

# Przykład praktycznego skalowania funkcji dojrzalności betonu

## Streszczenie

Artykuł przedstawia metodę praktycznego wyznaczania zależności pomiędzy wytrzymałością betonu i jego dojrzalnością, którą następnie zweryfikowano do szacowania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji poprzez ciągłe rejestrowanie jej temperatury. Zwrócono uwagę na potencjalnie małą wiarygodność szacowania wytrzymałości w początkowej fazie dojrzewania betonu na podstawie wyznaczonej w badaniach wstępnych krzywej korelacji.

## Słowa kluczowe:

beton, dojrzalność betonu, badania betonu

## Abstract

The article presents a method of practical determination of the relationship between the strength of concrete and its maturity, which was then verified to estimate the current strength of concrete in the structure by continuously recording its temperature. Attention was drawn to the potentially low reliability of estimating the strength in the initial stage of concrete maturation on the basis of the correlation curve determined in the preliminary tests.

## Keywords:

concrete, concrete maturity, concrete testing

Bardzo wygodnym, coraz częściej stosowanym narzędziem do śledzenia narastania wytrzymałości betonu w wykonanej konstrukcji jest metoda wykorzystująca funkcję dojrzalności, czyli zależność pomiędzy wytrzymałością betonu a jego dojrzalnością [1 ÷ 6]. Opiera się ona generalnie na założeniu, że dany beton o takiej samej dojrzalności posiada taką samą wytrzymałość, niezależnie od swojej historii temperaturowej od momentu wbudowania w konstrukcję. Istotne jest, że zależność wytrzymałość/dojrzalność jest dla każdego betonu (receptury) inna. Zależy przede wszystkim od charakterystyki zastosowanego w recepturze cementu (rodzaj – w tym ilość i rodzaj składników głównych, klasa wytrzymałości, czas początku i końca wiązania oraz ich zależność od temperatury, ciepło hydratacji itp.), a także użytych domieszek, które mogą mieć wpływ na przyspieszenie bądź opóźnienie procesów wiązania i twardnienia, czy też zmianę wskaźnika w/c mieszanki betonowej.

Aby można było zatem taką zależność stosować w praktyce, konieczne jest wcześniejsze wyskalowanie metody w ramach badań wstępnych betonu. Najczęściej badania te zmierzają do wyliczenia wskaźnika temperaturowo-czasowego (wskaźnika dojrzalności)  $M$  lub równoważnego wieku betonu  $t_e$

(wzory (1) i (2)). One z kolei służą do wyliczenia aktualnej wytrzymałości dojrzewającego betonu [np. 4]. Funkcja odzwierciedlająca charakterystykę temperaturowo-czasową po czasie dojrzewania betonu  $t$ , znana jako funkcja dojrzalności Nursego-Saula, może być przedstawiona w następującej postaci [4, 5]:

$$M = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

$M$  – wskaźnik temperaturowo-czasowy betonu (dojrzalność betonu) [°C·h lub °C·dni]

$T_c$  – średnia temperatura betonu w danym przedziale czasu [°C]

$T_0$  – temperatura odniesienia bazowa (zwykle przyjmowana jako 0°C lub -10 °C) [°C]

$\Delta t$  – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni].

Drugim sposobem wyrażenia aktualnej dojrzalności betonu jest funkcja ustalająca równoważny wiek betonu [5]:

$$t_e = \sum_0^t \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (2)$$

gdzie:

$t_e$  – równoważny wiek betonu w określonej temperaturze odniesienia (najczęściej przyjmuje się +20°C) [h lub dni]

$E$  – energia aktywacji wyznaczana laboratoryjnie [J/mol]

$R$  – uniwersalna stała gazowa ( $R=8,314$  [J/mol·K])

$T$  – średnia absolutna temperatura betonu w danym przedziale czasu  $\Delta t$  [K]

$T_R$  – absolutna temperatura odniesienia (zwykle przyjmuje się 293 [K], czyli warunki laboratoryjne) [K]

$\Delta t$  – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni].

W przykładzie skalowania metody wybrano beton klasy C35/45, w którym jako spoiwo zastosowano cement hutniczy CEM III/A 42,5N LH, a domieszką jest superplastyfikator polikarboksyłanowy.

Od lewej:

Rys. 1. Betonowanie płyty fundamentowej

Rys. 2. Płyta fundamentowa z przygotowaną instalacją do monitorowania temperatury dojrzewającego betonu



fol. Archiwum Styrobud

W ramach badań wstępnych przeprowadzonych w skali laboratoryjnej dla betonu dojrzewającego w trzech różnych temperaturach (5°C, 20°C i 35°C), wszystkie zgromadzone wyniki posłużyły do wyznaczenia zależności wytrzymałość/(wskaźnik temperaturowo-czasowy) oraz wytrzymałość/(równoważny wiek betonu). Weryfikację metody przeprowadzono w warunkach budowy (rys. 1 i 2) przy realizacji płyty fundamentowej, natomiast beton według tej receptury będzie stosowany również dla innych elementów konstrukcyjnych o różnych gabarytach i realizowanych w różnych porach roku. Będzie zatem możliwe szacowanie aktualnej wytrzymałości betonu dojrzewającego w konstrukcji, co pozwoli na podejmowanie istotnych z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa, jak i ekonomii, decyzji o demontażu deskowania lub podpór tymczasowych, czy też obciążania wykonanych części obiektu.

Przeprowadzając skalowanie metody, na etapie badań wstępnych przyjęto warunki dojrzewania analogicznie do wskazanych w normie ASTM 1074-98 [5] oraz modyfikacji tej procedury zaproponowanej przez Jonassona i Reteliusa [6]. Podstawową ideą doboru warunków dojrzewania jest fakt, że nie można skalowania metody oprzeć wyłącznie na normowych laboratoryjnych warunkach dojrzewania, czyli wyłącznie w temperaturze 20°C. Wynika to z różnych „zakłóceń”, zarówno przy niższych, jak i przy wyższych temperaturach, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania betonu. Przyjęto ostatecznie badanie 3 serii próbek dojrzewających w temperaturze 5°C, 20°C i 35°C, a uzyskane wyniki badania wytrzymałości, zarówno w obniżonej, jak i podwyższonej temperaturze dojrzewania, pozwalają na korektę ostatecznego przebiegu wyznaczonej linii trendu wytrzymałość/dojrzalskość. Analiza, zwłaszcza wczesnych wytrzymałości, pozwala też na zwrócenie uwagi, czy wpływ tych zakłóceń może być groźny dla bezpieczeństwa konstrukcji.

Jako terminy badania wytrzymałości przyjęto okresy 1, 2, 3, 7, 14, 21 i 28 dni dojrzewania, przy jednoczesnej rejestracji temperatury w dwóch próbkach każdej serii.

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości betonu każdej z serii zestawiono w tab. 1, 2 i 3 w odniesieniu do wyliczonych wartości wskaźnika dojrzalskości  $M$  oraz czasu równoważnego  $t_{eq}$ . Do obliczenia wskaźnika dojrzalskości betonu  $M$  wykorzystano wzór (1), gdzie przyjęto temperaturę odniesienia bazową równą -10°C. Z kolei do ustalenia równoważnego wieku betonu zastosowano zmodyfikowaną procedurę wskazaną w pracy Jonassona i Reteliusa [6], stosując wzór:

$$t_{eq} = \sum_{t=0}^t \beta_t \cdot \Delta t \quad (3)$$

w którym:

$$\beta_t = \frac{T - T_0}{T_{ref} - T_0} \quad (4)$$

gdzie:

$t_{eq}$  – temperaturowy wskaźnik czasu dojrzewania [h lub dni]

$T$  – średnia temperatura betonu w danym przedziale czasu [°C]

$T_0$  – temperatura odniesienia (jako bazowa – przyjęto -10°C) [°C]

$T_{ref}$  – wybrana temperatura odniesienia dla wieku betonu (przyjęto 20°C) [°C]

Tablica 1. Zestawienie wskaźnika dojrzalskości betonu  $M$  oraz równoważnika czasu dojrzewania  $t_{eq}$  z jego wytrzymałością na ściskanie w danym dniu dla temperatury 5°C

Wiek betonu [dni]	Wskaźnik dojrzalskości betonu $M$ (5°C) [°C · dni]	Czas równoważny $t_{eq}$ (5°C) [h]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	15,7	12,56	0,5
2	30,4	24,32	7,3
3	46,2	36,96	9,6
7	107,8	86,24	15,6
14	218,4	174,72	19,6
21	327,6	262,08	24,5
28	431,2	344,96	29,2

Tablica 2. Zestawienie wskaźnika dojrzalskości betonu  $M$  oraz równoważnika czasu dojrzewania  $t_{eq}$  z jego wytrzymałością na ściskanie w danym dniu dla temperatury 20°C

Wiek betonu [dni]	Wskaźnik dojrzalskości betonu $M$ (20°C) [°C · dni]	Czas równoważny $t_{eq}$ (20°C) [h]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	34,6	27,68	5,8
2	62,2	49,76	12,4
3	96,3	77,04	15,6
7	221,2	176,96	24,7
14	436,8	349,44	35,3
21	638,4	510,72	41,3
28	831,6	665,28	47,6

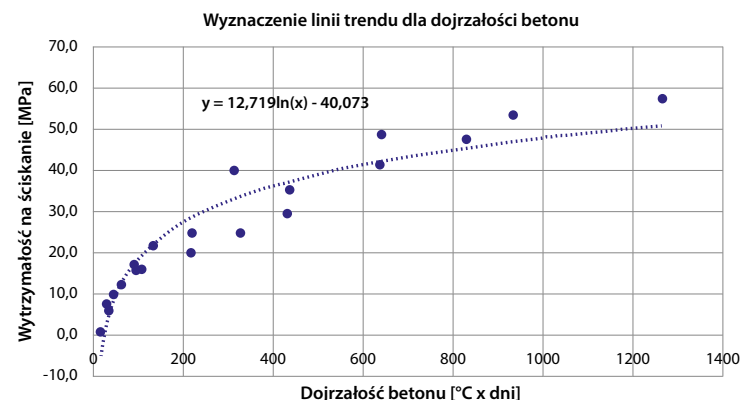
Tablica 3. Zestawienie wskaźnika dojrzalskości betonu  $M$  oraz równoważnika czasu dojrzewania  $t_{eq}$  z jego wytrzymałością na ściskanie w danym dniu dla temperatury 35°C

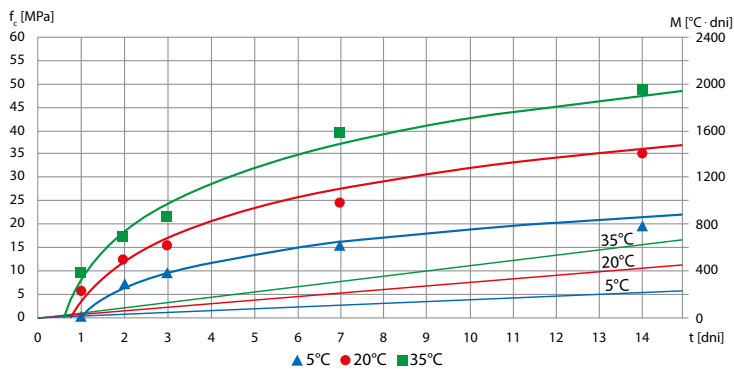
Wiek betonu [dni]	Wskaźnik dojrzalskości betonu $M$ (35°C) [°C · dni]	Czas równoważny $t_{eq}$ (35°C) [h]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	45,9	36,72	9,5
2	92,4	73,68	17,2
3	134,7	107,76	21,4
7	315,7	252,56	39,7
14	642,6	495,04	48,7
21	936,6	749,28	53,2
28	1268,4	1014,72	57,1

$\Delta t$  – przedział czasowy pomiaru temperatury [h lub dni].

Końcowym efektem skalowania metody jest dopasowanie linii trendu dla uzyskanych wyników badań i wyliczeń. Na rys. 3 przedstawiona jest zależność wytrzymałości od wskaźnika dojrzalskości  $M$ , którą wyznaczono wykorzystując wszystkie wyniki uzyskane w trzech badanych seriach betonu. Jej postać analityczna to  $f_{cc} = 12,719 \ln(M) - 40,073$  (analogicznie, stosując wyliczone wartości równoważnego czasu dojrzewania  $t_{eq}$ , otrzymujemy:  $f_{cc} = 12,856 \ln(t_{eq}) - 37,81$ ). Używanie tych formuł do szacowania aktualnej wytrzymałości beto-

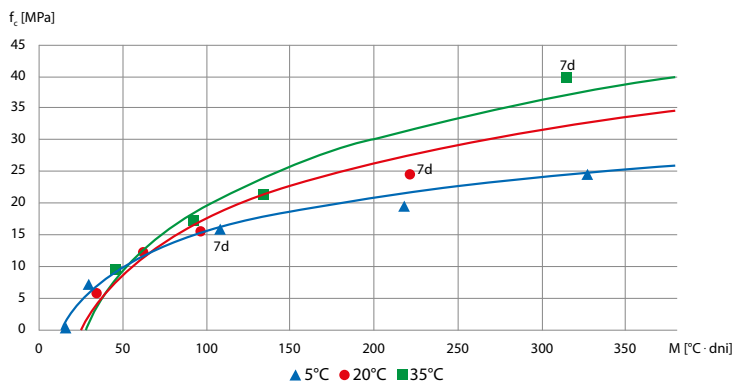
Rys. 3. Zależność wytrzymałości oraz wskaźnika dojrzalskości  $M$  ustalona przy uwzględnieniu wszystkich wyników badania próbek dojrzewających w temperaturach 5°C, 20°C oraz 35°C





Rys. 4. Różnice w narastaniu wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania odniesione do wskaźnika dojrzałości  $M$

Rys. 5. Widoczne istotne „zakłócenia” relacji wytrzymałość/dojrzałość przy różnych temperaturach we wczesnym okresie dojrzewania

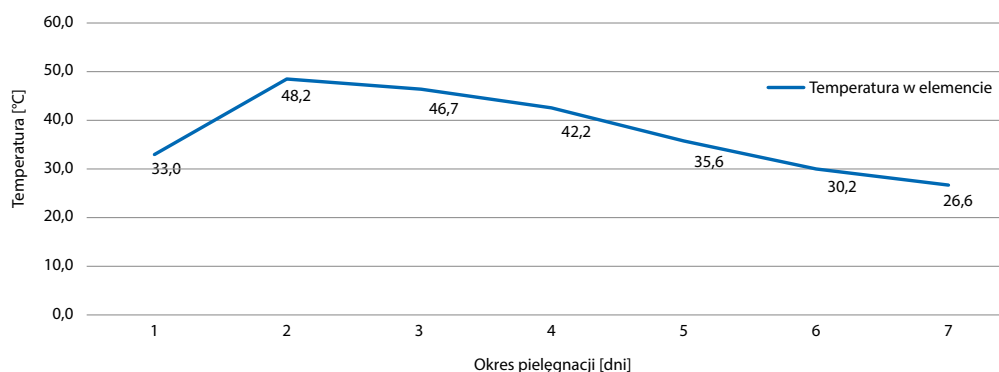


nu w rzeczywistych warunkach temperaturowych jego dojrzewania wymaga zachowania dość dużej ostrożności, zwłaszcza w przypadku wczesnych wytrzymałości przy obniżonych temperaturach. Mają na to zwrócić uwagę właśnie wyniki badań laboratoryjnych próbek dojrzewających w temperaturze 5°C.

W analizowanym przypadku, szczególnie dlatego, że beton wykonano z udziałem cementu CEM III/A 42,5N, bardzo wyraziste jest opóźnienie narastania wytrzymałości wraz z obniżeniem temperatury dojrzewania. Istotą problemu przy wyznaczaniu krzywej regresji jest przede wszystkim zbyt mała liczba punktów przy małych wartościach

wskaźnika dojrzałości – czyli tych, które związane są z wolnym lub bardzo wolnym dojrzewaniem w niskich temperaturach. Problem ten zobrazowano na wykresach przedstawionych na rys. 4 i 5. Podczas gdy w efekcie skalowania metody otrzymuje się jedną zależność funkcyjną (rys. 3), to w rzeczywistości, przy różnych temperaturach dojrzewania, postaci tych zależności jednak są różne. Nie jest to tak ważne, kiedy analizuje się te różnice przy wytrzymałościach na poziomie kilkudziesię-

Rys. 6. Wykres temperatury betonu zarejestrowanej w zabetonowanej płycie fundamentowej



ciu procent wytrzymałości końcowej (28-dniowej). Może być natomiast decydujące o bezpieczeństwie robót konstrukcyjnych we wczesnej fazie, zaraz po rozpoczęciu procesu twardnienia betonu. Wyraźnie widoczne na rys. 4 i 5 „zakłócenia” w pierwszych godzinach i dobach dojrzewania występują w czasie, gdy te właśnie informacje są najbardziej pożądane z uwagi na konieczność podejmowania decyzji związanych z kolejnymi krokami realizacji robót (bezpieczne usunięcie deskowania, podpór itp.). Wyznaczone na etapie badań laboratoryjnych relacje wytrzymałość/dojrzałość poddano weryfikacji podczas kontroli narastania wytrzymałości w wykonywanej płycie fundamentowej. W celu sprawdzenia prawidłowości przyjętych założeń „metody funkcji dojrzałości” przygotowano jednocześnie próbki betonowe, które umieszczono i osłonięto bezpośrednio przy zabetonowanym elemencie, a które posłużyły do wykonania badania rzeczywistej wytrzymałości betonu. Zmiany temperatury dojrzewającego betonu w elemencie przedstawiono na wykresie na rys. 6. Z kolei w tab. 4 zestawiono wyniki badań próbek betonowych odniesione do wyliczonego w tym terminie wskaźnika dojrzałości  $M$  i oszacowane wartości wytrzymałości na podstawie ustalonej na etapie badań laboratoryjnych zależności przedstawionej na wykresie na rys. 3.

W analizowanym przykładzie realizacji obiektu, w „rzeczywistych” warunkach dojrzewania, beton w próbkach kontrolnych uzyskał mniejsze wartości wytrzymałości niż te wyliczone na podstawie ustalonej funkcji dojrzałości. Zwrócić jednak należy uwagę na dość wysokie temperatury dojrzewającego betonu w elemencie wywołane samonagrzewaniem od ciepła hydratacji cementu, podczas gdy próbki-świadki na pewno nie osiągnęły aż tak wysokiej temperatury. W tym wypadku nie mierzono temperatury w próbkach-świadkach, a jedynie zawierono powszechnie stosowanej w praktyce zasadzie „podobieństwa” warunków dojrzewania z tymi w wykonanej konstrukcji. Przedstawiony przykład realizacji obiektu w okresie letnich temperatur pokazuje, że w wykonanej konstrukcji jest „lepiej” niż na próbkach kontrolnych. W przypadku jednak zimowych warunków wykonania informacja z badań może być odwrotna, że beton w próbkach jest „lepszy” niż w konstrukcji – a to może zagrażać bezpieczeństwu realizacji obiektu.

Dlatego w sytuacjach, gdzie ważne jest bezpieczeństwo konstrukcji lub bezpieczeństwo realizacji robót, metodę dojrzałości należy wspomagać innym sposobem oznaczenia potencjalnej wytrzymałości danego betonu – taki wymóg zawarto np. w normie ASTM [5], jako minimalizację ryzyka

szacowania rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego. Ta weryfikacja metody może polegać na innym sposobie pomiaru wytrzymałości wbudowanego betonu. Z uwagi na szczególne zagrożenie stosowania metody we wczesnych okresach dojrzewania w warunkach zimowych, można w takim okresie wykorzystywać funkcję dojrzałości wyznaczoną na podstawie badań wstępnych tylko dla temperatury dojrzewania 5°C. Wtedy wyznaczona linia trendu będzie lepiej skorelowana w zakresie początkowego narastania wytrzymałości. Trzeba też koniecznie uwzględnić w analizach opóźnienie wynikające z późniejszego rozpoczęcia procesów wiązania. W przypadku np. betonu z cementem hutniczym z dodatkiem popiołu lotnego to opóźnienie może sięgać nawet kilkunastu godzin.

**dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRZ**  
**Politechnika Rzeszowska**  
**Centrum Technologiczne Budownictwa**  
**Instytut Badań i Certyfikacji**  
**inż. Maciej Bań**  
**Centrum Technologiczne Budownictwa**  
**Instytut Badań i Certyfikacji**

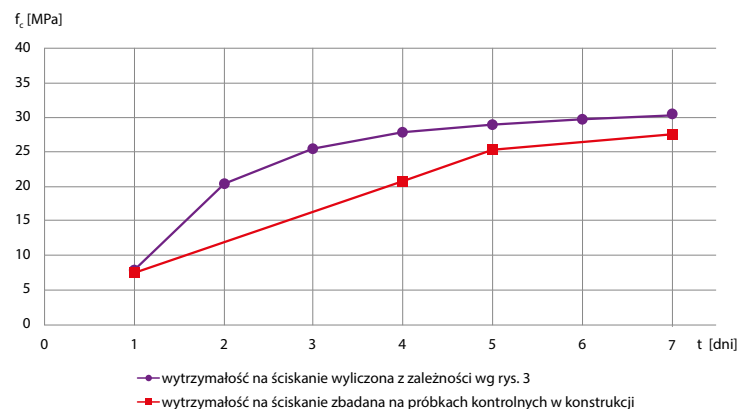
#### Literatura

1. Bajorek G., *Funkcja dojrzałości – narzędzie śledzenia aktualnej wytrzymałości betonu*, *Budownictwo Technologie Architektura*, 2/2016, s.58-61
2. Bajorek G., *Wykorzystanie relacji dojrzałość/wytrzymałość do szacowania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji*, *Inżynieria i Budownictwo*, 10/2016, s. 530-533
3. Bajorek G., *Pielęgnacja betonu w okresie dojrzewania*, *Monografia, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2017*
4. Carino N.J., Lew H.S., *The Maturity Method: from Theory to Application*, *Proceedings of the 2001*

Tablica 4. Zestawienie wyliczonego wskaźnika dojrzałości betonu  $M$ , wyliczonej dla niego wytrzymałości wg zależności na rys. 3 oraz zbadanej wytrzymałości na próbkach świadkach

Wiek betonu [dni]	Wskaźnik dojrzałości betonu $M$ [°C · dni]	Wytrzymałość na ściskanie wyliczona wg zależności na rys. 3 [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie zbadana na próbkach świadkach [MPa]
1	43,0	7,8	7,5
2	116,4	20,4	-
3	170,1	25,3	-
4	208,8	27,9	20,7
5	228,0	29,0	25,3
6	241,2	29,7	-
7	256,2	30,5	27,8

Rys. 7. Wykres wytrzymałości otrzymanej z wyliczeń z zależności na rys. 3 oraz zbadanej wytrzymałości na próbkach świadkach



*Structures Congress & Exposition, May 21-23, Washington 2001*

5. ASTM C 1074-98 *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*
6. Jonasson J.E., Retelius A., *Zastosowanie metody wskaźnika dojrzałości do oceny rozwoju wytrzymałości betonu na ściskanie*, *Drogi i Mosty 3/2011*



# CENTRUM TECHNOLOGICZNE BUDOWNICTWA INSTYTUT BADAŃ I CERTYFIKACJI

**Akredytowane laboratorium badawcze - AB 535**  
**Jednostka notyfikowana - NB 2039**  
**Jednostka certyfikująca wyroby - AC 205**

ul. Przemysłowa 23  
 35-105 Rzeszów

+48 17 864 04 50

ctb@ctb-ibc.pl

[www.ctb-ibc.pl](http://www.ctb-ibc.pl)

#### Oferta:

certyfikacja zakładowej kontroli produkcji betonu towarowego  
 badania wstępne betonu towarowego  
 kompleksowa obsługa laboratoryjna producenta betonu towarowego  
 kompleksowa obsługa laboratoryjna producenta kruszyw  
 badania typu wyrobów budowlanych, w tym liniowych elementów odwodnień  
 obsługa laboratoryjna wykonawcy robót i nadzoru  
 ekspertyzy i opinie budowlane  
 szkolenia otwarte w zakresie budownictwa