

## Podsumowanie

Podatne konstrukcje walcowych nieuzbrojonych płaszczy płaskodennych silosów w wielu przypadkach mogą przyczynić się do ułatwienia opróżniania silosów, w których składowana jest biomasa o niezbyt dużej wilgotności. Zastosowanie wiotkich, tkaninowych płaszczy w silosach na materiały trudno sypliwie (w tym biomase) może być od dawna poszukiwanym rozwiązaniem licznych problemów eksploatacyjnych, polegających na przesklepianiu się materiałów składowanych w tradycyjnych silosach oraz na poważnych trudnościach w ich rozładunku, często skutkujących poważnymi awariami

tych konstrukcji. Szerokie zastosowanie wiotkich płaszczy wymaga jeszcze wielu badań. Celowe byłoby wykorzystanie nowoczesnych metod badań (optoelektronicznych, tomografii pojemnościowej i innych [4 ÷ 6]) zachowania się sypliwego ośrodka w wiotkich płaszczy silosów do oceny skuteczności proponowanych rozwiązań.

## Literatura

- [1] Hotała E., Aniszczak A.: Prototypowa konstrukcja silosu o wiotkim płaszczy do składowania biomasy. *Materiały Budowlane*. 2013, nr 5, s. 52 – 54.
- [2] Hotała E., Pawłowski K.: Badania stalowych silosów do składowania biomasy. *Przegląd Budowlany*. 2012, nr 5, s. 14 – 18.

[3] Pawłowski K.: Obciążenia stożkowych lejów i cylindrycznych płaszczy silosów z blachy falistej od składowanego zboża, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Praca doktorska, Raport serii PRE 07/2013, Wrocław 2013.

[4] Buick J. M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z., Ooi J. Y., Pankaj D. M., Cambel D. M., Geated C. A.: Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2005, 131 (3), 299 – 307.

[5] Niedostatkiwicz M., Tejchman J.: Nowe bezinwazyjne metody pomiarowe zmian porowatości w materiałach sypkich. *Przegląd Budowlany* 5/2007, s. 28 – 31.

[6] Niedostatkiwicz M.: Opis mechanizmu powstawania lokalizacji odkształceń wewnątrz materiału sypkiego podczas opróżniania silosu na podstawie pomiarów metodą PIV (Particle Image Velocimetry), *Acta Agrophysica*, 2010, 16 (2), 377 – 390.

Prof. Dr.-Ing. habil. Piotr Noakowski\*

Dipl.-Ing. Andreas Harling\*

Msc Bartosz Michalak\*

# Szczelność płyty fundamentowej pod maszynownią

## Zasady właściwego wymiarowania

*Tightness of a foundation slab under an engine house, rules of the correct dimensioning*

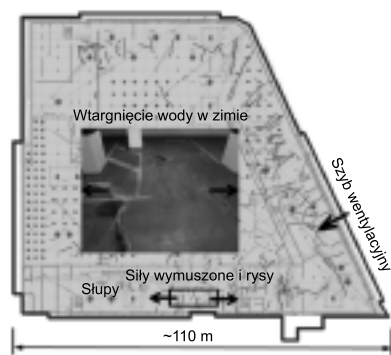
**Streszczenie.** Przedmiotem pracy jest analiza rozległej płyty fundamentowej, która stanowi spód podpiwniczenia maszynowni energetycznej. Płyta ta wbrew wymogom nie stanowi zapory dla parcia wody gruntowej. Powodem awarii jest jej niedostateczne zbrojenie wynikające z błędnego wymiarowania. W pracy pokazano, na czym ten błąd polega i jak ma wyglądać właściwe wymiarowanie płyty.

**Słowa kluczowe:** płyty fundamentowe, biała wanna, szerokość rys, nieliniowe obliczenia.

**Abstract.** The subject of the paper is analysis of a large foundation slab which makes up the bottom of the engine house basement. Against the rules, the slab did not constitute a barrier to the pressure of the ground water. The damage cause was insufficient reinforcement resulting from a poor structural design of the slab. The paper explains the committed mistakes and shows how the correct slab design should be carried out.

**Keywords:** foundation slabs, white tank, crack width, non/linear computations.

Na obrzeżach rozległej płyty fundamentowej (rysunki 1, 2), należącej do białej wanny pod blokiem energetycznym, wystąpiły liczne rysy z przeciekami wody gruntowej. Awaria jest wynikiem wyężenia niedostatecznie zbrojonej płyty parciem wody gruntowej oraz siłami wymuszonymi wzbudzonymi zimnym powietrzem z bocznych szybów wentylacyjnych. Podstawowe właściwości płyty i główne oddziaływania na nią są następujące:

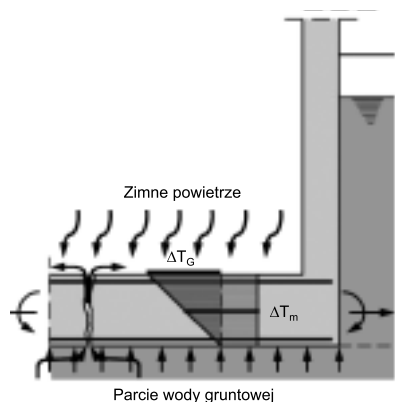


Rys. 1. Płyta fundamentowa – wzbudzenie naprężeń rozciągających wskutek ochłodzenia; powstawanie rys w czasie mroźnych zim oraz wtargnięcie prącej wody w okresach zimowych w otwarte rysy

- materiały: beton C 30/37 WU, stal S 500;
- wymiary: grubość  $h = 1,0$  m;
- zbrojenie: średnica  $d_s = 20$  mm; rozstaw  $s = 12$  cm, otulina  $c = 4,5$  cm;
- powłoka: system OS-8;
- parcie wody: wartość efektywna  $p = 40$  kN/m<sup>2</sup>;
- skurcz betonu: równomierny rozkład  $\epsilon = -0,05\text{‰}$  (-5 K);
- temperatura: różnica  $\Delta T_G = +5$  K do -10 K, spadek  $\Delta T_m = -5 + \Delta T_G/2$ .

W dalszych analizach płyty wykorzystano własne metody nieliniowej statyki konstrukcji żelbetowych [5 – 8], które weszły do norm [1 – 3] i znalazły zastosowanie przy rozwiązywaniu trud-

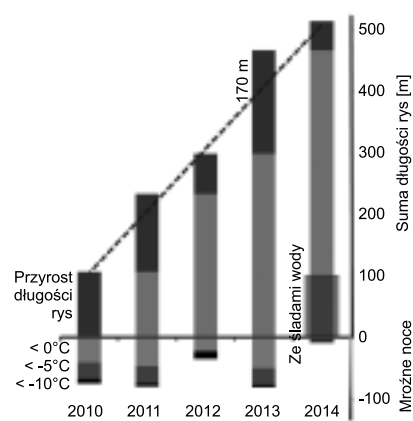
\* Technische Universität Dortmund; Exponent Industrial Structures, Düsseldorf



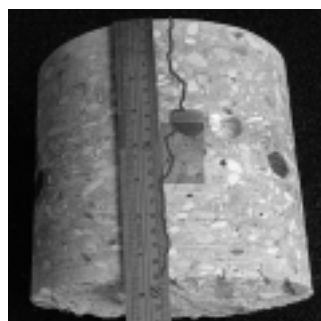
**Rys. 2. Oddziaływania na płytę – parcie wody gruntowej i ochłodzenie płyty w zimie; wzbudzenie sił przekrojowych M i N w utwardzonej płycie; rozciąganie i zarysowanie płyty; wtargnięcie wody gruntowej w zimie w wyniku szerokich rys**

nych problemów praktycznych, omawianych w [9 – 12].  
**Rysy** występują przede wszystkim na obrzeżach płyty z racji jej chłodzenia przez zimne powietrza z zewnątrz i jednoczesnego hamowania skurczów termicznych przez wysoko obciążone słupy. Długość tych rys (rysunek 3) wykazuje następujące prawidłowości:

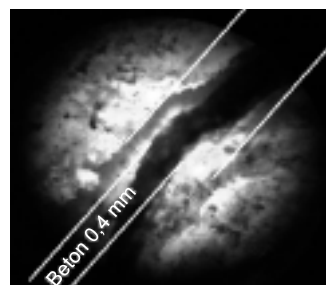
- aktualna suma długości: 500 m;
- aktualna długość z przeciekami: 100 m;



**Rys. 3. Rozwój zarysowania płyty**



Widok i właściwości rys



Szerokość rys w betonie i w powłoce

- średni roczny przyrost: 100 m;
- maksymalny przyrost w 2013 r.: 170 m;
- zależność przyrostu od mroźnych dni: 70 dni w 2013 r.

**Właściwości rys** widoczne na odwiertach i zdjęciach mikroskopowych (fotografia) są następujące:

- rozłupane kruszywo → powstanie rys w stwardniałym betonie;
- normalne rysy w betonie < 0,4 mm → nieprzekroczenie granicy elastyczności;
- szerokie rysy w powłoce > 0,4 mm → odspojenie i wykruszenie brzegów powłoki;
- wypełnienie niektórych rys → lokalne „uzdrowienie” przez odkładanie się pyłów.

### Wyteżenie płyty

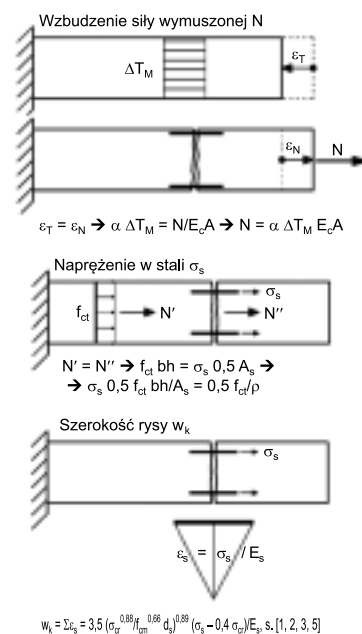
Wyteżenie płyty powstaje w wyniku hamowania jej termicznych skrótów przez wysoko obciążone słupy, pale i ściany kanałów (rysunek 4). Te wirtualne skręty wynikają ze skurczu betonu oraz chłodzenia doprowadzanym z zewnątrz zimnym powietrzem. Tak wzbudzone wyteżenie płyty i jej wartości pochodne są ustalane w sposób następujący:

- siła wymuszona N – przyrównanie odkształceń termicznych z odkształceniami z sił;
- naprężenie w stali  $\sigma_s$  – zgodność sił rozciągających w stanie I i w stanie II;
- szerokość rysy  $w_k$  – suma odkształceń stali na odcinku zakłóceń rysoprzyległych.

W celu ograniczenia szerokości rys opracowano metodę [5], która stała się częścią składową norm [1, 2, 3]:

$$w_k = 3,5 (\sigma_{cr}^{0,88} / f_{cm}^{0,66} d_s)^{0,89} (\sigma_s - 0,4 \sigma_{cr}) / E_s$$

W wypadku rys pierwszych, gdy aktualne naprężenie w stali jest równe naprężeniu po zarysowaniu betonu  $\sigma_s = \sigma_{cr}$ , wzór ten ulega uproszczeniu:



**Rys. 4. Zasada wyteżenia płyty: siła wymuszona N – przyrównanie odkształceń termicznych z odkształceniami z sił; naprężenie w stali  $\sigma_s$  – zgodność sił rozciągających w stanie I i w stanie II; szerokość rysy  $w_k$  – suma odkształceń stali na odcinku zakłóceń rysoprzyległych**

$w_k = 2,1 (\sigma_{cr}^{2,00} / f_{cm}^{0,66} \delta_c)^{0,89} / E_s$  (szerokość rysy zależy od kwadratu naprężenia w stali);

$$\sigma_{cr} = M_{cr} / W^I = f_{ct} W^I / W^I \approx f_{ct} h^2 / 6 / (A_s 0,8 h) = 0,21 f_{ct} / \rho$$

naprężenie w stali po zarysowaniu;

$M_{cr} = f_{ct} W^I$  [MNm], moment rysujący;

$f_{ct} = 0,35 (0,85 - 0,2 h) (2,6 + 24 h) / (1,0 + 40 h) f_{cm}^{2/3}$ , wytrzymałość na rozciąganie;

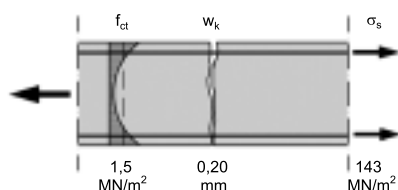
$$f_{cm} = f_c + 8 \text{ [MN/m}^2\text{]; } h \text{ [m]; } \rho = A_s / A_c, d_s \text{ [mm], } E_s = 210 \text{ 000 [MN/m}^2\text{].}$$

Właściwy dobór zbrojenia w płytach poddanych siłom wymuszonym wynika ze spełnienia następujących kryteriów:

- ograniczenie naprężenia stali  $\sigma_s < f_y$  w celu uniknięcia plastycznych odkształceń stali;
- ograniczenie szerokości rys  $w_k < 0,2$  mm, aby zapobiec wtargnięciu wody.

### Błędne wymiarowanie płyty

Błąd w projektowaniu płyty (rysunek 5) polegał na założeniu, że siły wymuszone prowadzące do zarysowania betonu odpowiadają wczesnemu stadium jego twardnienia. W tym stadium utraty ciepła hydratacyjnego siły te są niewielkie z racji niskiej jeszcze wytrzyma-



Rys. 5. Błędne wymiarowanie: założenie zarysowania wskutek utraty ciepła hydratacyjnego w młodym betonie; przyjęcie wysokich naprężeń własnych zaniżających efektywną wytrzymałość na rozciąganie  $f_{ct}$ ; założenie czystego rozciągania przy pominięciu zginania z parcia wody i różnicy temperatury; złudzenie niskiego naprężenia stali  $\sigma_s$  w rysie po zarysowaniu betonu; niedoceniecie szerokości rysy  $w_k$

małości na rozciąganie. To niedoceniecie wyężenia płyty doprowadziło do jej zbyt słabego zbrojenia i w rezultacie do wysokich naprężeń i szerokich rys przepuszczających wodę.

W sumie wymiarowanie rozważanej płyty obarczone jest następującymi błędami:

- założenie czystego rozciągania przy pominięciu parcia wody i różnicy temperatury;
- założenie zarysowania wskutek utraty ciepła hydratacyjnego w młodym betonie;
- przyjęcie naprężeń własnych zaniżających efektywną wytrzymałość na rozciąganie  $f_{ct}$ .

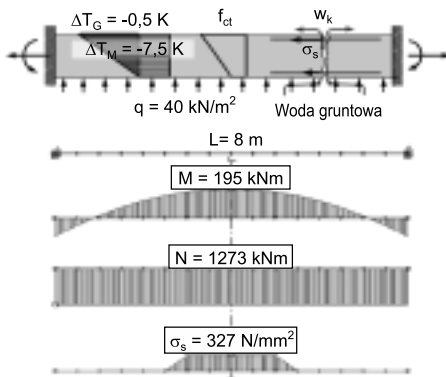
Błędy te spowodowały zaniżenie sił wymuszonych i dlatego, przy zastosowaniu metody [4], zachowanie płyty zostało niedocenione:

- niskie naprężenie w stali  $\sigma_s = 143 \text{ MN/m}^2$  przez przyjęcie wczesnego zarysowania;
- mała szerokość rys  $w_k = 0,20 \text{ mm}$  wskutek zaniżonego naprężenia w stali.

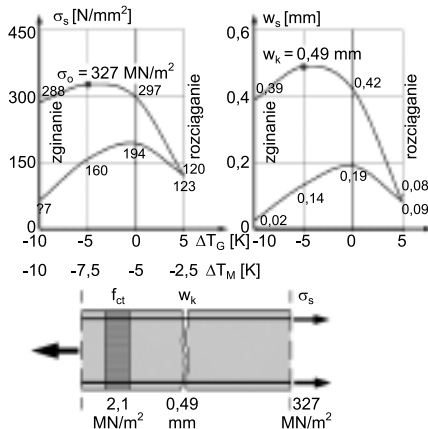
### Właściwa analiza płyty

Prawdziwe zachowanie się płyty zostało ustalone za pomocą systemu statycznego uwzględniającego jej wymiary, zbrojenie i obciążenia (rysunki 6 i 7). W systemie ujęto również spadek sztywności w wyniku zarysowania [5 – 8]. W ten sposób uwzględniono redukcję sił wymuszonych i redystrybucję momentów od parcia wody. Tego rodzaju zaawansowana analiza płyty odznacza się następującymi aspektami:

- odwzorowanie jako belka utwierdzona poddana parciu wody  $q$  i temperaturze  $\Delta T_G$  i  $\Delta T_M$ ;



Rys. 6. Właściwe wymiarowanie: odwzorowanie płyty jako belki utwierdzonej poddanej parciu wody  $q$  i temperaturze  $\Delta T_G$  i  $\Delta T_M$ ; uwzględnienie pełnej wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ct}$  i właściwości zbrojenia  $\rho$ ,  $c$ ; nieliniowe ustalenie sił wewnętrznych  $M$  i  $N$  z uwzględnieniem spadku sztywności w wyniku zarysowania; obliczenie właściwości zachowania się płyty  $\sigma_s$  i  $w_k$



Rys. 7. Analiza płyty: mocne ochłodzenie  $\Delta T_G < -5 \text{ K}$  spadek wyężenia przez przewagę zginania  $M$ ; średnie ochłodzenie  $\Delta T_G = -5 \text{ K}$  maksymalne wyężenie  $\sigma_s = 327 \text{ MN/m}^2$ ,  $w_k = 0,49 \text{ mm}$ ; słabe ochłodzenie  $\Delta T_G > -5 \text{ K}$  spadek wyężenia przez znoszenie się momentów  $M$

- uwzględnienie pełnej wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ct}$  oraz właściwości zbrojenia  $\rho$ ,  $c$ ;

- nieliniowe ustalenie sił  $M$  i  $N$  z uwzględnieniem spadku sztywności wskutek zarysowania;

- obliczenie właściwości zachowania się płyty  $\sigma_s$  i  $w_k$ .

Pełna analiza zachowania się płyty przy różnej wartości  $\Delta T_G$  pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- mocne ochłodzenie  $\Delta T_G < -5 \text{ K}$  – spadek wyężenia przez przewagę zginania  $M$ ;
- średnie ochłodzenie  $\Delta T_G = -5 \text{ K}$  – maksymalne wyężenie  $\sigma_s = 327 \text{ MN/m}^2$ ,  $w_k = 0,49 \text{ mm}$ ;

- słabe ochłodzenie  $\Delta T_G > -5 \text{ K}$  – spadek wyężenia przez znoszenie się momentów  $M$ .

### Wnioski

Wskutek oddziaływania zimnego powietrza, doprowadzanego przez boczne szyby wentylacyjne, w płycie fundamentowej powstały podłużne siły rozciągające. Są one wynikiem hamowania kurczącej się płyty przez posadzone na niej wysoko obciążone słupy. Wyężenie to, wraz z parciem wody gruntowej, doprowadziło do powstania licznych rys skośnych. Stosunkowo duża szerokość tych rys wynika z niedostatecznego zbrojenia płyty obarczonego błędnym wymiarowaniem. Błąd ten polega na przyjęciu niskiej wytrzymałości betonu na rozciąganie i skutkuje przedostawaniem się wody gruntowej do pomieszczenia. Wnioski te powinny być uwzględnione przy opracowaniu przedsięwzięć naprawczych.

### Literatura

- [1] CICIND: Model Code and Commentaries for Concrete Chimneys, Part A: The Shell, Editions 1984 and 2001.
- [2] DIN V 1056, Freistehende Schornsteine in Massivbauart, Berechnung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung e. V., Ersatz für DIN 1056, Entwurf März 2005.
- [3] DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine, Teil 2: Betonschornsteine. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN e. V., April 2002.
- [4] Eurocode 2: Design of concrete structures
- [5] Noakowski P., Schäfer, H. G.: Steifigkeit-orientierte Statik im Stahlbetonbau. Ernst & Sohn, 2003.
- [6] Noakowski P., Breddermann, M., Harling, A., Rost, M.: Turmartige Industriebauwerke, Grundlagen der CICIND, DIN EN 13084, Betonkalender 2006, Ernst und Sohn.
- [7] Noakowski P.: Limitation of crack width. CICIND Chimney Book 2006.
- [8] Noakowski P.: Close to reality methods for the structural design of towers. Architecture, Civil Eng., Environment, The Silesian Univ. of Technology, Vol. 3/2010.
- [9] Lohmeyer G., Ebeling, K: Weiße Wannen – einfach und sicher. Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2013.
- [10] Noakowski P., Schäfer H. G.: Steifigkeitsorientierte Statik im Stahlbetonbau. Ernst & Sohn, 2003.
- [11] Noakowski P., Leszinski H., Breddermann M., Rost M.: Schlanke Hochbaudecken Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), H. 1, S. 28.
- [12] Schnell J., Kautsch R., Noakowski P., Breddermann M.: Verhalten von Hochbaudecken Beton- & Stahlbetonbau 100 (2005), H. 5, S. 406.