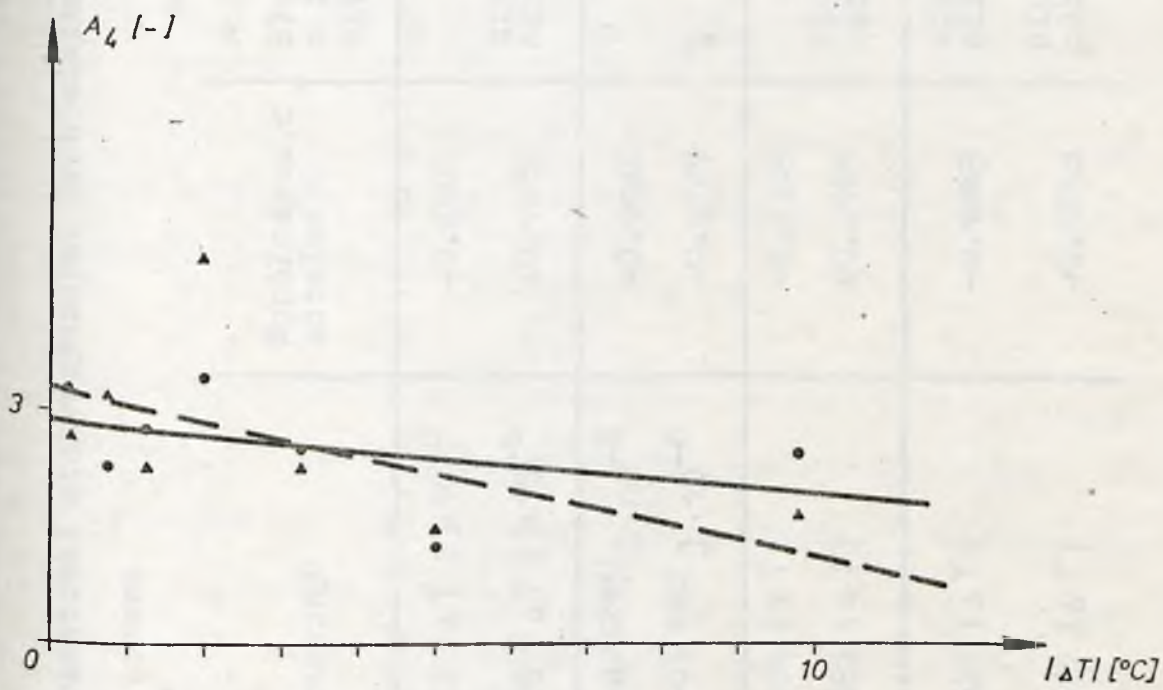
Rys. 12 Zależność błędu średniego $\bar{\delta}$ od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$.



Rys 13 Zależność odchylenia standardowego s od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$.



Rys. 14 Zależność współczynnika skośności A_3 od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$.



Rys. 15 Zależność współczynnika spłaszczenia A_4 od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$

● ——— DANE Z OKRESU BUDOWY (1976/77 – 1978)

▲ — — DANE Z OKRESU EKSPLOATACJI (1979-1982)

TABLICA 13. Związki regresyjne między parametrami statystycznymi prób wielkości błędu δ_i a modułem różnicy temperatur betonu.

Korelowane wielkości	Dane z lat:	Związek regresyjny	Współczynnik korelacji	Błąd odrzucenia hipotezy o braku korelacji między zmiennymi
$\bar{\delta}$; $\lvert\Delta T\rvert$	1976/77-78	$\bar{\delta} = [1.8812 - 0.5052 \lvert\Delta T\rvert] \cdot 10^{-6}$	-0.6800	10%
	1979-82	$\bar{\delta} = [-0.3516 + 0.0659 \lvert\Delta T\rvert] \cdot 10^{-6}$	+0.1402	hipotezy nie można odrzucić-brak korelacji
s_i; $\lvert\Delta T\rvert$	1976/77-78	$s = [9.7897 \lvert\Delta T\rvert^{-0.5233}] \cdot 10^{-6}$	-0.9486	1%
	1979-82	$s = [8.7362 \lvert\Delta T\rvert^{-0.7662}] \cdot 10^{-6}$	-0.9729	0.1%
A_3; $\lvert\Delta T\rvert$	1976/77-78	$A_3 = 0.2949 - 0.1406 \lvert\Delta T\rvert$	-0.7309	10%
	1979-82	$A_3 = 0.0398 + 0.0661 \lvert\Delta T\rvert$	+0.2144	hipotezy nie można odrzucić-brak korelacji
A_4; $\lvert\Delta T\rvert$	1976/77-78	$A_4 = 2.8820 - 0.0929 \lvert\Delta T\rvert$	-0.4249	hipotezy nie można odrzucić-brak korelacji
	1979-82	$A_4 = 3.3279 - 0.2177 \lvert\Delta T\rvert$	-0.5248	hipotezy nie można odrzucić-brak korelacji

W każdym z analizowanych przypadków ilość stopni swobody wynosiła 5. Stwierdzono, że cztery z badanych zależności są przypadkowe /parametry $\bar{\delta}$ i A_3 dla tych danych z okresu eksploatacji i parametr A_4 dla obu grup danych/ a dwie inne zależności /parametry $\bar{\delta}$ i A_3 dla danych z okresu budowy/ są istotne na poziomie 10% ale już nie na poziomie 5%. Pozostałe dwie zależności /odchylenia standardowego s od modułu różnicy temperatur betonu dla danych z okresu budowy oraz dla danych z okresu eksploatacji obiektu/ są bardzo prawdopodobne.

Z kolei sprawdzono istotność różnicy związków opisujących zależności odchyleń standardowych w okresie budowy i w okresie eksploatacji od modułu różnicy temperatur. Posłużono się testem t według rozdziału 8.1.5 pracy [75]. Służy on do badania istotności różnicy między dwoma współczynnikami nachylenia prostych regresji.

Statystyka testowa t wyraża się wzorem

$$t = \frac{b_1 - b_2}{s(\hat{y})_p \left(\frac{1}{\sum' x_1^2} + \frac{1}{\sum' x_2^2} \right)^{1/2}} \qquad /23/$$

przy $N_1 + N_2 - 4$ stopniach swobody.

Oznaczenia: b_1, b_2 - porównywane współczynniki nachylenia prostych,

$\sum' x_1^2$ $\sum' x_2^2$ - sumy kwadratów odchyleń zmiennych niezależnych X_1 /pierwszy związek regresyjny/ i X_2 /drugi związek regresyjny/ od odpowiednich średnich,

N_1, N_2 - ilości punktów do wyznaczenia prostych regresji,

$s(\hat{y})_p$ - łączne oszacowanie odchylenia standardowego współczynnika nachylenia według wzoru:

$$s(\hat{y})_p = \left(\frac{(N_1-2)s^2(\hat{y}_1)+(N_2-2)s^2(\hat{y}_2)}{(N_1-2)+(N_2-2)} \right)^{1/2} \qquad /24/$$

gdzie: $s^2(\hat{y}_1)$ $s^2(\hat{y}_2)$ - wariancje oszacowywania z dwóch korelacji; każdą z nich oblicza się według wzoru:

$$s^2(\hat{y}) = \frac{(1-r^2)\Sigma' y^2}{N-2} \qquad /25/$$

w którym: r - współczynnik korelacji,

$\Sigma' y^2$ - suma kwadratów odchyleń zmiennej zależnej y od wartości średniej.

Możliwość wykorzystania wyżej przedstawionego testu do badania związków potęgowych wynika z ich liniowej reprezentacji w układzie logarytmicznym. Obliczenie współczynników regresji badanych zależności dokonuje się również dzięki takiemu linearyzującemu przekształceniu. W przypadku relacjonowanych obliczeń wykorzystano kalkulator z odpowiednim oprogramowaniem.

Stąd też pochodzą potrzebne tu wartości:[1/]

1/ W zestawieniu pominięto wymiary i ewentualne mnożniki przedstawionych wielkości jako nieistotne w tych obliczeniach.

$N_1 = 7$ $\qquad$ $N_2 = 7$

$b_1 = -0.523$ $\qquad$ $b_2 = -0.766$

$r_1 = -0.9486$ $\qquad$ $r_2 = -0.9729$

$\Sigma' x_1^2 = 9.0692$ $\qquad$ $\Sigma' x_2^2 = 8.5467$

$\Sigma' y_1^2 = 2.7605$ $\qquad$ $\Sigma' y_2^2 = 5.3013$

Na tej podstawie obliczno kolejno:

$$s^2(\hat{y}_1) = 0.0553$$

$$s^2(\hat{y}_2) = 0.0567$$

$$s(\hat{y})_p = 0.2366$$

$$t = 2.154$$

Wartości progowe statystyki t odczytano z tablicy 6.1 pracy [75] dla poziomów istotności 5% i 10% przy ilości stopni swobody 10:

$$t_{0.05;10} = 2.228$$

$$t_{0.10;10} = 1.812$$

Zachodzi relacja:

$$t_{0.10;10} < t < t_{0.05;10}$$

co oznacza, że istnieje 90% szans niepopełnienia błędu przy stwierdzeniu istotnej różnicy porównywanych współczynników nachylenia, ale nie ma 95% takiej szansy.

Biorąc pod uwagę wyniki testu i przesłanki praktyczne zachowano rozróżnienie związków $s\ /|\Delta T|/$ w zależności od okresu prowadzenia pomiarów. Tworzenie łącznej zależności jest

niewskazane. Okres budowy jest już zamknięty i zdecydowanie krótszy niż czas przewidywanej eksploatacji obiektu. Warunki pomiarów panujące podczas wznoszenia zapory ustały i nie powinny wpływać na ocenę dalszych badań.

4.3.4. ROZKŁAD STATYSTYCZNY BŁĘDU POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA ODKSZTAŁCALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU WEWNĄTRZ MASYWU.

Analiza obliczonych parametrów statystycznych prób wartości błędu δ_i /tablica 11 i 12/ oraz wyniki badania zależności tych patametrów od modułu różnicy temperatur betonu /rysunki 12 - 15 i tablica 13/ upoważniają do postawienia następującej hipotezy:

Błąd określenia współczynnika odkształcalności cieplnej betonu przez pomiar odkształceń i temperatur we wnętrzu masywu podlega rozkładowi normalnemu /rozkład symetryczny - $A_3 = 0$/ o wartości średniej równej zero i odchyleniu standardowym danym wzorem:

$$s = 9.790 \cdot 10^{-6} \cdot |\Delta T|^{-0.523} \qquad /26/$$

przy zmieniających się warunkach wymiany cieplnej między masywem a otoczeniem /okres budowy/ lub:

$$s = 8.736 \cdot 10^{-6} \cdot |\Delta T|^{-0.766} \qquad /27/$$

w ustabilizowanych warunkach wymiany w okresie eksploatacji obiektu.

W powyższych wzorach ΔT oznacza różnicę temperatur, przy której określa się współczynnik odkształcalności cieplnej betonu.

Zasadność tak sformułowanej hipotezy statystycznej sprawdzono metodą siatek [52] .

W tym celu na siatki rozkładu normalnego naniesiono dystrybuanty empiryczne grup wartości błędu δ_i wyodrębnionych wcześniej /załącznik nr 3/ pod względem wartości modułu różnicy temperatur betonu i czasu pomiaru.

Wartości dystrybuanty F / δ_i / obliczono według wzoru:[1/]

$$F = (\delta_i) = \frac{i}{n+1} \qquad /28/$$

w którym: i - numer elementu δ_i w ciągu rozdzielczym,

n - ilość elementów ciągu.

Na siatki naniesiono także - w myśl sprawdzanej hipotezy - - dystrybuanty rozkładu normalnego o średniej zero i odchyleniu standardowym liczonym według wzoru /26/ lub /27/, tj. zależnie od okresu prowadzenia pomiarów i dla różnic temperatur, przy których wykonywano pomiary /wartości środkowe odpowiednich przedziałów $|\Delta T|$ - według tablicy 11 lub 12/.

Zgodność rozkładu postulowanego z empirycznym testowano stosując test λ [52] . Polega on na określeniu największego odchylenia dystrybuanty empirycznej od teoretycznej, w danej próbce, i porównaniu wartości tego odchylenia z wartością progową statystyki Kołmogorowa-Smirnowa λ . Wartości krytyczne zależą od liczności próbki i poziomu istotności testowania. Siatki funkcyjne rozkładu normalnego

---

1/ W istocie rzeczy jest to wzór na wartość oczekiwaną tej dystrybuanty [52] .

TABLICA 14. Wyniki testu zgodności λ .

Dane z okresu:	Moduł różnicy temperatur /°C/	Liczebność próby n /-/	Odchylenie maksymalne dystrybuanty empirycznej a /-/	Odchylenie krytyczne	Wynik testu zgodności / α = 5% /
budowy /1976/77-1978/	0.0 - 0.5	9	0.150	0.430	rozkłady można uznać za zgodne
	0.5 - 1.0	20.	0.144	0.294	rozkłady można uznać za zgodne
	1.0 - 1.5	18	0.180	0.309	rozkłady można uznać za zgodne
	1.5 - 2.5	15	0.110	0.338	rozkłady można uznać za zgodne
	2.5 - 4.0	11	0.110	0.391	rozkłady można uznać za zgodne
	4.0 - 6.0	5	0.155	0.563	rozkłady można uznać za zgodne
	6.0 -13.62	8	0.298	0.454	rozkłady można uznać za zgodne
eksploatacji /1979-1982/	0.0 - 0.5	14	0.095	0.349	rozkłady można uznać za zgodne
	0.5 - 1.0	18	0.100	0.309	rozkłady można uznać za zgodne
	1.0 - 1.5	18	0.150	0.309	rozkłady można uznać za zgodne
	1.5 - 2.5	10	0.150	0.409	rozkłady można uznać za zgodne
	2.5 - 4.0	8	0.165	0.454	rozkłady można uznać za zgodne
	4.0 - 6.0	8	0.178	0.454	rozkłady można uznać za zgodne
	6.0 -10.66	7	0.295	0.483	rozkłady można uznać za zgodne

z naniesionymi dystrybuantami empirycznymi i hipotetycznymi zawarto w załączniku nr 4. Dzięki nim zidentyfikowano punkty najbardziej odległe od dystrybuanty hipotetycznej /na rysunkach ujęto ją w okręgi/ i określono wartości tych odchyleń. Następnie porównano je z wartościami krytycznymi, odczytanymi z tablicy 7 pracy [52] , dla poziomu istotności α = 5% i odpowiedniej liczebności próbek n. Wyniki testu zgodności zamieszczono w tablicy 14.

W żadnym z badanych przypadków nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów empirycznych z postulowanymi. Z tego względu przedstawioną na wstępie rozdziału hipotezę można uznać za dopuszczalną /na poziomie istotności 5%/.

4.3.5. BŁĄD MAKSYMALNY

W celu określenia zależności błędu maksymalnego δ_{max} mierzonej wielkości współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b od modułu różnicy temperatur $|\Delta T|$ notowanych przy tych pomiarach w każdej z grup wartości błędu δ_i wyodrębnionych w załączniku 3 wybrano ekstremalne co do modułu realizacje zmiennej δ . Zestawiono je w tablicy 15. Zależność δ_{max} od modułu różnicy temperatur $|\Delta T|$ przedstawia rysunek 16. Zależności te estymowano związkami potęgowymi uzyskując dobre dopasowanie postaci funkcji do danych pomiarowych. Współczynnik korelacji dla danych z okresu budowy wynosi - 0.9286, a dla danych z okresu eksploatacji - 0.9488.

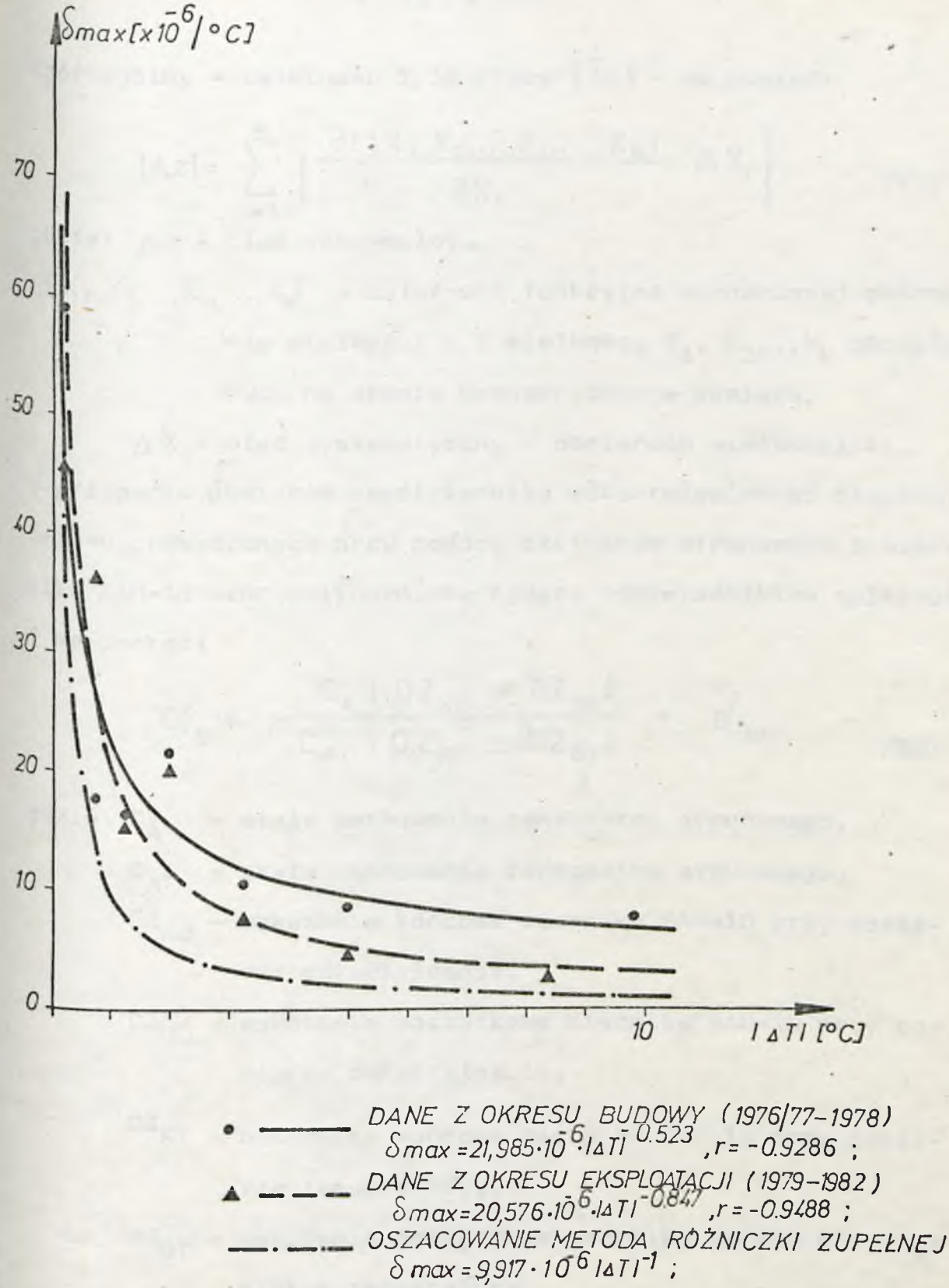
Niezależnie, błąd maksymalny wyznaczanej pośrednio wielkości współczynnika odkształcalności cieplnej betonu oszacowano metodą różniczki zupełnej.

TABLICA 15. Zestawienie błędów maksymalnych δ_{max} w funkcji modułu różnicy temperatur betonu.

Przedział $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	0.0 ÷ 0.5	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 4.0	4.0 ÷ 6.0	6.0 ÷ 13.62[x]
Wartość środkowa przedziału $\lvert\Delta T\rvert$; [°C]	0.25	0.75	1.25	2.00	3.25	5.00	9.8[xx]
δ_{max} [$\cdot 10^{-6}$/°C] Okres budowy /1976/77-78/	59.00	17.81	16.13	21.55	10.70	8.59	7.74
δ_{max} [$\cdot 10^{-6}$/°C] Okres eksploatacji /1978-82/	45.55	36.19	15.39	20.24	7.66	4.55	2.60

x - dla danych z okresu eksploatacji górna granica przedziału wynosi 10.66°C

xx - dla danych z okresu eksploatacji wartość środkowa przedziału wynosi 8.3°C



Rys. 16 Zależność błędu maksymalnego δ_{max} od modułu różnicy temperatur betonu $|\Delta T|$.

Wzór ogólny - zależność 1.18 pracy [74] - ma postać:

$$|\Delta z| = \sum_{i=1}^{k} \left| \frac{\partial f(X_1, X_2, \ldots, X_i, \ldots, X_k)}{\partial X_i} \Delta X_i \right| \qquad /29/$$

gdzie: Δz - błąd maksymalny,

$f(X_1, X_2, \ldots, X_i, \ldots, X_k)$ - zależność funkcyjna wyznaczanej pośrednio wielkości z i wielkości $X_1, X_2 \ldots X_k$ określonych na drodze bezpośredniego pomiaru.

ΔX_i - błąd systematyczny w pomiarach wielkości Xi.

W przypadku pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu prowadzonych przy pomocy czujników strunowych i miernika SAM-10 wzór obliczeniowy będący odpowiednikiem zależności f ma postać:

$$\alpha_b = \frac{C_A (DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT} (DZ_{KT} - DZ_{OT})} + \alpha_{str} \qquad /30/$$

gdzie: C_A - stała cechowania tensometru strunowego,

C_{AT} - stała cechowania termometru strunowego,

DZ_{KO} - wskazanie końcowe miernika SAM-10 przy pomiarze odkształcenia,

DZ_{OO} - wskazanie początkowe miernika SAM-10 przy pomiarze odkształcenia,

DZ_{KT} - wskazanie końcowe miernika SAM-10 przy pomiarze temperatury,

DZ_{OT} - wskazanie początkowe miernika SAM-10 przy pomiarze temperatury,

α_{str} - współczynnik odkształcalności cieplnej struny.

Ponieważ wielkości α_{str}, C_A i C_{AT} wyznacza się w warunkach laboratoryjnych i błąd ich określenia jest stosunkowo niewielki dlatego uznano, że do wzoru /29/ wejdą tylko pochodne

cząstkowe zależności /30/ po zmiennych $DZ_{KO}, DZ_{OO}, DZ_{KT}$ i DZ_{OT}.

$$\left|\frac{\partial \alpha_b}{\partial DZ_{KO}}\right| = \left|\frac{C_A}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \qquad /31/.$$

$$\left|\frac{\partial \alpha_b}{\partial DZ_{OO}}\right| = \left|\frac{-C_A}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| = \left|\frac{C_A}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \qquad /32/.$$

$$\left|\frac{\partial \alpha_b}{\partial DZ_{KT}}\right| = \left|\frac{-C_A(DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT}^2(DZ_{KT} - DZ_{OT})^2} \cdot C_{AT}\right| =$$

$$= \left|\frac{C_A(DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \cdot \left|\frac{1}{DZ_{KT} - DZ_{OT}}\right| \qquad /33/.$$

$$\left|\frac{\partial \alpha_b}{\partial DZ_{OT}}\right| = \left|\frac{-C_A(DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT}^2(DZ_{KT} - DZ_{OT})^2} \cdot (-C_{AT})\right| =$$

$$= \left|\frac{C_A(DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \cdot \left|\frac{C_{AT}}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \qquad /34/.$$

Stąd:

$$\delta_{max} = 2\left(\left|\frac{C_A}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| + \left|\frac{C_A(DZ_{KO} - DZ_{OO})}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right| \left|\frac{C_{AT}}{C_{AT}(DZ_{KT} - DZ_{OT})}\right|\right) \cdot \Delta DZ \qquad /35/$$

gdzie: ΔDZ - dokładność odczytu wskazania miernika SAM-10; w działkach skali miernika.

Ponieważ wyrażenie C_{AT} / DZ_{KT} - DZ_{OT} / jest różnicą temperatur betonu $|\Delta T|$ a ze wzoru /30/ wynika, że:

$$\frac{C_A(DZ_{KO}-DZ_{OO})}{C_{AT}(DZ_{KT}-DZ_{OT})} = \alpha_b - \alpha_{str} \qquad /36/$$

więc wzór /35/ można doprowadzić do postaci:

$$\delta_{max} = \frac{2\Delta DZ}{|\Delta T|}(C_A + |\alpha_b - \alpha_{str}| C_{AT}) \qquad /37/$$

Biorąc pod uwagę pomiary na zaporze Besko za C_A i C_{AT} przyjęto wartości średnie stałych cechowania tensometrów i termometrów tj. $C_A = 4.41 \cdot 10^{-6}$/DZ i $C_{AT} = 0.5325\ ^oC$/DZ. Uznano, że odczyty wskazań miernika SAM-10 dokonywane są z dokładnością 1 działki na skali przyrządu, choć w materiale pomiarowym /tablice 3 - 6/ zdarzają się i odczyty wykonane z dokładnością dwa razy większą.

Współczynnik rozszerzalności cieplnej struny przyjęto jako równy $11.7 \cdot 10^{-6}/^oC$, a za zmierzoną wartość współczynnika odkształcalności cieplnej betonu uznano średnią ze wszystkich pomiarów zawartych w tablicach 3-6 tj. wartość α_b = $= 10.67 \cdot 10^{-6}/^oC$.

Po podstawieniu tak określonych danych do wzoru /37/ otrzymano:

$$\delta_{max} = 9.917 \cdot 10^{-6}\ |\Delta T|^{-1} \qquad /38/$$

Zależność ujętą wzorem /38/ przestawiono na rysunku 16.

Z porównania wykresów uzyskanych na podstawie danych pomiarowych z wykresem błędu maksymalnego szacowanego metodą różniczki zupełnej wynika, że rzeczywiste ekstremalne realizacje zmiennej δ znacznie przewyższają wartości uzyskane drogą

szacowania. Wniosek ten dotyczy modułów różnicy temperatur $|\Delta T|$ większych od około 0.5°C. Poniżej tej granicy - przy krańcu bazy empirycznej estymowanych związków - wzajemne przebiegi wykresów są inne. Wynika to z postaci przyjmowanych funkcji i dużej ich wrażliwości na zmiany współczynników regresji w otoczeniu zerowej wartości argumentu. Dlatego też za wiążące należy traktować wnioski spoza tego otoczenia.

4.4. OMÓWIENIE WYNIKÓW ANALIZY STATYSTYCZNEJ.

Z analizy statystycznej błędu pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu wewnątrz masywu budowli hydrotechnicznej wynika, że przewidziany w rozdziale 4.1. podział danych pomiarowych na te z okresu wznoszenia obiektu i te z okresu jego eksploatacji jest w pełni uzasadniony.
O ile bowiem charakter rozkładów zmiennej losowej δ /vide sprawdzenie losowości ciągów wartości δ_i w rodziale 4.3.2./ pozostaje dla obu okresów prowadzenia pomiarów zasadniczo jednakowy /dopuszczalność opisu tej zmiennej przy pomocy rozkładu normalnego wykazano w rozdziale 4.3.4/, o tyle jeden z parametrów tego rozkładu /odchylenie standardowe/ zależy od okresu badań. W każdym przypadku obserwuje się istotny związek odchylenia standardowego błędu pomiaru z modułem różnicy temperatur betonu notowanych przy tych pomiarach /według tablicy 13 poziom ufności skorelowania tych wielkości jest nie mniejszy niż 99%/. Zależności te określone oddzielnie dla okresu budowy i oddzielnie dla okresu eksploatacji obiektu różnią się jednak istotnie od siebie /vide rozdział - 4.3.3/;

Oszacowania odchylenia standardowego z okresu budowy przewyższają odpowiednie oszacowania z okresu eksploatacji.
Powyższe wnioski wynikają z czysto formalnego potraktowania analizowanych wartości błędu δ . W takim ujęciu - jednakowym dla obu grup danych - stwierdza się jedynie skutki /w postaci wyników pomiarów i ich błędów/ - nic natomiast nie wiadowo o rodzących je przyczynach.
Istotne spostrzeżenia wynikają z rysunku 16. Skonfrontowano na nim wyniki deterministycznej oceny błędu maksymalnego przy pomiarze współczynnika odkształcalności cieplnej betonu /metoda różniczki zupełnej/ z rzeczywistymi realizacjami tego błędu. Oszacowanie metodą różniczki zupełnej daje wartości kilkakrotnie mniejsze niż te, które uzyskano z pomiarów. Wartości szacowane są porównywalne z odchyleniami standardowymi /vide rys. 13/, gdy tymczasem - zgodnie z teorią pomiarów [74] - powinny stanowić mniej więcej trzykrotną ich wielokrotność.
Wynika stąd wniosek, że o błędzie pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu we wnętrzu masywu decydować muszą czynniki inne niż parametry metrologiczne stosowanej aparatury /tensometr zerowy, teletermometr, miernik/.
Analiza warunków prowadzenia pomiarów każe tu wymienić:

1 zmienność właściwości betonu i jej wpływ na wielkość zakłóceń jakie wywołuje w badanym ośrodków obecność czujnika tensometrycznego,
2 cechy konstrukcyjne naczyń zerowych.

Poniżej, w kolejnych rozdziałach pracy, rozpatrzono wpływ tych czynników na pomiar odkształcalności cieplnej betonu.

5. WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI BETONU NA POMIAR JEGO WEWNĘTRZNYCH ODKSZTAŁCEŃ TERMICZNYCH.

5.1. STUDIA LITERATUROWE.

Umieszczenie tensometru wewnętrznego w badanym ośrodku wywołuje zakłócenie ciągłości ośrodka. Stan naprężeń i odkształceń w pewnym obszarze ośrodka obejmującym czujnik ulega zmianie względem stanu, który wystąpiłby w ośrodku wolnym od pogrążonego w nim czujnika, kabli itp. Według pracy [20] przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w następujących czynnikach:

- sztywności czujnika w stosunku do badanego ośrodka,
- przyczepności czujnika i ośrodka,
- kształcie samego czujnika i sposobie przyłączenia przewodów,
- przewodach, ich objętości i rozmieszczeniu,
- odmiennym zachowaniu się czujnika i ośrodka względem różnie skierowanych obciążeń oraz względem obciążeń przekraczających zakres sprężystych odkształceń ośrodka,
- odmiennym zachowaniu się w czasie quasi - sprężystego czujnika i lepkosprężystego ośrodka.

Wpływ wszystkich wymienionych czynników na wyniki pomiarów odkształceń nie został jak dotąd zbadany. Znane są wyniki badań nad wpływem niewielu spośród nich.

W pracach [20] i [73] przytoczono w sumie kilkadziesiąt wyników prac teoretycznych i eksperymentalnych mających na celu określenie ilościowego wpływu na pomiary czujnika traktowanego jako inkluzja w badanych ośrodku. Prezentowane zależności matematyczne wiążą przyjęte miary zakłóceń pomiaru

/np. współczynnik lokalnego wzrostu odkształceń, współczynnik koncentracji naprężeń, względny błąd pomiaru odkształcenia/ z właściwościami mechanicznymi ośrodka i czujnika /najczęściej są to moduły odkształcalności wzdłużnej i współczynniki Poissona/ oraz z kształtem i wymiarami korpusu czujnika. Zestaw cech, od których uzależnia się miary zakłóceń pomiaru, jak również postać zależności między nimi bywają różne. Wynika to z różnic założeń przyjmowanych w poszczególnych pracach bądź też z różnic w analizowanych danych empirycznych. Porównanie wyników liczbowych rozwiązań uzyskaznych przez różnych badaczy dla określonego typu czujnika wskazuje na istnienie rozbieżności dochodzących do 40% [73] . Mimo tego, zależności wiążące miary zakłóceń pomiaru z cechami czujnika i ośrodka /w szczególności z ich sztywnościami, kształtem i wymiarami czujnika/ są cennym źródłem poglądowej informacji o wzajemnych związkach tych wielkości.

Nieporównanie mniej prac dotyczy pozostałych wymienionych wcześniej źródeł zakłóceń pól odkształceń /niektórych zagadnień nie podjęto w ogóle/.

O badaniach wpływu kształtu czujnika na wielkość zakłóceń oraz o badaniach zasięgu tych zakłóceń wspomniano w pracy [20]. Wpływ przyczepności między czujnikiem a ośrodkiem na wyniki pomiarów badano w pracy [73] .

W wyniku elastooptycznych badań modelowych nie stwierdzono istotnego wpływu przyczepności lub jej braku na wyniki pomiaru. Badania dostarczyły też informacji o zasięgu zakłóceń.

Uderzającą cechą niemal wszystkich omawianych tu dociekań jest to, że dotyczą one pomiaru odkształceń lub naprężeń

wywołanych w ośrodku przez obciążenia zewnętrzne - równomierne i działające wzdłuż określonego kierunku. Wyjątek stanowić mogą wyniki analizy wpływu różnych współczynników odkształcalności termicznej ośrodka i czujnika na naprężenie termiczne wskazane przez czujnik; analizę taką prowadził Y.C. Loh [50] . Dominacja zagadnień współpracy czujnika z ośrodkiem obciążanym siłami zewnętrznymi nad problematyką pomiaru odkształceń termicznych czy wilgotnościowych ośrodka wynika z faktu, że w badaniach laboratoryjnych wpływ warunków higrotermicznych można redukować co najmniej do poziomu innych zakłóceć pomiaru. Inaczej jest jednak w przypadku badań odkształceń wewnętrznych prowadzonych "in situ", w szczególności zaś gdy badania te dotyczą konstrukcji masywnych np. hydrotechnicznych. Udział odkształceń fizyko-chemicznych betonu jest tu na tyle istotny, że powstaje konieczność ich określania /przez pomiar w naczyniach zerowych/ i eliminowania z całkowitego odkształcania betonu.

Z tej właśnie inspiracji wywodzą się badania laboratoryjne nad współpracą wewnętrznego strunowego czujnika odkształceń /typu SCOwb-150/ z ośrodkiem betonowym odkształcającym się termicznie.

Opis badań i ich wyniki przedstawiono w pracach [8] , [7] i [82]; dwie z tych pozycji - [8] i [7] - są sprawozdaniami przejściowymi z badań, a praca [82] ich podsumowaniem. W badaniach tych przyjęto, że miarą wpływu czujnika wewnętrznego na mierzone odkształcenie termiczne jest stosunek współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zmierzony przy użyciu tensometru wewnętrznego /SCOwb-150/ do współczynnika odkształcalności cieplnej

tego samego betonu wyznaczonego przez pomiar odkształceń na powierzchni betonu /przy użyciu tensometru zewnętrznego typu SCOpb-150/.

Badania prowadzono na próbkach zanurzonych w wodzie.

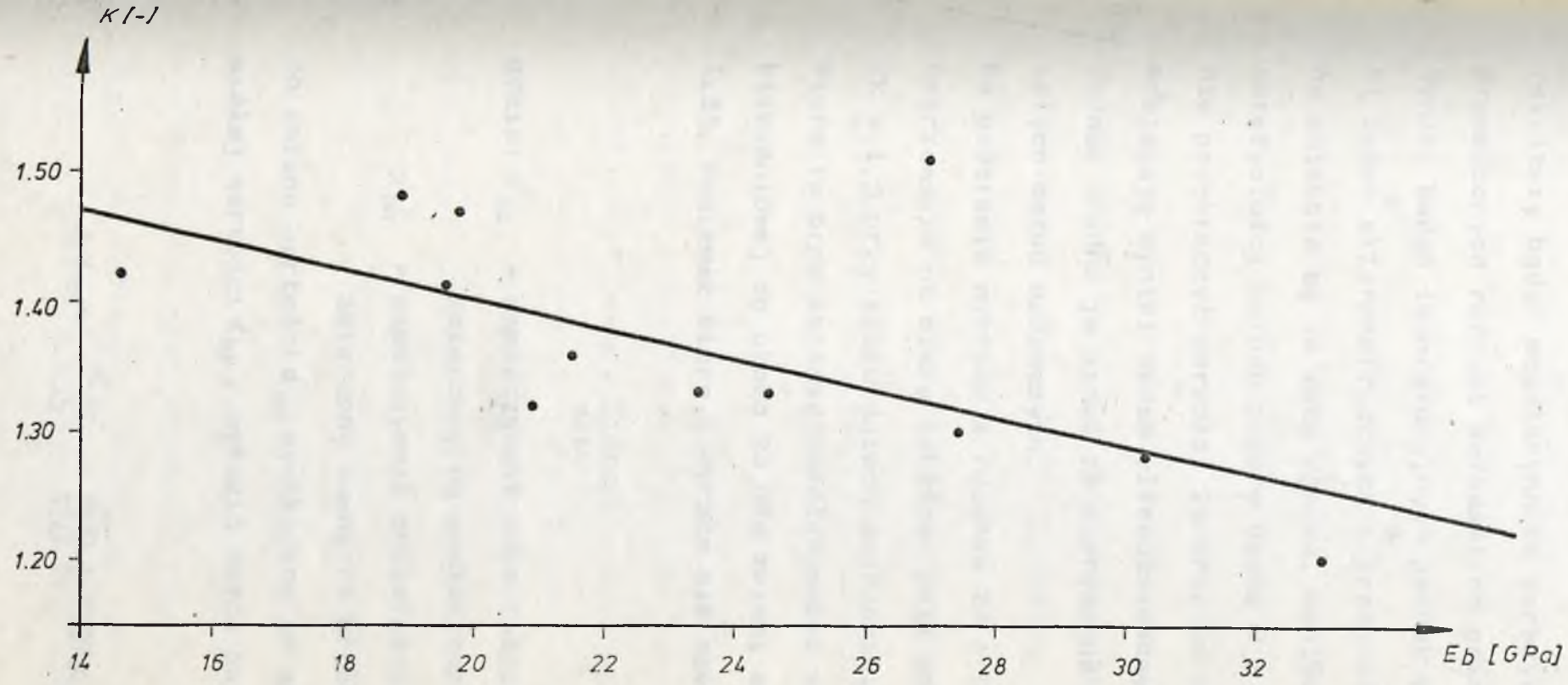
Zbadano wpływ wielkości próbki i czasu dojrzewania betonu na opisaną miarę zakłóceń. Stwierdzono, że zmiana średnicy próbki w zakresie od 16 cm do 36 cm nie wywołuje istotnej zmiany wskazań tensometru wewnętrznego [82] . Badania wpływu czasu dojrzewania betonu wykazały, że miara zakłóceń zmienia się od około 1.5 / w kilka dni po zabetonowaniu czujnika/ do około 1.2 /w 80-100 dniu dojrzewania/ i dalej pozostaje stała. Zmienność tę związano ze zmianą współczynnika sprężystości betonu /próbki wykonano przy użyciu cementu hutniczego/.

Na podstawie wyników badań wpływu czasu dojrzewania betonu i wielkości próbki na miarę zakłóceń pola odkształceń termicznych sporządzono wykres zależności tejże miary od siecznego współczynnika sprężystości betonu E_b /wyznaczono go zgodnie z instrukcją [80] /.

Wykres ten przedstawiono na rysunku 17; zapożyczono go z pracy [82] . Zależność badanych wielkości estymowano związkiem liniowym uzyskując współczynnik korelacji r = -0.6331.

Jeśli wartość r porównać z granicznymi wartościami współczynnika korelacji z tablicy 8.2. pracy [75] , to okaże się, że estymowany związek jest prawdopodobny w 95% ale już nie w 98%.

Aby oszacować wpływ zmienności współczynnika sprężystości betonu w masywie zapory Besko na pomiary współczynnika odkształcalności cieplnej betonu prowadzone wewnątrz masywu należy określić zmienność modułu sprężystości ośrodka. Odpowiednie dane zawiera praca [6] . Przedstawiono w niej między innymi



Rys.17 Zależność miary zakłóceń pola odkształceń termicznych betonu K, wywołanych obecnością czujnika SCO wb-150, od współczynnika sprężystości betonu E_b [82]

rezultaty badań współczynnika sprężystości betonu zapory Besko prowadzonych różnymi metodami na przestrzeni około 8 lat. Wyniki badań laboratoryjnych próbek wyciętych z zapory, wyniki badań sklerometrycznych i presjometrycznych prowadzonych na obiekcie są ze sobą zgodne. Wynika z nich, że współczynnik sprężystości betonu zapory Besko - w ciągu 8 lat dojrzewania nie przekroczył wartości 25 GPa. Od tej wartości zdecydowanie odbiegają wyniki badań ultradźwiękowych prowadzonych "in situ". Jednak trudno je uznać za miarodajne w świetle zgodności pozostałych metod badawczych.

Na podstawie wykresu z rysunku 17 i informacji o wpływie czasu dojrzewania na miarę zakłóceń pola odkształceń termicznych /K = 1.5 przy kilku dniach dojrzewania/ stwierdzić można, że miara ta przy zmianie współczynnika sprężystości E_b od wartości kilkudniowej do około 25 GPa zmieni się od około 1.5 do około 1.35. Ponieważ miara K wyraża się wzorem:

$$K = \frac{\alpha_{bz}}{\alpha_{bw}} \qquad /39/$$

gdzie: α_{bz} - współczynnik odkształcalności cieplnej betonu zmierzony na powierzchni próbki,

α_{bw} - współczynnik odkształcalności cieplnej betonu zmierzony wewnątrz próbki,

to zmianę wartości α_{bw} wynikającą ze zmiany wielkości K /przy stałej wartości α_{bz} / wyrazić można następująco:

$$\Delta\alpha_{bw} = \left| \frac{\alpha_{bz}}{1.35} - \frac{\alpha_{bz}}{1.50} \right| = 0.07\alpha_{bz} \qquad /40/$$

Ponieważ wartość współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory Besko wyznaczona metodą laboratoryjną /przy pomiarze odkształcenia tensometrami zewnętrznymi/ wynosi około $12.14 \cdot 10^{-6}/^{o}C$ /średnia z badań czterech próbek [15] /, więc zmienność wyników pomiarów tej wielkości, uzyskanych przy użyciu tensometrów wewnętrznych /typu SCOwb-150/, wyniesie około $0.85 \cdot 10^{-6}/^{o}C$. Jest to wielkość znikoma. Przypisywanie jej większego znaczenia jest nieuzasadnione w świetle rozrzutu punktów, na podstawie których wyznaczono zależność K /E_b / - rysunek 17 - - oraz wyników obliczeń numerycznych uzyskanych przeze mnie w trakcie badań nad współpracą czujnika SCOwb-150 z ośrodkiem betonowym odkształcającym się termicznie.

5.2. BADANIA WŁASNE NAD WSPÓŁPRACĄ CZUJNIKA SCOwb-150 Z BETONEM ODKSZTAŁCAJĄCYM SIĘ TERMICZNIE /ANALIZA NUMERYCZNA/.

W badaniach modelowych /model matematyczny/ zagadnień współpracy czujnika tensometrycznego SCOwb-150 z betonem odkształcającym się termicznie wykorzystywałem program metody elementów skończonych w wersji HYDRO1. Program powstał na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w Instytucie Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich.

5.2.1. PODSTAWY TEORETYCZNE PROGRAMU /WEDŁUG [60] /.

Zgodnie z koncepcją Terzaghiego stan naprężenia w ośrodku można przedstawić jako sumę naprężeń w szkielecie, zwanych naprężeniami efektywnymi, oraz ciśnienia płynu w porach. W przypadku płaskiego stanu naprężenia, płaskiego stanu odkształcenia oraz symetrii osiowej naprężenie całkowite wyrazić można zależnością macierzową:

$$\sigma = \sigma' + m\,(p + p_o) \qquad /41/$$

gdzie: $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z]^T$

$m = [1,1,0,1]^T$

p - wzrost ciśnienia porowego

W zakresie sprężystego zachowania się materiału stan naprężenia jest jednoznacznie określony przez stan odkształcenia w formie zależności:

$$\sigma = D_s \varepsilon^e + D_f \varepsilon^e + m\,p_o \qquad /42/$$

gdzie: $\varepsilon^e = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \varepsilon_z]^T$

D_s - macierz sprężystości szkieletu

D_f - macierz sprężystości płynu.

Przy założeniu, że płyn jest ściśliwy można wprowadzić pojęcie ciała zastępczego, którego odkształcenia objętościowe równe są sumie odkształceń objętościowych płynu i szkieletu. Wówczas naprężenia całkowite mogą być wyznaczone bezpośrednio z odkształceń bez znajomości aktualnego wzrostu ciśnienia w porach w zależności:

$$\sigma = (D_s + D_f)\,\varepsilon^e + m\,p_o \qquad /43/$$

Łatwo zauważyć, że dla materiałów nieporowatych "takich jak stal lub uszczelniony beton" [60] przyrostowi odkształceń nie towarzyszy wzrost ciśnienia w porach a naprężenia całkowite równe są naprężeniom w szkielecie. Zachodzi więc:

$$D_f = 0 \quad , \qquad \sigma = \sigma' = D_s\,\varepsilon^e \qquad /44/$$

Opisany program może również służyć do analizowania niesprężystego zachowania się materiałów. W tym względzie wykorzystano koncepcję modelu ciała sprężystoplastycznego. Ponieważ w moich obliczeniach przypadek ten nie miał zastosowania zagadnienia te w opisie programu pomijam.

5.2.2. KONCEPCJA METODY OBLICZEŃ /WEDŁUG [60]/

W programie wykorzystano algorytm metody elementów skończonych. Metoda ta sprowadza się do scalenia i rozwiązania układu równań równowagi, które na poziomie pojedyńczego elementu skończonego mają postać:

$$\int \mathbb{B}^T \sigma \, dv + \mathbb{f} = \mathbb{0} \qquad /45/$$

gdzie: $\mathbb{B}$ - macierz geometryczna wiążąca stan odkształcenia z przemieszczeniami węzłów:

$$\mathbb{\varepsilon} = \mathbb{B} \, \mathbb{u} \qquad /46/$$

$\mathbb{f}$ - wektor zbudowy ze składowych sił węzłowych.

Wykorzystując zależność /44/ otrzymamy dla przypadku ciała sprężystego bez wody porowej zależność:

$$\int \mathbb{B}^T \mathbb{D}_s \mathbb{\varepsilon}^e \, dv + \mathbb{f} = \mathbb{0} \qquad /47/$$

Stan odkształceń termicznych określany jest w programie w sposób analogiczny do realizowania stanów obciążeń realizujących się przez wymuszanie wstępnych odkształceń $\mathbb{\varepsilon}_o$.

Ekwiwalentne siły węzłowe wywołane odkształceniami wstępnymi wynoszą:

$$\mathbb{f}^{\varepsilon_o} = - \int \mathbb{B}^T \mathbb{D}_s \mathbb{\varepsilon}_o \, dv \qquad /48/$$

gdzie: ε_o dla "obciążenia termicznego" wyznacza się z prawa:

$$\varepsilon_o^t = \alpha_t \, t_o \, \mathfrak{m} \qquad /49/$$

w którym: α_t - współczynnik odkształcalności cieplnej materiału,

t_o - zmiana temperatury,

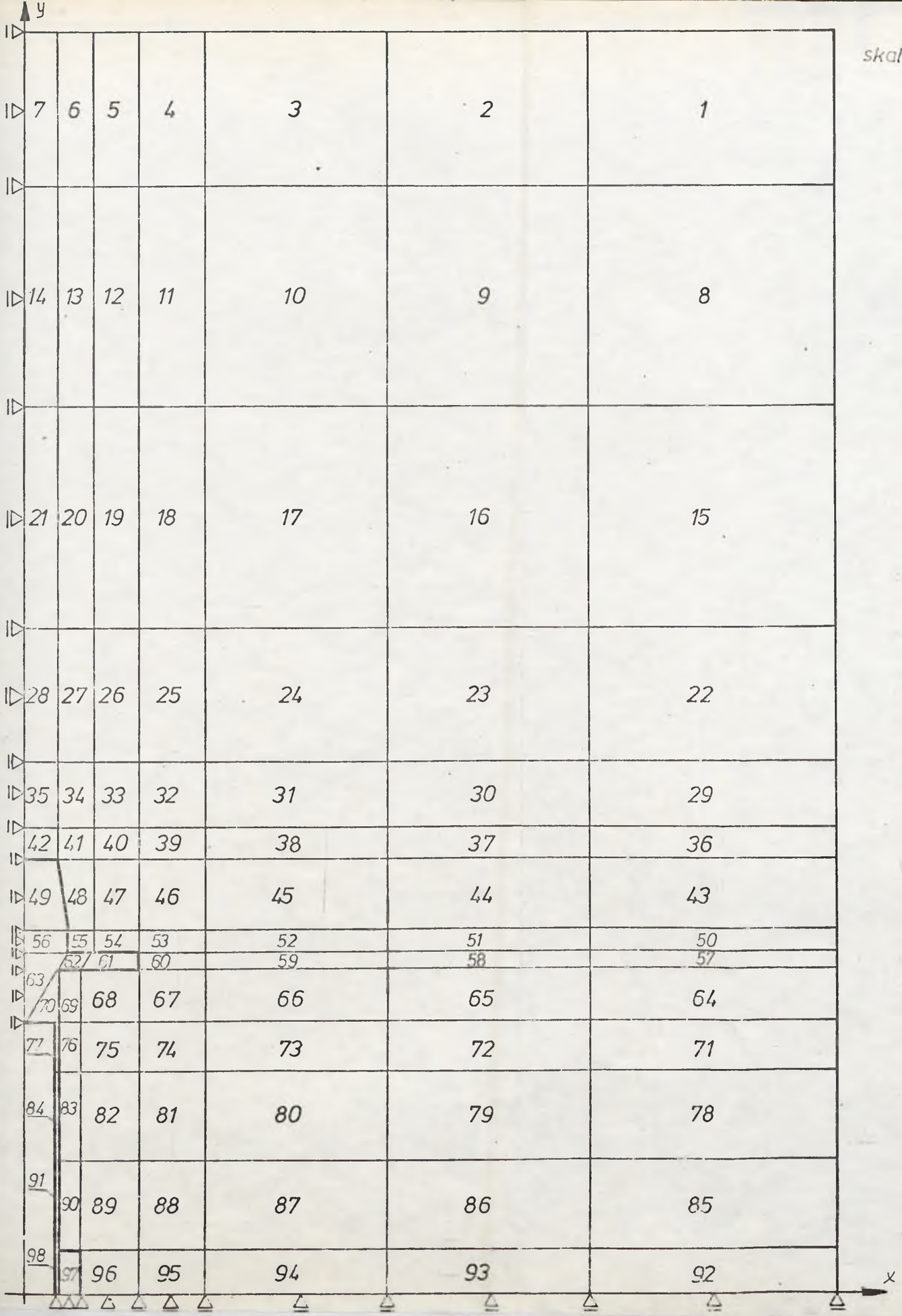
$\mathfrak{m}$ - wektor jak we wzorze /41/.

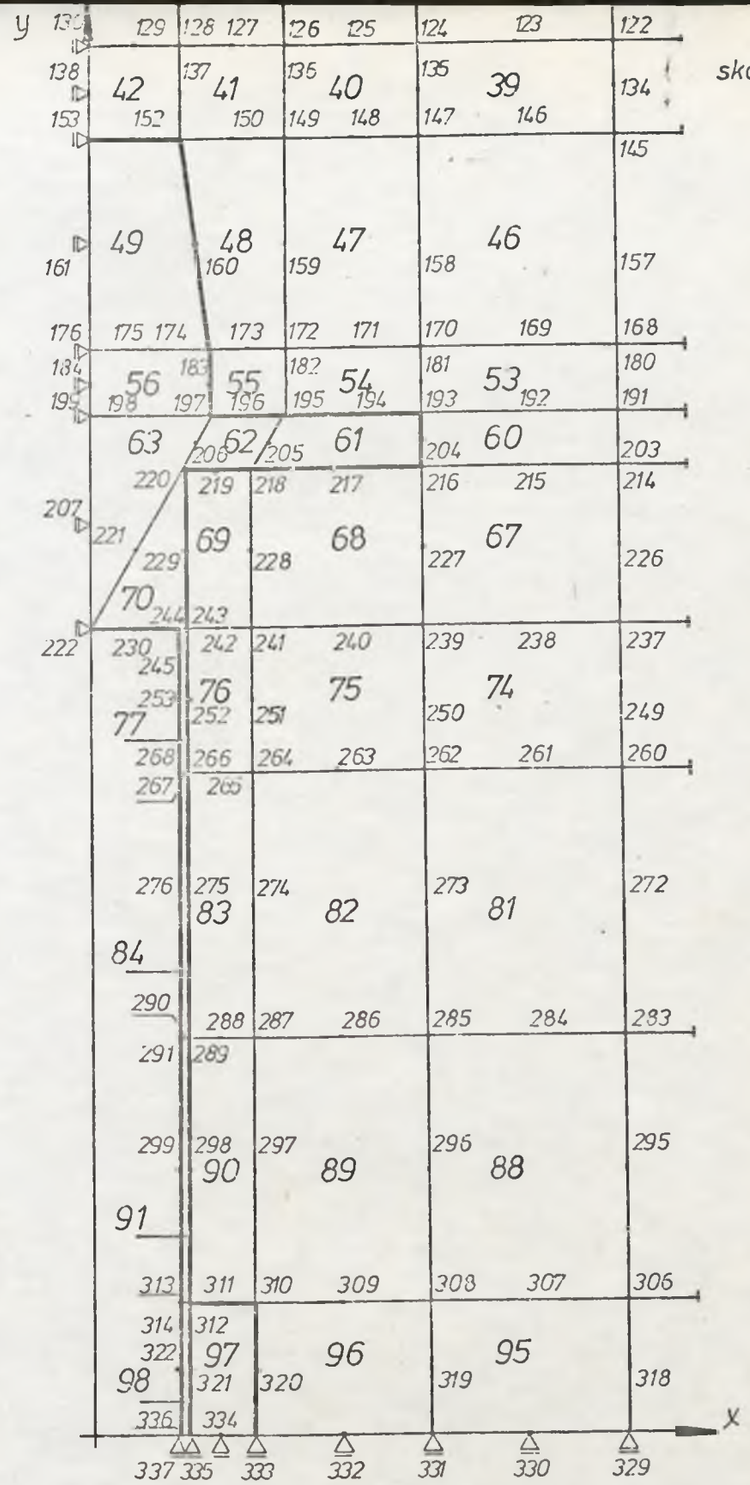
5.2.3. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ. ZAKRES BADAŃ

Analizę numeryczną prowadzono dla przypadku czujnika SCOwb-150 umieszczonego w osi próbki walcowej o średnicy 36 cm w połowie jej wysokości wynoszącej 57 cm. Uznano, że wystąpi osiowo-symetryczny stan naprężenia. W związku z tym analizie poddano wycinek walca ograniczony osią walca i prostopadłą doń płaszczyzną symetrii; program nie wymagał określenia grubości analizowanego wycinka.

Tak określony obszar podzielono na 98 elementów. Schemat dyskretyzacji przedstawia rysunek 18. Wymiary geometryczne czujnika zaczerpnięto z pracy [26] . Obrys czujnika odbiega od kształtu rzeczywistego w sąsiedztwie początku układu współrzędnych tj. tam, gdzie znajduje się kominek z przetwornikiem elektromagnetycznym i wyprowadzeniem kabla. Uwzględnienie tego fragmentu budowy czujnika - zgodnie z jego rzeczywistym kształtem było niemożliwe /symetria osiowa zadania/.

Wprowadzono więc stalowy pierścień /element 97/, którego sztywność miała modelować wpływ kominka i wyprowadzenia kabla. Wysokość pierścienia jest równa średnicy kominka a grubość pierścienia określono z warunku równości objętości pierścienia





Rys.18 Schemat dyskretyzacji analizowanego fragmentu próbki walcowej (ϕ36 cm, h=57cm) z czujnikiem tensometrycznym SCO wb-150

i stali budującej kominek. Jest to oczywiście duże przybliżenie decydujące o nikłej wartości rezultatów obliczeń w tej strefie obszaru.

Dla każdego z dwóch materiałów występujących w analizowanym obszarze tj. betonu i stali określono szereg niezbędnych własności: moduły Younga i współczynniki Poissona, współczynniki odkształcalności cieplnej i ciężary właściwe. Zagadnienie traktowano jako sprężyste, a ośrodek betonowy nie zawierał wody porowej. Przyjęto warunek plastyczności wg Coulomba-Mohra dobierając jednocześnie tak parametry tego warunku /kohezję i kąt tarcia wewnętrznego/ by go w obliczeniach nie osiągnąć /zadanie sprężyste/.

Dane przygotowano w kartach, a obliczenia przeprowadzono przy użyciu komputera Riad 32.

Wykonano siedem wariantów obliczeń. Poprzez zmiany modułu Younga i współczynnika Poissona dla betonu modyfikowano macierz sprężystości ciała / $\mathbb{D}_s$ we wzorze /47//. Zmieniano także współczynnik odkształcalności cieplnej betonu /α_t we wzorze /49// oraz znak i wielkość różnicy temperatur / t_o we wzorze /49//.

Parametry stali pozostawały cały czas niezmienne. Raz tylko zmieniono nieco sztywność zastępczą czujnika[1/] pogrubiając tuleję stalową między kołnierzami.

W pozostałych przypadkach sztywność zastępcza czujnika wynosiła 22 GPa i była zgodna z projektem tensometru [26] .

1/ Sztywność zastępcza czujnika tensometrycznego /podłużna/ jest to wartość naprężeń, które działając wzdłuż osi czujnika wywołują jego jednostkowe odkształcenie względne.

Wartości parametrów zmienianych w poszczególnych wariantach obliczeń zestawiono w tablicy 16.

5.2.4. WYNIKI OBLICZEŃ

Pełny wydruk wyników programu HYDRO1 obejmuje:

- schemat dyskretyzacji,
- parametry kontrolne zadania,
- wartości węzłowe,
- zbiory własności materiałowych,
- opis elementów,
- wymuszone przemieszczenia, siły węzłowe, przemieszczenia i reakcje,
- odkształcenia i naprężenia w punktach Gaussa każdego elementu.

Kompletny wydruk danych i wyników uzyskano dla wariantu I obliczeń. Później drukowano tylko parametry kontrolne, własności materiałów /zmieniające się w kolejnych wariantach/, wymuszone przemieszczenia, siły węzłowe, przemieszczenia i reakcje oraz odkształcenia i naprężenia w punktach Gaussa[1/].

Na podstawie uzyskanych wyników określano wartość współczynnika odkształcalności cieplnej ośrodka wskazywaną przez model czujnika tensometrycznego. W tym celu przemieszczenie pionowe /UY/ punktu węzłowego 199 /vide rysunek 18/ - jako najbliżej położonego względem miejsca zamocowania struny - dzielono przez wartość współrzędnej Y tego punktu /długość bazy pomiarowej/ i przez różnicę temperatur. Uzyskane w ten sposób wartości α_B^Z zestawiono w tablicy 16.

1/ Wydruki są dostępne w Zespole Materiałów i Konstrukcji Hydrotechnicznych Zakładu Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej.

TABLICA 16. Wybrane dane i rezultaty analizy numerycznej dotyczącej współpracy czujnika SCOwb-150 z betonem odkształcającym się termicznie.

Wariant obliczeń	Parametry materiałowe stali	Zastępcza sztywność czujnika	Parametry materiałowe betonu			$\lvert\Delta T\rvert$	Bezwymiarowe parametry zadania			Rezultaty: α_B^z [°C^{-1}] według węzła 199	α_B^z/α_B	Wymiary walca obejmującego strefę wpływu czujnika	
		[$\cdot 10^5$ daN/cm^2]	E_B [10^5 daN/cm^2]	ν_B [-]	α_B [°C^{-1}]	[°C]	E_B/E_S	ν_B/ν_S	α_B/α_S			L /cm/	R /cm/
I	E_S = 210 GPa, ν_S = 0.3, α_S = $11.7\cdot 10^{-6}$/°C	2.96	2.00	0.2	10.0	+ 10	0.68	0.67	0.85	10.00	1.00	27.0	9.5
II		2.20	2.20	0.2	10.0	+100	1.00	0.67	0.85	10.03	1.00	45.0	18.0
III		2.20	4.00	0.2	10.0	+100	1.82	0.67	0.85	10.01	1.00	45.0	18.0
IV		2.20	2.20	0.1	10.0	+100	1.00	0.33	0.85	10.03	1.00	45.0	18.0
V		2.20	2.20	0.2	7.5	+100	1.00	0.67	0.64	7.55	1.01	45.0	18.0
VI		2.20	2.20	0.2	10.0	- 10	1.00	0.67	0.85	10.00	1.00	27.0	9.5
VII		2.20	2.20	0.2	13.4	+ 10	1.00	0.67	1.17	13.38	1.00	27.0	9.5

Oznaczenia:

E_S; E_B - moduły Younga stali i betonu,

ν_S ν_B - współczynniki Poissona stali i betonu,

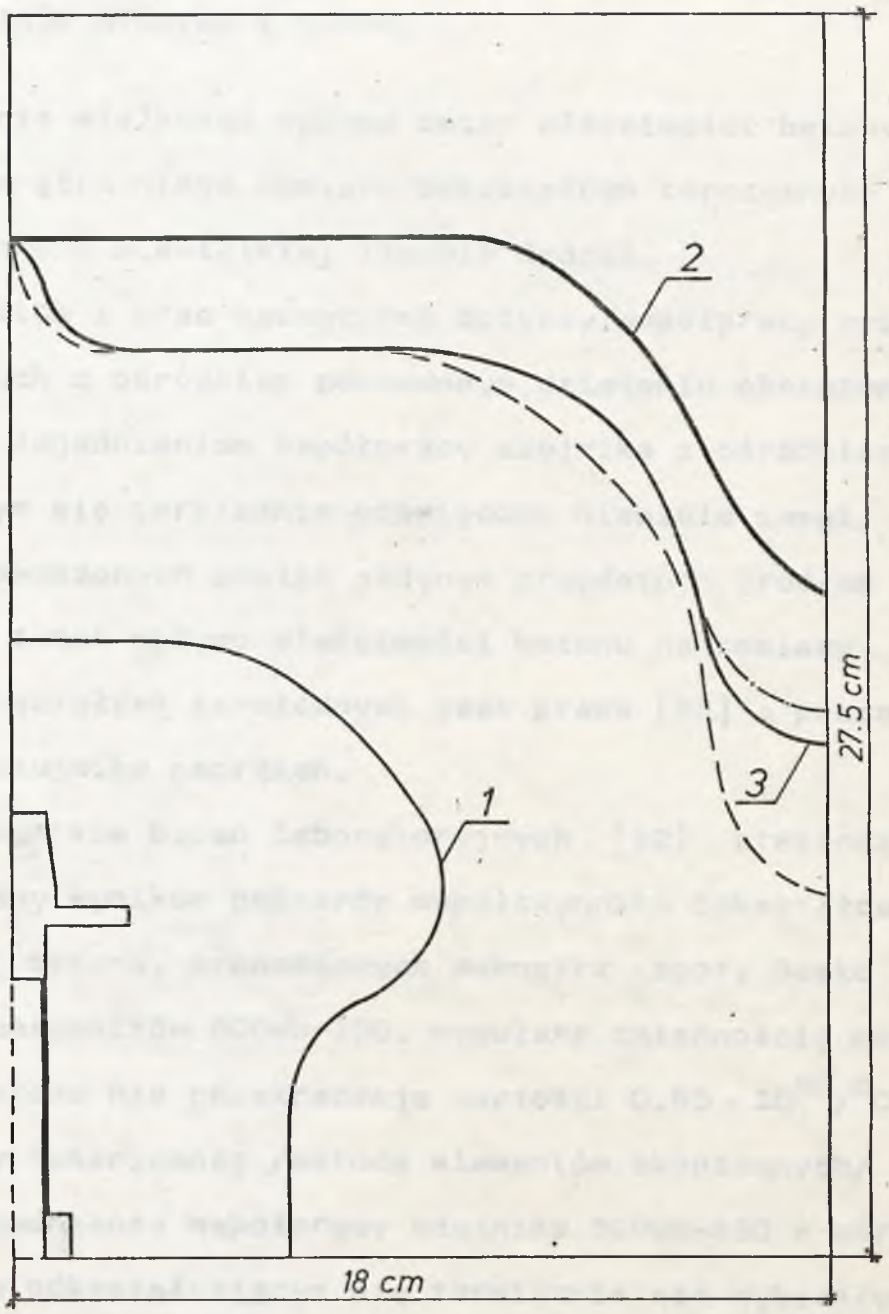
α_S α_B - współczynniki odkształcalności cieplnej stali i betonu,

α_B^z - współczynnik odkształcalności cieplnej betonu według modelowego odwzorowania czujnika tensometrycznego.

Z zestawienia tego wynika, że modyfikowanie macierzy sprężystości $\mathbb{D}_s$ - realizowane w kolejnych wariantach obliczeń poprzez zmiany modułu Younga i współczynnika Poissona betonu - - nie wpłynęło istotnie na wskazania modelu czujnika; w każdym przypadku wskazywał on zadawane wartości współczynnika odkształcalności cieplnej ośrodka α_B. Uzyskane rezultaty nie zależą od znaku i wielkości różnic temperatur ani też od tego, czy współczynnik odkształcalności cieplnej betonu był większy czy też mniejszy od współczynnika odkształcalności cieplnej stali.

Niezależnie od obliczeń α_B^Z oszacowano też strefy oddziaływania czujnika SCOwb-150 na mierzone przezeń pole odkształceń termicznych. Do strefy tej zaliczono każdy punkt Gaussa, w którym jakakolwiek składowa stanu odkształcenia różniła się od wartości odpowiedniej składowej w elemencie nr 1 /vide rysunek 18/; element ten odkształcał się w każdym z wariantów swobodnie.

Zakresy oddziaływań czujnika w każdym z wariantów obliczeń przedstawiono na rysunku 19, a długości i promienie walców ograniczających te strefy wpisano do tablicy 16. Z rysunku 19 i tablicy 16 wynika, że zasięg oddziaływania czujnika zależy od współczynnika odkształcalności cieplnej betonu i wartości różnicy temperatur. Nie zależy zaś od znaku tej różnicy i macierzy sprężystości ciała $\mathbb{D}_s$.



Oznaczenia:

1 Zasięg oddziaływania czujnika w wariantach I, VI i VII obliczeń

2 Zasięg oddziaływania czujnika w wariancie V obliczeń

3 Zasięg oddziaływania czujnika w wariancie II obliczeń

Zasięg oddziaływania czujnika w wariancie III obliczeń

Zasięg oddziaływania czujnika w wariancie IV obliczeń

Rys. 19 Zasięgi wpływu czujnika SCOwb-150 na pole odkształceń termicznych betonowej próbki walcowej. (Na rysunku przedstawiono 1/4 osiowego przekroju próbki).

5.3. OMÓWIENIE WYNIKÓW STUDIÓW I BADAŃ.

Próba określenia wielkości wpływu zmian właściwości betonu na prowadzone wewnątrz niego pomiary odkształceń termicznych bazuje na stosunkowo niewielkiej liczbie źródeł.
Większość studiów i prac badawczych dotyczy współpracy czujników wewnętrznych z ośrodkiem poddawanym działaniu obciążenia zewnętrznego. Zagadnieniom współpracy czujnika z ośrodkiem odkształcającym się termicznie poświęcono niewiele uwagi.
W zakresie prowadzonych analiz jedynym przydatnym źródłem informacji na temat wpływu właściwości betonu na pomiary wewnętrzne odkształceń termicznych jest praca [82] ; praca [50] dotyczy czujnika naprężeń.
Na podstawie wyników badań laboratoryjnych [82] stwierdzić można, że zmiany wyników pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu, prowadzonych wewnątrz zapory Besko przy użyciu tensometrów SCOwb-150, wywołane zmiennością modułu Younga betonu nie przekraczają wartości $0.85 \cdot 10^{-6}/^{o}C$.
Wyniki analizy numerycznej /metodą elementów skończonych/ dotyczącej zagadnienia współpracy czujnika SCOwb-150 z ośrodkiem betonowym odkształcającym się termicznie nie wykazały wpływu zmian sztywności ośrodka na wskazania czujnika.

W konkluzji stwierdzić należy, że nawet uznanie wyników badań laboratoryjnych za wiążące nie wyjaśnia w pełni wartości błędów /standardowego - rys. 13 i maksymalnego - rys. 16/ notowanych w pomiarach współczynnika odkształcalności cieplnej

betonu zapory Besko prowadzonych wewnątrz masywu.

Oszacowana wartość wpływu zmian właściwości betonu wyjaśnia co najwyżej drobną część tego błędu i to przede wszystkim w odniesieniu do danych z okresu budowy. W tym bowiem okresie zmiany cech mechanicznych betonu były najintensywniejsze [6].

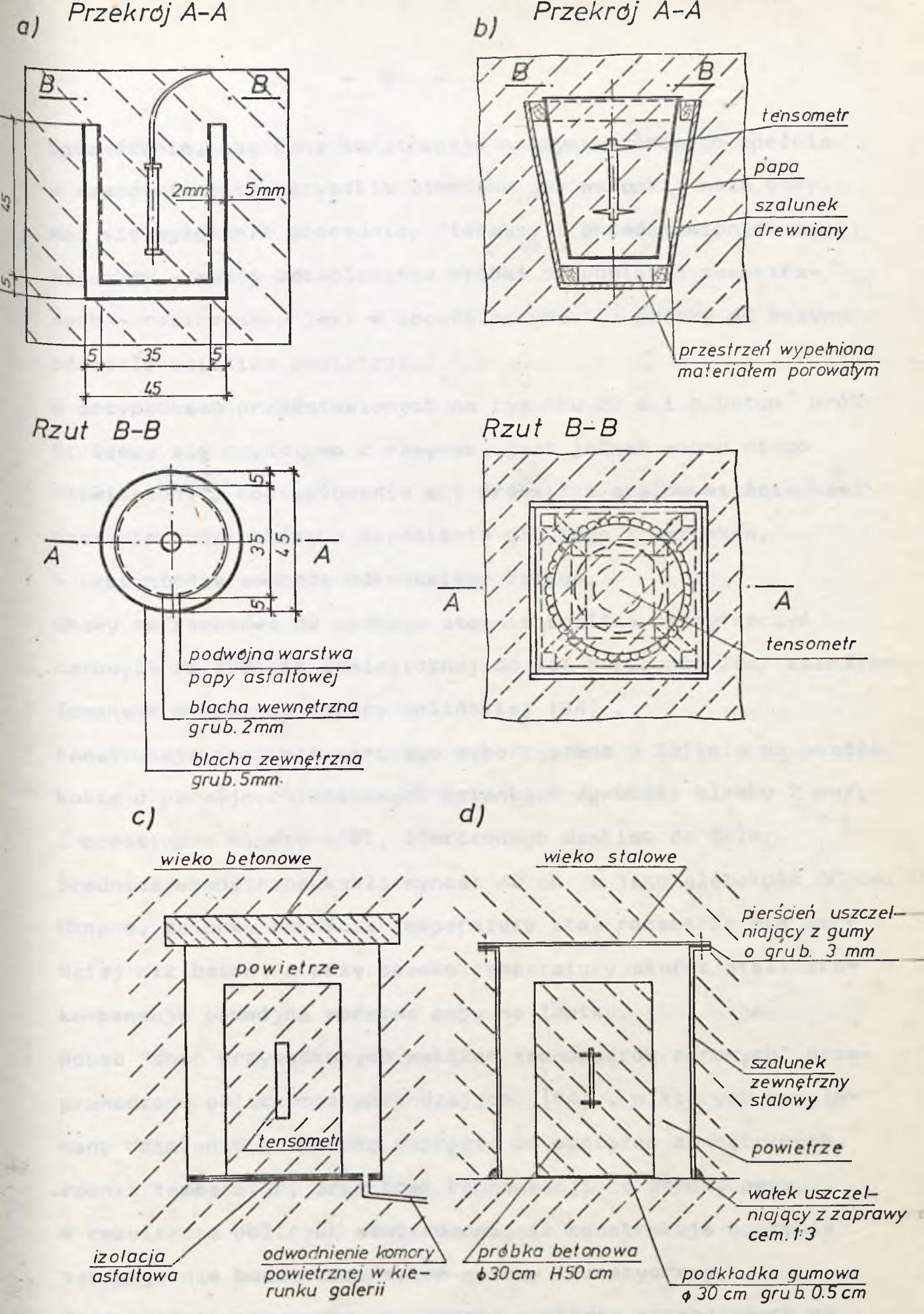
6. CECHY KONSTRUKCYJNE NACZYŃ ZEROWYCH.

Konstrukcja naczyń zerowych jest odbiciem stawianych mu wymagań. Praca [81] formułuje to następująco: "Pod pojęciem naczynia zerowego rozumieć należy każde rozwiązanie techniczne spełniające wszystkie niżej przedstawione warunki:

- odizolowanie próbki betonowej i pogrążonego w niej tensometru od obciążeń przenoszonych przez masyw konstrukcji,
- zapewnienie próbce niczym nieskrępowanej swobody odkształceń wilgotnościowych i termicznych,
- zapewnienie takich warunków higrotermicznych dojrzewania betonu próbki w jakich dojrzewa beton masywu otaczający gniazdo pomiarowe."

Większość rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu spełnienie powyższych wymagań polega na wytworzeniu pomiędzy próbką a masywem pustki powietrznej.[1/] Przykładowe rozwiązania konstrukcji naczyń zerowych przedstawia rysunek 20.

1/ W pracy [79] w punkcie 3.5.1.9 w określeniu tensometrów zerowych stwierdza się:" [...] Są to zwykłe tensometry strunowe ułożone w betonie odizolowanym pustką powietrzną od masywu bloku, a tym samym nie przejmującym odkształceń powstałych od obciążeń zewnętrznych" i dalej w punkcie 3.5.1.10: "Tensometry zerowe wbetonowuje się w klocki betonowe, które następnie umieszcza się w przygotowanych wnękach przykrywając wnękę pokrywą betonową. Klocki betonowe muszą mieć zapewnioną całkowitą swobodę odkształceń objętościowych".
W "Projekcie urządzeń tensometrycznych do zapory Besko" [64] w części dotyczącej próbek betonowych, w których umieszcza się tensometry zerowe stwierdza się m.in. "Próbki walcowe wydzielono z betonu korpusu zapory warstwą powietrza zapewniając im pełną swobodę odkształceń w analogii do pracy takich próbek w laboratorium".



Rys. 20 Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne naczyń zerowych.
a) i b) według pracy [57] c) według pracy [19]
d) według pracy [64]

Sprawdzenie, czy dana konstrukcja naczynia zerowego spełnia w rzeczywistości wszystkie stawiane jej warunki, może odbywać się wyłącznie pośrednio. Pierwszy z przedstawionych wyżej warunków - wymóg odizolowania próbki od obciążeń zewnętrznych - realizowany jest w sposób oczywisty: próbkę od masywu oddziela ściśliwe powietrze.

W przypadkach przedstawionych na rysunku 20 a i b beton próbki łączy się częściowo z masywem, jest jednak wobec niego "zawieszony". Kontaktowanie się próbki ze stalowymi ściankami naczynia budzi obawy o spełnienie drugiego z warunków.

- zapewnienie swobody odkształceń betonu.

Obawy te rozwiewa do pewnego stopnia analiza pracy naczyń zerowych /o budowie analogicznej do tej z rysunku 20a/ zainstalowanych w masywie zapory solińskiej [84] .

Konstrukcja naczynia zerowego wykorzystana w Solinie ma postać kubła o podwójnych stalowych ściankach /grubość blachy 2 mm/. Z powietrzem między nimi, odwróconego denkiem do dołu. Średnica wewnętrzna kubła wynosi 40 cm; a jego głębokość 60 cm. Uznano, że przy wzroście temperatury stal rozszerza się bardziej niż beton, a przy spadku temperatury skurcz stali zrekompensuje podwójna warstwa papy na lepiku.

Wobec "dość przypadkowych wskazań tensometrów zerowych" przeprowadzono obliczenia sprawdzające [84] , w których symulowano działania na próbkę naprężeń od obciążeń zewnętrznych, różnic temperatury oraz brak kompensacji ze strony papy.

W rezultacie obliczeń stwierdzono, że konstrukcja naczynia zerowego nie budzi zastrzeżeń natury teoretycznej.

Jednocześnie przyznano, że wyniki pomiarów prowadzonych na obiekcie całkowicie tego wniosku nie potwierdzają. Wyrażono

też przypuszczenie, że uproszczone wyliczenia statyczne, którymi się posłużono w analizie pracy naczynia, mogą nie ujmować faktycznego rozkładu naprężeń w "zawieszonym" betonie próbki. Wydaje się, że w konkluzji pracy [84] pominięto jeden istotny wniosek - charakter wyników pomiarów prowadzonych przy pomocy tensometrów zerowych może być efektem zaburzającego działania innych czynników - niekoniecznie braku swobody odkształceń próbki.

Według projektu [64] konstrukcja naczyń zerowych zainstalowanych wewnątrz zapory Besko przedstawia się jak na rysunku 20d. Próbkę walcową tensometru zerowego o wymiarach Ø 30 cm oraz H = 50 cm wykonano w szalunku stalowym. W trakcie betonowania próbki umieszczono wewnątrz niej tensometr.

Po stwardnieniu betonu i rozszalowaniu próbki ustawiono szalunek zewnętrzny. Pod szalunkiem przepuszczono kabel tensometru a styk szalunku z betonem podłoża uszczelniono zaprawą. Następnie przykręcono wieko szalunku ułożone dla uzyskania szczelności na pierścieniu z gumy. Tak przygotowane naczynie przykrywano betonem bloku zapory.

Z rysunku 20d i opisu wykonania naczynia wynika, że próbka jest odizolowana od masywu i przenoszonych przezeń obciążeń, jak również posiada swobodę odkształceń. Co więcej, konstrukcja naczynia z zapory Besko nie budzi w tym względzie takich wątpliwości jakie wywołuje budowa naczyń zerowych z rysunku 20 a i b. Potwierdzeniem tego są wyniki analizy statystycznej związków pomiędzy wskazaniami tensometru zerowego TS05 z sekcji nr 10 zapory Besko a temperaturą betonu /teletermometr Tt2/ i piętrzeniem zawarte w pracy [8] .

Stwierdzono, że wskazania tensometru zerowego są silnie skorelowane z temperaturą betonu /współczynnik korelacji r = 0.9709/ a nie zależą od zmian piętrzenia/ r = 0.1528/. Jednocześnie wykazano, że nikła wartość współczynnika korelacji pomiędzy wskazaniami tensometru a piętrzeniem jest prawie równa współczynnikowi przypadkowej korelacji pomiędzy temperaturą betonu a piętrzeniem / r = 0.1570/. W konkluzji stwierdzono, że nie ma podstaw do uznania iż naczynie zerowe pracuje źle w sensie nie izolowania wyodrębnionej próbki od obciążeń przenoszonych przez masyw. Trudno też uważać, że próbka nie ma swobody odkształceń. Mimo to, w świetle wyników pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu zapory przedstawionych w tablicach 3 - 6 dysertacji i statystycznej dyskusji błędu tych pomiarów /vide rozdział 4.3.6./, trudno nie powtórzyć za pracą [84] zdania o "dość przypadkowych wskazaniach tensometrów zerowych".

Rozpatrzmy więc trzeci z warunków jakie praca [81] stawia naczyniom zerowym tj. wymóg zapewnienia próbce analogicznych warunków higrotermicznych do tych, w jakich dojrzewa beton masywu. Wydaje się, że każda z przedstawionych na rysunku 20 konstrukcji spełnia postawione wyżej wymaganie. Jeżeli próbka kontaktuje się z powietrzem pustki, a ta jest zamknięta, to panująca w pustce powietrznej wysoka wilgotność jest porównywalna z wysoką wilgotnością relatywnie szczelnego masywu /vide rozdział 1.8/. W tym sensie nawet stale działające odwodnienie pustki powietrznej /rys. 20c/ nie-wiele zmienia warunki dojrzewania próbki, jeżeli tylko uchodzi ono do galerii zapory.

Z punktu widzenia celu prowadzonych tu analiz tj. próby wyjaśnienia źródeł znacznego błędu pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b wewnątrz zapory wymóg analogii pomiędzy warunkami dojrzewania masywu i próbki w naczyniu zerowym nie ma znaczenia. Bowiem już w rozdziale 3 dysertacji oszacowano możliwą zmienność wielkości α_b wynikającą ze zmian wilgotności i temperatury we wnętrzu masywu. Zmienność tę uznano za znikomą i zaniedbano. Wniosek ten sformułowany względem próbek w naczyniach zerowych /w szczególności w naczyniach zapory Besko/ jest dodatkowo uzasadniony zabiegami uszczelniającymi obudowę próbki. Ograniczają one do minimum zmiany wilgotności próbki i tym samym wspierają tezę o stałości mierzonego współczynnika α_b.

Rozpatrzmy jednak wymóg analogii pomiędzy warunkami termicznymi panującymi wewnątrz naczynia zerowego a warunkami panującymi w masywie, w sąsiedztwie naczynia - w szczególności w miejscu zainstalowania termometru. Niech analiza ta ma charakter metrologiczny i niech dotyczy warunków pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b, a nie warunków dojrzewania i porównywalności właściwości próbki z właściwościami masywu.

Rozpatrzmy zatem wpływ cech konstrukcyjnych naczyń zerowych - - w szczególności termoizolacyjnych właściwości pustki powietrznej - na lokalny rozkład temperatur betonu i wyniki pomiarów odkształcalności cieplnej betonu.

7. WPŁYW CECH KONSTRUKCYJNYCH NACZYŃ ZEROWYCH NA LOKALNY ROZKŁAD TEMPERATUR BETONU I WYNIKI POMIARÓW ODKSZTAŁCALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU

7.1. POLE TEMPERATUR MASYWNEJ KONSTRUKCJI HYDROTECHNICZNEJ

Odkształcenia termiczne betonu zapory są skutkiem zmiany rozkładu temperatur w zaporze. Rozkład temperatur jest funkcją miejsca i tworzy pewne pole. Powstaje ono w wyniku działania dwóch czynników:

- wydzielania ciepła wiązania cementu,
- oddziaływania otaczającego budowlę środowiska.

Pierwszy z tych czynników odgrywa dużą rolę w trakcie budowy zapory oraz w początkowym okresie eksploatacji tj. do czasu rozproszenia ciepła wydzielanego w procesach hydratacji cementu. Później pole temperatur kształtowane jest tylko przez oddziaływanie środowiska zewnętrznego, w wyniku złożonego i rozwijającego się w czasie procesu pobierania, przewodzenia i oddawania ciepła. W tym więc okresie pole temperatur w zaporze zależy od:

- różnego nagrzewania się ścian zewnętrznych zapory /ściany odpowietrznej nagrzewającej się od powietrza i w następstwie nasłonecznienia, ściany odwodnej kontaktującej się z wodą zbiornika oraz powierzchni posadowienia kontaktującej się z podłożem/,
- kształtu i powierzchni ogrzewanych lub chłodzonych wewnątrz korpusu tj. wymiarów i usytuowania galerii, szybów, komór i t.p.,

- czasów trwania i wahań wartości temperatury zewnętrznej tj. cyklicznych zmian temperatury powietrza , wody w zbiorniku i podłoża.

Pojemność cieplna i przewodnictwo cieplne betonu powodują, że zjawisko tworzenia się pola temperatur nabiera cech rozwijającego się procesu czasowego. Zmiany temperatur wewnątrz zapory postępują wolniej, nie nadążając za zmianami temperatury na powierzchni zapory. W następstwie tego samego procesu krzywe lokalnych temperatur betonu są łagodzone, a stopień tłumienia zależy od położenia danego punktu względem ścian budowli. Wynika stąd, że w zależności od odległości od powierzchni zewnętrznych zapory zmiany temperatur i odkształcenia termiczne będą miały charakter np. zmian dobowych, tygodniowych, miesięcznych i.t.p.[1/]

W przypadku ogólnym równanie pola temperatur ma postać następującą:

$$\nabla^2 T = -\frac{g}{\lambda} + \frac{c \cdot \varrho}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \qquad /50/$$

gdzie $T = T(x,y,z,t)$ - temperatura betonu w punkcie o współrzędnych x, y, z i w czasie t;

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$ - laplasjan;

1/ W pracy [24] stwierdzono, że dobowe wahania temperatury powietrza atmosferycznego oddziaływują na głębokość kilkunastu lub kilkudziesięciu centymetrów, a w głębszych partiach masywu temperatura wykazuje zmienność długookresową, zbliżoną do zmienności średnich miesięcznych temperatur powietrza.

$g = g(x,y,z,t)$ - gęstość wydzielanej mocy określona funkcją miejsca i czasu;

λ - współczynnik przewodności cieplnej betonu;

c - ciepło właściwe betonu;

ρ - gęstość betonu;

t - czas;

przy czym parametry λ, c, ρ mogą zależeć od miejsca i czasu. Równanie /50/ odpowiada warunkom budowy /nagrzewaniu się i stygnięciu masywu/ oraz zmianom właściwości betonu. Jednakże rozwiązanie tego równania dla okresu wznoszenia obiektu tj. czasu, w którym zmienia się kształt obszaru i przybywają coraz to nowe źródła ciepła przy zmieniających się nieustannie warunkach brzegowych /zmiany temperatur powietrza atmosferycznego/ jest bardzo trudne i może być co najwyżej przybliżone. Sytuacja upraszcza się, gdy w gotowym już masywie zapory zanikają źródła ciepła, a właściwości betonu ustalają się. Wówczas można założyć, że $g = 0$, a parametry λ, c, ρ są stałe w czasie /dla uproszczenia zakłada się także jednorodność masywu a więc niezmienność właściwości ośrodka przy przejściu od punktu do punktu/. Wtedy równanie /50/ sprowadza się do postaci:

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \qquad /51/$$

gdzie: a - współczynnik przewodnictwa temperaturowego[1/]

według wzoru: $$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \qquad /52/;$$

1/ Według pracy [70] współczynnik a ma nazwę współczynnika wyrównywania temperatury. Określenie użyte w objaśnieniach do wzoru /51/ pochodzi z prac [51] i [62].

pozostałe oznaczenia jak we wzorze /50/-i dotyczy obszaru u ostalonym już kształcie.

W wielu przypadkach pole temperatur może być analizowane jako płaskie. Wtedy równanie /51/ - zwane równaniem przewodnictwa lub dyfuzji [22] - przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \qquad /53/$$

gdzie: $T = T(x, y, t)$.

W analizie pola temperatur zapory jako warunki graniczne /brzegowe/ równania /53/ przyjmować należy /według pracy [62]/:

- na powierzchni betonu stykającej się z powietrzem temperaturę powietrza zmodyfikowaną współczynnikiem przejmowania ciepła,
- na powierzchni betonu w galeriach - temperaturę powietrza w odpowiednich galeriach z uwzględnieniem współczynnika przejmowania ciepła,
- na powierzchni betonu stykającej się z wodą w zbiorniku temperaturę równą temperaturze wody /z uwagi na łatwość przekazywania ciepła na tym styku/,
- na styku zapory z podłożem - temperaturę wynikającą ze stopnia geotermicznego, w przypadku niewielkiej filtracji, lub temperaturę filtrującej wody w przypadku występowania dużej filtracji /ilość ciepła niesiona przez filtrującą wodę jest znacznie większa niż ilość ciepła pochodząca z wnętrza Ziemi/,
- na styku zapory z zasypką - temperaturę wynikającą z rozkładu temperatury w zasypce.

Chcąc uzyskać informację o zmianach temperatury betonu w czasie należy równanie /53/ rozwiązać wielokrotnie - dla coraz to nowych zmieniających się w czasie warunków brzegowych. Skomplikowany kształt obszaru analizowanego pola oraz warunki graniczne równania /53/ wykluczają możliwość rozwiązania tego równania metodami analitycznymi /dokładnymi/. Możliwe są natomiast rozwiązania przybliżone - przede wszystkim numeryczne /metoda elementów skończonych metoda siatek zwana inaczej metodą różnic skończonych lub metodą Cranka-Nikolsona/lub też analogowe [22] . Przybliżony charakter ewentualnych rozwiązań równania przewodnictwa budzi obawy co do przydatności takich rezultatów w ocenie wielkości różnic temperatur betonu w naczyniu zerowym i w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Dodatkowym uzasadnieniem tych obaw są trudności w uwzględnieniu przestrzennej budowy naczynia oraz niejednorodności jaką stanowi w masywie betonowym naczynie zerowe z wytworzoną przezeń pustką powietrzną. Analiza rzeczywistych warunków wymiany cieplnej pomiędzy próbką w naczyniu zerowym,a otaczającym naczynie masywem wymaga zdecydowanie precyzyjniejszych metod - - głównie pomiarowych. Niemożność ich wykorzystania w przypadku naczyń zerowych zainstalowanych już w masywie zapory Besko skłania do tego, by wpływ zróżnicowania temperatur próbki w naczyniu zerowym i otaczającego naczynie masywu na pomiar współczynnika odkształcalności cieplnej betonu oszacować w sposób przybliżony. W tym celu skonstruujmy uproszczony model takiego pomiaru.

7.2. MODEL POMIARÓW ODKSZTAŁCALNOŚCI CIEPLNEJ BETONU W KONSTRUKCJI

Rozpatrzmy układ pomiarowy złożony z tensometru zerowego i teletermometru znajdujący się w tej strefie masywu zapory, której temperatury kształtowane są przede wszystkim dzięki nagrzewaniu się /i ochładzaniu/ ściany odpowietrznej budowli. Dzięki temu założeniu interesujący nas lokalny obszar wymiany cieplnej może być traktowany jako fragment półprzestrzeni /w przypadku płaskim - półpłaszczyzny/ uczestniczącej w wymianie ciepła. Załóżmy dodatkowo, że układ pomiarowy znajduje się w takiej odległości od granicy obszaru, iż zmiany temperatur betonu odpowiadają zmianom średnich miesięcznych temperatur powietrza. Przyjmując to założenie możemy się ograniczyć w opisie cyklicznych zmian temperatur powietrza atmosferycznego do pierwszego składnika szeregu harmonicznego[1/]:

$$T_p = T_{op} + A_{op} \sin\left[\frac{2\pi}{\Theta}(t - t_p)\right] \qquad /54/$$

gdzie: T_{op} - średnia roczna temperatura powietrza [°C],

A_{op} - amplituda wahań rocznych temperatury [°C],

Θ - okres wahań /365 dni/,

t - dzień roku,

t_p - faza początkowa w dniach.

1/ Przykład zastosowania równania /54/ do opisu konkretnych danych pomiarowych tj. średnich miesięcznych temperatur powietrza /z wielolecia/ pomierzonych na stacji meteorologicznej w Tęgoborzu przedstawia praca [72], a temperatur średnich dekadowych z wielolecia - dane ze stacji w Dobczycach - praca [59].

Dla tak uproszczonego obszaru /półprzestrzeń, półpłaszczyzna/ i warunków brzegowych danych wzorem /54/ dysponujemy już ścisłym rozwiązaniem równania przewodnictwa [51], [70], [62] . W wersji uwzględniającej warunki przejmowania ciepła na granicy obszaru i przy założeniu powtarzalności cyklicznych zmian temperatury /54/ rozwiązanie to ma postać /według pracy [62] /:

$$T(z,t) = T_{op} + \frac{h}{\sqrt{k^2+(k+h)^2}} A_{op} \cdot \exp(-k \cdot z) \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\Theta}(t-t_p) - k \cdot z - \delta\right] \qquad /55/$$

gdzie: $h = \frac{\alpha}{\lambda}$, przy czym: α - współczynnik przejmowania ciepła na granicy ośrodków betonowego i powietrznego,

λ - współczynnik przewodności cieplnej betonu;

$$k = \sqrt{\frac{\pi}{\Theta a}} \qquad /56/$$

gdzie: a - współczynnik przewodnictwa temperaturowego według wzoru /52/.

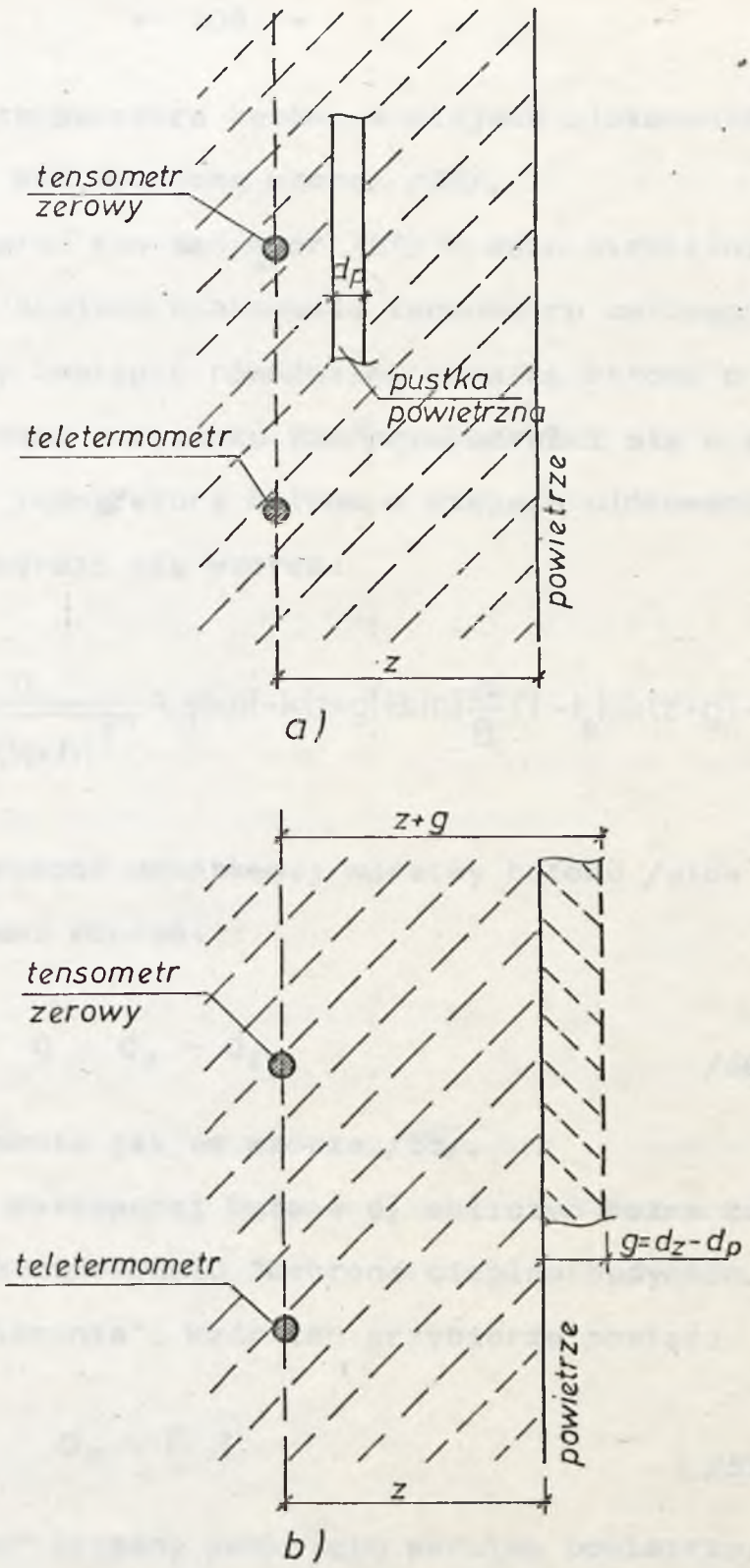
$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{k}{k+h} ,$$

z - odległość od granicy obszaru ,

$T_{op}, A_{op}, \Theta, t, t_p$ jak we wzorze /54/.

Załóżmy, że układ pomiarowy: tensometr zerowy - teletermometr usytuowany jest jak na rysunku 21a, tzn. czujniki znajdują się w jednakowej odległości z od granicy obszaru /półprzestrzeni/, a naczynie zerowe modelowane jest przez warstwę powietrza o grubości d_p 1/.

1/ Wpływ innych warstw, które mogą występować w konstrukcji naczynia zerowego /np. blach stalowych/ - dla uproszczenia - - pominięto.



Rys. 21 Ilustracja graficzna modelu pomiarów odkształcalności cieplnej betonu w konstrukcji.

W tym układzie temperatura betonu w miejscu ulokowania teletermometru może być wyrażona wzorem /55/.

Aby móc wykorzystać ten sam wzór /55/ w celu określenia temperatury betonu w miejscu ulokowania tensometru zerowego warstwę powietrza należy zastąpić równoważną warstwą betonu o grubości d_z. Wówczas schemat z rysunku 21a przekształci się w schemat z rysunku 21b, a temperatura betonu w miejscu ulokowania tensometru zerowego wyrazi się wzorem:

$$T(z+g,t)=T_{op}+\frac{h}{\sqrt{k^2+(k+h)^2}}A_{op}\exp[-k(z+g)]\cdot\sin[\frac{2\pi}{\Theta}(t-t_p)-k(z+g)-\delta] \qquad /57/$$

w którym: g - grubość dodatkowej warstwy betonu /vide rys.21b/ dana wzorem:

$$g = d_z - d_p \qquad /58/$$

pozostałe oznaczenia jak we wzorze /55/.

Grubość warstwy zastępczej betonu d_z obliczyć można ze wzoru numer 5 normy PN-82/B-02020 "Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia". Wzór ten przybierze postać:

$$d_z = R\cdot\lambda \qquad /59/$$

gdzie: R - opór cieplny zamkniętej warstwy powietrza,

λ - współczynnik przewodności cieplnej betonu.

Wartości oporu cieplnego R zamkniętej pionowej warstwy powietrza podano - w funkcji grubości warstwy - w załączniku nr 3 normy PN-82/B-02020. Według załącznika nr 4 tej samej normy przyjęto wartość λ = 1.5 W//m·K/ /dla betonu wilgotnego o przeciętnej gęstości/. Następnie według wzoru /59/

obliczono grubości d_z warstw zastępczych betonu odpowiadające grubościom pustki powietrznej d_p. Według wzoru /58/ obliczono grubości g warstw dodatkowych betonu w schemacie z rysunku 21b. Obliczono wartości przesunięć fazowych /k·g/ ze wzoru /57/; wyrażono je w dobach, w funkcji grubości warstwy powietrznej d_p. Wartość współczynnika k obliczono według wzoru /56/ przyjmując: λ = 1,5 W/ /m·K /, ϱ = 2200 kg/m^3, c = 0,84 kJ//kg · K/, Θ = 365 dni.

Wynik obliczeń przedstawiono graficznie na rysunku 22.

Jeżeli przyjąć, że pomiar zerowy odkształcenia termicznego betonu wykonano w temperaturze 0°C to odkształcenie termiczne mierzone tensometrem zerowym wyrazi się wzorem:

$$\varepsilon_t(z+g,t) = \alpha_b \cdot T(z+g,t) \qquad /60/$$

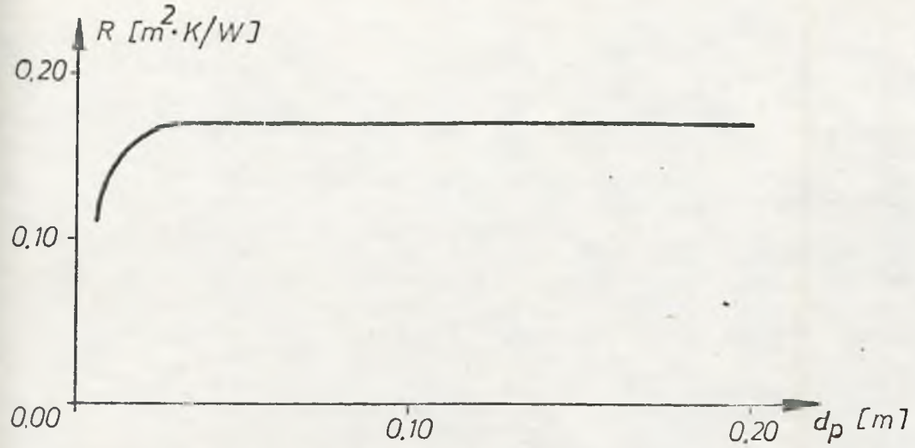
w którym: α_b - współczynnik odkształcalności cieplnej betonu. Przy pomiarach współczynnika odkształcalności cieplnej betonu dysponujemy parami wskazań tensometru zerowego i teletermometru w chwili początkowej i końcowej. Wynik pomiaru wielkości α_b - dla odróżnienia od rzeczywistej wartości tej wielkości oznaczmy go α_b^z - wyrazi się wzorem:

$$\alpha_b^z = \frac{\varepsilon_t(z+g,t_k) - \varepsilon_t(z+g,t_o)}{T(z,t_k) - T(z,t_o)} \qquad /61/$$

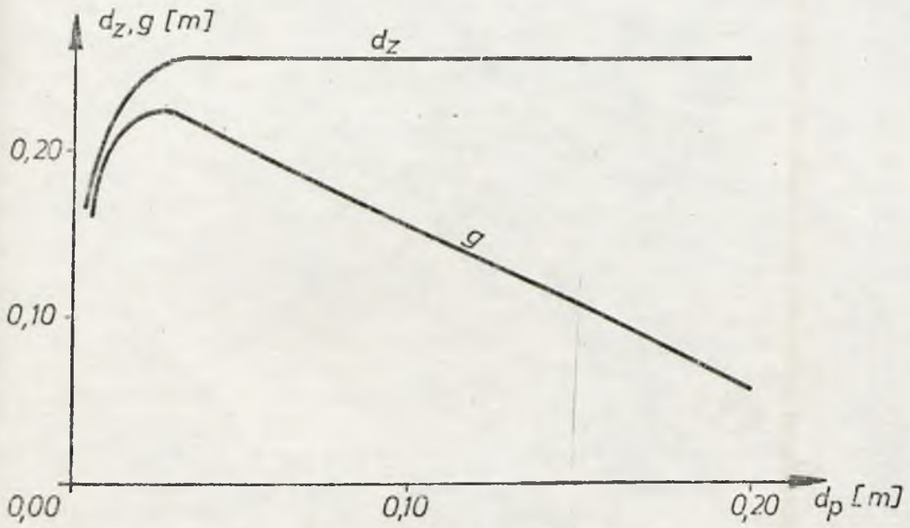
Po podstawieniu do wzoru /61/ wielkości temperatur i odkształceń wyrażonych wzorami /57/, /60/ i/55/, po serii prostych przekształceń otrzymujemy:

$$\alpha_b^z = \alpha_b \cdot \exp(-k\cdot g)\left\{\cos(-k\cdot g) + \right. \qquad /62/$$

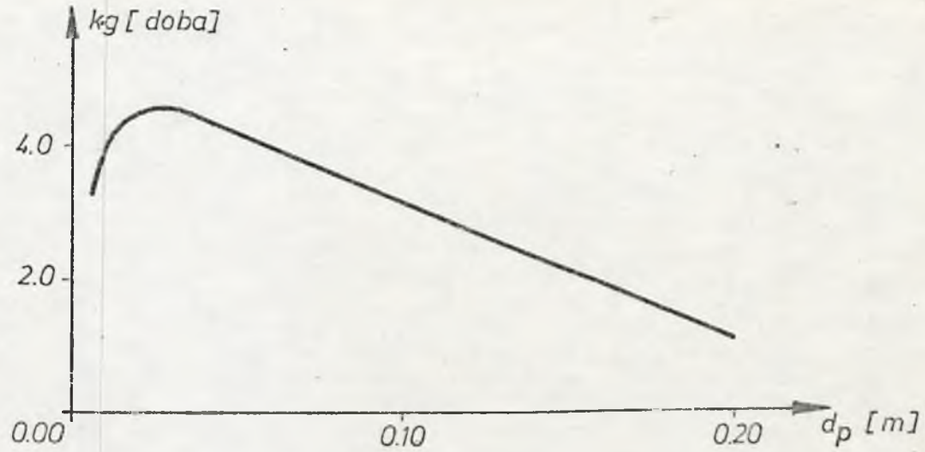
$$\left. - tg\left[\frac{2\pi}{0}\left(\frac{t_k + t_o}{2} - t_p\right) - k\cdot z - \delta\right]\cdot \sin(-k\cdot g)\right\}$$



Opór cieplny zamkniętej pionowej warstwy powietrza w funkcji grubości warstwy (według zał. 3 normy PN-82/B-02020)



Grubość d_z zastępczej warstwy betonu odpowiadająca oporowi cieplnemu warstwy powietrza o grubości d_p - w funkcji d_p.
Grubość g dodatkowej warstwy betonu w schemacie z rys. 21 b, w funkcji grubości warstwy powietrza d_p.



Przesunięcie czasowe okresowych zmian temperatury betonu wywołane oporem cieplnym warstwy powietrza o grubości d_p.

Rys. 22 Charakterystyki pustki powietrznej naczynia zerowego w modelu pomiarów odkształcalności cieplnej betonu w konstrukcji.

Wyrażenie 0.5 / $t_k + t_o$ / określa na skali czasu położenie środka przedziału między pomiarem początkowym, a pomiarem końcowym. Jeśli dobrać początek skali czasu tak, by faza początkowa funkcji tangens była zerem tj. aby zachodziła zależność:

$$t_p + \frac{\Theta}{2\pi}(k \cdot z + \delta) = 0 \qquad /63/$$

i oznaczyć środek przedziału czasu między pomiarami przez $t_{śr}$, to zależność /62/ uprości się do postaci:

$$\alpha_b^z = \alpha_b \exp(-k \cdot g)[\cos(-k \cdot g) - tg(\frac{2\pi}{\Theta} t_{śr}) \sin(-k \cdot g)] \qquad /64/$$

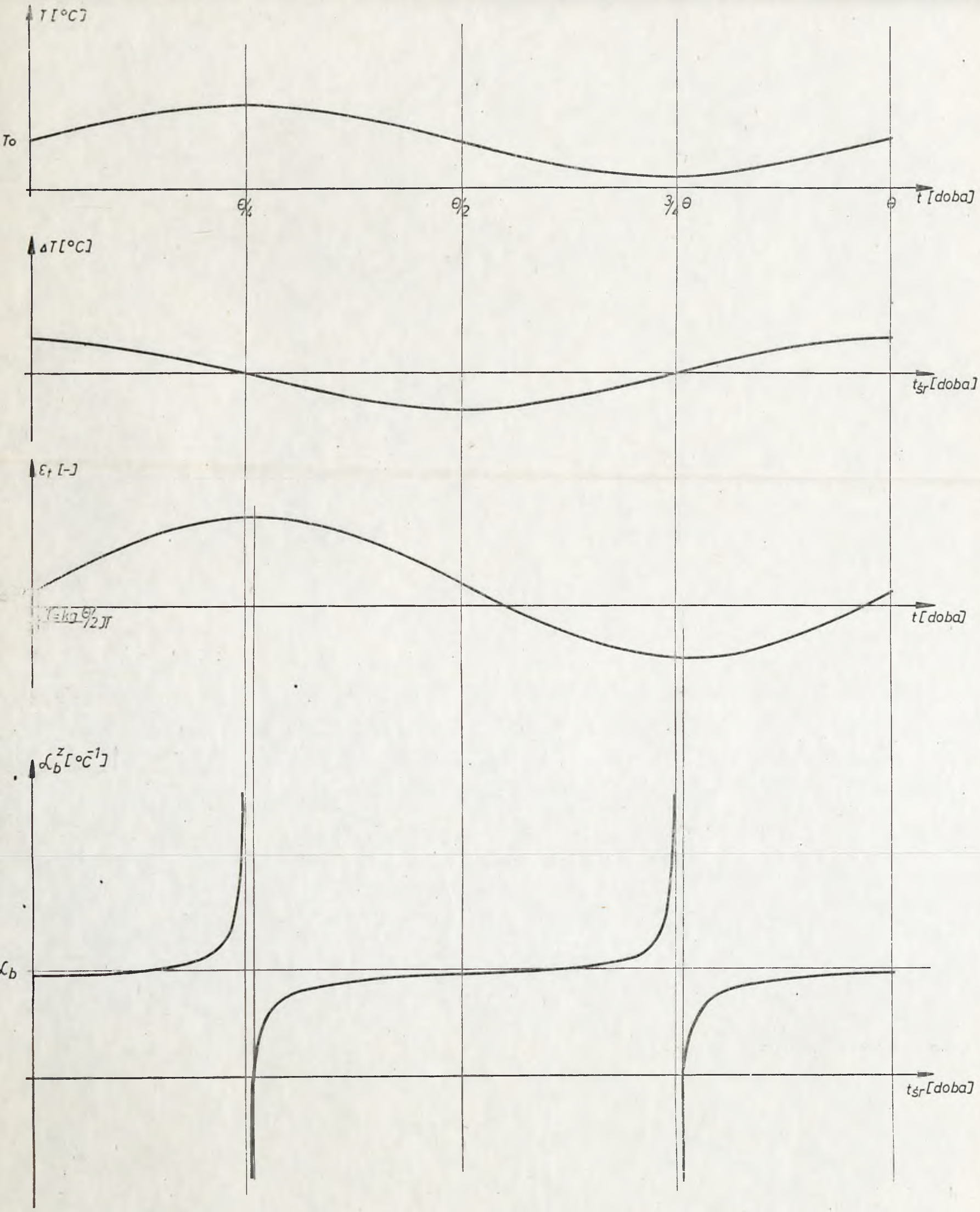
Dyskusję równania /64/ przeprowadzimy w oparciu o wykres zależności α_b^z / $t_{śr}$/. Za k·g przyjmujemy wartość odpowiadającą 10 centymetrowej pustce powietrznej /vide rysunek 22c/, taką bowiem posiadają naczynia w zaporze Besko [64] . Wykres α_b^z/$t_{śr}$/ przedstawiono na rysunku 23. Oprócz analizowanej zależności rysunek przedstawia przebiegi zmian temperatury i odkształceń termicznych oraz zależność różnic temperatur, pomierzonych przy regularnym prowadzeniu odczytów wskazań aparatury, od wielkości $t_{śr}$.[1/]

Analiza wykresu z rysunku 23 i równań /55/, /57/, /60/, /64/, na podstawie których wykresy te sporządzono - wskazuje, że przesunięcie czasowe τ pomiędzy przebiegiem okresowych zmian temperatury a przebiegiem zmian odkształcenia termicznego betonu prowadzi do istotnych błędów przy pomiarze współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b.

1/ Przy próbkowaniu systematycznym tj. przy regularnych odstępach między pomiarami różnice temperatur betonu będą się zmieniać okresowo, proporcjonalnie do wartości funkcji cosinus. Przekonuje o tym proste przekształcenie.

$$\Delta T = A_o \sin(t_{śr} + a) - A_o \sin(t_{śr} - a) = 2A_o \cos t_{śr} \cdot \sin a$$

gdzie: a - połowa okresu między pomiarami.



Rys. 23 Ilustracja graficzna wyników pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b w niestacjonarnym i niejednorodnym polu temperatur — według modelu.

Gdy przesunięcie czasowe nie występuje /$\tau = 0$/ wówczas we wzorze /64/ znika składnik okresowy, a wartości α_b^z są równe mierzonej wartości α_b. Temperatura w miejscu pomiaru odkształcenia jest przy tym równa temperaturze wskazywanej przez teletermometr. Istnieje więc ścisła odpowiedniość mierzonego odkształcenia termicznego i mierzonej temperatury, a pomiar współczynnika odkształcalności cieplnej betonu jest merytorycznie poprawny. Gdy przesunięcie czasowe τ jest różne od zera, to wyniki pomiaru α_b^z zmieniają się w zależności od wartości środkowej $t_{śr}$ przedziału wyznaczonego na osi czasu przez terminy wykonania odczytów wskazań aparatury: termin odczytu początkowego t_o i końcowego t_k. Zależność α_b^z /$t_{śr}$/ ma charakter okresowy, a odchylenia wyników pomiaru α_b^z od wartości mierzonej α_b tj. błędy pomiaru mogą być nieskończenie duże.

Błąd pomiaru określony według wzoru /15/ jako różnica wielkości zmierzonej α_b^z i rzeczywistej α_b składa się z dwóch części:

- stałej danej wzorem:

$$\Delta_s = \alpha_b[\exp(-kg)\cos(-kg) - 1] \qquad /65/$$

- okresowej danej wzorem:

$$\Delta_o = \alpha_b \cdot \exp(-kg)\cdot\sin(kg)\cdot tg\left(\frac{2\pi}{\Theta} t_{śr}\right) \qquad /66/$$

Ponieważ wartość średnia okresowego składnika błędu Δ_o wynosi zero, więc błąd średni pomiaru sprowadza się do wartości składnika stałego Δ_s.

Jest rzeczą charakterystyczną, że największe rozrzuty wyników pomiarów α_b^z mają miejsce wówczas, gdy wartości $t_{śr}$ wypadają w pobliżu tych wartości zmiennej t, dla których funkcja zmian

temperatury osiąga ekstrema lokalne. Łatwo spostrzec, że właśnie wówczas notowane między chwilami t_o i t_k różnice temperatur betonu są niewielkie. W skrajnym przypadku, gdy zachodzi:

$$\left.\frac{dT}{dt}\right|_{t = t_{śr}} = 0 \qquad /67/$$

Wartość α_b^z pozostaje nieokreślona; odpowiada to zerowej różnicy temperatur betonu.

Charakterystyczna jest również zbieżność zerowania się wartości α_b^z z osiąganiem przez funkcję $\varepsilon_t(t)$ ekstremów lokalnych. Jeśli bowiem zachodzi warunek:

$$\left.\frac{d\varepsilon_t}{dt}\right|_{t = t_{śr}} = 0 \qquad /68/$$

to oznacza on, że zmierzona różnica odkształceń jest zerowa /przy różnej od zera różnicy temperatur/.

W podsumowaniu można określić następująco cechy jakościowe wyników pomiarów odkształcalności cieplnej betonu α_b uzyskanych z modelu:

1 wartości błędu pomiaru wielkości α_b są teoretycznie nieograniczone,

2 wartości błędu zmieniają się w sposób okresowy,

3 wynik pomiaru wielkości α_b odbiega od wartości rzeczywistej najbardziej wtedy, gdy różnice temperatur są najmniejsze,

4 błąd średni pomiaru jest stały,

5 możliwe są przypadki gdy niezerowej różnicy odkształceń termicznych odpowiada zerowa różnica temperatur i odwrotnie niezerowej różnicy temperatur odpowiada zerowa różnica odkształceń termicznych.

7.3. PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH Z MODELU Z WYNIKAMI POMIARÓW WYKONANYCH "IN SITU".

Uproszczony i wyidealizowany charakter modelu przedstawionego w punkcie 7.2. dysertacji oraz przewidywana złożoność warunków wymiany cieplnej w obrębie konkretnych układów pomiarowych: tensometr zerowy - teletermometr, zainstalowanych wenątrz zapory Besko, sprawiają, że porównania wyników uzyskanych "in situ" i z modelu mogą mieć charakter wyłącznie jakościowy. Możliwe porównania dotyczą w szczególności danych z okresu eksploatacji. Wtedy bowiem okresowe zmiany odkształceń i temperatur betonu [11] są najbliższe uproszczonym założeniom modelu. I tak punkt 1 opisu wyników uzyskanych przy wykorzystaniu modelu koresponduje ze stwierdzeniem znacznych wartości błędu pomiaru wielkości α_b /vide rozdział 4.4./.
Wartości błędu maksymalnego i standardowego określone z pomiarów znacznie przekraczają wartości maksymalne błędu szacowane metodą różniczki zupełnej. Przedstawiony model pomiarów odkształcalności cieplnej betonu w niejednorodnym i niestacjonarnym polu temperatur najlepiej wyjaśnia przyczyny takiego stanu rzeczy. O ile bowiem wszystkie z analizowanych czynników /paratemtry metrologiczne aparatury - rodział 4.3.5., zmiany właściwości betonu - rozdział 3 i 5, wymagania dotyczące konstrukcji naczyń zerowych - rozdział 6/ wpływają na błąd pomiaru wielkości α_b w sposób ograniczony i niewielki /lub nie wpływają w ogóle/, o tyle niejednorodność pola temperatur prowadzić może do błędów teoretycznie nieograniczonych. Model wyjaśnia nie tylko znaczne wartości błędu ale i tłumaczy pojawiające się w wynikach ujemne wartości współczynnika α_b /vide tablica 3 - 6/.

Okresowa zmienność wartości błędu cechująca wyniki uzyskane z modelu /punkt 2 opisu wyników/ nie znajduje potwierdzenia w wynikach uzyskanych w "in situ" /vide rozdział 4.3.2./. O losowości badanych serii wartości błędu δ decydują jednak przede wszystkim przypadkowe odstępy między pomiarami /vide kolumny 11 tablic 3 - 6/. Należy sądzić, że zmiana reżimu prowadzenia odczytów wskazań aparatury na bardziej równomierny wykazałaby okresowość wyników. Warto przy tym zauważyć, że periodyczność rezultatów pomiarów wielkości α_b może ujawnić się tylko dla danych z okresu eksploatacji. Wtedy bowiem przebiegi zmian temperatur i odkształceń nabierają cech okresowości.

Cecha wyników modelowania pomiaru wielkości α_b przedstawiona w punkcie 3, w wynikach z obiektu odzwierciedla się najdobitniej. Świadczą o tym zależności błędu standardowego /rys.13/ i maksymalnego /rys.16/ od modułu różnicy temperatur oraz wysoki stopień korelacji charakteryzujący te związki.

Wyniki z modelu ujawniają swoją zależność od różnic temperatur betonu niezależnie od dokładności pomiaru odkształceń i temperatur - model nie wymaga bowiem żadnych informacji o cechach aparatury. Obserwowana zależność znajduje swoją przyczynę w modelowanej niejednorodności pola temperatur betonu.

Należy zauważyć, że zależność wartości błędu pomiaru wielkości α_b od różnic temperatur betonu może mieć w przypadku pomiarów prowadzonych w "in situ" dwie przyczyny.

Jedna z nich to ograniczona dokładność pomiaru odkształceń i temperatur, a druga to możliwe wzajemne przesunięcie czasowych przebiegów tych wielkości.

O tym, że cechy metrologiczne aparatury nie są w tym zestawie przyczyn dominujące świadczy układ wykresów z rysunku 16. Błąd maksymalny z pomiarów przewyższa zdecydowanie swoje oszacowanie metodą różniczki zupełnej.

Wystąpienie tych różnic należy przypisać właśnie wzajemnemu przesunięciu czasowych przebiegów odkształcania i temperatury.

Z czwartą cechą wyników modelowania pomiaru wielkości α_b korespondują wyniki badania zależności błędu średniego $\bar{\delta}$ od modułu różnicy temperatur /vide tablica 13 i rysunek 12/.

Stwierdzono, że błąd średni w okresie eksploatacji nie zależy od modułu różnicy temperatur, a w okresie budowy obiektu jego zależność od tej wielkości jest istotna na poziomie 10%, ale już nie na poziomie 5%. Istnienie - w okresie budowy obiektu - - zależności $\bar{\delta}$ od modułu różnicy temperatur nie podważa wartości modelu. Ten bowiem opisuje warunki pomiaru wielkości α_b w okresie eksploatacji tj. wtedy, gdy przebiegi czasowe mierzonych wielkości stają się okresowe. W okresie budowy występuje zjawisko "uderzenia termicznego" i stygnięcia masywu.

Sprawia to, że warunki pomiaru wielkości α_b są wtedy o wiele bardziej skomplikowane niż te, które odzwierciedla model z rozdziału 7.2.

Próba stwierdzenia w wynikach uzyskanych "in situ" niezerowej wartości błędu średniego natrafia na poważne trudności.

Różnice wartości średnich wielkości α_b uzyskanych z pomiarów na zaporze /vide tablica 7/ i wartości α_b uzyskanych w warunkach laboratoryjnych [15] nie mogą być jednoznacznie zinterpretowane jako błąd średni. Można je bowiem uznać za efekt zakłóceń wywołanych obecnością tensometru wewnętrznego /vide rozdział 5/.

Punkt 5 opisu wyników z modelu znajduje pełne potwierdzenie w wynikach uzyskanych w "in situ". W każdej z tablic 3 - 6 odnaleźć można po kilka wyników pomiarów o cechach opisanych w punkcie 5 .

W podsumowaniu przeprowadzonych porównań należy stwierdzić, że zaproponowany w rozdziale 7.2. rozprawy model pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu w konstrukcji wykazuje daleko posuniętą jakościową zgodność z obrazem wyników uzyskanych "in situ".

8. ANALIZA OGÓLNA

Pozytywny rezultat porównania wyników pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b uzyskanych "in situ" z wynikami uzyskanymi przez modelowanie takich pomiarów pozwala na stwierdzenie, że czynnikiem decydującym o wartościach błędu pomiaru wielkości α_b jest niejednorodność niestacjonarnego pola temperatur w obrębie układu pomiarowego: tensometr zerowy - teletermometr.

Niejednorodność taka jest zwykle cechą pola temperatur konstrukcji jako całości. Z przedstawionego modelu wynika jednak, że posiada ona także aspekt lokalny. Mianowicie zawsze wywoła ją pustka powietrzna naczynia zerowego. Powszechne jej stosowanie sprawia, że konstrukcja naczyń zerowych wykazuje właściwości termoizolacyjne. Wywołuje to w niestacjonarnym polu temperatur sytuację, w której mierzone wewnątrz naczynia zerowego odkształcenia termiczne stają się nieadekwatne wobec mierzonych poza naczyniem temperatur betonu.

Stan taki wpływa niekorzystnie na rezultaty interpretowania wyników pomiarów tensometrycznych powodując znaczne wartości błędu wielkości wyznaczanych w toku interpretacji.

Rozważania w dysertacji dowodzą tego w sposób oczywisty w odniesieniu do zmodyfikowanej metody obliczania odkształceń konstrukcji [17] , jako że istotą tej metody jest określenie odpowiednich współczynników termicznych.

Stosowanie innych metod interpretowania wyników /vide rozdział 1.7/ wykorzystujących wskazania tensometrów zerowych nie uwalnia od niekorzystnego wpływu konstrukcji naczynia zerowego.

W tych bowiem przypadkach od wskazań tensometrów aktywnych odejmuje się wskazanie tensometru zerowego, co ma eliminować odkształcenie termiczne z odkształcenia całkowitego ośrodka obciążonego.

Różnice temperatur wewnątrz i na zewnątrz naczynia - spotęgowane wpływem zwykle stukilkudziesięciocentymetrowego oddalenia rozety od tensometru zerowego - są przyczyną błędu określenia odkształceń termicznych betonu w miejscu rozety i pośrednio błędu określenia tej części odkształceń, którą wywołuje obciążenie zewnętrzne.

Właściwe konstrukcjom masywnym proporcje odkształceń od obciążeń i odkształceń termicznych /vide rozdział 1.8./ sprawiają, że błąd ten - najczęściej pomijalny względem wartości odkształceń termicznych - bywa porównywalny z wielkością odkształceń od obciążeń; jako taki jest istotny i pomijać go nie należy.

W świetle wyżej przedstawionych analiz wydaje się wskazanym stosowanie w każdym gnieździe pomiarowym dwóch teletermometrów: jednego w naczyniu zerowym, drugiego w sąsiedztwie rozety czujników aktywnych.

Wiąże się z tym ściśle problem doboru czujników o odpowiedniej czułości pomiaru.

Ponieważ pomiary tensometryczne wewnątrz masywu konstrukcji mają charakter względny tj. rejestrują jedynie zmiany stanu między terminami odczytów wskazań aparatury więc i pomiary temperatury służą nie tyle określeniu jej wartości /np. w skali Celsjusza/, ile określeniu jej zmian.

Wykorzystując równania /55/ i /57/ określić można różnice temperatur notowane między pomiarami w chwilach t_o i t_k odpowiednio:

- w punkcie o współrzędnej z /vide rozdział 7.2/:

$$\Delta T(z,t_o,t_k) = 2\frac{h}{\sqrt{k^2+(k+h)^2}}\cdot A_{op}\exp(-k\cdot z)$$

$$\cos\left[\frac{2\pi}{\Theta}\left(\frac{t_k+t_o}{2}-t_p\right)-k\cdot z-\delta\right]\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k-t_o}{2}\right) \qquad /69/$$

- w punkcie w współrzędnej z + g:

$$\Delta T(z+g,t_o,t_k) = 2\frac{h}{\sqrt{k^2+(k+h)^2}}A_{op}\exp[-k(z+g)]$$

$$\cos\left[\frac{2\pi}{\Theta}\left(\frac{t_k+t_o}{2}-t_p\right)-k(z+g)-\delta\right]\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k-t_o}{2}\right) \qquad /70/$$

oznaczenia jak we wzorach /55/ i /57/.

Wpływ oddalenia miejsc pomiaru temperatury /jeden termometr w naczyniu zerowym, drugi poza nim, w pewnej odległości od naczynia/ spowoduje, że pomierzone różnice $\Delta T/z, t_o, t_k/$ i $\Delta T/z+g, t_o, t_k/$ będą się różnić o wartość - proporcjonalną do ewentualnej poprawki wskazania tensometru zerowego - daną wzorem:

$$\Delta = 2\frac{h}{\sqrt{k^2+(k+h)^2}}\cdot A_{op}\exp(-k\cdot z)\left\{\cos\left[\frac{2\pi}{\Theta}\left(\frac{t_k+t_o}{2}-t_p\right)-k\cdot z-\delta\right]+\right.$$

$$\left.-\exp(-k\cdot g)\cos\left[\frac{2\pi}{\Theta}\left(\frac{t_k+t_o}{2}-t_p\right)-k\cdot z-k\cdot g-\delta\right]\right\}\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k-t_o}{2}\right) \qquad /71/$$

Jeśli oznaczyć amplitudę wahań temperatury betonu w punkcie o współrzędnej z literą A i wprowadzić skalę czasu o własności danej równaniem /63/, to wzór /71/ uprości się do postaci:

$$\Delta = 2\cdot A\cdot\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k-t_o}{2}\right)\left[\cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k+t_o}{2}\right)+\right.$$

$$\left.-\exp(-k\cdot g)\cdot\cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}\frac{t_k+t_o}{2}-k\cdot g\right)\right] \qquad /72/$$

lub po dodatkowym przekształceniu wykorzystującym prosty wzór trygonometryczny do postaci:

$$\Delta = 2 \cdot A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\,\frac{t_k - t_o}{2}\right)\left\{\left[1 - \exp(-kg)\cos(-kg)\right]\cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}\,t_{śr}\right) + \right.$$

$$\left. + \exp(-kg)\sin(-kg)\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\,t_{śr}\right)\right\} \qquad /73/$$

gdzie: $t_{śr}$ - środek przedziału czasowego wyznaczonego przez terminy pomiarów t_o i t_k.

Analiza równania /73/ wskazuje, że wielkość Δ zmienia się przy próbkowaniu równomiernym /$t_k - t_o$ = const/ w sposób okresowy, a jej wartości zależą od wyboru terminów t_k i t_o, wzajemnej odległości termometrów /z uwzględnieniem pustki powietrznej!/ oraz amplitudy wahań temperatury w miejscu ulokowania teletermometru /w prezentowanym ujęciu jest to termometr poza naczyniem/. W określonych warunkach, związanych z wyborem terminów pomiarów, wielkość Δ osiąga wartości ekstremalne. I tak np. przy g = 0.5 m wynoszą one $\pm$ 0.45 A, a przy g = 1.0 m $\pm$ 0.82 A. Stosowanie w danym miejscu konstrukcji zestawu dwóch termometrów /jednego w naczyniu zerowym, drugiego w pobliżu rozety czujników aktywnych/ będzie miało sens wówczas, gdy czułość stosowanych termometrów będzie pozostawała w pewnej proporcji do wartości ekstremalnych wielkości Δ. Wartość tego ułamka zależeć więc musi od przewidywanego reżimu prowadzenia odczytów wskazań aparatury, budowy gniazda pomiarowego i amplitudy wahań temperatury w danym miejscu konstrukcji.

O ile układ czujników w gnieździe pomiarowym może być do pewnego stopnia dowolny,a wybór terminów pomiarów zależy całkowicie od obserwatora, o tyle wartości amplitud temperatur pozostają w ścisłych związkach z cechami pola temperatur konstrukcji. Co więcej, same amplitudy - jako wielkości charakteryzujące

lokalne własności pola temperatur - tworzą pewne pole skalarne $A = A/x,y,z/$; przy niezmieniających się warunkach brzegowych pole amplitud jest polem stacjonarnym.

W praktyce dysponuje się czujnikami o określonej z góry czułości /vide tablica 8/. Zagadnienia doboru odpowiedniej czułości przyrządu ulega wówczas odwróceniu. Teraz polega ono na wyborze tych stref konstrukcji, w których zmienność temperatur - - charakteryzowana wartością amplitudy - umożliwi, przy realnym reżimie prowadzenia odczytów, określenie i uwzględnienie wielkości Δ. W konstrukcji masywnej istnieć będą strefy, w których dublowanie termometrów o określonej czułości nie da, z punktu widzenia prowadzonych tu analiz, żadnego rezultatu. Wówczas należy ograniczyć się do pomiarów jednym termometrem licząc się z większym błędem interpretacji. Błąd ten można często ograniczyć poprzez zwiększenie częstotliwości prowadzenia pomiarów. Działanie takie ma jednak swoje granice.

Rozpatrzmy przykładowo pomiar współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b wewnątrz zapory Besko, prowadzony w oparciu o wskazania tensometrów zerowych i teletermometrów.[1/]

W rozdziale 4.3.4. wykazano, że rozkład błędu tej wielkości może być traktowany jako normalny o średniej zero i odchyleniu równym:

$$s = 9.790 \cdot 10^{-6} \left| \Delta T \right|^{-0.523} \qquad /74/$$

w okresie budowy obiektu,

$$s = 8.736 \cdot 10^{-6} \left| \Delta T \right|^{-0.766} \qquad /75/$$

1/ Określenie tej wielkości stanowi integralną część zmodyfikowanej metody obliczania odkształceń konstrukcji na podstawie pomiarów tensometrycznych [17] .

w okresie eksploatacji, przy czym ΔT - różnica temperatur przy pomiarach α_b. Wykorzystując znajomość odchylenia standardowego s /równania /74/ i /75// można określić minimalne liczebności zbioru wyników α_b zapewniające, iż przy zadanym poziomie istotności, odchylenie δ wartości średniej $\overline{\alpha}_b$ z próby od wartości rzeczywistej nie przekroczy wartości z góry zadanej.

Według pracy [74] liczebność takiej próby wyraża się wzorem:

$$n = \frac{u_\alpha^2 \cdot s^2}{\delta^2} \qquad /76/$$

gdzie: n - minimalna liczebność próby,

u_α - zmienna standaryzowana rozkładu normalnego,

s - odchylenie standardowe populacji α_b,

δ - odchylenie wartości średniej $\overline{\alpha}_b$ od wartości rzeczywistej,

α - poziom istotności.

Wartości n przy dwóch poziomach istotności / α = 5% i α = 1%/ oraz przy dwóch wartościach $\delta = 4.41 \cdot 10^{-6}$ /odpowiada to czułości tensometru SCOwb-150 przy współpracy z miernikiem SAM-10/ i $\delta = 1 \cdot 10^{-6}$ /wówczas błąd względny wyznaczonej wartości α_b stanowi około 10% wartości rzeczywistej/ - oddzielnie dla okresu budowy i eksploatacji obiektu - podano w tablicy 17. Nawet pobieżna analiza tablicy 17 wskazuje na nierealność przeprowadzenia odpowiedniej liczby pomiarów w warunkach niewielkich wahań temperatury. Z równania /69/ wynika, że maksymalna różnica temperatur jaką można zmierzyć w danym miejscu konstrukcji wynosi 2A tj. odpowiada podwójnej amplitudzie wahań. Ze wzoru /69/ wynika także, że ilość takich pomiarów w okresie Θ jest ograniczona. Pomiary - gdyby realizować je według

TABLICA 17. Minimalna liczebność zbioru wyników pomiarów współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b zapewniająca, iż - przy zadanym poziomie istotności α - - odchylenie δ wartości średniej z próby od wartości rzeczywistej nie przekroczy zadanej wartości.

Moduł różnicy temperatur betonu $\lvert\Delta T\rvert$ [°C]	Okres budowy				Okres eksploatacji			
	Poziom istotności α 5%		Poziom istotności α 1%		Poziom istotności α 5%		Poziom istotności α 1%	
	$\delta=4{,}41\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=1\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=4{,}41\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=1\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=4{,}41\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=1\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=4{,}41\cdot10^{-6}$/°C	$\delta=1\cdot10^{-6}$/°C
1	19	369	33	636	16	294	27	507
2	10	178	16	308	6	102	10	176
3	6	118	11	204	3	55	5	95
4	5	87	8	150	2	36	4	61
5	4	69	7	119	2	25	3	44
7	3	49	5	84	1	15	2	26
10	2	34	3	58	1	9	1	15

tablicy 17 - ciągnęłyby się bardzo długo.

Praktycznie rzecz biorąc amplitudy wahań temperatury wewnątrz masywu w połączeniu z ograniczoną czułością czujników wyznaczają granice stosowalności bardziej skomplikowanych metod interpretacji. W dużych masywach mogą wystąpić wreszcie strefy tak znikomych wahań temperatury, że próby ich pomiaru okażą się bezcelowe. W strefach tych nie ma sensu umieszczać ani termometrów ani tensometrów zerowych, jako że znikome zmiany temperatury wywoływać będą znikome zmiany odkształceń termicznych. Jeśli wziąć pod uwagę decydujący udział tych odkształceń w odkształceniu całkowitym masywnej konstrukcji hydrotechnicznej /vide rozdział 1.8/ to i obecność tensometru aktywnego jest bezcelowa. Taka strefa budowli nie wykaże uchwytnych zmian temperatur i odkształceń - pod tym względem jest "martwa".

9. WNIOSKI

1. Dominującym składnikiem wewnętrznego odkształcenia betonowej konstrukcji hydrotechnicznej jest odkształcenie termiczne.
2. Błąd pomiaru współczynnika odkształcalności cieplnej betonu α_b masywnej konstrukcji hydrotechnicznej wyznaczanego na podstawie wskazań tensometru zerowego i teletermometru podlega rozkładowi normalnemu o średniej zero i odchyleniu standardowym odwrotnie proporcjonalnym do modułu różnicy temperatur notowanych między odczytami wskazań aparatury.
3. Zależność odchylenia standardowego wielkości α_b od modułu różnicy temperatur betonu może być wyrażona związkiem potęgowym typu $y = Ax^B$ / $B < 0$ /, przy czym wartości parametrów A i B wyznaczone na podstawie danych z okresu wznoszenia budowli różnią się istotnie /na poziomie ufności 95%/ od wartości tych parametrów wyznaczonych na podstawie danych z okresu eksploatacji obiektu.
4. Zasadniczym źródłem błędu pomiaru współczynnika α_b wewnątrz konstrukcji jest nieadekwatność wielkości zmian temperatur mierzonych przy pomocy teletermometru i wielkości odkształceń termicznych mierzonych przy pomocy tensometru zerowego wywołana niejednorodnością niestacjonarnego pola temperatur konstrukcji masywnej w miejscach pomiaru tych wielkości.
5. Znaczącą przyczyną niejednorodności pola temperatur w obrębie gniazda pomiarowego czujników wewnętrznych są termoizolacyjne właściwości pustki powietrznej występującej powszechnie w konstrukcjach naczyń zerowych.

6. W celu ograniczenia błędów opracowania pomiarów termometrycznych wywołanych wpływem zróżnicowania temperatur i odkształceń termicznych w naczyniu zerowym i w miejscu instalowania tensometrów aktywnych i teletermometru należy stosować dwa teletermometry: jeden wewnątrz naczynia zerowego i drugi poza naczyniem, w sąsiedztwie rozety tensometrów aktywnych.
7. Różnice temperatur /i odkształceń termicznych/ wewnątrz naczynia zerowego i tuż poza nim są proporcjonalne do amplitudy zmian temperatury betonu w danym miejscu konstrukcji.
8. Instalowanie układów pomiarowych z dwoma teletermometrami należy ograniczyć do tych stref konstrukcji, w których wartość amplitudy wahań temperatury betonu - przy ograniczonej czułości teletermometrów - zapewnia możliwość pomiaru zróżnicowania temperatur wewnątrz i na zewnątrz naczynia zerowego.
9. W tych miejscach konstrukcji, gdzie wartości amplitud wahań temperatury betonu i czułość stosowanych teletermometrów uniemożliwiają pomiar zróżnicowania temperatur wewnątrz i na zewnątrz naczynia należy stosować układy pomiarowe z jednym czujnikiem temperatury ulokowanym poza naczyniem. Wtedy należy stosować statystyczne planowanie pomiarów bądź też wykorzystywać prostsze i niestety mniej informatywne metody obliczania wyników tj. takie, które nie wymagają wyznaczenia wielkości pośrednich względem zmierzonych odkształceń i temperatur.
10. Projekt rozmieszczenia punktów pomiaru odkształceń wewnętrznych w konstrukcji, projekt zestawów czujników w gniazdach pomiarowych oraz wybór sposobu interpretowania wyników pomiarów tensometrycznych muszą być dostosowane do wartości amplitud wahań temperatury betonu w masywnej konstrukcji hydrotechnicznej.

10. LITERATURA

1. Ablewicz Z., Jóźwik B. "Budownictwo w technice jądrowej" Arkady, Warszawa 1978;
2. Aleksandrovskaja E.K. "Naprjaženija v plotine Krasnojarskoj ges v periody stroitelstva i vremennoj ekspluatacii" Gidrotechničeskoe Stroitelstvo No. 4/1971;
3. Aleksandrovskaja E.K., Kadyskina N.A., Urachčin V.P. "Analiz rezul'tatov naturnych issledovanij naprjaženij v massivnych gravitacionnych plotinach" Gidrotechničeskoe Stroitelstvo No. 7/1976;
4. "Aparatura strunowa do budowy szybów". Etap I: "Studia oraz analiza istniejących rozwiązań w świecie" Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów - MERA, Warszawa 1968, /maszynopis/;
5. Argyris J.H., Warnke E.P., Willam K.J. "Berechnungen von Temperatur- und Feuchtfeldern in Massivbauten nach der Methode der Finiten Elemente" Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 1964, zeszyt 278;
6. "Badania cech fizycznych betonów zapory w Besku na próbkach odwierconych z korpusu zapory" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa 1984, /maszynopis/;
7. "Badania laboratoryjne aparatury do pomiaru odkształceń betonu. Metodyka interpretacji pomiarów tensometrycznych betonowych konstrukcji hydrotechnicznych" PR-7.02.03.06.06., Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984, /maszynopis/;
8. "Badania laboratoryjne dotyczące zestawień aparatury strunowej do pomiaru odkształceń betonu oraz analiza wyników pomiarów tensometrycznych prowadzonych w obiektach hydrotechnicznych" PR-7.02.03.06.05., Instytut Zaopatrzenia w

Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983, /maszynopis/;

9. "Badania odkształceń części betonowej zapory ziemnej Dobczyce" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, listopad 1978, /maszynopis/;

10. "Badania odkształceń i temperatury w części betonowej zapory ziemnej w Dobczycach wraz z zainstalowaniem tensometrów i termometrów strunowych" część I i II, Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, grudzień 1980, /maszynopis/;

11. "Badania odkształceń, temperatury i ciśnień wody w zaporze Besko" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, listopad 1981, /maszynopis/;

12. "Badania odkształceń, temperatury i parcia gruntu w zaporze Dobczyce aparaturą strunową" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, styczeń 1982, /maszynopis/;

13. "Badania odkształceń zapory betonowej Besko" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, listopad 1978, /maszynopis/;

14. "Badania stanu technicznego zapory Besko czujnikami strunowymi" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, listopad 1982, /maszynopis/;

15. "Badanie cech mechanicznych betonów hydrotechnicznych" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa 1985, /maszynopis/;

16. Baran L., Dobosz W., Kwaśniewski J., Sulikowska I. "Zastosowanie tensometrii strunowej do pomiaru odkształceń zapory wodnej" Konferencja SIMP, Warszawa 1967;

17. Baran L., Kwaśniewski J. "Zmodyfikowana metoda obliczania odkształceń zapory betonowej na podstawie pomiarów tensometrycznych" Archiwum Hydrotechniki 1/1979;

18. Baran L., Kwaśniewski J. "Zmodyfikowanie metody obliczania odkształceń na podstawie pomiarów tensometrycznych na zaporze" Gospodarka Wodna 9/1979;

19. Baran L., Kwaśniewski J., Lasota E. "Obliczanie odkształceń na podstawie pomiarów tensometrycznych na zaporze przy wykorzystaniu elektronicznych maszyn cyfrowych". Rozprawy Hydrotechniczne 42/1980;

20. Brandt A.M. "Metody pomiarów i analizy odkształceń wewnętrznych w elementach konstrukcji" PWN, Warszawa 1978;

21. "Budowle wodne śródlądowe" tom XVII monografii "Budownictwo betonowe", Arkady, Warszawa 1962;

22. Ciok Z. "Metody obliczania pól elektromagnetycznych i przepływowych" Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981, /skrypt/;

23. Dettling H. "Die Wärmedehnung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone" Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Berlin 1964, zeszyt 164;

24. Djatlovickij L.I., Ermolenko A.I., Vajnberg A.I., Bredjuk V.I. "Issledovanie termonaprjažennogo sostojanija gravitacionnoj plotiny na skol'nom osnovanii v ekspluatacionnyj period" Gidrotechničeskoe Stroitelstvo No 6/1978;

25. Dobosz W. "Model opisujący przemieszczenie punktu na zaporze jako funkcję historii obciążenia i temperatury" Gospodarka Wodna 4/1980 ;

26. "Dokumentacja wzorcowa 1202 "Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów , Zakład ORC, Warszawa 1980;

27. Eksperimental'nye metody issledovanija deformacij i naprjaženij" Spravočnoe posobie, Kasatkin B.S. i in. Naukova Dumka, Kiev 1981;

28. Emanuel J.H., Hulsey J.L. "Prediction of the Thermal Coefficient of Expansion of Concrete" Journal of the American Concrete Institute April 1977 No. 4 Proceedings V.74 p. 149 - 155;

29. Fiedler K. "Współczesne metody interpretacji wyników pomiarów zapór wodnych" Gospodarka Wodna 12/1974;

30. Ginzburg M.B. "Naturnye issledovanija krupnych gidrotechničeskich sooruženij" Izdatel'stvo "Energija", Moskwa-Leningrad, 1964;

31. Głodek J. "Jeziora zaporowe świata" PWN, Warszawa 1985;

32. Godycki-Ćwirko T. "Mechanika betonu" Arkady, Warszawa 1982;

33. "Instrukcja i koncepcja urządzenia do badania modułów sprężystości na próbkach betonowych z uwzględnieniem obciążeń i reologii dla zapory Besko" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, czerwiec 1976;

34. Jasiński B., Szarliński J. "Obliczanie metodą elementów skończonych naprężeń w korpusie ciężkiej zapory betonowej z otworami" Gospodarka Wodna 6/1973;

35. Jaworski B.M., Dietłaf A.A. "Fizyka. Poradnik encyklopedyczny" PWN, Warszawa 1971;

36. Kawalerow G.I., Mandelsztam S.M. "Wprowadzenie do teorii pomiarów" PWN, Warszawa 1983;

37. Kiernożycki W., Kurzawa J. "Badanie ciepła twardnienia mieszanek betonowych przeznaczonych do wykonywania konstrukcji masywnych" Cement, Wapno, Gips, 12/1983;

38. Kledyński Z. "Ocena dotychczasowych zastosowań aparatury strunowej do badań temperatury i odkształceń wewnątrz betonu na wybranych obiektach hydrotechnicznych w kraju" Warszawa 1981, /praca dyplomowa - maszynopis/;

39. Kuhn R. "Erfahrungen mit Dehnungsmessungen im Massenbeton". VDI - H.99/1957/ No. 17;

40. Kwaśniewski J. "Sprzeczności w konwencji znaków naprężeń w odwzorowaniu Mohra" Rozprawy Hydrotechniczne 35/1975;

41. Kwaśniewski J. "Zastosowanie biegunowej metody koła Mohra przy określaniu rozkładu odkształceń i naprężeń w punkcie" Archiwum Hydrotechniki 3/1968;

42. Kwaśniewski J., Baran L., Sobieraj J., Sulikowska I. "Uwzględnienie pełzania betonu przy obliczaniu naprężeń w zaporze w oparciu o pomiary tensometryczne" IV Sympozjum PTMTS poświęcone reologii, Wrocław 1969;

43. Kwaśniewski J., Baran L., Sobieraj J., Sulikowska I. "Uwzględnienie wpływu pełzania przy ustalaniu niektórych własności mechanicznych betonu zapory" PAN IBW, Gdańsk. Biblioteka Naukowa Hydrotechnika Nr 2, PWN - Warszawa - - Poznań - 1969;

44. Kwaśniewski J., Baran L., Sobieraj J., Sulikowska I. "Wyznaczanie naprężeń w zaporze w oparciu o pomiary tensometryczne z uwzględnieniem pełzania i dojrzewania betonu" Rozprawy Hydrotechniczne 32/1973;

45. Kwaśniewski J., Baran L., Sulikowska I. "Analiza stanu odkształceń i naprężeń przy zastosowaniu metod graficznych" Rozprawy Hydrotechniczne 23/1969;

46. Kwaśniewski J., Baran L., Sulikowska I. "Graficzny sposób określania i weryfikacji naprężeń w zaporach w oparciu o pomiary tensometryczne" Gospodarka Wodna 1/1969;

47. Kwaśniewski J., Baran L., Sulikowska I. "Komunikat z wstępnych prac nad opracowaniem metodyki pomiaru odkształceń i naprężeń w zaporze" Gospodarka Wodna" 6/1966;

48. Kwaśniewski J., Sulikowska I. "Natychmiastowe i opóźnione odkształcenia betonu zapory" Rozprawy Hydrotechniczne 32/1973;

49. Kwaśniewski J., Baran L., Sulikowska I. "Wyznaczenie stałych materiałowych przy pomiarach naprężeń w konstrukcjach betonowych" Rozprawy Hydrotechniczne 21/1967;

50. Loh Y.C. "Internal stress gauges for cementitious materials" Mass. Inst. of Techn. Rep., Office of Naval Res., NR 064-331, July 1952;

51. Madany A. "Promieniowanie i dynamika atmosfery" Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1977, /skrypt/;

52. Maksymiuk J., Wohlmuth F. "Metody statystyczne w inżynierii elektrotechnicznej" Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981, /skrypt/;

53. "Methods of determining effects of shrinkage, creep and temperature on concrete for large dams" ICOLD. Bulletin No. 26/1976;

54. Mitzel A. "Reologia betonu" Arkady, Warszawa 1972;

55. Nemet J., Angeli R. "Spannbeton - Reaktor - druckbehälter. Instrumentierung" Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 1975, zeszyt 253;

56. Neville A.M. "Właściwości betonu" Arkady, Warszawa 1972;

57. "Nove metody merania - odbitka kserograficzna fragmentu książki w języku słowackim o powyższym tytule, rok i miejsce wydania nie znane;

58. "Obliczenia wybranych sekcji zapory w Besku pod wpływem parcia wody i zmian tempertury" PR-7.02.03.08, Etap III Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1983, /maszynopis/;

59. "Ocena bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych na podstawie modeli ich pracy i przy wykorzystaniu zautomatyzowanych systemów pomiarowych" PR-7.02.03.08 Etap Vb "Podsumowanie wyników badań prowadzonych w latach 1981 - 1985" Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985, /maszynopis/;

60. "Opracowanie programu komputerowego HYDRO1 do badania stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczeń budowli hydrotechnicznych /zakończ./" Praca wykonana w ramach tematu PR-7.04.06.01.01 "Doskonalenie metod obliczeń betonowych konstrukcji hydrotechnicznych" Instytut Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich Politechniki Warszawskiej, Warszawa, czerwiec 1985, /maszynopis/;

61. Parczewski W. "Materiały do wykładów z meteorologii i klimatologii" Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1978, /skrypt/;

62. Plajt Š.N. "Rasčety temperaturnych polej betonnych gidrosooruženij" Energija, Moskva 1974;

63. "Polska aparatura strunowa PAS" Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, Warszawa 1982, /wydawnictwa katalogowe, prospekty/;

64. "Projekt urządzeń tensometrycznych dla zapory Besko" PAN IBW Zakład Mechaniki Gruntów, Gdańsk 1973, /maszynopis/;

65. "Przemieszczenia i naprężenia korpusu 8 sekcji zapory w Besku podczas skrajnych warunków przyrodniczych" C.B.S. i P.B.W. "Hydroprojekt" Oddział Kraków, 1983, /maszynopis/;

66. "Przeprowadzenie badań i zestawienie wyników pomiarów odkształceń i temperatury w sekcji betonowej B-2 oraz nacisku /parcia/ części ziemnej na część betonową zapory w Dobczycach" Zespół Rzeczoznawców SITWM NOT, Warszawa, grudzień 1980, /maszynopis/;

67. "Rozpoznanie dotychczasowych doświadczeń zagranicznych w dziedzinie możliwości badań hydrotechnicznych konstrukcji betonowych wraz z interpretacją wskazań tensometrów zerowych" PR-7.02.03.06.04 Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982, /maszynopis/;

68. "Rozpoznanie dotyczące istniejącej aparatury kontrolno-pomiarowej i warunków jej pracy" PR-7.02.03.06.03, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981, /maszynopis/;

69. "Sprawozdanie z badań elastooptycznych zapory w Besku" IPPT PAN Warszawa 1971, /maszynopis/;

70. Staniszewski B. "Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne" PWN, Warszawa 1979;

71. Strzemiecki S. "Czujniki strunowe w zaporze Dobczyce" Gospodarka Wodna 2/1981;

72. Szczepkowski R. "Analiza wpływu temperatury na naprężenia i przemieszczenia zapory betonowej", Warszawa 1984, /praca dyplomowa - maszynopis/;

73. Śniadkowski Z. "Elektrooporowe tensometry wewnętrzne" ITB, Seria II, Konstrukcje inżynierskie i budowlane, nr 38, Arkady, Warszawa 1967;

74. "Teoria pomiarów" praca zbiorowa pod redakcją H.Szydłowskiego, PWN, Warszawa 1974;

75. Volk W. "Statystyka stosowana dla inżynierów" WNT, Warszawa 1965;

76. Witakowski P. "Analiza naprężeń termicznych w masywach betonowych" Prace IMGW, Nr 12, Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa 1977;

77. Wittmann F. "Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons" Deutscher Auschuss für Stahlbeton, Berlin 1977, zeszyt 290;

78. Wittmann F., Lukas J. "Experimental Study of Thermal Expansion of Hardened Cement Paste" Materiaux et Constructions, juillet-août 1974;

79. "Wyposażenie budowli hydrotechnicznych w urządzenia kontrolno-pomiarowe. Wytyczne instruktażowe projektowania". CUGW, Warszawa 1969;

80. "Wytyczne badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach" Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1976, Instrukcja nr 194;

81. "Wytyczne prowadzenia badań odkształceń wewnętrznych w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych" Załącznik do opracowania: "Zalecenia dotyczące instalowania aparatury strunowej i interpretacji wyników pomiarów stanu odkształceń wewnątrz betonowych konstrukcji hydrotechnicznych" PR-7.02.03.06.07. Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985, /maszynopis/;

82. "Zalecenia dotyczące instalowania aparatury strunowej i interpretacji wyników pomiarów stanu odkształceń wewnątrz betonowych konstrukcji hydrotechnicznych" PR-7.02.03.06.07. Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985, /maszynopis/;

83. "Zapora Besko. Pomiary stanu betonu wykonane za pomocą aparatury strunowej", Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów - - MERA, Warszawa 1978, /maszynopis/;

84. "Zapora wodna w Solinie. Sprawozdanie techniczne i analiza pomiarów tensometrycznych za okres od dnia 21.VI.1964 r. do dnia 26.X.1964 r." IBW PAN Gdańsk 1965, /maszynopis/;

85. "Zapora wodna w Solinie. Sprawozdanie z interpretacji wyników pomiarów kontrolnych od 1.I. do 31.XII.1980" Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk 1981, /maszynopis/;

86. Ziegeldorf S., Kleiser K., Hilsdorf H.K. "Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton" Deutscher Auschuss für Stahlbeton, Berlin 1979, zeszyt 305;

87. Zielonko R. "Porównanie analogowych i cyfrowych metod pomiaru w zastosowaniu do tensometrów naprężno-strunowych. Mera-Nowa Technika. Numer specjalny dotyczący technicznych zastosowań tensometrii strunowej. VI. 1966r.

R.
4101

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Zbigniewa Franciszka Kledyńskiego

pt. „Wpływ pola temperatury w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych na zastosowanie tensometrycznej aparatury strunowej"

ZAŁĄCZNIKI

WARSZAWA
1986

POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
EX LIBRIS
BIBLIOTEKI GŁÓWNEJ
R.4101

[531.781.2: 627.82: 624.012.4J: 043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII SANITARNEJ I WODNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Zbigniewa Franciszka Kledyńskiego

p.t.

"Wpływ pola temperatury w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych na zastosowanie tensometrycznej aparatury strunowej"

/ załączniki /

Promotor

Doc. dr inż. Czesław Kempa

Warszawa 1986

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
R.4101
Biblioteka Główna

133-1/II-86d

Spis załączników:

Załącznik nr 1 : Dane do testu serii ciągów wartości błędu δ_i.

Załącznik nr 2 : Graficzne przedstawienie wzajemnego układu punktów $/\Delta T; \delta_i/$ w układzie współrzędnych prostokątnych.

Załącznik nr 3 : Podział wartości błędu δ_i w zależności od wartości modułu różnicy temperatur betonu.

Załącznik nr 4 : Dane do testu zgodności λ.

Załącznik nr 1.

"Dane do testu serii ciągów wartości błędu δ_i .

Zawartość: 4 tablice.

Tablica Z1-1. Zapora Besko; sekcja 6; Ts01 / Tt3.

ciąg wartości	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	
$\cdot 10^{-6}/^{o}C$	$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		
-10.70	-26.54	-			okres budowy
-26.54	-12.29	-			
- 7.53	-10.70	-			
+ 1.97	- 8.59	+			
- 7.53	- 7.53	-			
+ 6.72	- 7.53	+			
+11.47	- 7.53	+			
- 7.53	- 7.53	-			
+ 5.14	- 6.35	+			
-12.29	- 4.37	-			
+11.47	- 2.78	+			
- 2.78	- 2.78	-			
- 1.20	- 2.78	-			
- 6.59	- 1.20	-			
+11.47	+ 0.78	+			
+ 6.72	+ 1.97	+			
+11.47	+ 1.97	+			
- 4.37	+ 1.97	-			
- 2.78	+ 3.16	-			
+ 4.35	+ 4.35	+			
+ 1.97	+ 5.14	+			
+ 3.16	+ 6.72	+			
+ 0.78	+ 6.72				
- 2.78	+11.47	-			
+ 1.97	+11.47	+			
- 7.53	+11.47	-			
+17.81	+11.47	+			
+59.00	+17.81	+			
- 6.35	+59.00	-			
+ 1.97			-45.55	+	okres eksploatacji
- 5.63			-21.79	-	
+ 8.31			-17.04	+	
+20.98			-13.24	+	
-12.29			-12.29	-	
+ 6.72			-10.70	+	
- 2.10			- 5.63	+	
- 2.78			- 4.37		
- 3.73			- 3.73	-	
-17.04			- 3.46	-	
-45.55			- 2.78	-	
-21.79			- 2.10	-	
+ 9.10			- 1.20	+	
-10.70			+ 1.97	-	
+30.48			+ 6.72	+	
- 1.20			+ 7.67	+	
+ 7.67			+ 8.31	+	
-13.24			+ 9.10	-	
+11.47			+11.47	+	
- 3.46			+20.98	-	
- 4.37			+30.48	-	
mediana:	+ 0.78		- 2.78		

Tablica Z1-2. Zapora Besko; sekcja 6; Ts02 / Tt5.

ciąg wartości	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	
$\cdot 10^{-6}/^{o}C$	$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		
- 5.69	-21.55	-			okres budowy
+12.29	-16.13	+			
+ 4.17	-16.13	+			
- 2.60	- 8.01	-			
- 8.01	- 8.01	-			
- 8.01	- 8.01	-			
+ 8.23	- 8.01	+			
-16.13	- 8.01	-			
+ 4.17	- 8.01	+			
+ 0.11	- 5.69				
- 3.95	- 3.95	-			
- 8.01	- 2.60	-			
+ 8.23	- 2.21	+			
+ 0.11	+ 0.11				
-21.55	+ 0.11	-			
+ 0.11	+ 0.11				
+ 0.11	+ 0.11				
- 8.01	+ 0.11	-			
+ 0.11	+ 0.11				
+ 0.11	+ 0.11				
- 2.21	+ 4.17	-			
- 8.01	+ 4.17	-			
- 8.01	+ 4.17	-			
-16.13	+ 8.23	-			
+ 0.11	+ 8.23				
+ 4.17	+ 8.23	+			
+ 8.23	+ 8.23	+			
+ 8.23	+12.29	+			
+12.29	+12.29	+			
+ 0.11			- 8.01	-	okres eksploatacji
+ 4.17			- 4.76	+	
+ 2.14			- 3.14	-	
+ 1.73			- 2.60	-	
+ 1.27			+ 0.11	-	
- 3.14			+ 0.11	-	
- 4.76			+ 1.27	-	
+ 8.23			+ 1.73	+	
+ 0.11			+ 2.14	-	
- 2.60			+ 2.82	-	
- 8.01			+ 4.17	-	
+ 8.23			+ 4.17	+	
+ 4.17			+ 6.20	+	
+ 8.23			+ 8.23	+	
+ 6.20			+ 8.23	+	
+ 8.23			+ 8.23	+	
+ 8.23			+ 8.23	+	
+ 2.82			+ 8.23	+	
mediana:	+ 0.11		+ 2.48		

Tablica Z1-3. Zapora Besko; sekcja 8; Ts01 / Tt3.

ciąg wartości	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	
$\cdot 10^{-6}/^{o}C$	$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		
- 2.66	- 7.74	-			okres budowy
+ 6.04	- 6.38	+			
+ 6.04	- 5.55	+			
+ 1.07	- 2.66				
+ 1.07	- 1.72				
- 0.42	- 1.22	-			
+ 8.52	- 0.42	+			
+ 0.24	+ 0.14	-			
+ 4.80	+ 0.24	+			
- 6.38	+ 1.07	-			
+ 1.07	+ 1.07				
- 7.74	+ 1.07	-			
+20.94	+ 1.07	+			
+ 1.07	+ 1.57				
+ 1.57	+ 4.80	+			
- 5.55	+ 6.04	-			
- 1.72	+ 6.04	-			
+ 0.14	+ 8.52	-			
- 1.22	+20.94	-			
- 5.14			-36.19	-	okres eksploatacji
- 6.38			- 6.38	-	
+ 1.29			- 6.38	+	
-36.19			- 5.14	-	
+ 2.00			- 3.90	+	
- 1.91			- 2.41	-	
- 3.90			- 1.91	-	
- 0.42			- 0.79	-	
+ 1.07			- 0.42	+	
+ 0.82			- 0.11	+	
+ 4.33			+ 0.66	+	
+ 7.03			+ 0.82	+	
- 6.38			+ 1.07	-	
+ 8.52			+ 1.07	+	
+ 2.93			+ 1.29	+	
+ 0.66			+ 2.00	-	
+ 4.55			+ 2.31	+	
- 0.11			+ 2.93	-	
- 0.79			+ 4.33	-	
+ 1.07			+ 4.55	+	
- 2.41			+ 7.03	-	
+ 2.31			+ 8.52	+	
mediana:	+ 1.07		+ 0.74		

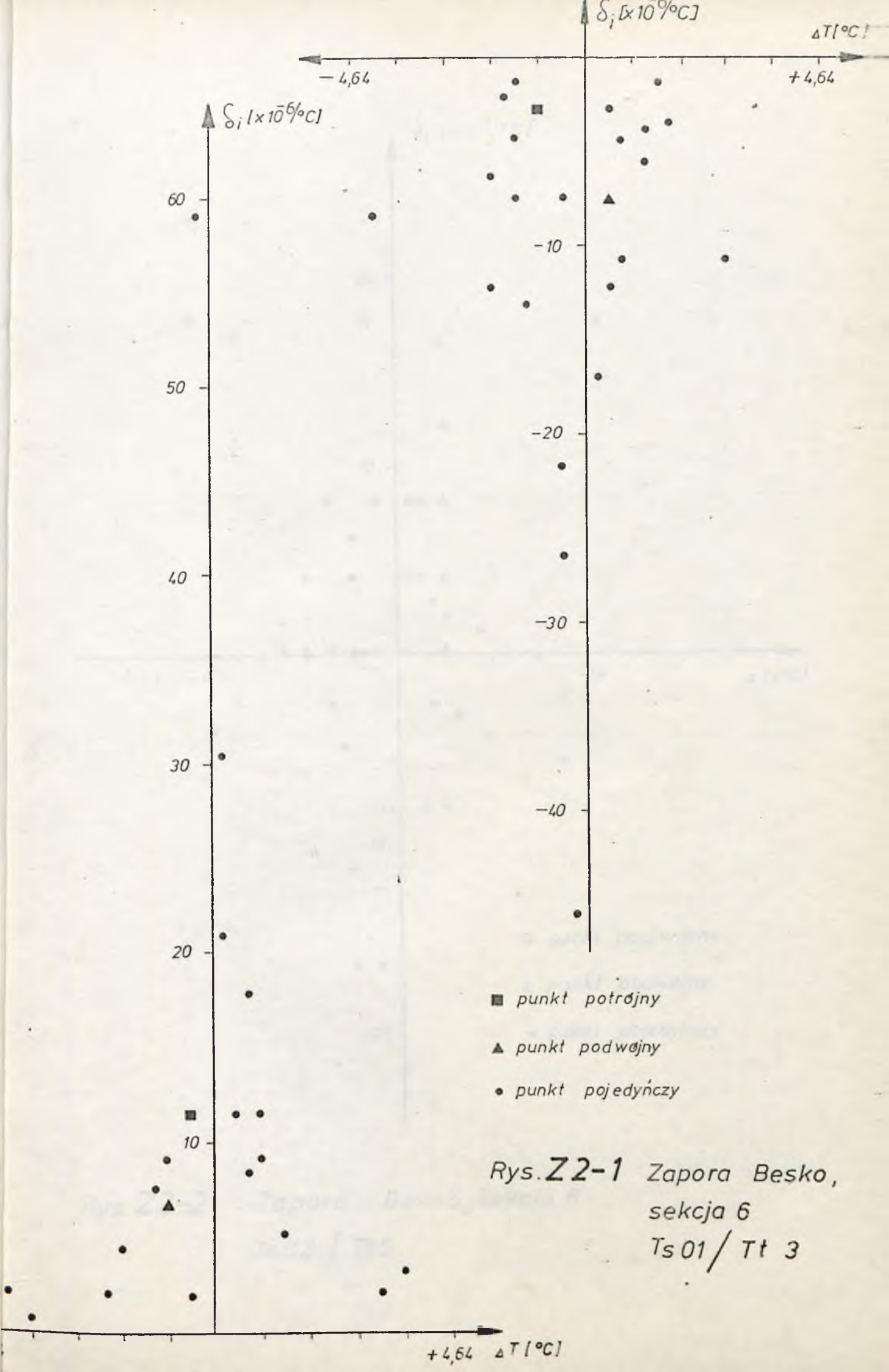
Tablica Z1-4. Zapora Besko; sekcja 10; Ts05 / Tt2.

ciąg wartości	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	ciąg rozdzielczy	ciąg znaków	
$\cdot 10^{-6}/^{o}C$	$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		$\cdot 10^{-6}/^{o}C$		
- 3.29	- 4.01	-			okres budowy
+ 8.57	- 3.29	+			
- 4.01	- 0.85	-			
- 0.80	- 0.80	-			
+ 7.09	+ 0.03	+			
- 0.85	+ 0.17	-			
+ 0.03	+ 0.62				
+ 0.62	+ 7.09	+			
+ 0.17	+ 8.57	+			
+ 0.86			-24.06	+	okres eksploatacji
-15.75			-15.75	-	
+20.24			-11.60	+	
- 2.60			- 7.45	-	
+13.32			- 5.37	+	
- 2.46			- 5.37	-	
- 1.45			- 2.70	-	
- 2.70			- 2.60	-	
- 5.37			- 2.46	-	
- 1.22			- 1.45	-	
+ 7.66			- 1.22	+	
+15.39			- 1.08	+	
- 0.95			- 0.95	+	
+17.47			- 0.74	+	
-24.06			+ 0.10	-	
- 0.74			+ 0.17	+	
-11.60			+ 0.86	-	
- 5.37			+ 7.66	-	
- 1.08			+13.32	+	
+ 0.17			+15.39	+	
- 7.45			+17.47	-	
+ 0.10			+20.24	+	
mediana:	+ 0.03		- 1.15		

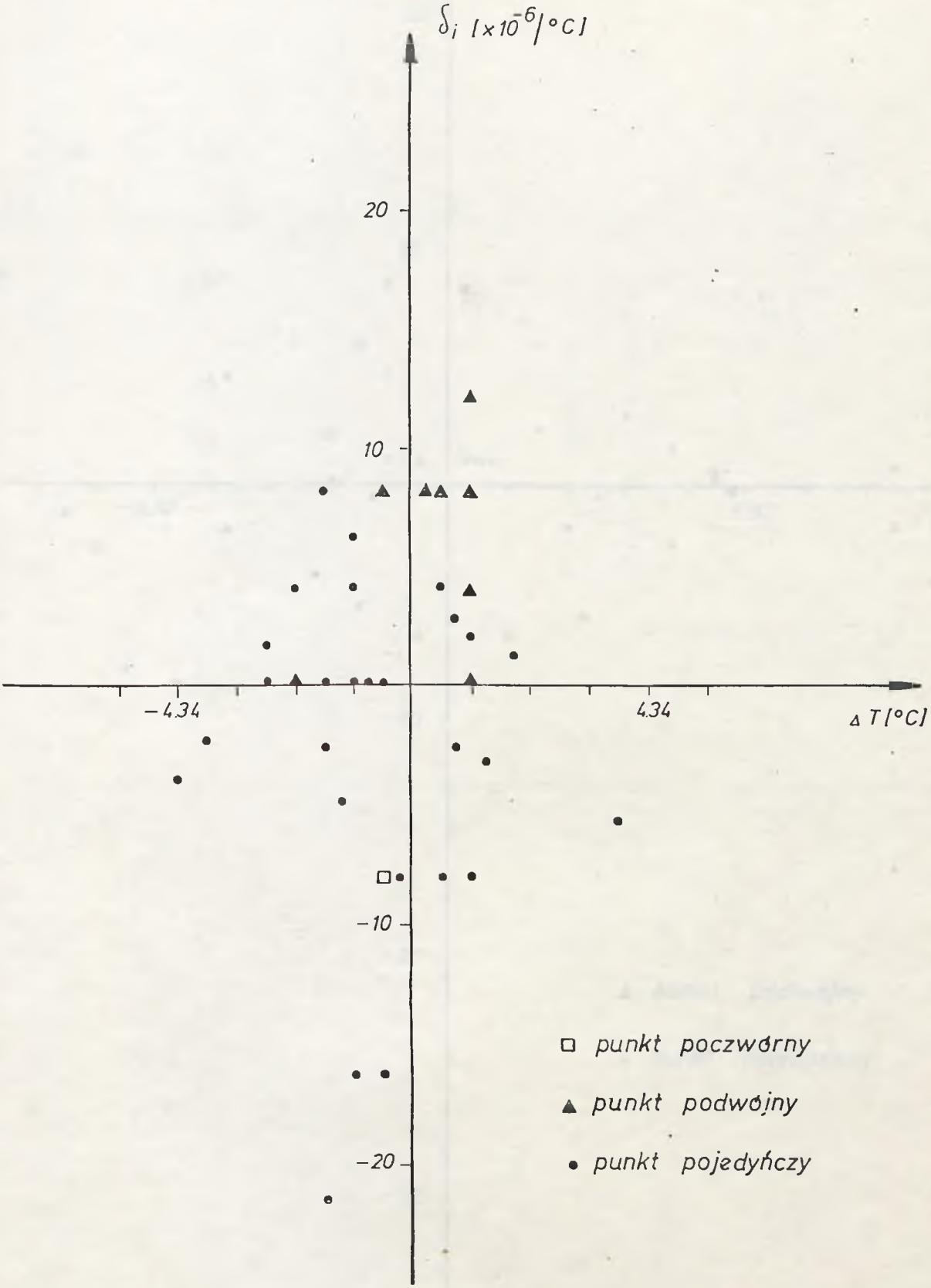
Załącznik nr 2.

"Graficzne przedstawienie wzajemnego układu punktów/ΔT, δ_i/ w układzie współrzędnych prostokątnych."

Zawartość: 4 rysunki.

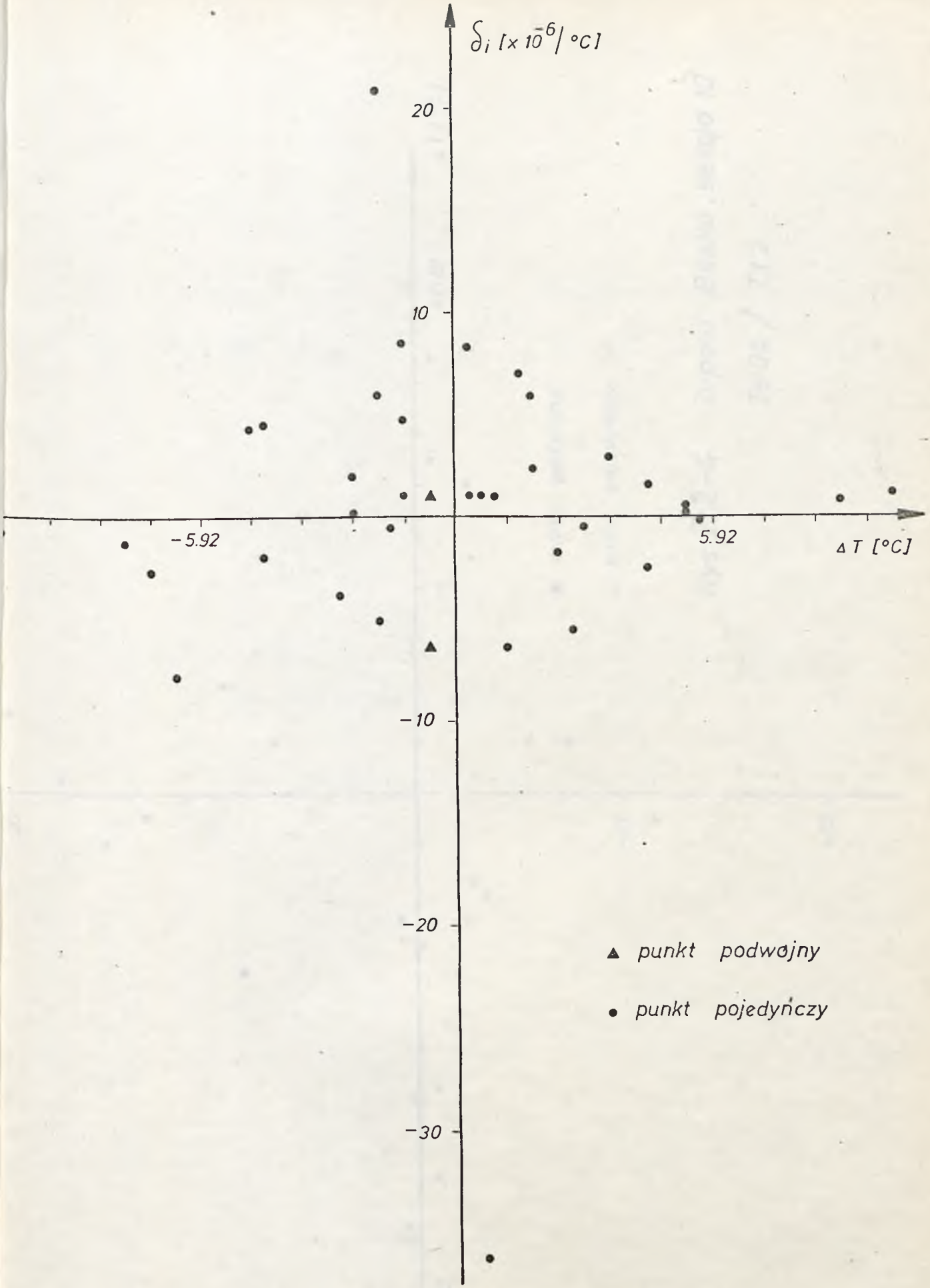


Rys. Z2-1 Zapora Besko, sekcja 6
Ts 01 / Tt 3



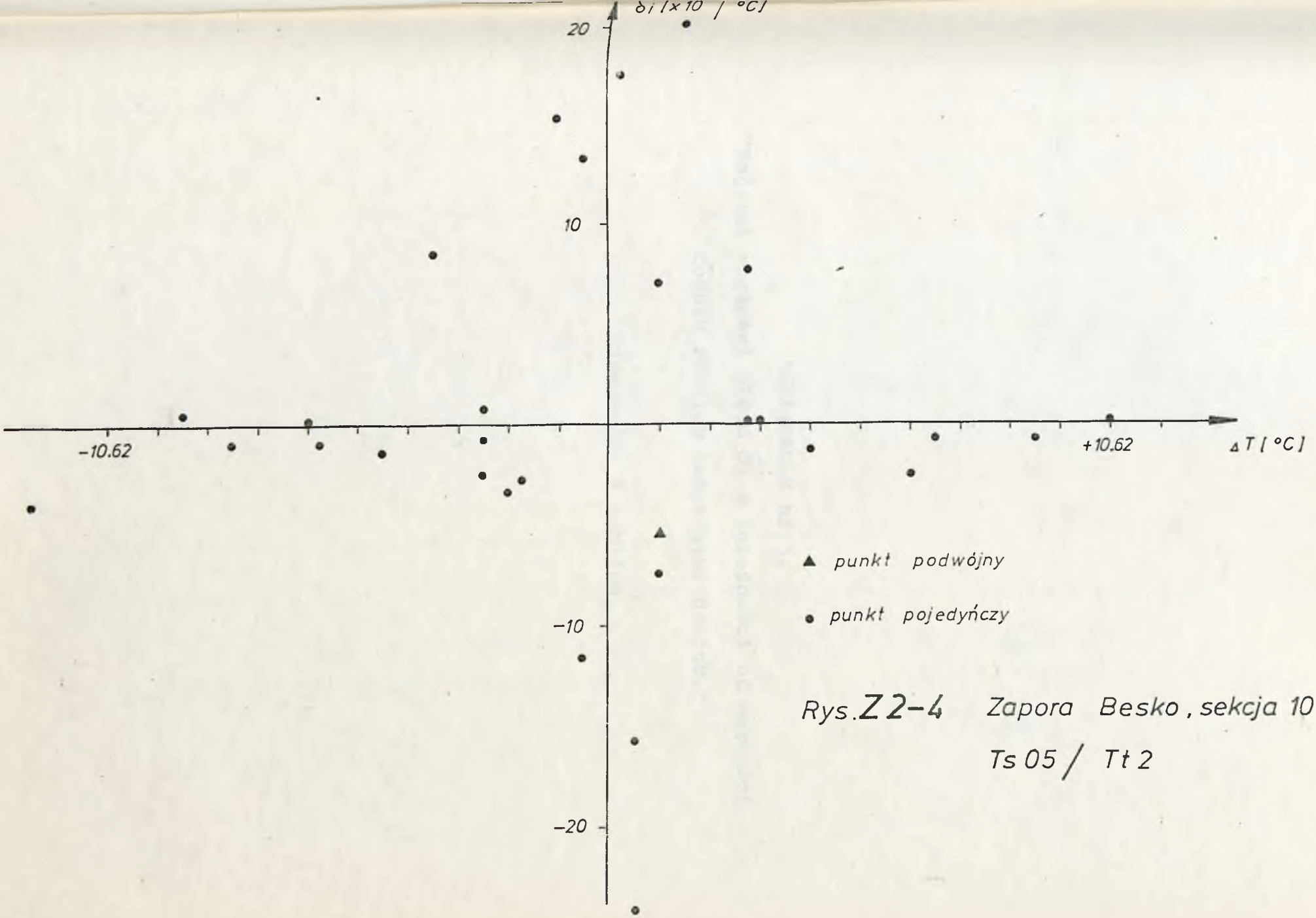
Rys. Z2-2 Zapora Besko, sekcja 6

Ts 02 / Tł 5



Rys. Z2-3 Zapora Besko, sekcja 8

Ts 01 / Tł 3



Rys. Z2-4 Zapora Besko, sekcja 10

Ts 05 / Tt 2

Załącznik nr 3.

"Podział wartości błędu δ_i w zależności od wartości modułu różnicy temperatur betonu."

Zawartość: 1 tablica.

Tablica Z3-1. Podział wartości błędu δ_i w zależności od modułu różnicy temperatur betonu.

	moduł różnicy temperatur [°C]						
	0.0 ÷ 0.5	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 4.0	4.0 ÷ 6.0	6.0 ÷ 13.62 x
okres budowy	-26.54	-16.13	-16.13	-21.55	-10.70	- 8.59	- 7.74
	- 7.53	- 8.01	- 8.01	-12.29	- 5.69	- 3.95	- 4.01
	- 7.53	- 8.01	- 7.53	- 6.35	- 5.55	+ 0.24	- 2.66
	- 7.53	- 8.01	- 4.37	- 3.29	- 2.21	+ 1.57	- 1.22
	+ 1.97	- 8.01	- 1.20	- 2.60	- 0.80	+ 1.97	- 0.85
	+11.47	- 8.01	+ 0.11	- 1.72	- 0.42		+ 0.03
	+11.47	- 6.38	+ 0.11	+ 0.11	+ 0.11		+ 0.17
	+11.47	- 2.78	+ 0.11	+ 0.11	+ 0.78		+ 0.62
	+59.00	- 2.78	+ 1.07	+ 0.14	+ 1.97		
		- 2.78	+ 4.17	+ 4.17	+ 3.16		
		+ 0.11	+ 4.17	+ 4.35	+ 8.57		
		+ 1.07	+ 4.80	+ 6.04			
		+ 1.07	+ 5.14	+ 6.04			
		+ 1.07	+ 7.09	+ 8.23			
		+ 6.72	+ 8.23	+20.94			
		+ 6.72	+ 8.52				
		+ 8.23	+12.29				
		+ 8.23	+12.29				
		+11.47					
		+17.81					
n	9	20	18	15	11	5	8
okres eksploatacji	-45.55	-36.19	-13.24	- 5.14	- 3.90	- 2.41	- 2.60
	-21.79	-24.06	- 7.45	- 3.46	- 2.46	- 1.91	- 1.08
	-17.04	-15.75	- 6.38	- 2.70	+ 0.10	- 1.45	- 0.95
	-12.29	-11.60	- 5.63	- 2.10	+ 0.17	- 1.22	- 0.79
	- 8.01	-10.70	- 5.37	+ 0.11	+ 0.86	- 0.11	- 0.74
	- 2.78	- 6.38	- 5.37	+ 1.27	+ 1.73	+ 0.66	+ 0.82
	+ 1.07	- 4.37	- 4.76	+ 1.97	+ 2.93	+ 4.33	+ 1.29
	+ 8.23	- 2.60	- 3.73	+ 2.00	+ 7.66	+ 4.55	
	+ 8.23	+ 0.11	- 3.14	+ 2.31			
	+ 8.52	+ 1.07	- 1.20	+20.24			
	+11.47	+ 2.82	- 0.42				
	+17.47	+ 4.17	+ 2.14				
	+20.98	+ 6.72	+ 4.17				
	+30.48	+ 8.23	+ 6.20				
		+ 8.23	+ 7.03				
		+ 8.31	+ 7.67				
		+ 9.10	+ 8.23				
		+13.32	+15.39				
n	14	18	18	10	8	8	7

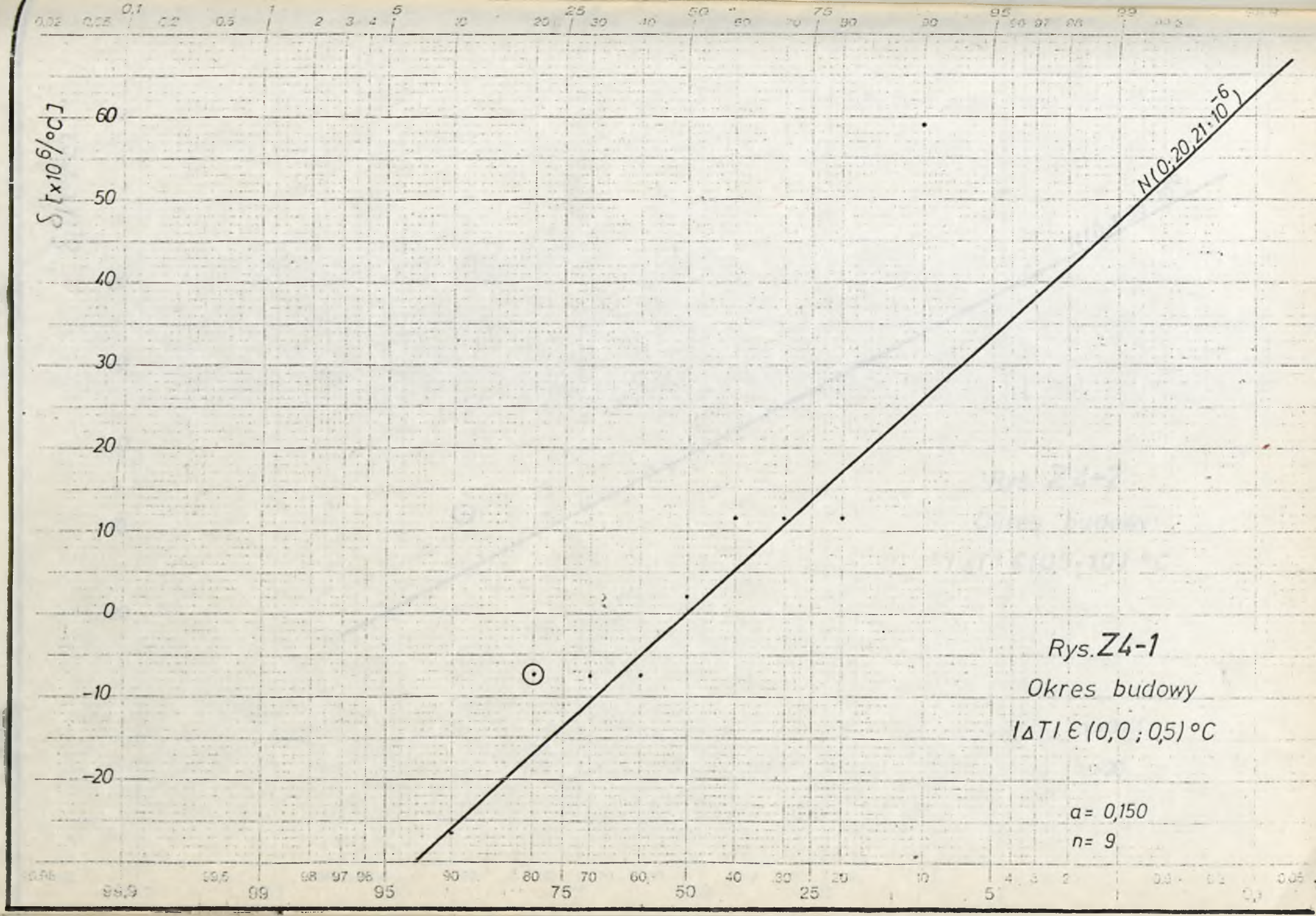
x dla danych z okresu eksploatacji górna granica przedziału wynosi 10.66°C

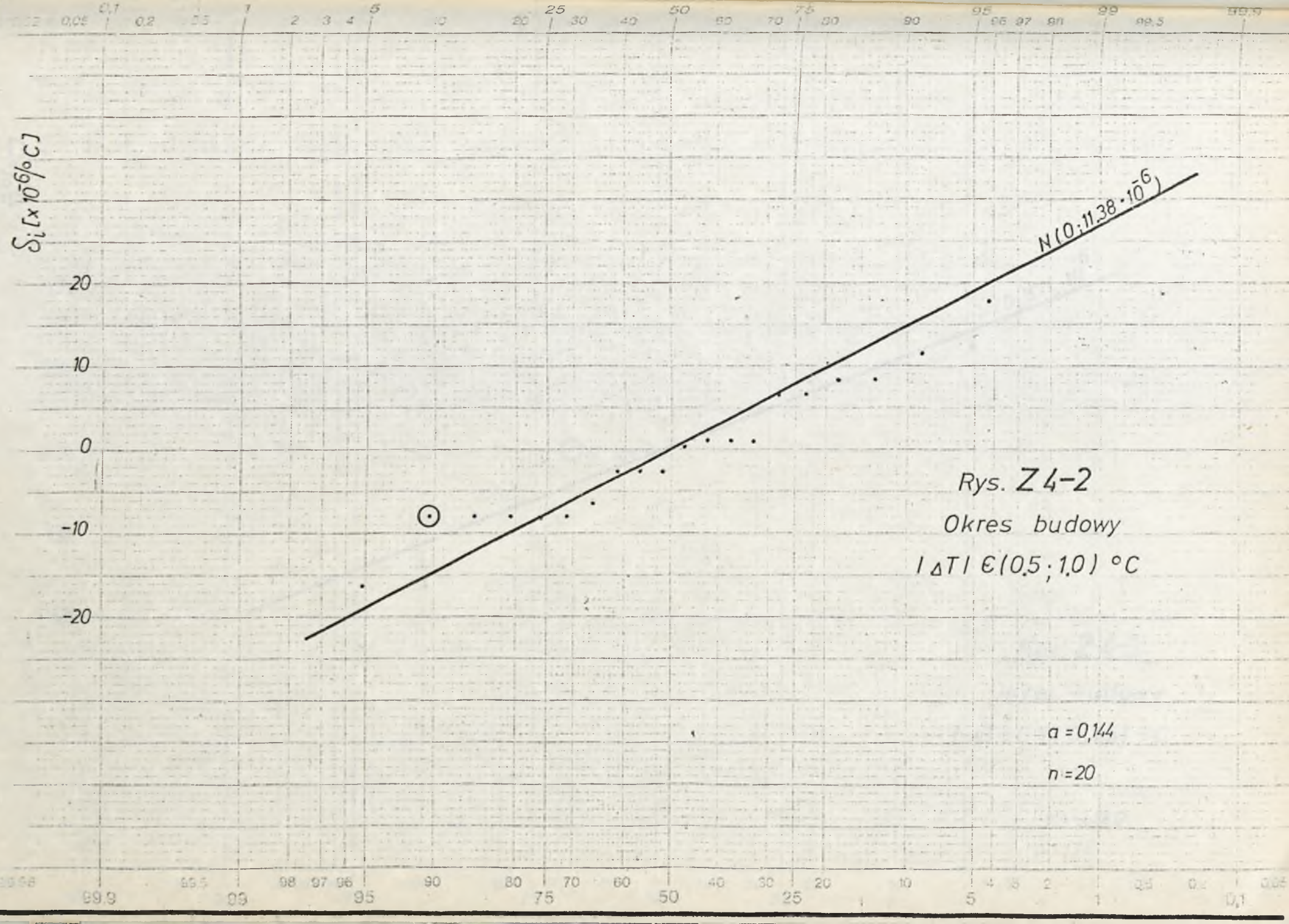
Uwaga: każda wartość δ_i ma mnożnik $10^{-6}/°C$

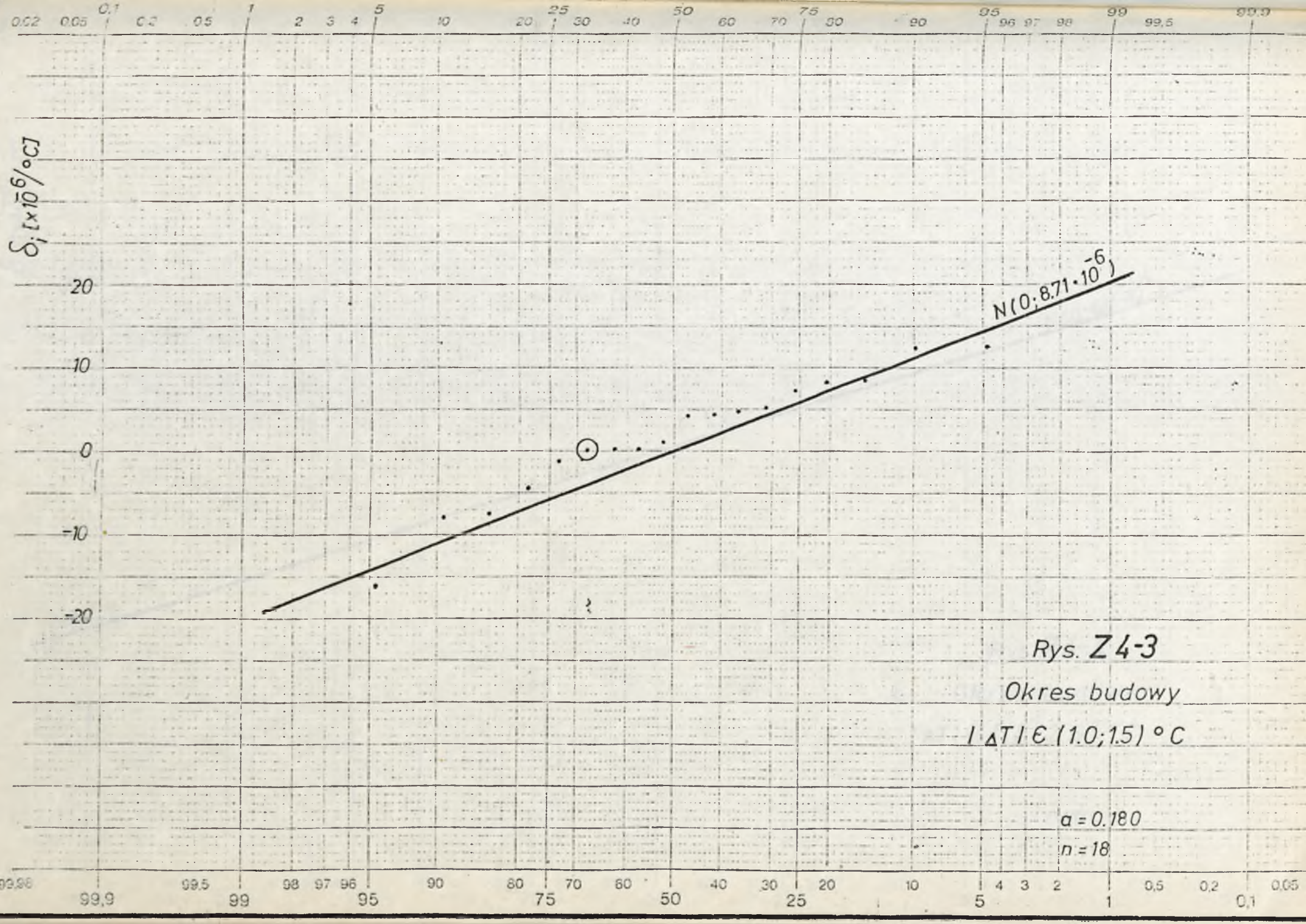
Załącznik nr 4.

"Dane do testu zgodności λ ."

Zawartość: 14 rysunków.


δ [x10⁻⁶/°C]
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
N(0;20,21·10⁻⁶)
Rys. Z4-1
Okres budowy
|ΔT| ∈ (0,0 ; 0,5) °C
a = 0,150
n = 9
99,9
99
95
75
50
25
5


δ_i [$\times 10^{-6}$/°C]
20
10
0
-10
-20
N(0; 11.38 · 10^{-6})
Rys. Z4-2
Okres budowy
$|\Delta T| \in (0.5; 1.0)$ °C
a = 0,144
n = 20



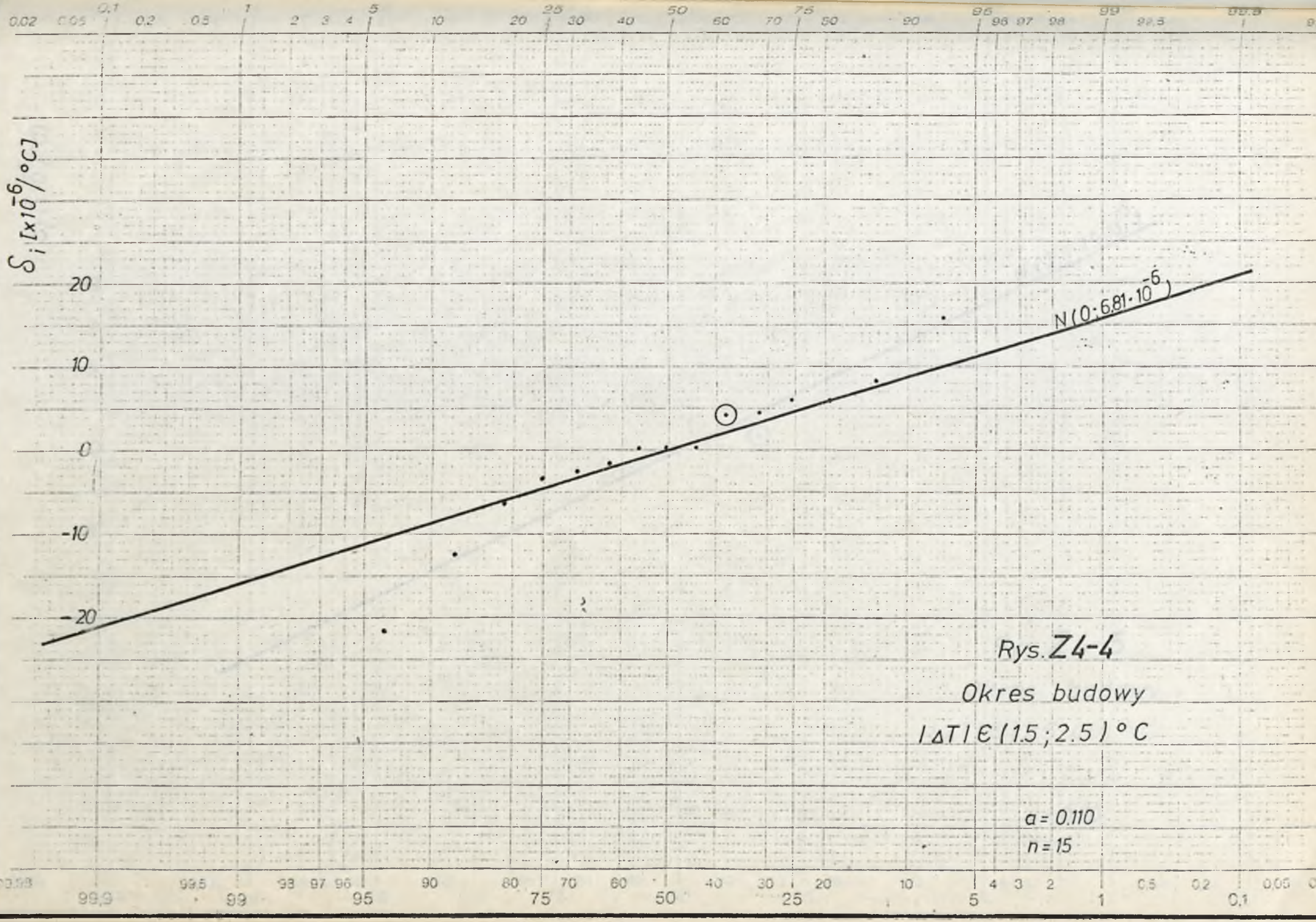
Rys. Z4-3

Okres budowy

$|\Delta T| \in (1.0; 1.5)$ °C

$a = 0.180$

$n = 18$



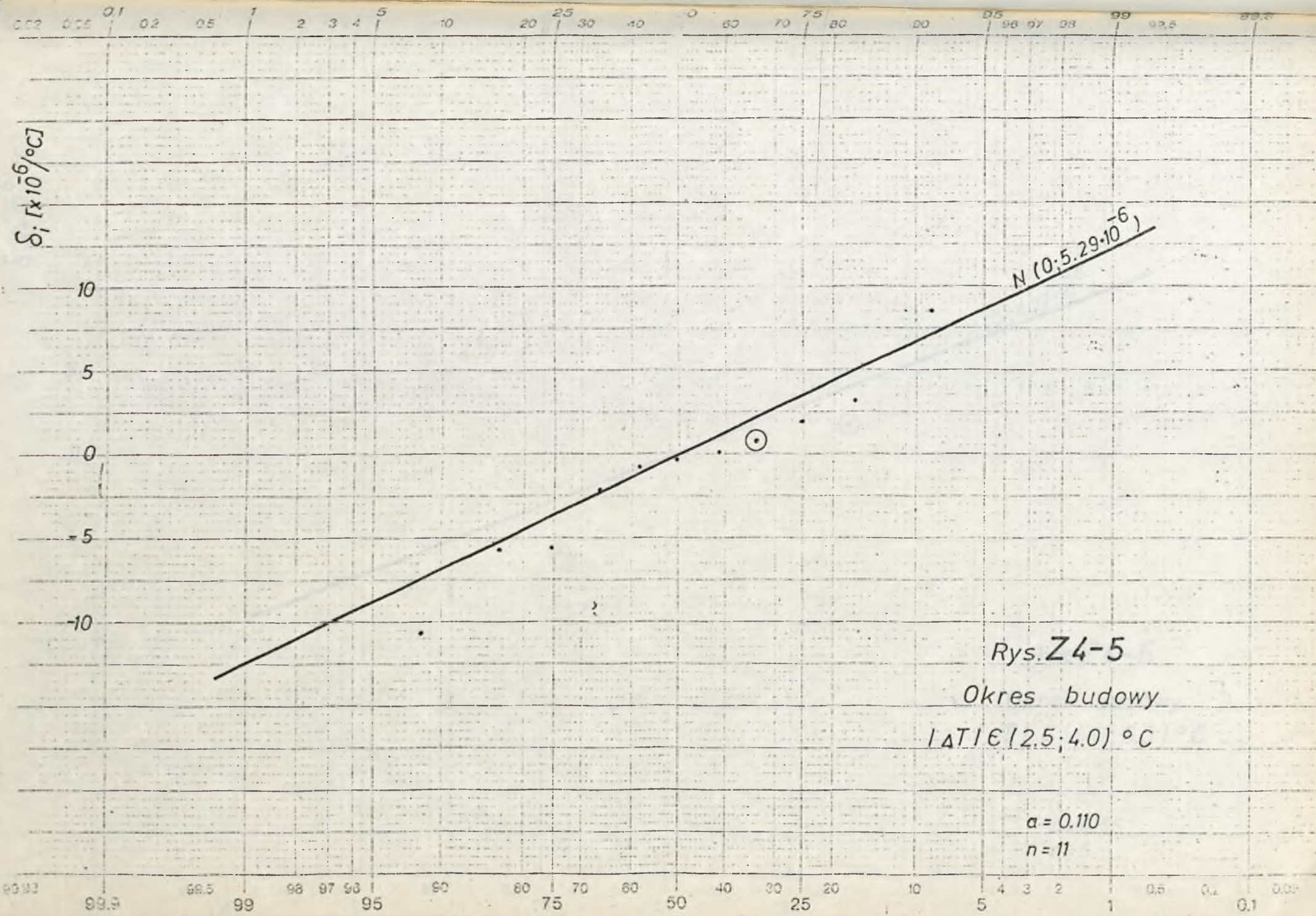
Rys. Z4-4

Okres budowy

$|\Delta T| \in (1.5; 2.5)$ °C

$a = 0.110$

$n = 15$



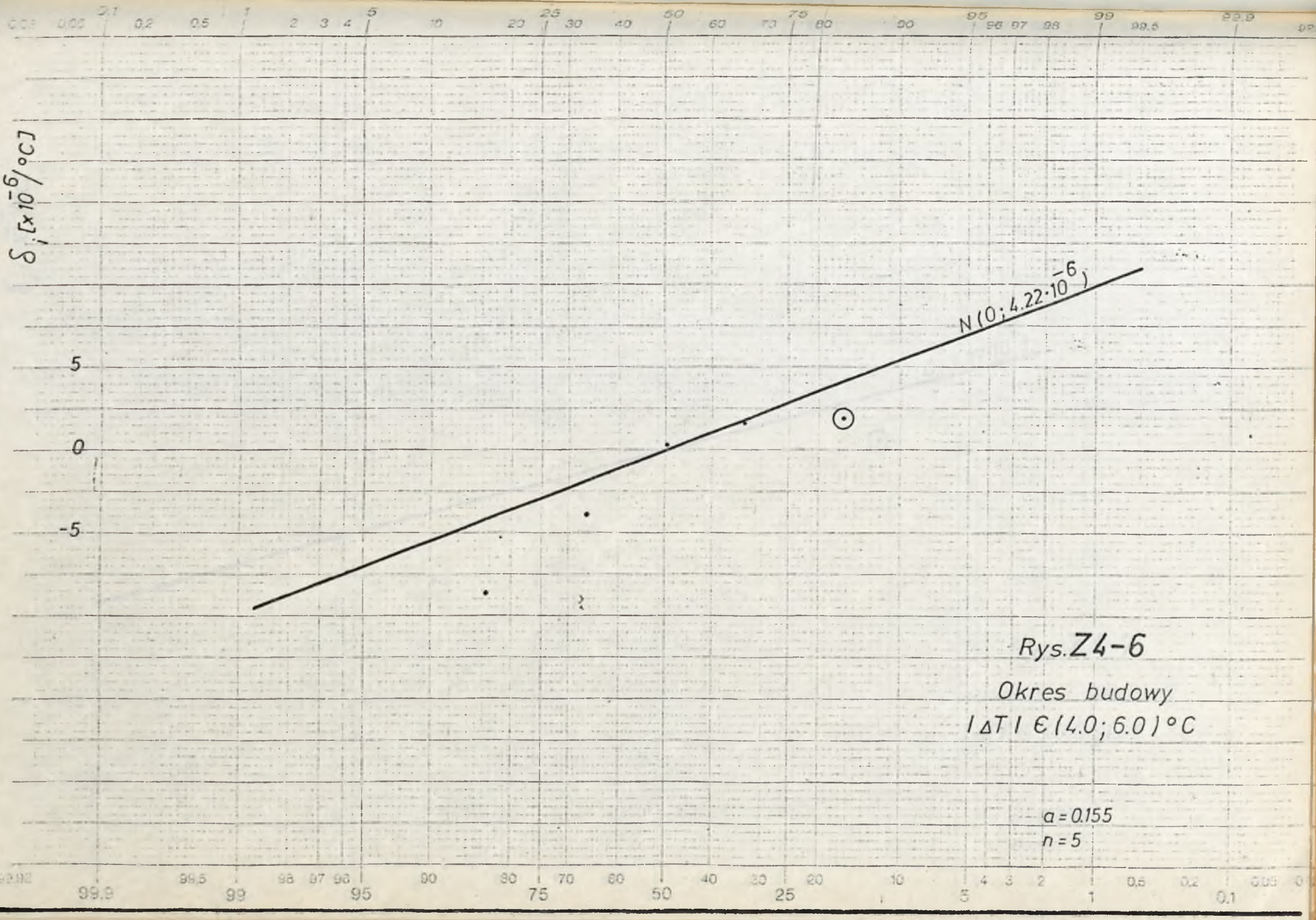
Rys. Z4-5

Okres budowy

$|\Delta T| \in (2.5; 4.0)$ °C

$a = 0.110$

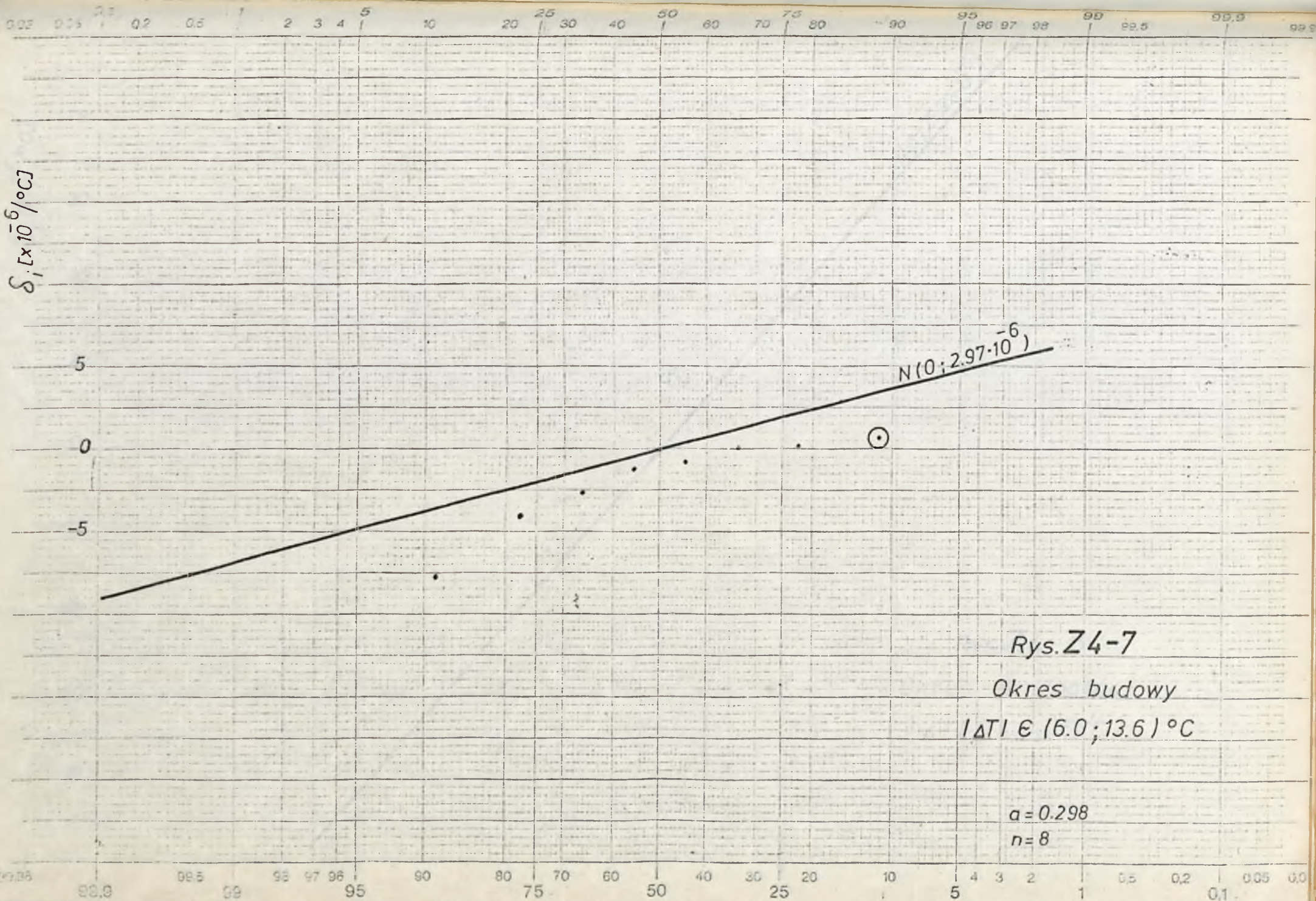
$n = 11$

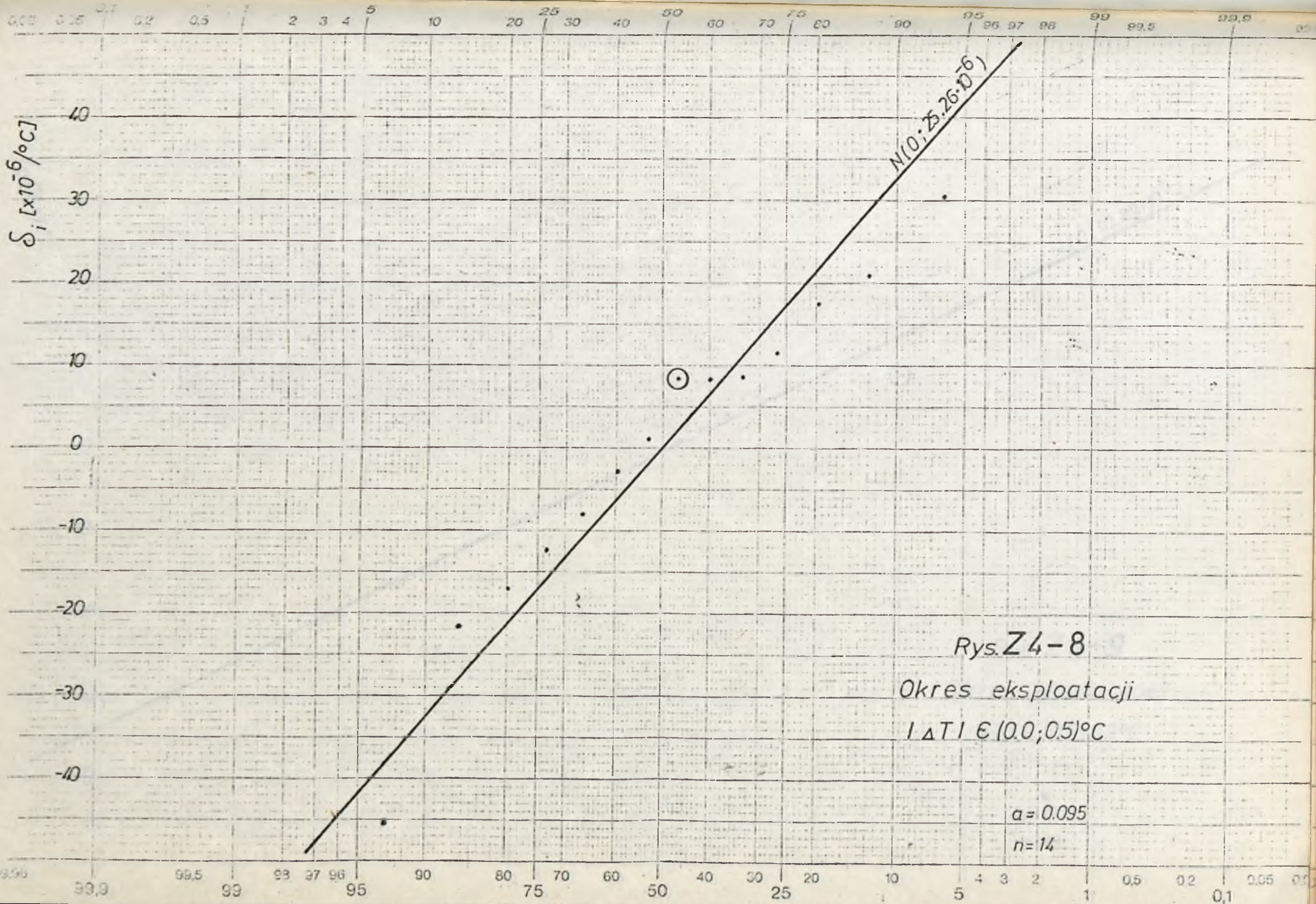


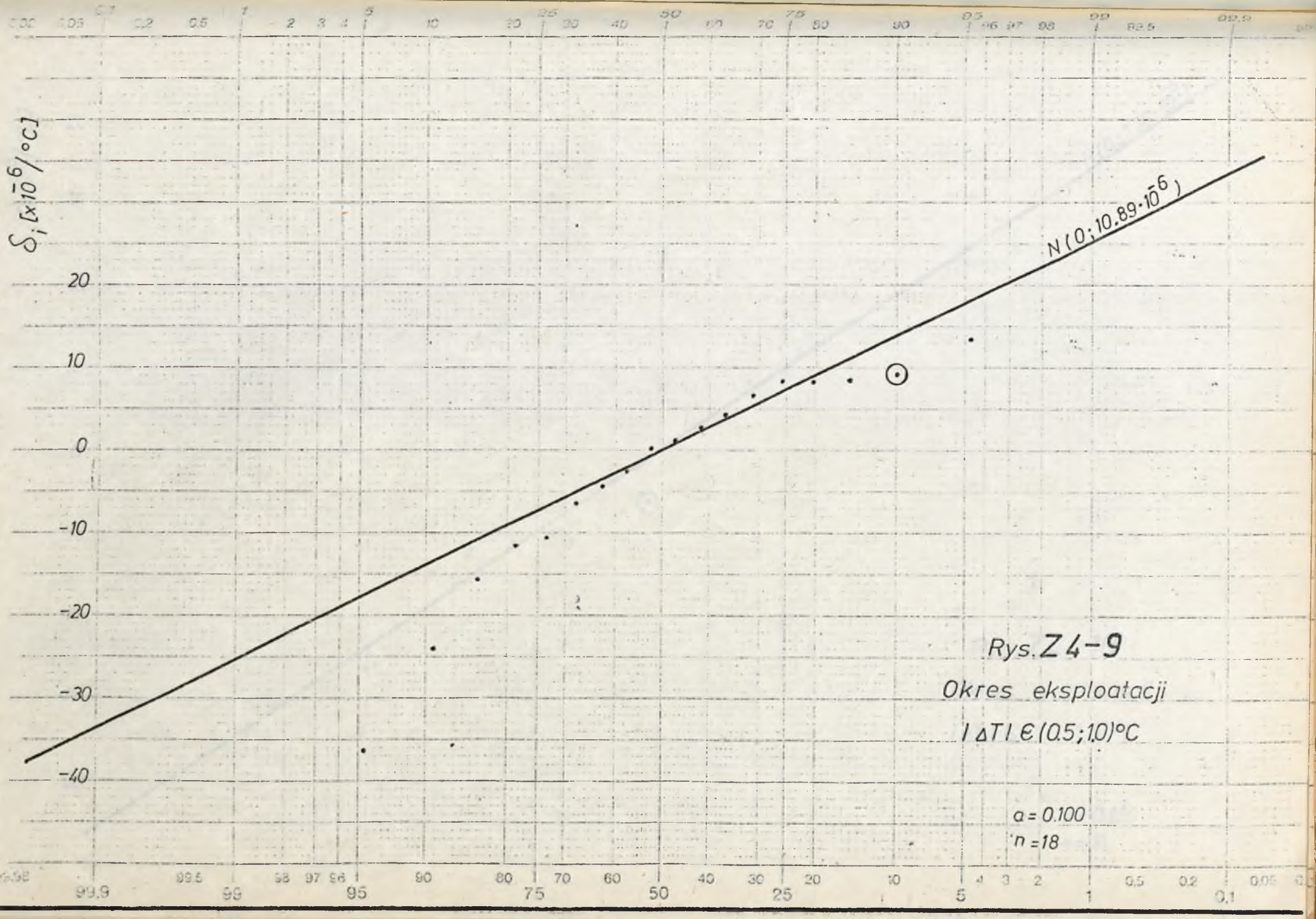
Rys. Z4-6

Okres budowy

$|\Delta T| \in (4.0; 6.0)\,°C$


δ; [x 10⁻⁶/°C]
5
0
-5
N(0; 2.97·10⁻⁶)
Rys. Z4-7
Okres budowy
|ΔT| ∈ (6.0; 13.6) °C
a = 0.298
n = 8
95
75
50
25
5
1
0.1

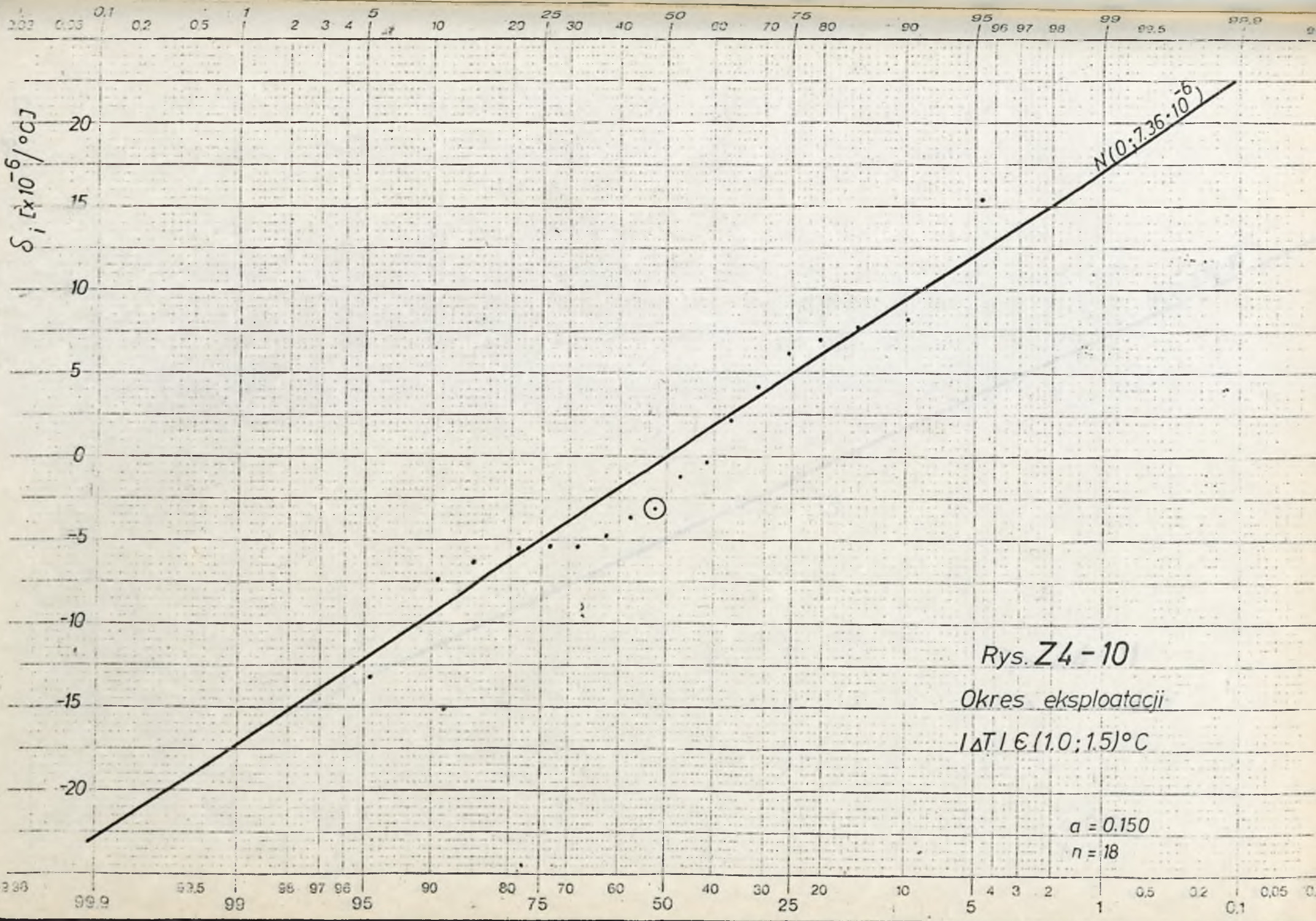

δ_i [x10^{-6}/°C]
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
N(0; 2,26·10^{-6})
Rys. Z4-8
Okres eksploatacji
|ΔT| ∈ (0.0; 0.5)°C
a = 0.095
n = 14



Rys. Z4-9

Okres eksploatacji

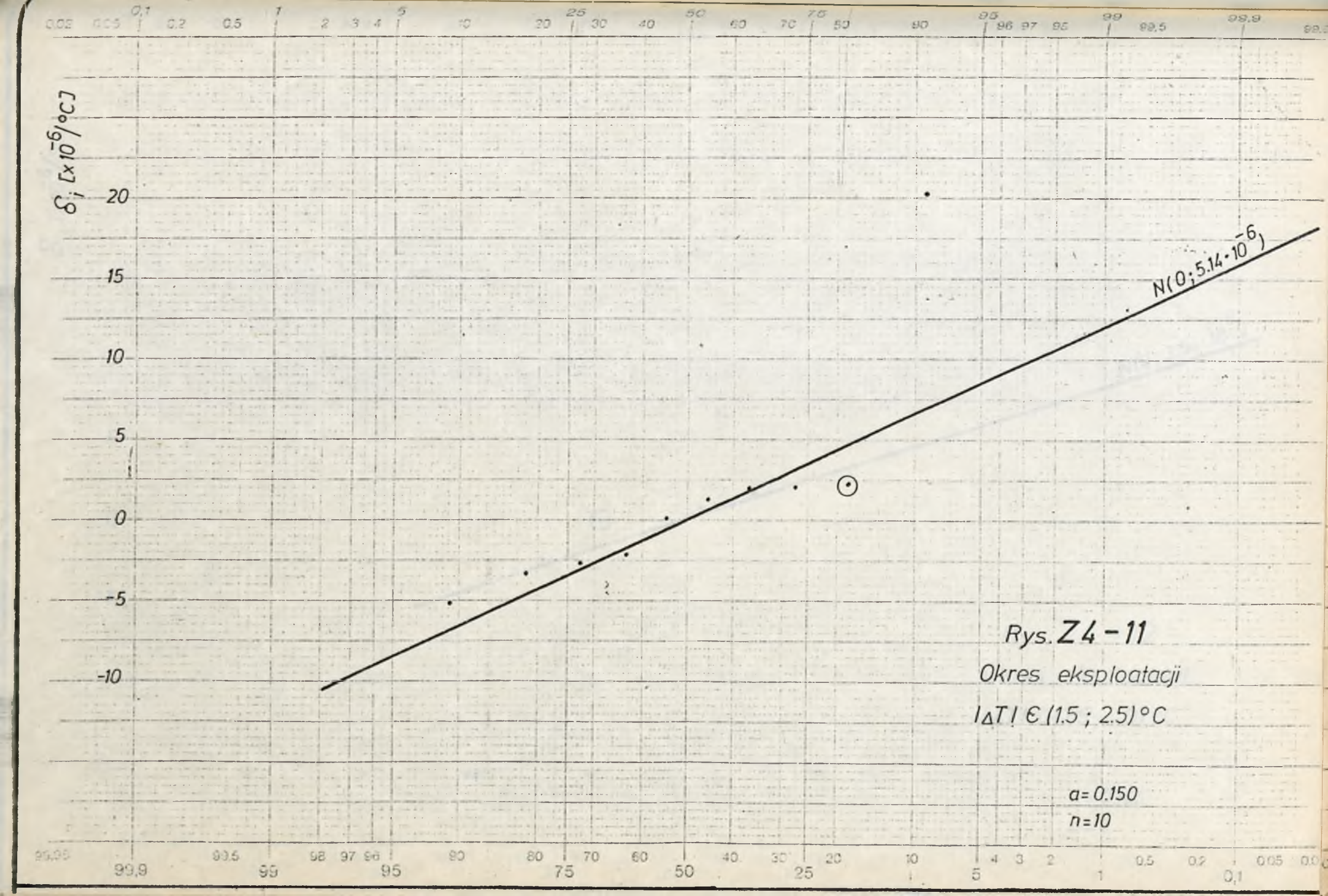
$|\Delta T| \in (0.5; 1.0)$°C



Rys. Z4 - 10

Okres eksploatacji

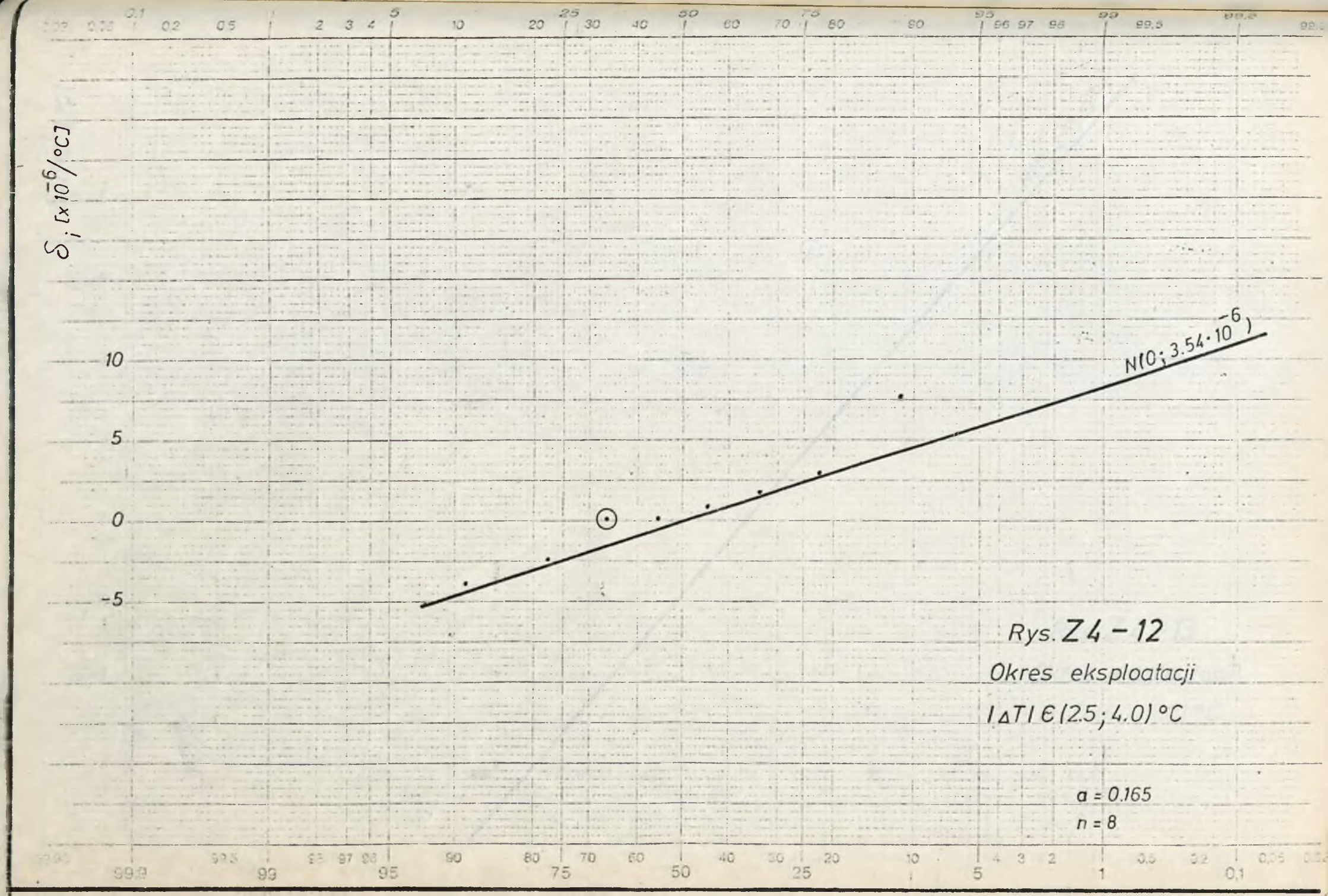
$|\Delta T| \in (1.0;1.5)$°C



Rys. Z4 - 11

Okres eksploatacji

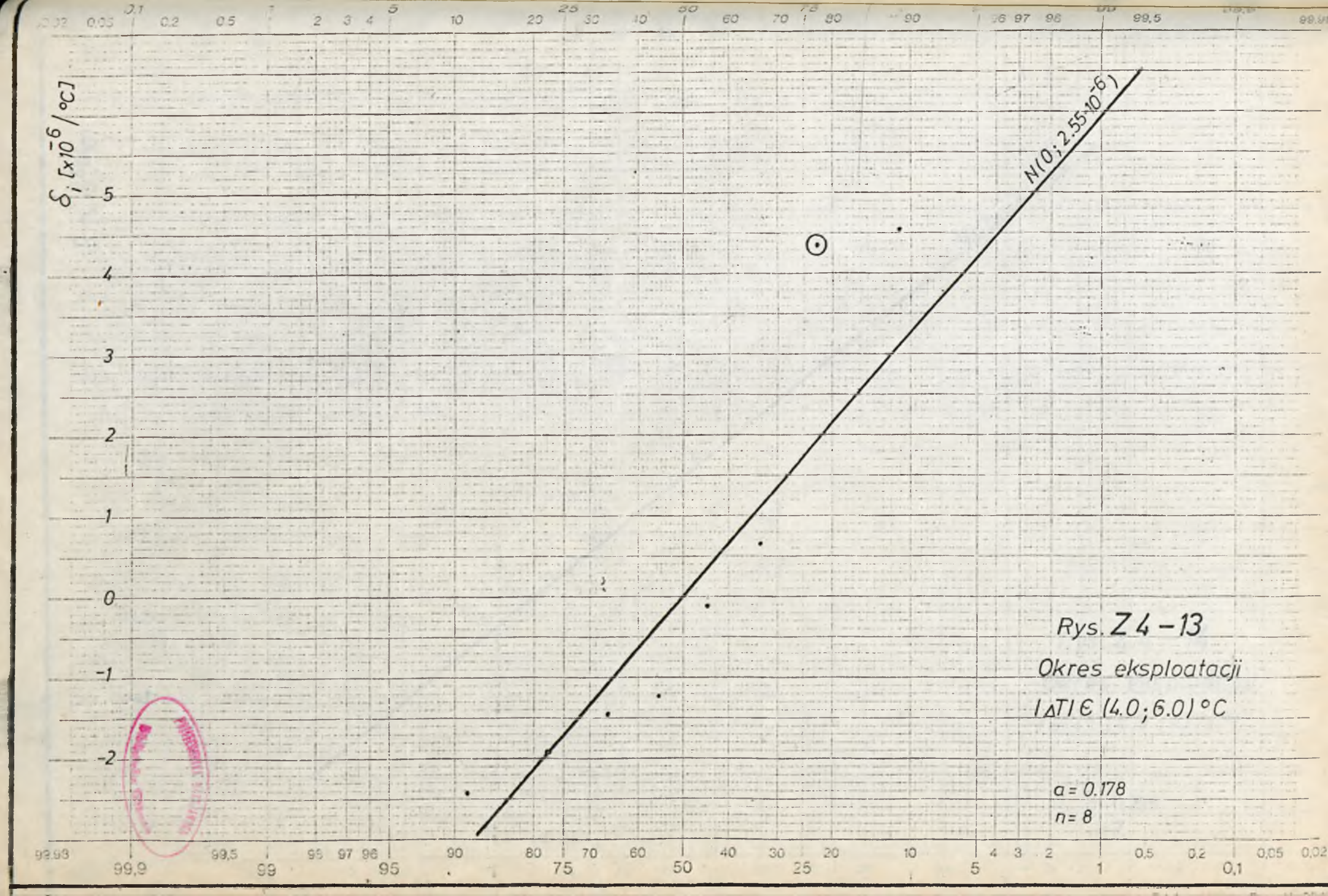
$|\Delta T| \in (1.5 ; 2.5)$ °C

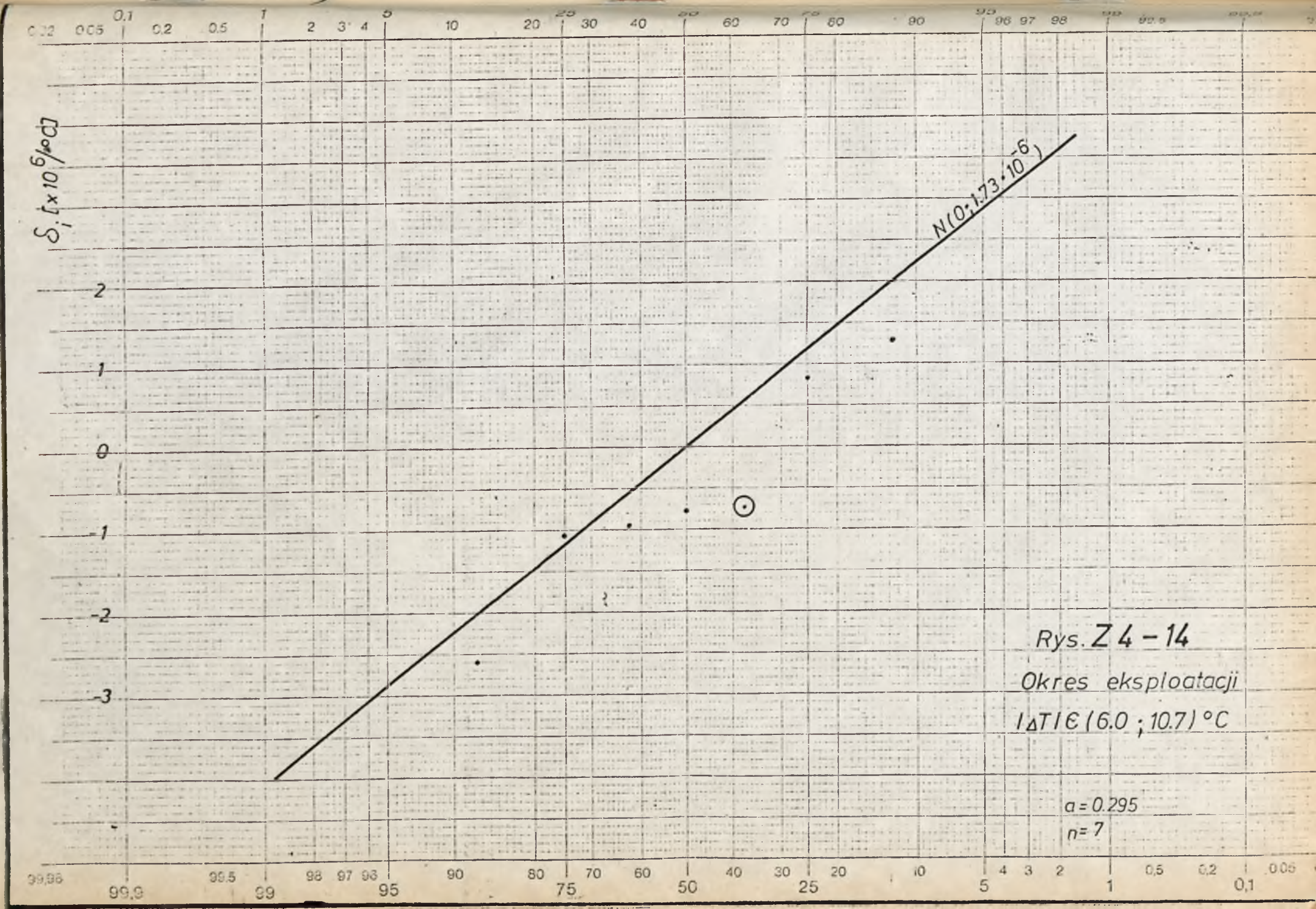


Rys. Z4 – 12

Okres eksploatacji

$|\Delta T| \in (2.5; 4.0)$ °C


δ_i [$\times 10^{-6}$/°C]
5
4
3
2
1
0
-1
-2
N(0; 2.55·10^{-6})
99,9
99
95
75
50
25
5
1
0,1
Rys. Z4 – 13
Okres eksploatacji
|ΔT| ∈ (4.0; 6.0) °C
a = 0.178
n = 8



Rys. Z 4 – 14

Okres eksploatacji

$|\Delta T| \in (6.0 ; 10.7)$ °C

a = 0.295

n = 7

R.
4101