



Michał Pelczarski\*

***O kształtowaniu konstrukcji dachu katowickiej hali Spodka.  
Rozważania z wywiadów z Profesorem Waławem Zalewskim***

***About shaping the structure of Katowice Spodek-arena roof.  
Considerations from interviews with Professor Waław Zalewski***

***Wprowadzenie***

W artykule przedstawiono najważniejsze decyzje projektowe podjęte przez prof. Waławę Zalewskiego (W.Z.), które wpłynęły bezpośrednio na niezwykle i niepowtarzalną dotąd na świecie formę hali widowiskowo-sportowej. Choć nie wszystkie rozwiązania proponowane w projekcie konkursowym zostały zrealizowane, artykuł pozwoli prześledzić tok rozumowania [7], jaki doprowadził Profesora do przełomowego odkrycia protoplasty opatentowanego później nowego systemu konstrukcyjnego nazwanego *tensegrity*<sup>1</sup>.

***Profesor Waław Zalewski  
– fazy pracy i realizacje***

Profesor Waław Zalewski jest polskim inżynierem budownictwa i specjalistą w dziedzinie „filozofii kształtowania konstrukcji”. Urodził się w 1917 r. w Samogródku, do lat 60. XX w. pracował w Polsce, następnie w latach 1962–1966 w Wenezueli, a ostatecznie osiadł w USA, gdzie do 1988 r. był zatrudniony na Wydziale Architektury MIT. Kształtując konstrukcję, stosował metodę strumieni sił nazwaną później Strut & Tie Method. Wśród ważnej-

\* Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej/Faculty of Architecture, Wrocław University of Technology.

<sup>1</sup> System *tensegrity* to system prętowo-ciężnowy zbudowany w taki sposób, że elementy sztywne nie stykają się ze sobą bezpośrednio.

***Introduction***

The article presents the most important decisions taken by Prof. Waław Zalewski (W.Z.), which have had a direct impact on the unusual and hitherto unique form of the discussed sports and entertainment hall. Although not all of the solutions proposed in the contest design have been implemented, the article will make it possible to follow the process of reasoning [7] which has led Prof. Zalewski to the breakthrough discovery of an ancestor of the new, later-patented structural system called *tensegrity*<sup>1</sup>.

***Professor Waław Zalewski  
– phases of work and developments***

Prof. Waław Zalewski is a Polish structural engineer and expert in the field of “philosophy of shaping structures”, born in 1917 in Samogródek, he worked in Poland until the 1960s, and then in Venezuela in the years 1962–1966, and finally settled in the USA where he worked at the MIT’s Department of Architecture until 1988. When shaping a structure he used the flow of forces method, later called Strut & Tie Method. Among the major facilities: he designed the Supersam building [1] and the warehouse with precast slab with mushroom or conical heads for what is now Cefarm in Warsaw, for the Katowice railway station

<sup>1</sup> The *tensegrity* system is a cable-strut system built in such a manner that the compression members do not touch each other directly.

szych zaprojektowanych przez niego obiektów należy wymienić: budynek Supersamu [1] oraz magazyn głowicowy obecnego Cefarmu w Warszawie, zaproponował też dach złożony z dźwigarów typu parasolowego dla katowickiego dworca, a także gdański wysokościowy budynek biurowy w technologii stropów opuszczanych, konstrukcję hotelu w Kołobrzegu, przekrycia powłokowe hal przemysłu włókienniczego w Mińsku Mazowieckim, Łodzi, Wyszku i Krośnie, Muzeum Sztuki Współczesnej w Caracas oraz wiszące hale sportowe w wenezuelskiej Barcelonie i Maracaibo. Każdą z tych realizacji cechuje oryginalna architektura konstrukcji i wyjątkowość indywidualnych rozwiązań, których wspólnym mianownikiem jest kształtowanie na minimalne zginanie, jako że jest ono wyłączeniem najbardziej materiałochłonnym.

### ***Inżynierskie obserwacje na temat pracy płyty kołowej oraz systemów nośnych z niej się wywodzących***

#### *Analiza pracy płyty kołowej, równomiernie obciążonej i podpartej w sposób ciągły na krawędzi*

Gdy przyjrzy się deformacjom płyty żelbetowej obciążonej równomiernie, o rzucie i podparciu według schematu środkowego (il. 1), zauważy się, że w pewnym przybliżeniu w płycie utworzą się obszary „czaszy” wypukłych „g” oraz „niecek” wklęsłych „f”.

Można zaobserwować, że czasze wypukłe i z dużym przybliżeniem niecki wklęsłe mają powierzchnię o dwóch krzywiznach: krzywiznie radialnej oraz równoleżnikowej. To co najciekawsze, to fakt, że krzywizny te są potwierdzeniem występowania w płycie dwóch typów momentów: głównych<sup>2</sup> momentów radialnych oraz głównych momentów równoleżnikowych. Jest to wynik znanej analogii krzywizn powierzchni zginanej z momentami głównymi w niej panującymi. Poniższe schematy przedstawiają rozkłady momentów głównych oraz deformacji płyty kołowej podpartej przegubowo na obwodzie w trzech przypadkach (il. 2e, g, i, il. 3).

Analizując konfigurację zbrojenia lub uźebrowania „niecek” płyty, należy stwierdzić, że może ono naśladować układ głównych momentów zginających, ale może również być ukształtowane na kilka innych sposobów, jak pokazano na ilustracji 4.

Przez pojęcie konfiguracji uźebrowania oraz zbrojenia płyty rozumie się tu geometrię i sposób rozbudowania kanałów przenoszących siły wewnętrzne niczym sieci „inteligentnych” wzmocnień. Te z konfiguracji, które są zbliżone do trajektorii momentów głównych, cechują się największą sztywnością i pozwalają na maksymalne zmniejszenie ciężaru płyty, a w konsekwencji ciężaru fundamentów<sup>3</sup>. Poniżej każdy z systemów płyt anizotro-

he proposed a roof composed of “umbrella”-type girders, Gdańsk high-rise office building in the lowered-floor technology, structure of a hotel in Kołobrzeg, shell covers for textile industry buildings in Mińsk Mazowiecki, Łódź, Wyszku and Krosno, Contemporary Art Museum in Caracas, and suspension sports halls in Venezuelan Barcelona and Maracaibo. Each of those developments features original structural architecture and an exceptionally unique solution, both aimed at shaping the structure to minimum bending which is the most material-consuming effort.

### ***Engineering observations on the structural behaviour of a circular slab and its derived load-carrying systems***

#### *Analysis of the structural behaviour of a uniformly loaded circular slab supported on its edge in a continuous manner*

When looking at the deformations of a reinforced concrete slab, uniformly loaded, with the view and support according to the middle diagram (Fig. 1) it is noticeable that, to a certain approximation, the regions of convex “domes” (“g”) and concave “troughs” (“f”) are created in the slab.

It can be observed that the convex domes and, to a certain approximation, concave troughs have a surface with two curvatures: the radial curvature and the circumferential one. What is most interesting is the fact that these curvatures are the confirmation of the occurrence of two types of moments in the slab: principal<sup>2</sup> radial moments and principal circumferential moments. This is a result of the known analogy between the curvatures of a bent surface and the principal moments occurring in it. The diagrams below show the distributions of principal moments and deformations of a circular slab pivotally supported on its circumference in three cases (Fig. 2e, g, i, Fig. 3).

Analysing the configuration of a slab trough reinforcement or ribbing, one can state that it can simulate the arrangement of the principal bending moments but it can also be shaped in several other ways as shown in Figure 4.

The configuration of slab reinforcement and ribbing is to be understood here as the geometry and way of developing external force transmitting channels, like an “intelligent” reinforcement network. Those of the configurations which are approximate in trajectory to the principal moments are characterised by the highest rigidity and allow the maximum reduction in the slab weight and consequently in the foundation weight<sup>3</sup>. Each of the anisotropic<sup>4</sup> slab systems [2] is described in more detail below. In order to depict the behaviour of bent slabs in a more transparent manner the analysis also makes use of grid models.

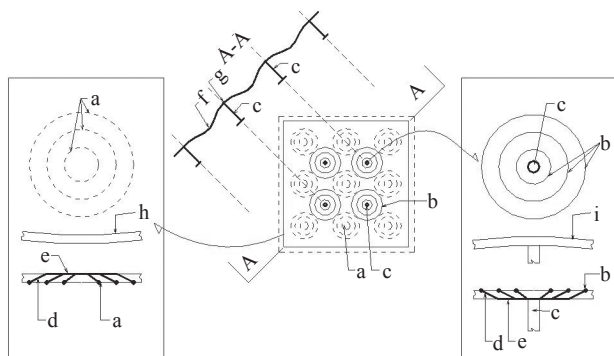
<sup>2</sup> The principal moments are understood to be the moments with the highest values (as regards the absolute value) at a given point in the directions perpendicular to each other.

<sup>3</sup> However, from the viewpoint of technology and labour costs the minimisation of deadweight is not always the decisive factor in selecting the system.

<sup>4</sup> Here, the anisotropy means the variable properties of the slab depending on the direction in which a given property is observed. Both the reinforcement and ribbing locally change the slab rigidity.

<sup>2</sup> Przez momenty główne rozumie się tu momenty o wartościach największych (co do wartości bezwzględnej) w danym punkcie w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

<sup>3</sup> Jednak z punktu widzenia technologii i kosztów pracy nie zawsze minimalizacja ciężaru własnego jest warunkiem decydującym o wyborze systemu.



II. 1. Schemat środkowy to rzut oraz diagonalny przekrój A-A płyty opartej na słupach oraz przegubowo na krawędziach. Schematy „h, i” przedstawiają deformację płyty płaskiej w obszarach „niecki” oraz „czaszy” nad słupem. W schematach zastosowano zbrojenie płyty prętami tworzącymi koncentryczne pierścienie kołowe. Kołowe linie przerywane symbolizują tu zbrojenie dolne „a”, natomiast kołowe linie ciągłe „b” symbolizują zbrojenie górne. Schemat lewy przedstawia pracę kratownicową płyty, jaka generuje się w „niecce” płyty, schemat prawy obrazuje pracę kratownicową płyty, jaka generuje się w „czaszy” płyty nad słupem „c”. W obu przypadkach pierścienie zbrojenia „a, b” łączone są z prętami strefy ściskanej „e”, krzyżulcami betonowymi „d” powstającymi w materii tworzącej płytę żelbetową zgodnie z teorią Morscha. Obszary czaszy wypukłej oznaczono jako „g”, obszar czaszy wklęsłej „f”. Kontynuacja w podrozdziale *System równoleżnikowy „IV”* (rys. autora)

Fig. 1. The middle diagram depicts the view and diagonal section A-A of a slab supported on columns and pivotally on the edges.

Diagrams „h, i” depict the deformation of a flat slab in the regions of a “trough” and “dome” above the column. The slab shown in the diagrams is reinforced with bars forming concentric circular rings. Circular broken lines “a” symbolize the lower reinforcement and circular solid lines “b” symbolize the upper reinforcement.

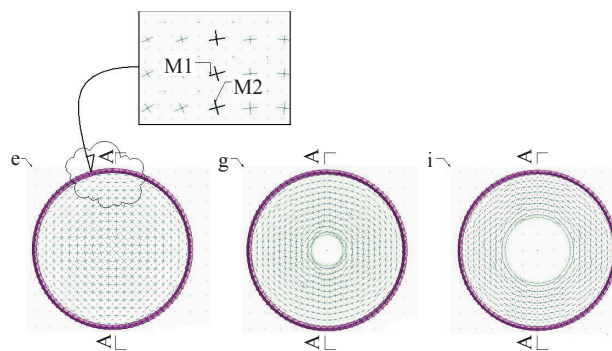
The left diagram depicts the truss behaviour of the slab, which is generated in the slab “trough”, the right diagram depicts the truss behaviour of the slab, which is generated in the slab “dome” above column “c”. In both cases the rings of reinforcement “a, b” are joined with compression zone bars “e” by concrete cross braces “d” created in the mass forming a reinforced concrete slab according to Morsch’s theory. Convex dome areas are marked as “g” and dished areas as “f”. To be continued in section *Circumferential system “IV”* (drawn by the author)

powych<sup>4</sup> [2] omówiono bardziej szczegółowo. Celem bardziej przejrzystego zobrazowania pracy płyty zginanej w analizie posłużono się również modelami rusztowymi.

#### *System ortogonalny lub diagonalny „II”*

W przypadku systemu „II” płyta pracuje jak ruszt ortogonalny, przy czym dla rzutów niekołowych ugięcia rusztu diagonalnego będą mniejsze ze względu na mniejsze rozpiętości belek. W związku z tym pochłona one mniej materiału konstrukcyjnego niż rozwiązania ortogonalne. Zaletą systemów dwukierunkowych jest integracja belek podczas przenoszenia obciążeń nierównomiernych, zapewniająca ich wzajemną współpracę. Korzystna jest również stabilizacja pasów ściskanych.

<sup>4</sup> Anizotropia oznacza tu zmienne własności płyty w zależności od kierunku, w którym dana własność jest w nich obserwowana. Zarówno zbrojenie, jak i uźebrowanie zmieniają lokalnie sztywność płyty.



II. 2. Krzyże momentów głównych w płycie pełnej (e), z małym otworem (g) i z dużym otworem (i). Widoczne są dwa wzajemnie prostopadłe kierunki momentów głównych: momentu równoleżnikowego (M1) oraz radialnego (M2). Zauważyć można, że w płycie „e” krzyże momentów równoleżnikowych i południkowych są równe sobie w środkowej części płyty, po czym w miarę zbliżania się do podpory momenty południkowe ulegają zmniejszeniu do zera. W przypadku płyty z otworem „g” oraz „i” południkowe momenty ulegają silnej redukcji, a momenty równoleżnikowe silnej intensyfikacji (rys. autora)

Fig. 2. Visible crosses of the principal moments in a solid slab (e), in a slab with a small hole (g), in a slab with a large hole (i).

The crosses represent the two (perpendicular to each other) directions of the principal moments: the circumferential (M1) and radial moment (M2). It is noticeable that in slab “e” the crosses of the circumferential and radial moments are equal in the middle part of the slab and then, as approaching the support, the meridional moments are reduced to zero. In the case of a slab with a hole “g” and “i” the meridional moments are strongly reduced and the circumferential moments are strongly intensified (drawn by the author)

#### *Orthogonal or diagonal system “II”*

In the case of system “II” the slab behaves as the orthogonal grid, and for the non-circular views diagonal grid deflections will be smaller due to the smaller beam spans. Therefore, they will consume less structural material as compared with the orthogonal solutions. The advantage of two-directional systems is the integration of beams when transferring non-uniform loads, ensuring their cooperation with each other. The stabilisation of compression strips is also advantageous.

#### *Radial system “III”*

In the case of system “III” the ribs modelled from the slab behave as the system of radial free-ends beams intersecting with each other at the central point. Each of them works independently, collecting the load from the two wedge surfaces. The maximum moments occur at the centre of the beam span (Fig. 5). Hence, the mass of material creating the radial beam will be concentrated in the central zone, further deepening the moments from the external load. In such a solution there will be problems with the physical construction of the central node.

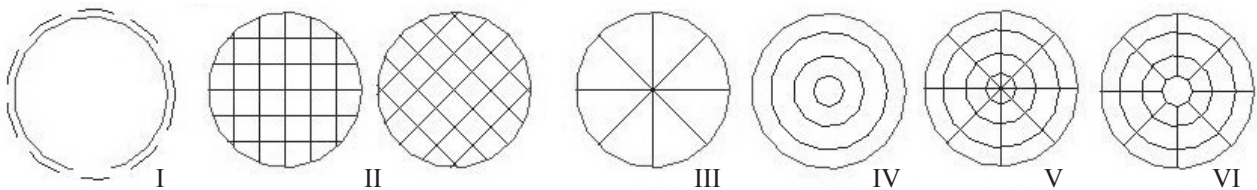
#### *Circumferential system “IV”*

In the case of system “IV”, the circumferential ribbing system carries the principal circumferential bending moments as well as the horizontal and vertical components of the adjacent rib reactions. In order to bet-



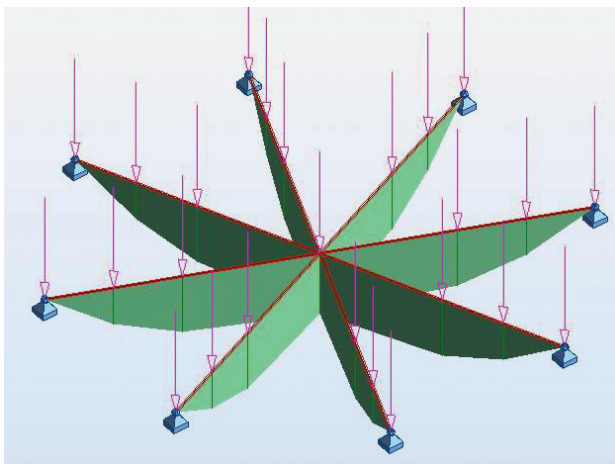
Il. 3. Widok boczny deformacji płyty bez otworu (k), z małym otworem (l) oraz z dużym otworem (m). Gdy skoreluje się deformacje z krzyżami momentów głównych z ilustracji 2, zauważy się, że krzywizna południkowa jest tym większa, im większe są momenty główne – południkowe. Ponieważ otwór zakłóca pracę układów południkowych, obserwuje się wypłaszczenie pasm południkowych w płytach z otworem (rys. autora)

Fig. 3. The side view of deformations in the slab without a hole (k), with a small hole (l) and with a large hole (m). When correlating the deformations with the crosses of the principal moments from Figure 2 it is noticeable that the meridional curvature is larger the larger the principal meridional moments are. As the hole upsets the behaviour of the meridional systems the flattening of meridional bands is observed in the slabs with a hole (drawn by the author)



Il. 4. Zastępcze konfiguracje systemów rusztowych lub żebrowych, modelujących pracę płyty opartej swobodnie na obwodzie: system ortogonalny lub diagonalny (II), system radialny (III), system równoleżnikowy (IV), system radialno-równoleżnikowy (V), system radialno-równoleżnikowy (VI) z otworem (rys. autora)

Fig. 4. The diagram depicts the substitute configurations of grid or ribbed systems, modelling the behaviour of a slab freely supported on the circumference orthogonal or diagonal system (II), radial system (III), circumferential system (IV), radial and circumferential system (V), radial and circumferential system (VI) with a hole (drawn by the author)



Il. 5. Wykresy momentów zginających powstających w układzie radialnych belek obciążonych siłami skupionymi (rys. autora)

Fig. 5. The diagrams of bending moments generated in the radial system of beams loaded with concentrated forces (drawn by the author)

### System radialny „III”

W przypadku systemu „III” żebra wymodelowane z płyty pracują jak układ belek radialnych, swobodnych, przecinających się wzajemnie w punkcie centralnym. Każda z nich pracuje niezależnie, zbierając obciążenie z dwóch powierzchni klinowych. Momenty maksymalne występują w środku rozpiętości belek (il. 5). Stąd masa materiału tworzącego belkę radialną będzie koncentrować się w strefie środkowej, jeszcze bardziej pogłębiając momenty od obciążenia zewnętrznego. Przy takim rozwiązaniu pojawiają się trudności z fizycznym wykonaniem węzła centralnego.

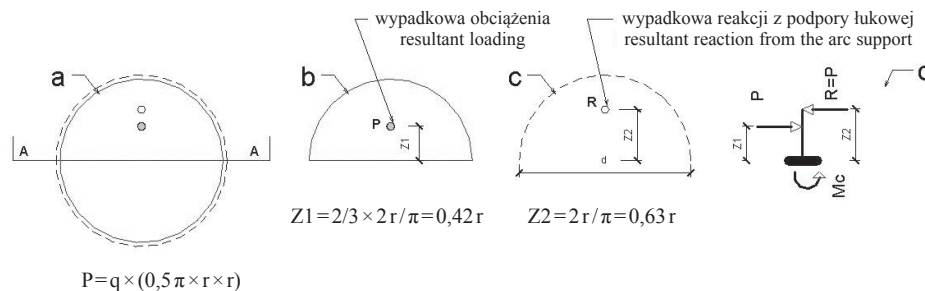
ter depict the behaviour of this interesting system, presented below is an analysis of the diagrams of moments bending a circular slab, the solid one and the one with a hole, from uniformly distributed load (see also [4]). Possible system configurations are further presented in detail.

- Meridional and circumferential bending moments in “IV”-type systems

The approximate values of the circumferential moments can be found in section A-A according to the method presented in Figure 6. Knowing the value and location of resultant “P” from load “q” acting on the cut-off half of the slab and the location of the resultant arc support reaction “R”, it is possible to determine the bending moments in the plane perpendicular to section A-A, as for the cantilever beam [6]. Thanks to this the approximate value of total concentrated moment  $M_c$ , is obtained and it can be then distributed along the section length into the partial moments according to the proportion 1/3 to 2/3.

From the diagram of moments (M1) (perpendicular to section A-A) bending the reinforced concrete slab in the diametral section, it can be concluded that the lower reinforcement rings will transfer the tensile forces arising from those moments and above them in the mass of reinforced concrete the compression rings will form. As the central bands are the longest they undergo bending to the largest extent and, therefore, the inner rings will be bent more strongly on a length of about 2/3 of the slab diameter, which is visible in (Fig. 7 “F”<sup>5</sup>) [2], [4], [5], [8], [9].

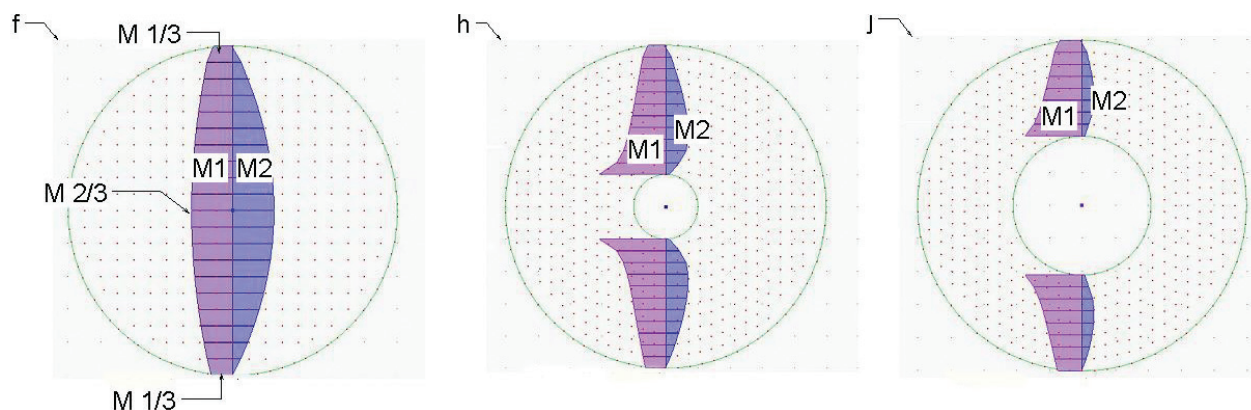
<sup>5</sup> Diagrams from MES programme made by the author.



$M_c = M_{całkowity} = (P \times Z2) - (P \times Z1)$   
 $M_c = M_{total} = (P \times Z2) - (P \times Z1)$   
 $M_{średni}$  rozłożony na długości średnicy =  $M_{całkowity} / d$   
 Average M distributed on the diameter length =  $M_{total} / d$   
 $M_{2/3} = M$  rozłożony na 2/3 średnicy =  $1,3 \times M_{średni}$   
 $M_{2/3} = M$  distributed on 2/3 of the diameter =  $1,3 \times M_{average}$   
 $M_{1/3} = M$  rozłożony na 1/3 średnicy =  $M_c - (1,3 M_{średni} \times 2/3 d) / 0,33 d$   
 $M_{1/3} = M$  distributed on 1/3 of the diameter =  $M_c - (1,3 M_{average} \times 2/3 d) / 0,33 d$

II. 6. Sposób wyznaczania momentu zginającego płytę w płaszczyźnie prostopadłej do przekroju A-A [6]. To właśnie ten moment przenoszony jest przez obrycze współśrodkowe zbudowane z łączonych wzajemnie słupkami pierścienia pasa górnego oraz dolnego (rys. autora)

Fig. 6. The diagram presents the method of determining the moment bending the slab in the plane perpendicular to section A-A. This is the very moment carried by the concentric dual rings consisting of an upper ring and lower ring connected with each other by posts [6] (drawn by the author)



II. 7. Wykresy momentów równoleżnikowych (M1) i południkowych (M2) w przekroju A-A dla płyty pełnej (f) oraz z otworami (h) i (j). Momenty (M1) działają w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny przekroju A-A, natomiast moment (M2) działa w płaszczyznach prostopadłych, do wirtualnie wyciętych, koncentrycznych przekrojów kołowych. Na schematach „h, j” widoczny jest również wzrost momentów równoleżnikowych (M1), będący wynikiem przerwania pasm środkowych, z których obciążenie przejmowane jest przez nieco krótsze pasma sąsiednie (rys. autora)

Fig. 7. The diagrams present the graphs of circumferential moments (M1) and meridional moments (M2) in section A-A for a solid slab (f) and for slabs with a hole (h) and (j). Moments (M1) act in the plane perpendicular to the plane of section A-A, whereas moment (M2) acts in the planes perpendicular to imaginary concentric circular sections. An increase in circumferential moments (M1), which is the result of discontinuation of central bands and taking the load from them by slightly shorter adjacent bands is visible in diagrams “h, j” (drawn by the author)

*System równoleżnikowy „IV”*

W przypadku układu typu „IV” to system uźebrowania równoleżnikowego przenosi główne, równoleżnikowe momenty zginające oraz składowe poziome i pionowe oddziaływać sąsiednich żeber. Aby lepiej zobrazować pracę tego ciekawego systemu, dalej przedstawiono analizę przebiegu momentów zginających płytę kołową pełną oraz z otworami, od obciążenia równomiernie rozłożonego [4]. Dalej zaprezentowano też szczegółowo możliwe konfiguracje systemu.

- Momenty zginające południkowe i równoleżnikowe w systemach typu „IV”

Przybliżone wartości momentów równoleżnikowych widać w przekroju A-A płyty według metody przedstawionej na ilustracji 6. Znając wartość oraz odległość wy-

- Possible configurations of “IV”-type circumferential system

The system of concentric circumferential circles (type „IV”) can be located in space in two different ways: by the method of their suspending one from another (Fig. 8), and by the method of their resting one against another (Fig. 9).

Each circle is a single dual ring consisting of two rings connected with hangers: upper ring “a”, and lower ring “b”.

The first method involves suspending the successive rings one from another by means of steel hangers (“d”) or other type of ties, as shown in Figure 8. The second method involves supporting the rings one against another by means of cross braces (“c”) as shown in Figure 9. In the case of a solid slab, by analogy to the beam, the compression cross braces will form in the reinforced concrete mass.

padkowej „P” od obciążenia „q” działającego na odciętą połowę płyty oraz położenie wypadkowej reakcji podpory łukowej „R”, można wyznaczyć momenty zginające, w płaszczyźnie prostopadłej do przekroju A-A, jak dla belki wspornikowej [6]. Dzięki temu uzyskuje się przybliżoną wartość całkowitego momentu skupionego  $M_c$ , który następnie można rozłożyć na długości przekroju na momenty cząstkowe według proporcji 1/3 do 2/3.

Z przebiegu momentów ( $M_1$ ) (prostopadłych do przekroju A-A) zginających badaną płytę żelbetową w przekroju średnicowym można wywnioskować, że dolne pierścienie zbrojenia przenosić będą siły rozciągające powstające od tych momentów, a nad nimi w masie żelbetu wytworzą się pierścienie ściskane. Ponieważ pasma środkowe są najdłuższe, ulegają największemu zginaniu, w związku z czym pierścienie wewnętrzne będą silniej zginane na odcinku bliskim 2/3 średnicy płyty, co widoczne jest na ilustracji 7f<sup>5</sup> [2], [4], [5], [8], [9].

- Możliwe konfiguracje systemu równoleźnikowego typu „IV”

System współśrodkowych kół równoleźnikowych (typu „IV”) umiejscowić można wzajemnie w przestrzeni na dwa sposoby: metodą ich wzajemnego podwieszania (il. 8) oraz metodą ich wzajemnego opierania (il. 9).

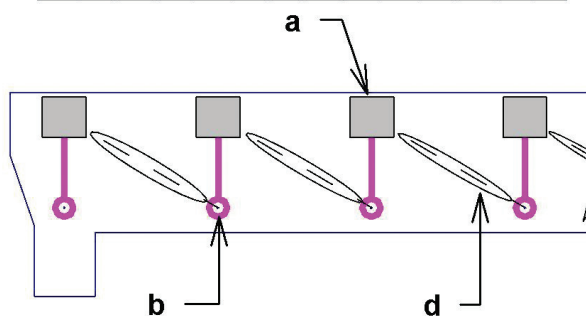
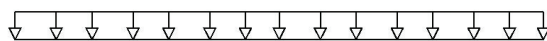
Każde koło to pojedyncza obręcz składająca się z dwóch połączonych wieszakami pierścieni – górnego „a” oraz dolnego „b”. Pierwsza metoda polega na wzajemnym podwieszeniu kolejnych obręczy za pomocą stalowych wieszaków („d”) lub innego rodzaju cięgien. Tak jak na ilustracji 8. Drugi sposób polega na wzajemnym podparciu pierścieni za pośrednictwem krzyżulców („c”), jak na ilustracji 9. W przypadku płyty pełnej analogicznie jak w belce krzyżulce ściskane tworzą się w materii żelbetu.

Podsumowując, w obu typach konfiguracji obciążonych grawitacyjnie górne obręcze równoleźnikowe („a”) przenoszą ściskania osiowe, a obręcze dolne („b”) przenoszą rozciągania osiowe. Momenty równoleźnikowe i powstające od nich pary sił przedstawiono na ilustracji 10g, h.

W obu też przypadkach obręcze górne („a”) pracują jako opory dla poziomych składowych południkowych sił „f” (il. 10) działających obwodowo. Dążą one do zmniejszenia średnic tych obręczy, co prowadzi do dalszego wzrostu ściskania osiowego obręczy górnych „a”. Analogicznie, lecz jako rozciągane opory, dla poziomych składowych sił „e” pracują obręcze dolne „b”, jak na ilustracji 10. Ostatecznie więc obręcze „a” ściskane są siłami od równoleźnikowego momentu zginającego oraz dodatkowo ściskane od poziomych składowych ciągnięć „f”. W przypadku pierścieni „b” są one rozciągane siłami wywołanymi zginaniem od momentu równoleźnikowego oraz dodatkowo rozciągane od poziomych składowych ciągnięć „e”.

#### System radialno-równoleźnikowy „V”

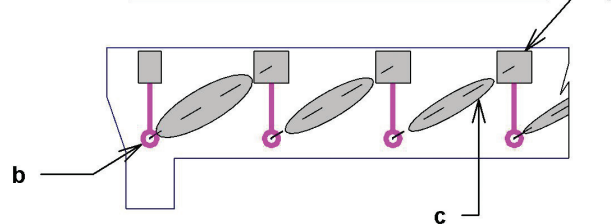
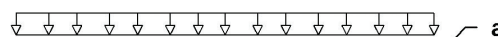
W przypadku konfiguracji typu „V” schemat pracy płyty jest połączeniem przypadku „III” oraz „IV”. Dlatego też wprowadzając zbrojenie naśladujące układy głównych



Il. 8. Model obciążonego systemu równoleźnikowego – protoplasty systemu *tensegrity*. Schemat dolny prezentuje zasadę pracy systemu równoleźnikowego. Obręcze równoleźnikowe ułożone koncentrycznie składają się z pierścienia górnego „a” oraz dolnego „b” i są wzajemnie podwieszane poprzez wieszaki „d” (rys. autora)

Fig. 8. The photograph shows a model of the loaded circumferential system – an ancestor of the tensegrity system. The lower diagram depicts the principle of circumferential system behaviour.

The concentrically located circumferential rings consist of an upper ring “a” and lower ring “b” and are suspended one from another by means of hangers “d” (drawn by the author)



Il. 9. Schemat przedstawia zasadę pracy systemu równoleźnikowego, gdy obręcze równoleźnikowe ułożone koncentrycznie są wzajemnie podparte krzyżulcami „c”.

W przypadku płyt żelbetowych krzyżulce wytworzą się z masy betonu tworzącej płytę analogicznie do systemu kratownicy Morscha. Pierścienie górne oznaczono jako „a”, dolne jako „b” (rys. autora)

Fig. 9. The diagram depicts the principle of circumferential system behaviour when the concentrically located circumferential rings are supported one against another by means of cross braces “c”.

In the case of reinforced concrete slabs, the cross braces are formed in the concrete mass by analogy to Morsch’s truss system.

Upper ring was marked as “a” and lower rings as “b” (drawn by the author)

<sup>5</sup> Wykresy z programu MES, wykonane przez autora.

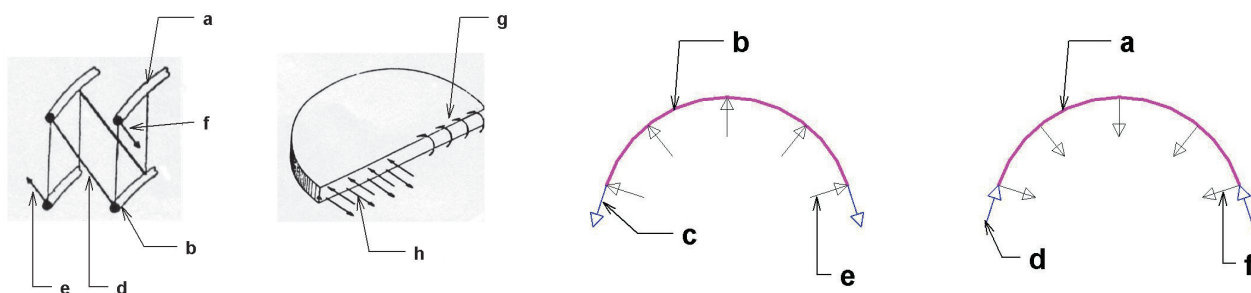
sił rozciągających w płycie żelbetowej, w strefie dolnej trzeba zastosować układy prętów równoleżnikowych „b” oraz radialnych „e” (il. 11). W strefie górnej przekroju betonowego powstaną analogiczne, lecz ścisane pasma równoleżnikowe i południkowe „a, c”.

W przypadku pracy rusztu belkowego o geometrii typu „V” można zauważyć, że elementy równoleżnikowe pełnią funkcję wspomagającą – odciążają zginane belki radialne. Ponieważ belki równoleżnikowe obracają się swobodnie w węzłach wraz z uginającymi się belkami radialnymi, nie powstają w nich momenty skręcające. W poszczególnych węzłach siły ścisające z pasa górnego belek radialnych wnikają w pasy górne belek równoleżnikowych. Analogicznie dzieje się na poziomie pasa

To sum up, in both configuration types, gravitationally loaded, the upper circumferential rings (“a”) carry axial compressions and the lower rings (“b”) carry axial tensions. The circumferential moments and related couples of forces are depicted in Figure 10 “g, h”.

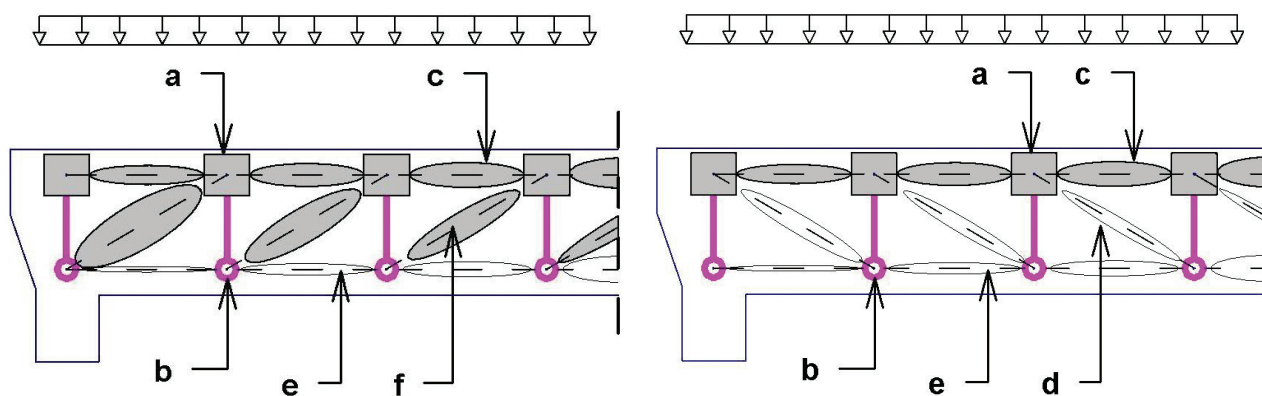
In both cases, the upper rings (“a”) act as stops for the horizontal components of meridional forces “f” (Fig. 10) acting circumferentially. They tend to decrease the diameters of those rings, which leads to a further increase in the axial compression of upper rings “a”. By analogy, the lower rings “b” work as pulled stops for the horizontal components of forces “e”, as shown in Figure 10.

Eventually, rings “a” are compressed by the forces from the circumferential bending moment and, in addi-



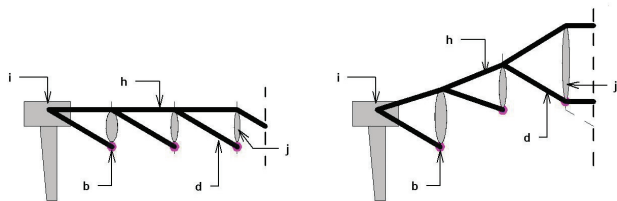
Il. 10. Schematy wyjaśniające zasadę pracy pierścieni oporowych „a, b”. Pierścień „a” poddany działaniu radialnych ciągnięć od składowej poziomej „f” ulega dalszemu ścisaniu osiowemu, natomiast pierścień „b” poddany przeciwnemu radialnemu działaniu „e” podlega dalszemu rozciąganiu osiowemu. Mechanizm ten obrazują również zwroty reakcji „c” i „d” powstające w przekrojach pierścienia. Momenty równoleżnikowe w przekroju oznaczono jako „g”, natomiast pary sił osiowych od tych momentów pochodzące oznaczono jako „h” (schemat lewy: W.Z., prawy: autor)

Fig. 10. The diagrams explain the behaviour of thrust resistance rings “a, b”. Ring “a” subjected to action of radial pulling forces from the horizontal component of “f” undergoes further axial compression, whereas ring “b” subjected to the opposite radial action of “e” undergoes further axial tension. This mechanism is also depicted by the senses of reactions “c” and “d” forming in the ring sections. The circumferential moments in the section have been marked as “g”, while the pairs of axis forces originating from these moments have been marked as “h” (left diagram: W.Z., right: drawn by the author)



Il. 11. Możliwe konfiguracje systemu typu „V” przenoszącego momenty zarówno radialne, jak i południkowe. Porównując schemat lewy z prawym, układy obręczy zbudowanych ze ścisanych pierścieni „a” i rozciąganych pierścieni „b” połączonych rozciągającymi słupkami są tu jednakowe. Jednakowe są też ścisane pasy górne „c” i pasy dolne rozciągane „e”. Różnica dotyczy tylko sposobu przenoszenia momentów południkowych. Lewy układ wykorzystuje ścisane krzyżulce „f”, natomiast prawy układ wykorzystuje krzyżulce rozciągane „d”. W przypadku płyt żelbetowych krzyżulce betonowe wytworzą się z masy betonowej, natomiast w przypadku rozwiązania prawego konieczne jest wbudowanie do płyty stalowych diagonal lub pochyłonych strzemion (rys. autora)

Fig. 11. The diagrams depict the possible configurations of system “V” transferring both radial and meridional moments. Comparing the left diagram with the right one, the systems of rings consisting of compression rings “a” and tension rings “b” connected with the tension posts, are the same. Likewise, upper compression strips “c” and lower tension strips “e” are equal. The only difference is in the way of transferring the meridional moments. The left system employs compression cross braces “f” whereas the right system employs tension cross braces “d”. In the case of reinforced concrete slabs, concrete cross braces will form from the concrete mass, while in the case of the right solution it is necessary to embed steel diagonals or inclined stirrups in the slab (drawn by the author)



Il. 12. Z lewej płaska wersja systemu *tensegrity*. Z prawej bardziej znany system kopuły w systemie *tensegrity*. Płaska wersja wymaga dociążenia balastem, np. ciężarem świetlika, ze względu na mniejszą odporność na obciążenia od ssania wiatru spowodowaną mniejszymi kątami między elementami linowymi prowadzącymi do powstawania większych sił i odkształceń. Pierścien dolny „b”, podporowy pierścien zewnętrzny „i”, radialne liny podwieszające „d”, pionowy słupek – dewiator, pas górny „h” (rys. autora)

Fig. 12. On the left, the flat version of the tensegrity system. On the right, the better known dome system in the tensegrity system. The flat version requires loading with ballast – e.g. with a skylight due to the smaller resistance to loads from the wind suction caused by the smaller angles between the cable members leading to the formation of larger forces and deflections. Lower ring was marked as “b”, supporting external ring as “i”, radial hanging elements “d”, vertical columns, top chord “h” (drawn by the author)

dolnego. Skutkiem tego w belkach równoleżnikowych powstają momenty zginające, a od obciążeń symetrycznych są stałe na całym obwodzie pierścienia.

#### *System radialno-równoleżnikowy typu „VI” z otworem*

W przypadku wykonania otworu centralnego w ruszcie typu „VI” belki południkowe ulegają przerwaniu i pierścienie równoleżnikowe pełnią wówczas niezbędną funkcję nośną – wspierającą końce żeber radialnych.

Rozwiązanie z otworem daje możliwość budowy świetlika centralnego. Moment na wewnętrznym końcu belki radialnej równoważony jest przez momenty powstające w elementach dochodzących z obu stron pierścienia. Ponieważ moment radialny musi zostać zrównoważony dwoma jednakowymi momentami równoleżnikowymi, momenty te będą tym większe, im większy będzie kąt rozwarcia między radialnymi elementami tworzącymi pierścien.

#### *Przekrycie typu tensegrity*

Możliwe jest również zastosowanie systemu podwieszanego typu „IV” z usunięciem ściskanych pierścieni górnych (il. 12). System ulega tu zmianie z układu przenoszącego momenty zginające (charakterystycznego dla płyty sztywnej) na system podwieszony. Układ taki charakteryzuje się niskim wskaźnikiem ciężaru własnego, ale ma duże odkształcenia lokalne od obciążeń niesymetrycznych. Dlatego najodpowiedniejsze dla tego typu konstrukcji jest stosowanie pokrycia membranowego.

Rolę głównego nośnika obciążenia przejmuje tu system rozciąganych dolnych obręczy „b”, podwieszonych wzajemnie za pomocą radialnych lin „d” kotwionych w pojedynczym ściskającym pierścieniu zewnętrznym „i” (il. 12).

tion, they are compressed by the horizontal components of pulling forces “f”.

In the case of rings “b” they are pulled by the forces generated by bending from the circumferential moment and, in addition, they are pulled by the horizontal components of pulling forces “e”.

#### *Radial-circumferential system “V”*

In the case of “V”-type configuration, the diagram of slab behaviour is the combination of cases “III” and “IV”. Therefore, in order to apply reinforcement simulating the system of principal tensile forces in a reinforced concrete slab, the systems of equipotential bars “b” and radial bars “e” (Fig. 11) must be applied. By analogy, equipotential and meridional compression bands “a, c” will form in the upper zone of the concrete section.

In the case of a beam grid with the “V”-type geometry it is noticeable that the circumferential members perform an assisting and relieving function for the bent radial beams. As the circumferential beams rotate freely in the nodes together with the bent radial beams, no torsional moments are formed in them. In particular nodes the compressive forces from the upper strip of radial beams penetrate the upper strips of circumferential beams. The same happens at the lower strip level. As a result, bending moments are formed in the circumferential beams, and those from the symmetrical loads are constant on the whole circumference of the ring.

#### *Radial-circumferential system “VI” with a hole*

In the case when there is a central hole in the “VI”-type grid, the meridional beams are discontinued and then the circumferential rings perform the necessary load-carrying function – supporting the ends of the radial ribs.

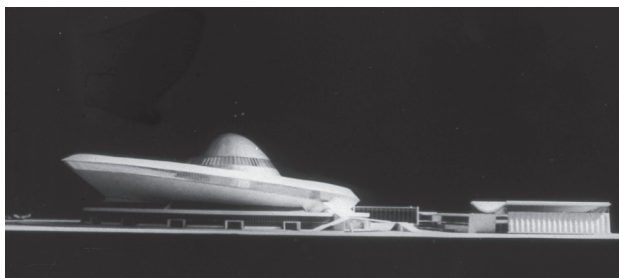
The solution with a hole offers the possibility of constructing a central skylight. The moment at the inner end of the radial beam is counterbalanced by the moments generated in the members coming from both sides of the ring. As the radial moment must be counterbalanced by the two identical circumferential moments, these moments will be greater the greater is the angle between the ring-forming radial members.

#### *Tensegrity-type cover*

It is also possible to apply the “IV”-type suspended system with the upper compression rings removed (Fig. 12). The system will change from a bending moment transferring system (characteristic of the rigid slab) into a suspended system. Such a system is characterised by a low deadweight index, but features large local deflections from asymmetrical loads. Therefore, the application of a membrane cover is the most suitable for this type of structure.

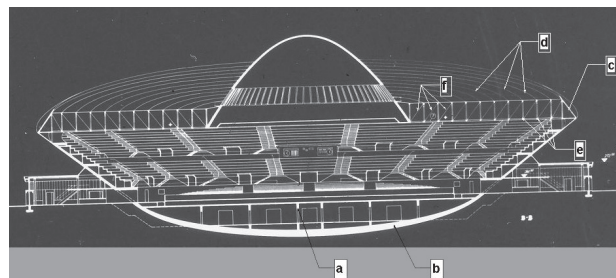
The role of the principal load carrier is taken over here by the system of lower tension rings “b”, suspended one from another by means of radial cables “d” anchored in the single external compression ring “i” (Fig. 12).





Il. 13. Model zwycięskiej koncepcji zrealizowanej w zespole W. Zalewskiego w konkursie SARP-u na projekt hali sportowej w Katowicach w 1959 r. (zdjęcie z archiwum W.Z.)

Fig. 13. The view of the winning concept developed by W. Zalewski's team in the SARP contest for the design of a sports hall in Katowice in 1959 (the photograph comes from W.Z. archives)



Il. 14. Przekrój Spodka w wersji konkursowej przedstawia oryginalne rozwiązanie konstrukcji przekrycia autorstwa W. Zalewskiego (zdjęcie z archiwum W.Z.)

Fig. 14. The section of Spodek in the contest version shows the original structural solution for the cover developed by W. Zalewski (the photograph comes from W.Z. archives)

### *Etapy kształtowania formy i rozwiązań konstrukcyjnych hali Spodka*

O złożoności projektu Spodka i stopniu trudności procesu tworzenia tej konstrukcji może świadczyć już sam model hali przedstawiony na ilustracji 13 i 14.

#### *Proponowane rozwiązania Wacława Zalewskiego*

Profesor, będąc zwolennikiem projektowania „architektury czytelnej funkcji”, przewidział dla hali charakterystyczną stożkową geometrię widowni. Integralną jej częścią był fundament powłokowy z dnem skrzyniowym „a” (il. 14), umożliwiający „pływanie hali niczym okręt”<sup>6</sup> w słabym gruncie [3].

Dla konstrukcji dachu zaproponował system typu „IV” (il. 4) – koncentrycznych pierścieni „d” (il. 14) podwieszonych wzajemnie za pośrednictwem wieszaków „f” i kotwionych ostatecznie do pierścienia zewnętrznego „c”. Jedną z zasadniczych przyczyn takiego kształtowania podjętego przez Profesora była potrzeba wytworzenia kołowego otworu na kopułę świetlika, wolnego od elementów konstrukcyjnych.

Celem przekonania inwestora do swego nowatorskiego pomysłu W. Zalewski dowiódł, że objętość materiału będzie dokładnie jednakowa dla systemu radialnych kratownic typu „III” oraz systemu jego pierścieni typu „IV”.

Ponieważ układ nośny wyseparowany z płyty pełnej jest wrażliwy na obciążenia skupione w modelu, założono sztywną tarczę jak w projekcie pierwotnym (il. 15) dachu, pokrywającą pierścienie, która kontroluje deformacje układu od nierównomiernych obciążeń.

#### *Zmiany warunków pierwotnych projektu*

Początkowo dach Spodka miał być poziomy – jednakże o jego pochyleniu zdecydowały względy architektoniczne oraz funkcjonalne organizacji sceny i widowni, w której zaakcentowano oś główną o najlepszej widoczności, przygotowując zaplecze sceny w niskiej części obiektu.

### *Stages of shaping the form and structural solutions of the Spodek hall*

On the complex design of the Spodek and degree of difficulty of the creation process of this construction maybe attested by the model of the hall presented in illustrations 13 and 14.

#### *Solutions proposed by Professor Zalewski*

As a supporter of the “clear function architecture” design Prof. Zalewski designed a characteristic conical geometry for the hall auditorium. The shell foundation with a box bottom “a” (Fig. 14) was its integral part allowing “floating of the hall as a ship”<sup>6</sup> in a weak soil [3].

For the roof structure, W.Z. proposed a “IV”-type system (Fig. 4) of concentric rings “d” (Fig. 14) suspended one from another by means of hangers “f” and eventually anchored to the external ring “c”. One of the basic reasons for such shaping was the need to create a circular hole for a skylight dome, free from structural members.

In order to persuade the investor to accept his innovative idea, Prof. Zalewski proved that the material volume would be exactly the same as for the “III”-type radial truss system and for its “IV”-type ring system.

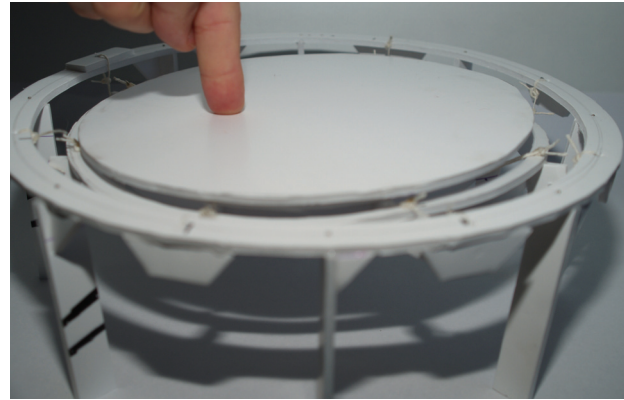
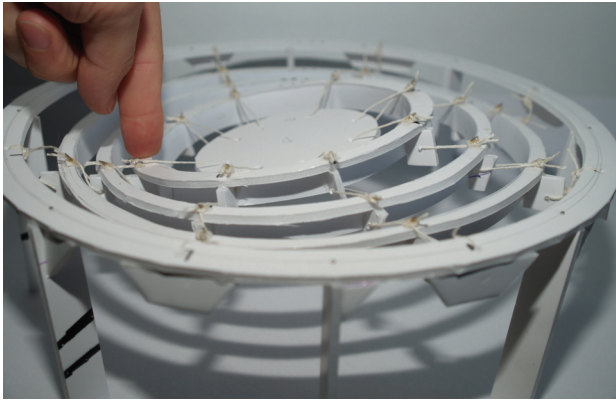
As the load-carrying system separated from the solid slab is sensitive to concentrated loads, both in the model and design, a rigid disc (Fig. 15) covering the rings was assumed for the roof in order to control the deformations of the system from non-uniform loads.

#### *Changes in the original design conditions*

Initially the Spodek roof was to be horizontal – however, its inclination was determined due to architectural as well as functional reasons concerning the stage and the auditorium in which the main axis with the best visibility was accentuated when preparing a backroom for the stage in the low part of the building.

<sup>6</sup> Cytat z wywiadu autora z prof. Wacławem Zalewskim.

<sup>6</sup> A citation from an interview with Prof. Wacław Zalewski.



Il. 15. Zdjęcia przedstawiają wrażliwość na deformacje układu pierwotnego *tensegrity* pod niesymetrycznym obciążeniem siłą skupioną. Po zastosowaniu sztywnej płyty pokrycia problem ten zostaje zlikwidowany (fot. M. Pelczarski)

Fig. 15. The photos show the original tensegrity system sensitivity to deformations under the load of an asymmetric concentrated force. After the application of a rigid cover plate the problem becomes resolved (photo by M. Pelczarski)

W konsekwencji geometrię obiektu stanowi odwrócony stożek o podstawie przyciętej płaszczyzną nachyloną pod kątem około 5,7 stopnia. Z kołowego więc dachu w wersji dachu poziomego utworzył się dach o kształcie eliptycznym. W tej konfiguracji Profesor przearanżował układy pierścieni w taki sposób, by oś kopuły świetlika umieszczona była nad środkiem boiska oraz by jej krawędź dolna była kołowa. Wymogi te oraz pochylenie dachu mocno skomplikowały układ kołowych pierścieni, które wpisywane mimośrodowo w elipsę musiały ulegać przerywaniu w miejscach „wtapiania” się kół w elipsę.

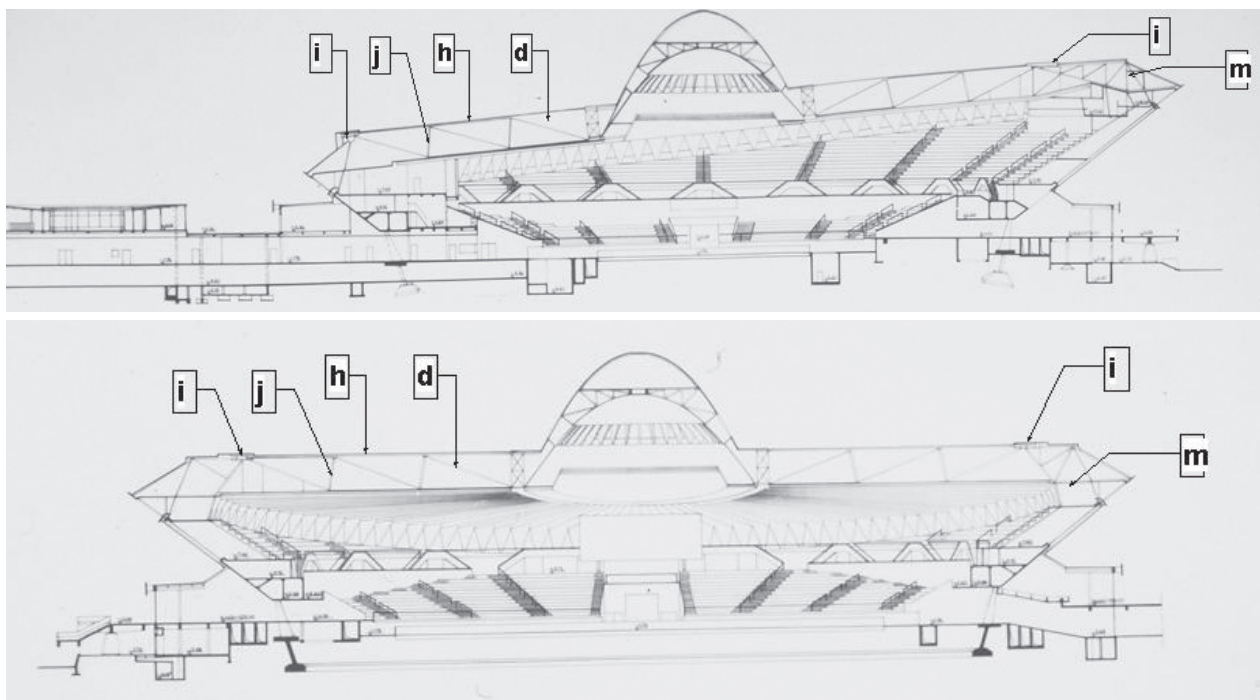
Pierwotnie hala miała być lokalizowana w pobliżu centrum na terenie o bardzo słabej nośności gruntu, jednakże ostatecznie przeniesiona została do ścisłego centrum Katowic przy skrzyżowaniu dwóch ważnych arterii aglomeracji. Nowe warunki gruntowe były jeszcze bardziej skomplikowane, ze względu na szkody górnicze i bezpośrednią bliskość czynnej kopalni węgla kamiennego „Kleofas”. Przewidywano możliwość wystąpienia: lokalnych zapadlisk, nieciągłości krzywizny terenu, nierównomiernego osiadania spowodowanego różnymi gruntami skalistymi oraz piaszczystymi, rozpełzania gruntu w płaszczyznach równoległych do osi głównej lub w płaszczyznach odchylnych o 30 stopni od tego kierunku, a także możliwości wystąpienia wygięcia terenu ku górze. Badania wykazały również występowanie masywu skalnego zalegającego w osi hali. Z powodu spodziewanych deformacji górniczych fundament musiał mieć minimalną powierzchnię styczności z gruntem. Jego wnętrze musiało zostać otwarte z powodu sztywnego masywu skalnego, który występował w nowej lokalizacji. Dodatkowym czynnikiem komplikującym rozwiązanie konstrukcyjne fundamentów było to, iż geometria wsporników dachu „m” (il. 16) mocowanych w żebrach widowni wymuszała odległe od źródeł obciążenia podparcie fundamentowe. Ostatecznie więc przyjęto bardzo oryginalne rozwiązanie reagujące aktywnie na deformację terenu niczym „okręt unoszący się na fali”<sup>7</sup> lub raczej swobodnie ją przepuszczający pod sobą.

As a consequence the object geometry is a reverse cone with its base inclined at an angle of approx. 5.7 degrees. Thus, a circular roof in the horizontal roof version changed its shape into an elliptic one. In this configuration W.Z. rearranged the system of rings in such a way that the axis of the skylight dome would be located above the centre of the playing area and that its lower edge would be circular. Those requirements and the roof inclination strongly complicated the system of circular rings which as being inscribed into an ellipse had to be discontinued in certain places where the circles “blend” into the ellipse.

Originally the hall was to be located near the city centre on soils with a low bearing capacity, however, it was eventually moved to the close vicinity of the centre of Katowice at the intersection of the two arterial roads of the agglomeration. The new soil conditions were even more complicated due to mining damage and the direct vicinity of productive coalmine “Kleofas”. It was anticipated that the following might occur: local sink holes, ground surface curvature discontinuity, non-uniform ground subsidence caused by different rock and sand soils, soil creep in planes parallel to the main axis or in planes inclined at 30 degrees from that direction as well as an up-warp of the ground surface. The research had also revealed the occurrence of rock massif in the hall axis. Owing to the expected mining deformations, the foundation had to have the minimum contact surface with the ground. Its interior had to be opened due to the rigid rock massif which occurred in the new location. Another factor which complicated the structural solution of the foundation was the fact that the geometry of roof brackets “m” (Fig. 16) mounted in the auditorium ribs forced the foundation support away from load sources. Thus, eventually, a very original solution actively reacting to the ground surface deformation as “a ship floating on a wave”<sup>7</sup> or rather passing it freely underneath was adopted.

<sup>7</sup> Z wywiadu autora z prof. inż. arch. Henrykiem Buszko.

<sup>7</sup> From an interview with architect Prof. Henryk Buszko.



Il. 16. Dwa główne przekroje istniejącej konstrukcji hali katowickiego Spodka. 120 jednakowych płaskich dźwigarów prętowo-ciężnowych „d, h, j” kotwionych jest w pierścieniu kopuły świetlika oraz w zewnętrznym pierścieniu „i”. Pierścień zewnętrzny ma geometrię kołową, a ze względu na eliptyczny obrys krawędzi dachu spoczywa on na wspornikowych kratownicach „m” o zmiennych wycięgach (schemat z archiwum W.Z.)

Fig. 16. The two main sections of the existing structure of the Spodek hall in Katowice. 120 identical flat cable-strut girders “d, h, j” are anchored in the skylight dome ring and in external ring “i”. The external ring has a circular geometry and due to an elliptic outline of the roof edge it rests on truss brackets “m” with variable spans (drawing scheme from W.Z. archives)

### **Ostatecznie zrealizowane rozwiązania konstrukcji przekrycia hali Spodka**

Ostatecznie, gdy Profesor był już poza granicami Polski, zespół projektowy w składzie m.in. inż. Andrzej Żórawski [10], [11], arch. Maciej Gintowt oraz arch. Maciej Krasieński zdecydowali o zastosowaniu systemu przekrycia składającego się z układu płaskich dźwigarów prętowo-ciężnowych. Był to najprawdopodobniej system łatwiejszy do realizacji w odchylonym od poziomu dachu, dodatkowo posiadającym obrys eliptyczny. Łatwiejszym również dlatego, że rozwiązanie dźwigara zaadaptowano prawdopodobnie z wcześniejszych realizacji eksperymentalnego budownictwa przemysłowego (il. 16).

W związku z powyższym konstrukcję dachu podzielono na dwa obszary: część kołową, w której rozpięto 120 jednakowych prętowo-ciężnowych dźwigarów, oraz część wspornikową „m”, dopełniającą do obrysu eliptycznego (il. 16).

Na schemacie (il. 17) przedstawiono ogólną zasadę pracy dźwigarów prętowo-ciężnowych. Na ilustracji 18 zaprezentowano dwa możliwe rozwiązania tego typu dźwigarów. W Spodku zastosowano rozwiązanie z pochylonymi słupkami. Poniżej opisano schemat pracy i budowy tych dźwigarów.

System radialnych układów prętowo-ciężnowych przewidzianych na sobie wzajemnie i kotwionych w pierścieniu zewnętrznym uzyskano po rezygnacji z dolnych pierścieni równoleżnikowych „b” systemu *tensegrity* i zastąpieniu ich linami radialnymi pasa dolnego „f” (il. 17).

### **Final solutions for the Spodek hall cover structure**

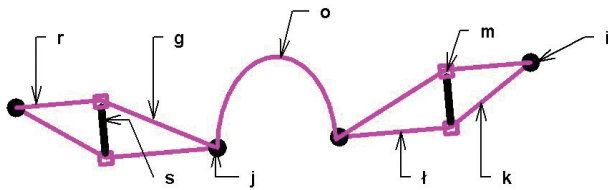
Finally, when Prof. Zalewski was already outside the Polish borders the design team composed of, inter alia, Andrzej Żórawski [10], [11], arch. Maciej Gintowt and Maciej Krasieński decided to apply the cover system comprising a system of flat cable-strut girders. This system was probably easier to develop in the inclined roof with an elliptic outline. It was also easier because the girder solution had been probably adapted from the earlier designs of experimental industrial building.

Therefore, the roof structure was divided into two areas: the circular part in which 120 identical cable-strut girders were spanned, and bracket part “m” to fill up to the elliptic outline (Fig. 16).

The diagram (Fig. 17) presents the general principle of the cable-strut girder system. The sketches in (Fig. 18) show the two possible solutions for this type of girders. A solution with inclined posts was applied in the Spodek and presented below is a description of structural behaviour and construction of these girders.

The complex of radial cable-strut systems suspended from each other and anchored in the external ring was obtained after giving up the lower circumferential rings (“b”) of the tensegrity system and replacing them with the radial cables “f” of the lower belt (Fig. 17).

However, the application of continuous cable members “k” (Fig. 18) running without resistance through intermediate nodes “m” requires that cable spacing posts “j” must



Il. 17. Schemat przedstawia uproszczony system płaskiej kratownicy prętowo-ciężnowej bardzo zbliżonej do rozwiązania zastosowanego w przekroju hali Spodka. Docelowo elementy „r, g” i „j, k” zostały wykonane z wiązki pojedynczych lin, więc węzły „m” zostały ostatecznie pominięte. System tego typu polega na wzajemnym podwieszaniu poprzez słupki „s” kolejnych układów podwieszających.

Na schemacie układ „j, k” dźwiga układ „r, g”, który dźwiga kopułę. Kable kotwione są w pierścieniu wewnętrznym „j” oraz w pierścieniu zewnętrznym „i”. Kopuła pełni funkcję balastu utrzymującego odpowiedni naciąg systemu, który dzięki temu nie jest wrażliwy na siły ssące od wiatru. Przechylenie układu powoduje, że składowe poziome obciążenia muszą być przejęte przez tarczę dachu i przeniesione na konstrukcję wspierającą pierścień zewnętrzny dachu (rys. autora)

Fig. 17. The diagram shows the simplified system of a flat cable-strut truss very similar to the solution applied to the Spodek hall cover.

Eventually, members „r, g” and „j, k” were made from a bunch of single cables so nodes „m” were finally left out. The system of this type is built by suspending one from another, through post „s” of the successive suspending systems. In the diagram, system „j, k” bears system „r, g” which, in turn, bears the dome. The cables are anchored in internal ring „j” and in external ring „i”. The dome plays the role of ballast maintaining the proper tension of the system, which thanks to this is not sensitive to suction forces from winds.

The inclination of the system causes the situation in which the horizontal components of loads must be taken over by the roof disc and transferred to the structure supporting the external ring of the roof (drawn by the author)

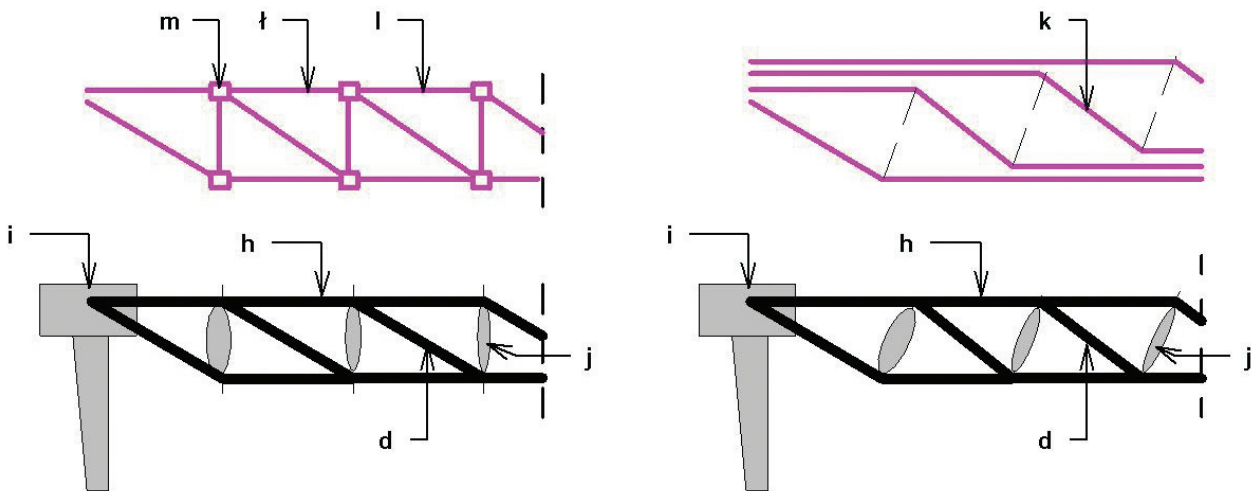
be situated in the bisector of the angle between them. The force in the cable tends to equalise its value before the node and after the nodes so a deviator post will be pushed into the axis of the resultant force, i.e. the equilibrium position.

### Conclusions – historical background

The considerations presented in this article mainly concerned the phases of shaping the roof structure of the Spodek hall and did not touch upon the equally interesting system of its foundations. There is no doubt, however, that no similar object has been so far built in the world and its architectural form as well as many of the applied solutions are unique on a global scale. Beyond the shadow of doubt, the design of the Spodek hall structure should be regarded as extremely bold and exceptional for those times but what is more important for the present times as well.

The hall was under construction for nearly 10 years in a reality when the computers were still fledging and in the conditions of political tensions between the central authority and the authorities of the Upper Silesia region. Invaluable support for the undermined investment was provided by General Jerzy Ziętek who, during the years 1964–1973, was the chairman of the Presidium of the Voivodship Council in Katowice<sup>8</sup>. An anecdote says

<sup>8</sup> [http://pl.wikipedia.org/wiki/Jerzy\\_Zi%C4%99tek](http://pl.wikipedia.org/wiki/Jerzy_Zi%C4%99tek) [accessed: 28.05.2013].



Il. 18. Schematy przedstawiają dwa typy dźwigarów prętowo-ciężnowych wykonanych z elementów krótkich łączonych w węzłach (lewy szkic) oraz z elementów przebiegających swobodnie przez węzły (prawy szkic). Schemat lewy górny przedstawia schemat kratownicy prętowo-ciężnowej zbudowanej z elementów „l, l'” łączonych w węzłach „m”. Siły w każdym elemencie są różne w zależności od miejsca i obciążenia. Schemat lewy dolny to dźwigar płaski prętowo-ciężnowy tworzony na podstawie schematu górnego. Ciężna „h” kotwiona są w ściskającym pierścieniu zewnętrznym „i”. Krzyżulce „d” podwieszają węzeł dolny, a słupki „j” podpierają węzeł górny. Schemat prawy górny przedstawia budowę dźwigara płaskiego prętowo-ciężnowego, w którym elementy linowe „k” przeciągane są w całości od pierścienia wewnętrznego do pierścienia zewnętrznego (rys. autora)

Fig. 18. The diagrams show two types of cable-strut girders made from the members joined in the nodes (left sketch) and the members running freely through the nodes (right sketch). The upper left sketch shows the diagram of a cable-strut built truss built from members „l, l'” joined in nodes „m”. The forces in each member are different depending on load and location. The lower left sketch shows the flat cable-strut girder created on the basis of the upper sketch. Cables „h” are anchored in external compression spring „i”. Cross braces „d” suspend the lower node, and posts „j” support the upper node. The upper right sketch show the structure of flat cable-strut girder in which cable members „k” are pulled in whole from the internal ring to the external ring (drawn by the author)

Przy zastosowaniu natomiast linowych elementów ciągłych „k” (il. 18), przebiegających bez oporu przez węzły pośrednie „m”, konieczne stało się usytuowanie słupków „j” rozpięających liny w dwusiecznej kąta między linami. Siła w linie dąży bowiem do wyrównania swej wartości przed węzłem i za węzłami, więc naturalnie słupek – dewiator „spychany” będzie w oś działania wypadkowej, tj. w pozycję równowagi.

### **Podsumowanie – tło historyczne**

Rozważania przeprowadzone w artykule dotyczyły głównie etapów kształtowania konstrukcji dachu hali Spodka i nie poruszyły zagadnień nie mniej interesującego systemu jej fundamentów. Nie ulega jednak wątpliwości, że podobny obiekt nie powstał dotąd na świecie i forma architektoniczna oraz wiele rozwiązań konstrukcyjnych w nim zastosowanych są wyjątkowe w skali światowej. Projekt konstrukcji Spodka bez cienia wątpliwości uznać można za niezwykle śmiały jak na tamte czasy, ale co ważniejsze – również na czasy dzisiejsze.

Hala powstawała blisko 10 lat w rzeczywistości raczkujących jeszcze komputerów i w trudnych warunkach politycznego napięcia między władzą centralną a władzami regionu Górnego Śląska. Nieocenione wsparcie dla podważanej inwestycji zapewnił gen. Jerzy Ziętek, który w latach 1964–1973 był przewodniczącym Prezydium Wojewódzkiej Rady Narodowej w Katowicach<sup>8</sup>. Anegdota mówi, że: „Gdy I sekretarz Władysław Gomułka dowiedział się o budowie piekielnie drogiej inwestycji w Katowicach, wydał zakaz budowy czegokolwiek innego niż obiektów przemysłowych. Budowa nie została jednak przerwana, ponieważ na wniosek generała Ziętka miejsce budowy osłonięto wysokim płotem, a kierowcy transportujący sekretarza byli pouczeni, by budowę opisywać jako przemysłową.

Koncepcja generała Ziętka polegała na wykorzystaniu wszelkich możliwości inwestycyjnych do stworzenia bazy zespołów sportu i usług kulturowych dla wielkich imprez, w tym olimpiady sportowej na Śląsku, o której marzył. Za planami ubiegania się Polski o organizację olimpiady przemawiały trzy argumenty:

– Polska była traktowana jako dopuszczalne dla świata oblicze komuny, żaden inny kraj bloku nie miał takiej samodzielności jak Polska,

– nasze kontakty ze światem organizacji pozarządowych były znaczne i jedne z silniejszych w bloku wschodnim,

– wysoka sprawność organizacyjna załogi gen. Ziętka wraz z technicznymi organizacjami górniczymi oraz architektonicznymi były gwarantem powodzenia ambitnego przedsięwzięcia.

Generał »postawił sobie za punkt honoru« uporządkowanie urbanistyczne konurbacji miast centrum Śląska zwanego później Górnośląskim Okręgiem Przemysłowym, a w szczególności miasta Katowice, które wówczas było zlepkiem przypadkowej zabudowy.

that: “When First Secretary Władysław Gomułka learnt about an extremely expensive investment under construction in Katowice, he issued a ban on constructing anything else apart from industrial structures. However, the construction process had not been discontinued because upon the motion of Gen. Ziętek the construction site was surrounded with a high fence and the drivers of the First Secretary were instructed to describe the construction site as an industrial one.

The concept of Gen. Ziętek involved taking advantage of any investment opportunities in order to create a sports and cultural support base for large events, including the Olympics in Upper Silesia which he dreamt about. There were three arguments behind the plans of the Polish endeavour for hosting the Olympics:

– Poland was considered as having a communist face acceptable to the world, no other country in the bloc enjoyed such autonomy as Poland did,

– Our contacts with the world of non-governmental organisations were wide and one of the strongest in the communist bloc,

– High organisational efficiency of Gen. Ziętek’s staff along with mining and architectural organisations were a guarantee of success in that ambitious undertaking.

Gen. Ziętek ‘set himself as a matter of honour’ a goal of urban transformation of the conurbation of central Silesia cities later called Upper-Silesian Industrial Region (Górnośląski Okręg Przemysłowy) and especially the city of Katowice which was then a cluster of accidental development.

The new objects included the Voivodeship Park of Culture and Recreation (in Polish: Wojewódzki Park Kultury i Wypoczynku)<sup>9</sup>, the Silesian Stadium (Stadion Śląski), the unique object of the Flower Hall and the nearby Baildon Hall covered with a suspension roof<sup>10</sup>. Also, the stadiums in Gliwice, Zabrze and in the neighbourhood underwent expansion.

Eventually, in spite of such intensive development the team of Gen. Ziętek was unable to complete the social and municipal plan<sup>11</sup>, nevertheless the valuable buildings still exist and most of them serve the inhabitants of the agglomeration.

Unfortunately, in 2012 the unique Baildon Hall was demolished according to a scenario similar to the Super-sam building, but still there is consolation in knowing that owing to proper inspection and maintenance the Spodek hall is still in good shape and has become a well-known symbol of Silesia.

*Translated by  
Bogusław Setkiewicz*

<sup>8</sup> [http://pl.wikipedia.org/wiki/Jerzy\\_Ziętek](http://pl.wikipedia.org/wiki/Jerzy_Ziętek) [data dostępu: 28.05.2013].

<sup>9</sup> The park is located in the industrial areas on the boundary of the cities Katowice, Chorzów and Siemianowice Śląskie and is one of the largest urban parks worldwide.

<sup>10</sup> Alfred Korpys was the author of the structure.

<sup>11</sup> From the author’s interview with architect Prof. Henryk Buszko.

Powstał wówczas Wojewódzki Park Kultury i Wypoczynku<sup>9</sup>, Stadion Śląski, unikatowy obiekt Hali Kwiatów, a w jego pobliżu Hala Baildonu przekryta dachem wiszącym<sup>10</sup>. Rozbudowie uległy również stadiony w Gliwicach, w Zabrze i okolicy. Ostatecznie jednak, pomimo tak intensywnego rozwoju, zespołowi gen. Ziętka nie udało się

dopełnić planu socjalno-komunalnego”<sup>11</sup>, mimo to cenne obiekty pozostały i większość z nich od lat służy mieszkańcom aglomeracji.

Niestety w roku 2002 wyjątkowa Hala Baildonu została rozebrana według podobnego scenariusza co obiekt Super-samu, ale pocieszające jest, że Spodek dzięki właściwemu dozorowi i konserwacji nadal jest w dobrej kondycji i stał się powszechnie znanym na świecie symbolem Śląska.

<sup>9</sup> Park zlokalizowany jest na terenach poprzemysłowych na granicy miast: Katowic, Chorzowa i Siemianowic Śląskich. To jeden z największych parków miejskich na świecie.

<sup>10</sup> Autorem konstrukcji był inż. Alfred Korpys.

<sup>11</sup> Z wywiadu autora z prof. inż. arch. Henrykiem Buszko.

### Bibliografia/References

- [1] Allen E., Zalewski W., *Form and Forces, Designing efficient expressive structures*, John Wiley & Sons, Hoboken 2010.
- [2] Dąbrowski O., Kolendowicz T., *Poradnik inżyniera i technika budowlanego*, t. 3, Arkady, Warszawa 1998.
- [3] *Informacje o warunkach geologiczno-górnictwa*, WUG, Katowice 2009.
- [4] Kączkowski Z., *Płyty – obliczenia statyczne*, Arkady, Warszawa 1968.
- [5] Kobiak J., Stachurski W., *Konstrukcje żelbetowe*, Arkady, Warszawa 1960.
- [6] Kuś S., *Szybkie metody sprawdzania sił wewnętrznych w konstrukcjach*, [w:] A. Richhart (red.), *Nowe osiągnięcia nauki i techniki w budownictwie*, materiały konferencyjne, Rzeszów 2005, 135.
- [7] Rękopisy Profesora Wacława Zalewskiego [w posiadaniu autora artykułu].
- [8] Starosolski W., *Konstrukcje żelbetowe*, t. 2, PWN, Warszawa 1998.
- [9] Stiglat K., Wippel H., *Platten*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1966.
- [10] Zamorowski J., *Specyfika konstrukcji Hali Widowiskowo-Sportowej – Spodek w Katowicach*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2011, z. 58, 422–432.
- [11] Żurawski A., *Konstrukcja wojewódzkiej Hali Widowiskowo-Sportowej w Katowicach*, praca doktorska, Warszawa 1977.

### Streszczenie

Powyższy artykuł poświęcony jest rozważaniom na temat sposobów konstruowania ekonomicznych systemów stropowych i dachowych w oparciu o analizę pracy kołowej płyty zginanej podpartej ciągle na obwodzie. Spektakularnym rezultatem takich rozważań jest pierwotna konstrukcja dachu hali Spodka zaproponowana przez prof. Wacława Zalewskiego, która wniosła do zestawu rozwiązań dostępnych dla inżynierów i architektów pierwsze rozwiązanie z opatentowanej później rodziny typu *tensegrity*. W artykule przedstawiono również schematy ostatecznie zastosowanego rozwiązania konstrukcji dachu tego obiektu.

**Słowa kluczowe:** Spodek, *tensegrity*, praca płyty kołowej, momenty główne równoleżnikowe

### Abstract

This article is about the methods of designing economic floor and roof structures based on the work of a circular bending plate, supported continually at the edge. A spectacular result of such considerations was the first tensegrity system defined by Prof. Wacław Zalewski which contributed to the set of solutions accessible to engineers and architects as the first solution of which later a patent was taken for the tensegrity type of group. The article also shows the final solution of the roof structure of the Spodek hall.

**Key words:** Spodek, tensegrity, structural behaviour of circular slab, circumferential moments