



Michał Pelczarski*

***Strumienie sił w teorii Wacława Zalewskiego
jako narzędzie projektanta w kształtowaniu architektury konstrukcji.
Podstawowe zasady, metody dydaktyczne, przykłady realizacji***

***Streams of forces in Wacław Zalewski's theory
as a designer's instrument in forming constructional architecture.
Basic principles, didactic methods, examples of realisations***

Wprowadzenie

Metody przedstawione w poniższym opracowaniu mogą stanowić narzędzie pozwalające na lepsze zrozumienie sposobu zachowania się formy pod obciążeniem. Graficzny oraz fizyczny charakter metod może lepiej trafić do wyobraźni projektanta i rozbudować w nim intuicyjne „czucie konstrukcji” oraz wzmocnić możliwości przeprowadzenia samodzielnej analizy wytworów własnej wyobraźni. Celem artykułu jest przedstawienie metod tworzenia formy oraz jej systemu konstrukcyjnego odpowiedniego do zadanych warunków projektowych i zgodnego z warunkami „poprawnej” statyki. Omówiono w nim proste narzędzia do uniwersalnej uproszczonej analizy konstrukcji przydatnej podczas podejmowania szybkich decyzji projektowych [1]–[3], kiedy to w umyśle projektantów decyzje kształtowania formy muszą być nieustannie i natychmiastowo weryfikowane przy użyciu narzędzi inżynierskich oraz architektonicznych. Opracowanie stanowi istotne uzupełnienie obecnego rozumienia pracy konstrukcji przekazywanego w sposób

Introduction

The methods presented in this article may constitute an instrument which makes it possible to understand better the way forms behave under a load. A graphic and physical character of methods can appeal to designers' imagination in a better way and help them develop an intuitive “feeling of a construction” as well as enhance possibilities of carrying out an independent analysis of products of their own imagination. The purpose of this article is to show methods of creating a form and its constructional system which is adequate to designing conditions and in accordance with conditions of “correct” statistics. The article discussed simple tools to be used in an universal simplified analysis of a construction, which is useful when making quick design decisions [1]–[3], especially when decisions concerning a form shaping must be continually and instantly verified by means of engineering as well as architectural instruments in the minds of designers. The article constitutes an important complement of current understanding of the construction work, which is transmitted in a traditional way. A more inquisitive reader will find fuller explanations of the discussed issues in books on statistics and material strength. The article was based on numerous phone calls and two scientific trips to Boston where Professor Zalewski lives (Fig. 1).

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

tradycyjny. Bardziej dociekliwy czytelnik znajdzie głębsze wyjaśnienia poruszanych tu zagadnień w książkach dotyczących statyki i wytrzymałości materiału. Artykuł oparto na licznych rozmowach telefonicznych oraz dwóch wyjazdach naukowych do Bostonu, gdzie mieszka obecnie Profesor Zalewski (il. 1).

Zalety metody strumieni sił

Dzięki zastosowaniu metody strumieni sił modele przepływu sił w konstrukcji sprowadzane są do czytelnego i sugestywnego zapisu graficznego, a rozwijanie rozumienia pracy konstrukcji może pozwolić młodym projektantom na krytyczne spojrzenie na wyniki analiz komputerowych. Siła metody leży również w dobrej wizualizacji pracy konstrukcji, albowiem – jak mówi W. Zalewski – „Geometria też przecież jest matematyką”, a ponieważ obraz lepiej trafia do wyobraźni, warto geometrię stosować w kształtowaniu wstępnym.

Tradycyjne podejście realizowane w obliczeniach inżynierskich, polegające na mierzeniu naprężeń w przekrojach prostopadłych i równoległych do krawędzi badanej konstrukcji, fałszuje często obraz pracy konstrukcji i nie daje syntetycznego spojrzenia projektującemu. Metoda strumieni sił pozwala natomiast na obserwację realnych przepływów sił, w przeciwieństwie do obrazu trudnych do interpretacji naprężeń generujących się w zadanym punkcie konstrukcji. Znajomość realnych przepływów sił daje również możliwość intuicyjnego kształtowania konstrukcji, nawet mniej wtajemniczonym projektantom.

Zasady ogólne metody strumieni sił

Metoda jest szczególnie wartościowa w obszarach, gdzie zastosowanie ma podstawowe ujęcie prawa Hooke'a¹ i liniowy rozkład naprężeń na wysokości przekroju. Metoda operuje strumieniami sił, reprezentującymi działania określonych strumieni naprężeń. Jak bowiem wiadomo, w każdym ciele poddanym działaniu sił tworzy się sieć linii zwanych trajektoriami naprężeń głównych².

W związku z powyższym, wzór dróg, którymi obciążenie przenoszone może być do podpór, może być zbliżony do przebiegu trajektorii naprężeń głównych. Znając te drogi, projektant może obserwować, jak konstrukcja „działa” i „pracuje”. W metodzie każdy kanał transmisji sił wewnętrznych symbolizowany jest za pośrednictwem pręta przenoszącego określoną siłę jednostkową, a grubość pręta informuje o intensywności siły w nim panującej.

Idea metody polega więc na graficznym obrazowaniu sił wirtualnych, będących wypadkową naprężeń głównych panujących w danym punkcie. Łączenie sił wirtualnych prowadzi do powstawania łańcuchów sił obrazowo



Il. 1. Pracownia Wacława Zalewskiego.
Autor w trakcie wizyty naukowej u Profesora

Fig. 1. Wacław Zalewski's Studio.
The author on his scientific trip visiting Professor Zalewski

Advantages of the streams of forces method

Thanks to the application of the streams of forces method, models of a force flow in a construction are expressed as a readable and suggestive graphic record and developing the understanding of the structure work may allow young designers to view results of computer analyses more critically. According to W. Zalewski, who says that “geometry is still mathematics as well”, the power of the method also lies in a good visualisation of the construction work and because an image much better appeals to imagination, geometry is worth applying in the initial shaping.

A traditional approach, which is used in engineering calculations and consists in measuring stress in sections perpendicular and parallel to the edge of the examined structure, often falsifies the structural work image and does not provide a designer with a synthetic view. On the other hand, the method of streams of forces makes it possible to observe real flows of forces as opposed to an image of difficult to interpret stresses which are generated at a given point of the structure. The knowledge of real flows of forces also gives a possibility of intuitive shaping of a structure even for designers who are not so privy to secrets of the art of designing.

General rules of the streams of forces method

This method is particularly valuable in cases where the basic Hook's law¹ and a linear distribution of stresses at the height of the section are applied. This method operates with streams of forces which represent actions of specified streams of stresses. As it is known, in each body

¹ Obszar pracy sprężystej materiału, kiedy odkształcenia wybranego obszaru są proporcjonalne do naprężeń w nim panujących.

² Największych w danym punkcie naprężeń (ciśnień) normalnych, występujących na kierunkach wzajemnie prostopadłych i działających pod takim kątem do układu odniesienia, że naprężenia styczne są w nim zerowe.

¹ Region of resilient work of the material when deformations of a chosen region are proportional to stresses existing in it.

nazywanych strumieniami sił. Łącuchy zwykle tworzą układy kratownicowe z prętami ściskanymi i rozciągany-
mi, zbiegającymi się we wspólnych węzłach. Spośród
wielu strumieni sił wyszukać można powtarzające się
motywy: równoległe, wachlarzowe i obszary przejściowe
(„D”). Szkice z ilustracji 2 oraz 3 przedstawiają takie
kratownice stworzone przez W. Zalewskiego. Modele
z ilustracji 4, 5 oraz 6 demonstrują natomiast wyobraże-
nia studentów o możliwym przebiegu strumieni sił w za-
danym obszarze materii tworzącej ścianę pracującą w okre-
ślonych warunkach obciążeniowych.

Analiza jakościowa, a nie ilościowa

Metoda strumieni sił, jako metoda jakościowa, daje
wystarczająco dokładne wyniki pozwalające na racjonal-
ne, świadome kształtowanie formy, która w kolejnym
etapie projektowania poddana może zostać gruntownej
analizie statycznej, przy zastosowaniu dowolnego progra-
mu komputerowego MES³. Programy te, z dużą obecnie
dokładnością, naśladują zachowanie się realnego materia-
łu, lecz wymagają znacznego doświadczenia podczas we-
ryfikacji otrzymanych wyników. Istnieje więc wysokie
prawdopodobieństwo, iż stosując metodę strumieni w fazie
kształtowania formy konstrukcji, wyniki szczegółowej
już analizy cyfrowej będą znacznie zbliżone do przewidy-
wanych wcześniej wartości i nie wpłyną znacząco na
zmianę zasadniczych założeń projektu początkowego.
Metoda daje również spory zakres pewności architektowi
i umożliwi świadome jej kształtowanie i otworowanie.

Zasadnicze etapy metody strumieni sił

Podczas stosowania metody projektant powinien
przejsć przez kilka zasadniczych etapów:

1. Zdefiniowanie obszaru obiektu i dopuszczalnego
zarysu materiału konstrukcyjnego.
2. Budowa optymalnego wiazara (złożonego z wirtual-
nych strumieni sił) w ograniczonym obszarze zdefiniowa-
nym. Przy czym za optymalny uznaje się tu układ zuży-
wający minimalne objętości materiału, przy założeniu
maksymalnego (bezpiecznego) wyężenia jego elemen-
tów.
3. „Pokrycie” materiają poszczególnych linii, reprezen-
tujących pręty, w zależności od ich wyężenia.
4. Usunięcie materiału z miejsc, gdzie siły nie wystę-
pują lub są pomijalnie małe.
5. Przewidywanie, jak „natura” skierowałaby przepły-
wy sił w danych warunkach i poszukiwanie, czy zbudow-
wany model odpowiada takim kierunkom oraz jak bardzo
od nich odbiega.

Model kratownicowy

Jak już wspomniano, łącuchy sił tworzą zwykle układy
kratownicowe. Większość ustrojów można bowiem
przedstawić za pomocą wirtualnego układu prętów.

which is exposed to an action of forces a network of lines
called main stress trajectories are created².

Accordingly, a pattern of ways along which loads may
be transferred to supports can be similar to the main stress
trajectories. Having the knowledge of these ways a de-
signer is able to observe how a construction “operates”
and “works”. In this method each transmission channel of
internal forces is symbolised via a rod carrying a specified
unit force and the rod’s thickness gives the information
about the intensity of a force existing in it.

Therefore, the idea of the method consists in a graphic
representation of virtual forces being a resultant of main
stresses which are present at a given point. Joining virtual
forces creates chains of forces which are figuratively
called streams of forces. The chains usually form truss
systems with compressed and stretched rods which con-
verge at common junctions. Among many streams of
forces we can distinguish repeating motives, i.e. parallel,
fan and transitional regions (“D”). Sketches in Figures 2
and 3 present this type of trusses created by W. Zalewski.
On the other hand, models in Figures 4, 5 and 6 demon-
strate students’ ideas about a possible streams of forces
course in a given region of matter which forms a wall
working in specified loading conditions.

Qualitative analysis, not a quantitative one

The method of streams of forces as a qualitative meth-
od gives sufficiently accurate results making it possible to
shape a rational and conscious form which in the next
stage of designing may undergo a thorough statistic analy-
sis by applying an optional computer program FEM³.
These programs, with high accuracy at present, imitate
behaviour of a real material but they require a consider-
able experience while verifying obtained results. There-
fore, there is a high probability that by using the method
of streams in the phase of shaping a structure form, the
results of a detailed digital analysis will be very similar to
the previously anticipated values and will not signifi-
cantly influence the change of basic assumptions of the
initial design. This method also offers a designer a con-
siderable scope of certainty and enables its conscious
shaping and creating the openings.

Basic stages of the method of streams of forces

During the application of the method a designer should
go through several fundamental stages:

1. Defining the region of an object and a permissible
outline of the constructional material.
2. Building structure of an optimal truss (consisting of
virtual streams of forces) in the limited defined region.
And the optimal system is considered to be the one which
uses a minimum volume of the material assuming the
maximum (safe) effort of its elements.

² The greatest normal stresses (pressures) in a given point existing
in directions mutually perpendicular and operating under such an angle
to a reference system that tangential stresses have a zero value there.

³ Finite element method.

³ Metoda elementów skończonych.

Kształtując te układy w metodzie strumieni, należy znaleźć takie ich konfiguracje, by „naśladowały” one kierunki głównych sił wewnętrznych. Układy takie dają bowiem minimalną objętość materiału, są z reguły najsztwytniejsze i często posiadają znaczne walory estetyczne.

Chcąc stworzyć nową konstrukcję, buduje się w określonym obszarze przestrzeni kratownicę, której zadaniem będzie transmisja obciążenia od punktu jego przyłożenia do punktów podparcia. Stworzyć można wówczas niezliczoną liczbę poprawnych statycznie modeli kratownicowych przenoszących siły w konstrukcji, jednakże istnieje tylko jedna taka konfiguracja, która bliska będzie przebiegowi strumieni sił, jaki powstałby naturalnie w takim obszarze konstrukcji. Będzie to konfiguracja prętowa o minimalnej objętości materiału, kształtowana przy założeniu, że materiał wszystkich elementów wykorzystany jest całkowicie i naprężenia w elemencie równe są naprężeniom granicznym dla danego materiału.

Projektowanie W. Zalewskiego ogniskowało się właśnie wokół tej zasady, by w elementach struktury minimalizować, na ile to możliwe, kosztowne materiałowo zginanie, a strumieniom sił dać „ujście” drogą najbardziej naturalną z możliwych absorbującą minimalną ilość energii wewnętrznej. Taką więc, jaką wybrałaby natura w cieple sprężystym wypełniającym dostępną przestrzeń.

Modelowanie przy zastosowaniu metody strumieni sił

Ponieważ każdy z nas ma intuicyjne wyczucie z obszaru statyki, w które zostaliśmy niejako od urodzenia wyposażeni, modelowanie fizyczne jest bardzo pomocnym narzędziem projektowania, wzmacniającym i rozbudowującym te wrodzone umiejętności. Stosując metodę strumieni sił, „pracujemy na obrazach, a nie słowach i liczbach” – jak mówi Profesor.

Modelowanie graficzne oraz fizyczne daje możliwość obserwacji procesu projektowego „oczyma wyobraźni” i pozwala uruchomić zmysły – wzroku, dotyku oraz wyczucia równowagi. Zmysły te nie są niestety uruchamiane podczas stosowania ścisłych metod matematycznych, przy czym przez modelowanie graficzne rozumie się tu stosowanie m.in.: metody strumieni sił i jej kalibrację⁴, oraz metod graficznych w statyce, pozwalających na obserwację i kontrolę gry sił w konstrukcji.

Metoda strumieni sił może być bardzo pomocna architektom, ponieważ zwykle pozwala na generowanie konstrukcji inspirowanych rozwiązaniami natury, zawierającymi w sobie pierwiastek piękna „naturalnego”, a – jak powiada W. Zalewski – „poszukiwanie tych inspiracji rodzi często formy «sympatyczne»”.

Na tym etapie projektant musi więc zadawać sobie pytanie, jak „natura” zorganizowałaby przebieg sił w danym obszarze materii, i tworzyć równocześnie otwory (jeśli to potrzebne) tam, gdzie wyężenie jest minimalne.

Na każdej mapie naprężeń można wyszukać trzy powtarzalne motywy – „patterns”, a znając podstawowe wzory

3. “Covering” particular lines representing rods with matter, depending on their effort.

4. Removing the material from places where forces are not present or are negligible.

5. Anticipating how “nature” would direct flows of forces under given circumstances and investigating whether a designed model corresponds to such directions or how much it differs from them.

Truss model

As it was mentioned above, the chains of forces usually create truss systems. Most structures can in fact be presented by means of a virtual system of rods. Shaping these systems in the method of streams such configurations should be found so as they could “imitate” directions of the main internal forces. These systems give a minimum volume of the material, they are generally stiffest and they often have considerable aesthetic values.

If a new structure is to be created, a truss whose task is to transmit the loading from the point of its application up to support points is built in a given region of space. Then it is possible to create an unlimited number of statistically correct truss models transferring forces in the construction, however, there is only one configuration which will be close to the course of streams of forces that would be created naturally in this region of the construction. This will be a rod configuration with a minimum volume of the material and shaped on the assumption that the material of all elements is used completely and stresses in the element are equal to the yield strengths for a given material.

W. Zalewski’s designing focused on this principle in order to minimise, if possible, expensive material bending in the elements of the structure and give the streams of forces an “outlet” through the most natural way possible absorbing a minimum amount of internal energy. The way that would be chosen by nature in an elastic body which fills the available space.

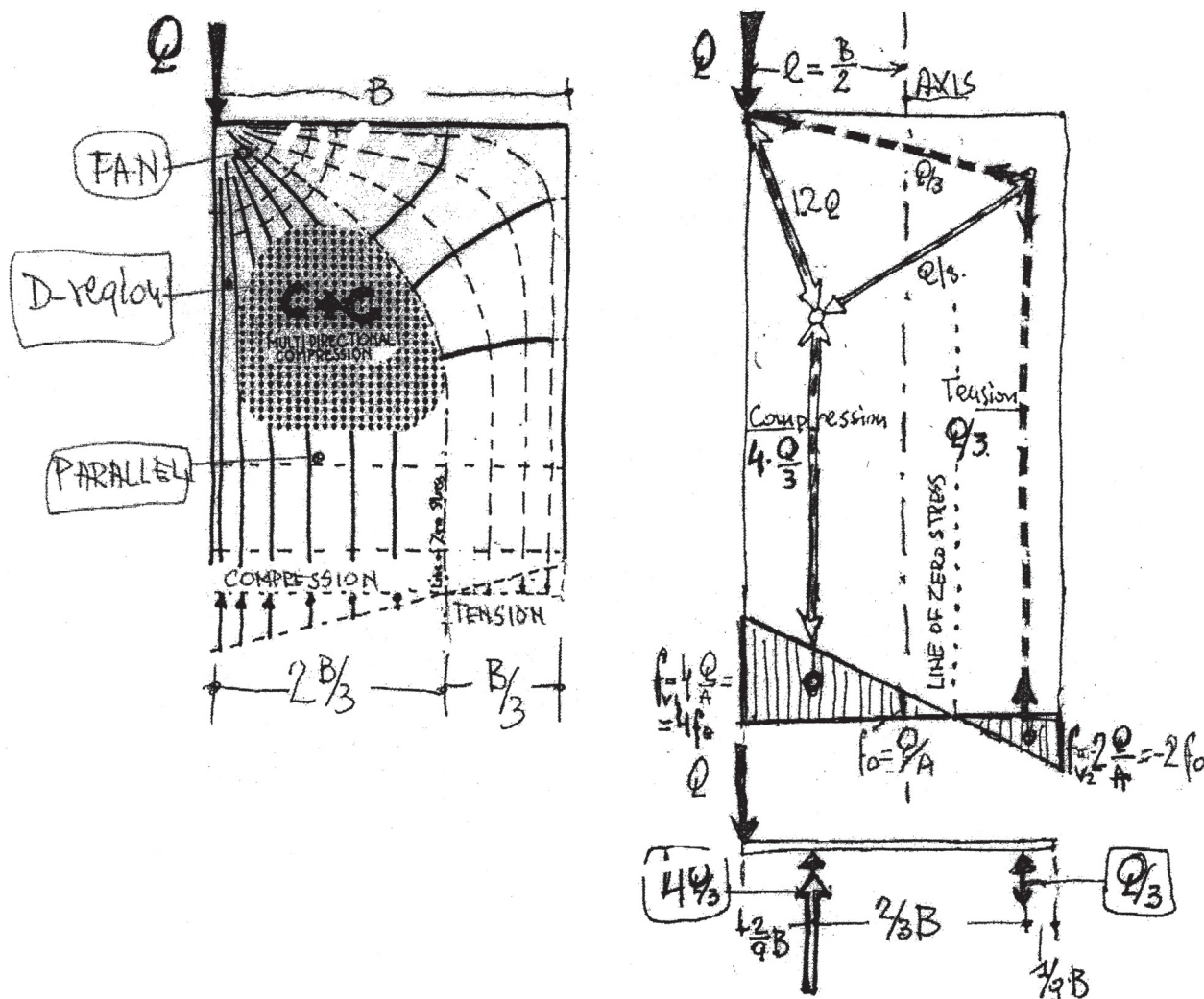
Modelling with the use of the method of stream of forces

Since each of us has an intuitive sense of statics, which we were somehow equipped with from birth, physical modelling is a very helpful instrument of designing which reinforces and develops these congenital skills. Professor Zalewski says that by applying the method of stream of forces “we work with images, not with words or numbers”.

Graphic and physical modelling gives a possibility of observing a designing process with “eyes of imagination” and allows us to activate our senses – sight, touch and a sense of balance. Unfortunately, these senses are not launched when using strict mathematical methods and by graphic modelling we understand the application of, among other things, the method of streams of forces and its calibration⁴ as well as graphic methods in statics which

⁴ Pod względem minimalnego ciężaru własnego kratownicy wirtualnej.

⁴ With regard to a minimum dead weight of the virtual truss.



II. 2. Autorskie szkice prof. Zalewskiego przedstawiające strumienie sił, jakie powstają w ścianie obciążonej w narożu, na dużym mimośrodzie. Po lewej – regiony typowych wzorów strumieni sił: *Fan* (wachlarzowe), *Parallel* (równoległe), *D-region* (od *disturbance*; obszar zakłóceń). W obszarze zakłóceń występuje strefa wielokierunkowego ściskania „C+C”. Po prawej – model prętowo-ciężnowy operujący wewnętrznymi siłami wypadkowymi, reprezentującymi poszczególne obszary strumieni sił. Na dolnej krawędzi ściany zobrazowano wartości i lokalizację wypadkowych reakcji powstających u jej podstawy⁵ [4]

Fig. 2. Original sketches by Professor Zalewski presenting streams of forces which are created in the loaded wall in the corner on the big eccentricity. On the left – regions of typical patterns of streams of forces: *Fan*, *Parallel*, *D-region* (*disturbance*).

In the disturbance region there is a zone of multidirectional compressing “C+C”. On the right – a rod-cable model operating with internal resultant forces that represent particular regions of streams of forces. Values and the location of resultant reactions produced at its base were presented on the lower edge of the wall [4]

geometryczne transmisji sił, jesteśmy w stanie budować je na obszarach pośrednich i następnie kalibrować⁶ w zależności od wielkości sił wewnętrznych w nich panujących.

W rozumieniu pracy konstrukcji bardzo pomocne jest również uproszczone rozumowanie fizyczne, gdzie skomplikowane zespoły elementów rozcina się wirtualnie i poszukuje w tych rozcięciach wartości sił zapewniających równowagę sił w badanym przekroju. Dla lepszego zobrazowania tych działań zamieszczono szkice prof. Zalewskiego przedstawiające wybrane etapy metody strumieni sił (il. 2, 3).

⁵ *Tension* – rozciąganie, *compression* – ściskanie, *axis* – oś, *line of zero stress* – linia naprężeń zerowych.

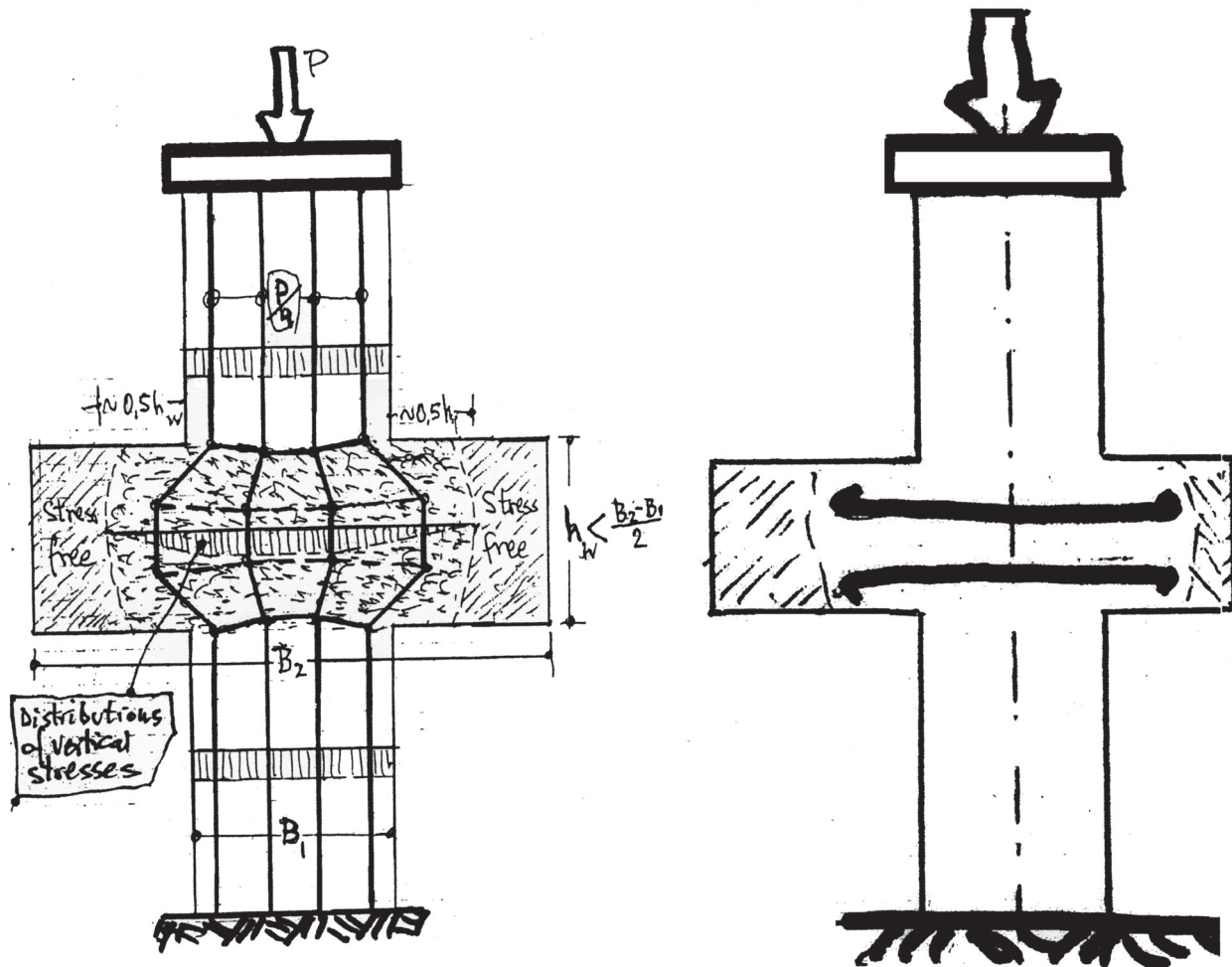
⁶ Nadając im grubość lub szerokość.

make it possible to observe and control the play of forces in the construction.

The method of streams of forces may be very helpful for architects because it allows them to generate constructions inspired by solutions of nature which include an element of “natural” beauty and according to W. Zalewski “a search for these inspirations often results in «sympathetic» forms”.

Hence, a designer at this stage must ask himself how “nature” would organise the course of forces in a given region of matter and at the same time create openings (if necessary) in places where effort is minimum.

On each map of stresses we can find three repeatable motives, i.e. “patterns” and knowing the basic geometrical formulas of the force transmission we are able to construct them in indirect regions and then cali-



Il. 3. Autorskie szkice prof. Zalewskiego. Po lewej – przedstawiający strumienie sił, jakie powstają w ścianie z dwoma krótkimi wspornikami, obciążonej osiowo oraz – po prawej – schemat jej niezbędnego zbrojenia⁷ [4]

Fig. 3. Original sketches by Professor Zalewski. On the left – presenting streams of forces which are produced in the axially loaded wall with two short supports and – on the right – a scheme of its necessary reinforcement [4]

W przykładzie przedstawionym na ilustracji 3 obciążenie do ściany przykładane jest osiowo za pośrednictwem stalowej płyty nieodkształcalnej. Po lewej widoczne są cztery obszary pracy ściany: górna i dolna strefa ściany, gdzie występują strumienie równoległe, środkowa strefa wachlarzowa i wolny obszar niepracujący. W strefie środkowej ściskane strumienie górne wnikają do obszaru wspornikowego po liniach krzywych i spotykają się z takimi samymi strumieniami dolnymi. Zakrzywienie strumieni ściskanych możliwe jest dzięki ciągnom znajdującym się w dwusiecznych kąta załamania strumieni ściskanych. Po prawej przedstawiono lokalizację niezbędnego zbrojenia pełniącego funkcję ciągn spinających „wybrzuszone” się strumienie ściskane.

Przedstawione na fotografiach (il. 4–6) modele pokazują, jak różne i ciekawe, w detalach, może być studenckie wyobrażenie kształtowania i pracy wirtualnych kratownic tworzących systemy strumieni sił. Modele obejmują zarówno systemy płaskie, jak i przestrzenne. Niezależnie jednak od technologii ich wykonania zawsze mają intrygującą archi-

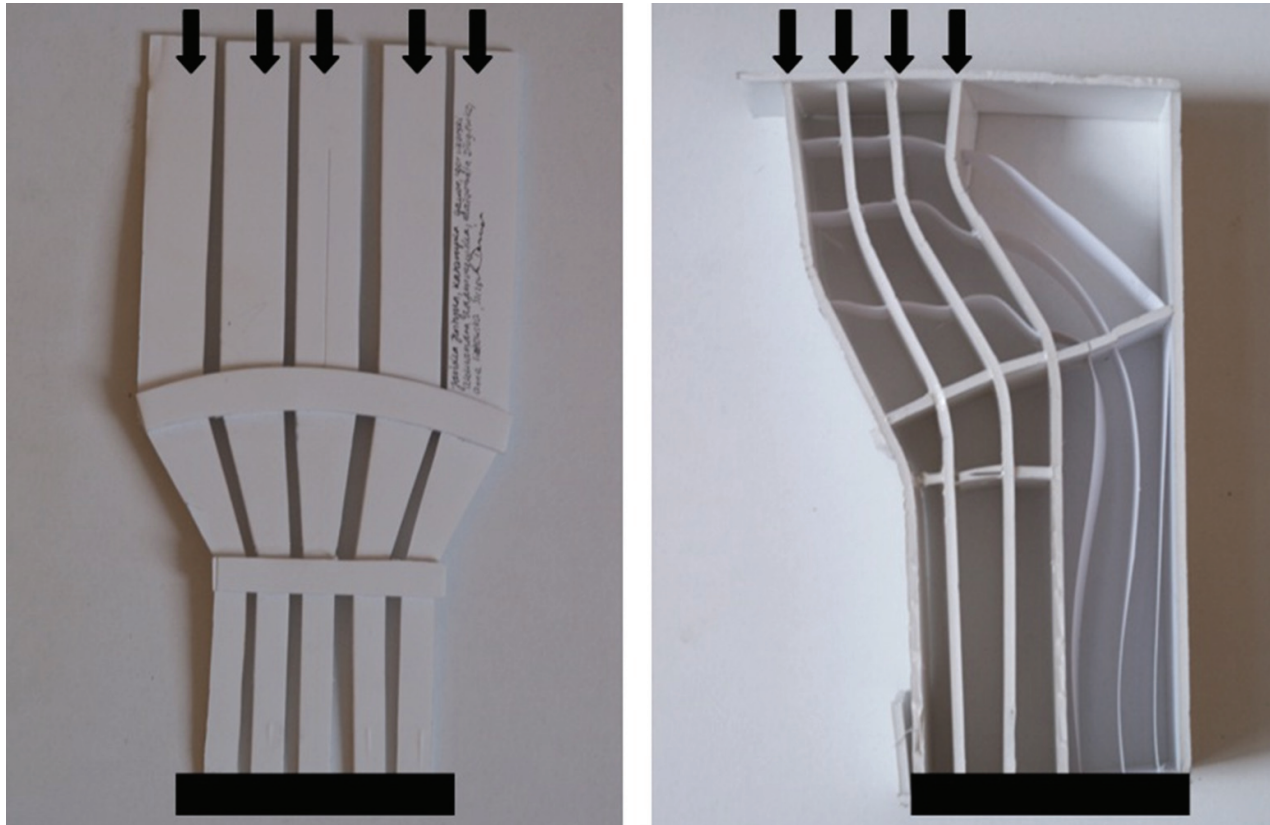
brate⁵ them depending on the size of the internal forces existing in them.

In terms of the construction work, a simplified physical understanding is also very helpful where complicated complexes of elements are virtually cut through and afterwards those cuts are searched for values of forces that ensure a balance of forces in a studied section. In order to depict these actions, see sketches drawn by Professor Zalewski and presented illustrating selected stages of the method of streams of forces (Fig. 2, 3).

In the example presented in Figure 3 a load is axially applied to the wall by means of a steel non-deformable plate. On the left four regions of the wall work can be seen, i.e. upper and lower zones of the wall where parallel streams appear along with a fan central zone and a free non-working region. In the central zone compressed upper stream penetrate into the support region along curved lines and come across the same lower streams. The curvature of the compressed streams is possible due to cables in bisectors of the angle of refraction of com-

⁷ Distribution of vertical stresses – rozkład naprężeń normalnych.

⁵ Giving them thickness and width.



Il. 4. Z lewej – interpretacja studentów płaskiego modelu strumieni sił generujących się w ścianie o geometrii typu „butelka”⁸. Z prawej – przestrzenny model ściany obciążonej mimośrodowo. Strumienie rozciągane wykonano z pasm papieru. Modele realizowane były na zajęciach z konstrukcji żelbetowych⁹. Strumienie sił oparto na mapach krzyży naprężeń głównych, pozyskanych z programu wykorzystującego metodę elementów skończonych (por. il. 7)

Fig. 4. On the left – a students' interpretation of the flat model of streams of forces generated in the geometry type walls called a “bottle”⁶. On the right – a spatial model of the wall loaded eccentrically. Stretching streams were made of paper strips. The models were prepared during classes in reinforced concrete structures⁷. Streams of forces were based on maps of main stress crosses obtained from the program which uses a finite element method (see Fig. 7)

teksturę. Modele tworzone były w oparciu o wyniki uzyskane z programu MES, przykładowo przedstawione na ilustracji 7. Długości ramion, krzyży naprężeń informują tu o intensywności naprężeń w danym punkcie. Po prawej stronie ilustracji 7 widoczna jest równomiernie obciążona ściana o geometrii typu „butelka”. Przekroje A-A1 oraz A-A4 obrazujące wykresy naprężeń normalnych¹⁰ pozwalają na obserwację obszarów najbardziej intensywnie rozciąganych oraz ściskanych, a wyznaczenie ich pola powierzchni pozwala na wyznaczenie wypadkowej ogólnych rozciągań oraz ściskań w danym obszarze przekroju. Fizyczne modele tego typu pozwalają na weryfikację ich poprawności poprzez obserwację zachowania modelu pod obciążeniem. Obserwacja daje również obraz pracy wirtualnej kratownicy i dobrze wskazuje jej elementy ściskane i rozciągane.

pressed streams. On the right we can see the location of indispensable reinforcement performing the function of cables coupling “bulging” compressed streams.

Models presented in photographs (Fig. 4–6) show how different and interesting in details students' images of formation and work of virtual trusses creating systems of streams of forces can be. The models comprise flat and spatial systems as well. However, regardless of the technology they always have intriguing architecture. These models were made on the basis of the results obtained from FEM program, which was presented as an example in Figure 7. The lengths of arms and crosses of stresses give us information about intensity of stresses at a given point. On the right side of Figure 7 we can see an evenly loaded wall with “bottle” type geometry. Sections A-A1

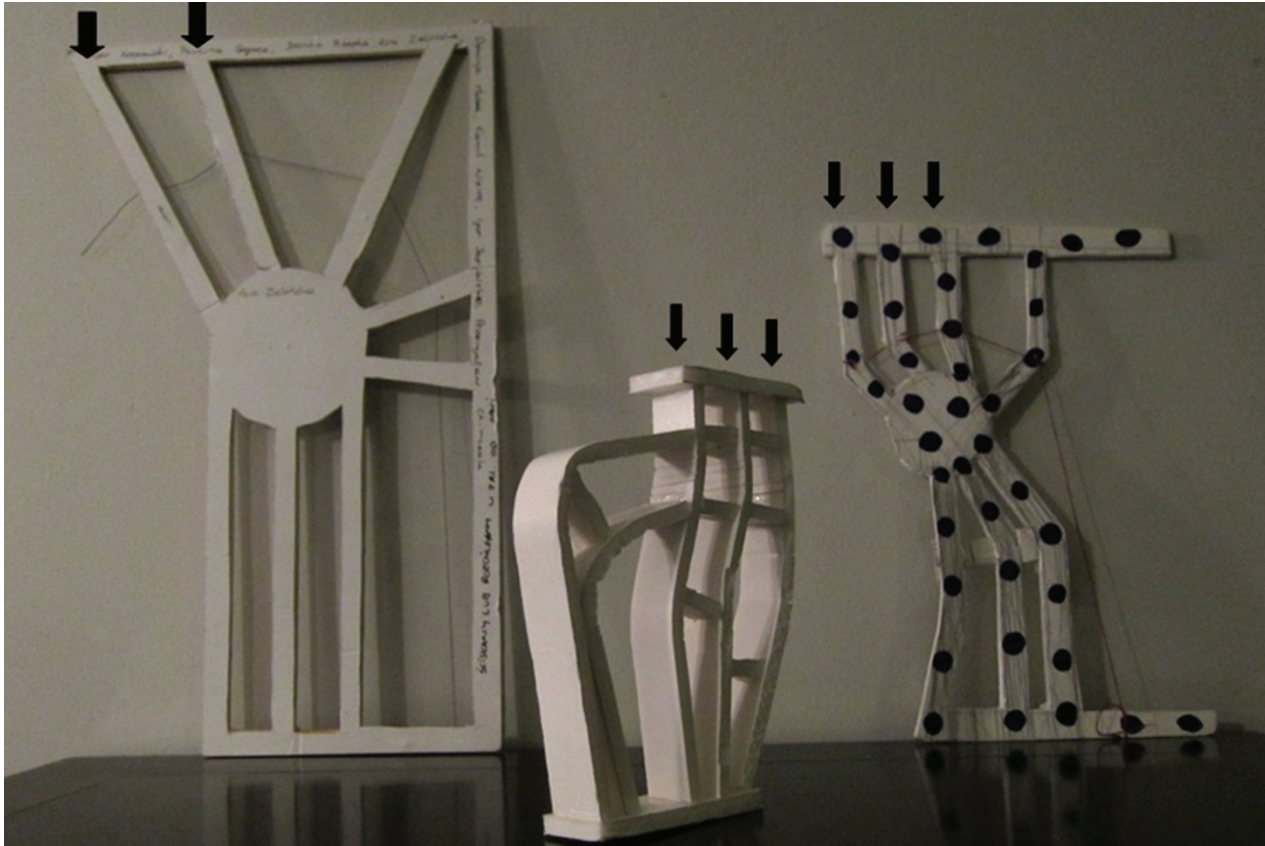
⁸ Model płaski jest znacznie łatwiejszy do wykonania, ponieważ nie musi uwzględniać zjawiska wybożenia oraz utraty stateczności prętów. Modele tego typu mogą być kontrolnie obciążane w momencie, gdy leżą na stole.

⁹ Autorzy modeli: J. Jańska, K. Gawor, I. Sikorski, A. Adamczewska, M. Długiewicz, A. Siekowska, D. Szczęch, P. Rynowicka, K. Jurkanis, M. Eisler, S. Żybert, A. Guderska, A. Haligowska.

¹⁰ Prostopadłych do tych przekrojów.

⁶ A flat model is much easier to make as it does not have to take into account a buckling phenomenon and loss of stability of rods. Models of this type can be loaded in a controlled way when they are placed at a table.

⁷ Authors of the models: J. Jańska, K. Gawor, I. Sikorski, A. Adamczewska, M. Długiewicz, A. Siekowska, D. Szczęch, P. Rynowicka, K. Jurkanis, M. Eisler, S. Żybert, A. Guderska, A. Haligowska.



Il. 5. Modele fizyczne strumieni sił generujących się w ścianach obciążonych silnie mimośrodowo w interpretacji studentów architektury. Dwa tylnie modele są typu płaskiego, jako że ten typ łatwiej zbudować i zanalizować bez zjawiska utraty stateczności¹¹

Fig. 5. Physical models of streams of forces that are generated in walls eccentrically strongly loaded, as interpreted by students of architecture. Two rear models are flat because this type is easier to be built and analysed without a phenomenon of a loss of stability⁸

Hotel w Kołobrzegu

Znakomitą polską realizacją i bardzo interesującym przykładem zastosowania metody strumieni sił jest konstrukcja hotelu w Kołobrzegu (il. 8–11), zaprojektowanego w latach 1960–1962 przez zespół konstruktorów w osobach: J. Draguły, W. Panorskiego, W. Zalewskiego, oraz architektów: J. Łowińskiego, J. Góreckiego, J. Zaremskiego.

Zasadniczą siłą motywującą prof. Zalewskiego do poszukiwań nowych form i rozwiązań konstrukcyjnych było tworzenie konstrukcji poprawnej, zgodnej z prawami fizyki materii i jednocześnie ściśle odpowiadającej zadanym potrzebom użytkowym. Szybko okazało się, iż takie podejście dawało również ciekawe wyniki architektoniczne. To właśnie środowisko architektów dostrzegło bowiem w jego projektach „ożywcze” intrygujące formy, które były wynikiem synergii i czystej często syntezy funkcji z prawami zachowania się materii pod obciążeniem. Wyjątkowość konstrukcji tego budynku polega na śmiałej idei podwieszenia powtarzalnych komórek pokoi

and A-A4 which present graphs of normal stresses⁹ allow us to observe regions most intensively stretched and compressed and determining their surface area makes it possible to designate a resultant of general stretches and compressions in a given region of the section. Physical models of this type allow us to verify their correctness through observation of a model's behaviour under a load. Observation also gives an image of virtual work of the truss and shows its compressed and stretched elements in a good way.

Hotel in Kołobrzeg

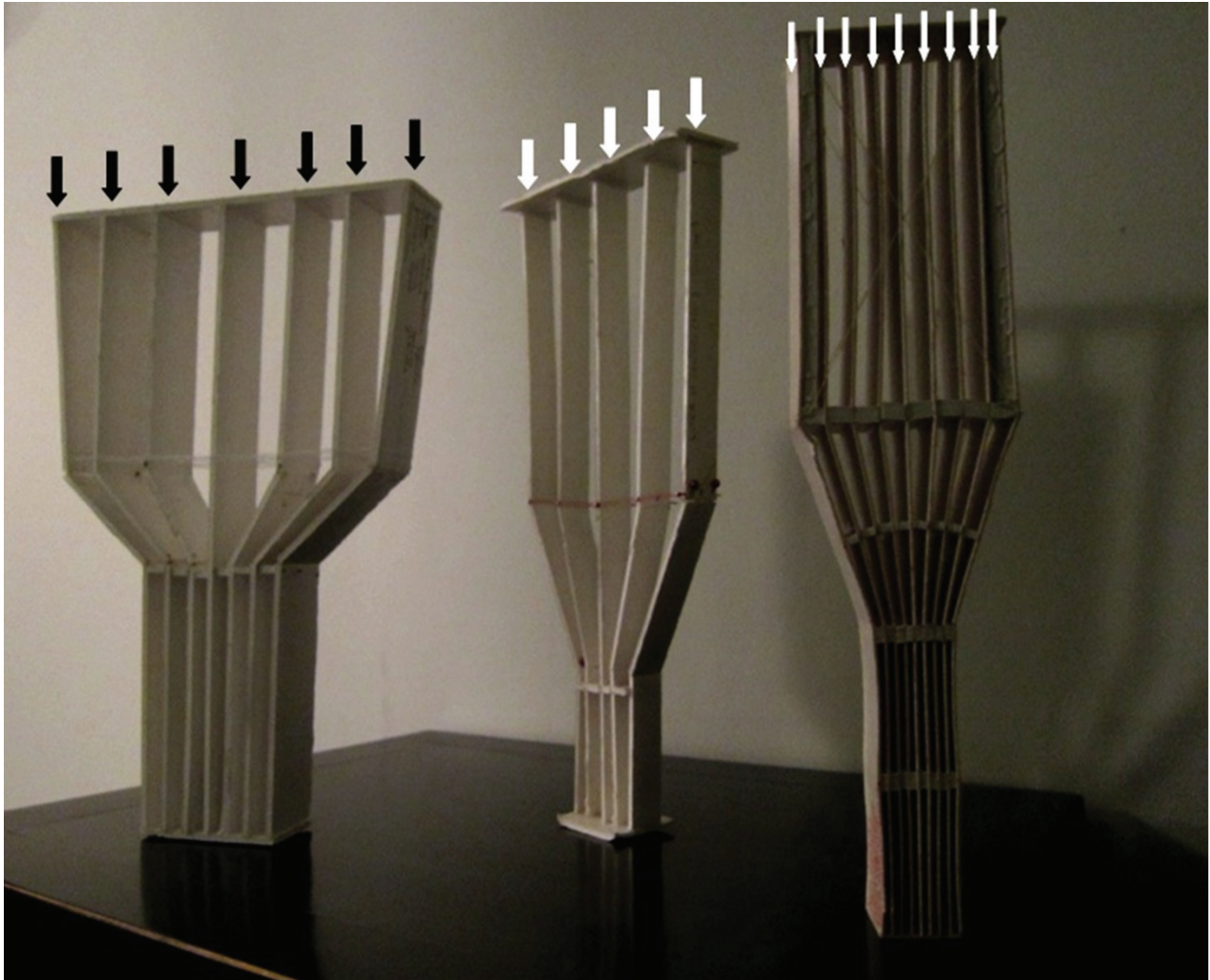
A hotel construction in Kołobrzeg (Fig. 8–11), which was designed by a team of constructors J. Draguła, W. Panorski, W. Zalewski and architects J. Łowiński, J. Górecki, J. Zaremski in the years 1960–1962, constitutes a Polish remarkable realisation and a very interesting example of applying a method of streams of forces.

A fundamental force which motivated Professor Zalewski to search for new forms and constructional solutions was the formation of the correct construction

¹¹ Autorzy – model lewy: P. Koszowski, P. Gogacz, J. Rzepka, A. Zielińska, D. Małek, K. Nizioł, I. Sapijaszko, P. Chimczak; model środkowy: L. Trochanowska, A. Zgraja; model prawy: M. Szydłowska, J. Sielska, A. Sawicka, J. Żyłowska, J. Woś, K. Kołodziejka, N. Ladzyńska.

⁸ Authors – left model: P. Koszowski, P. Gogacz, J. Rzepka, A. Zielińska, D. Małek, K. Nizioł, I. Sapijaszko, P. Chimczak; central model: L. Trochanowska, A. Zgraja; right model: M. Szydłowska, J. Sielska, A. Sawicka, J. Żyłowska, J. Woś, K. Kołodziejka, N. Ladzyńska.

⁹ Perpendicular to these sections.



Il. 6. Modele fizyczne strumieni sił generujących się w ścianach o geometrii typu „butelka” w interpretacji studentów architektury. Cechą szczególną przedstawionych tu modeli jest ich budowa przestrzenna¹²

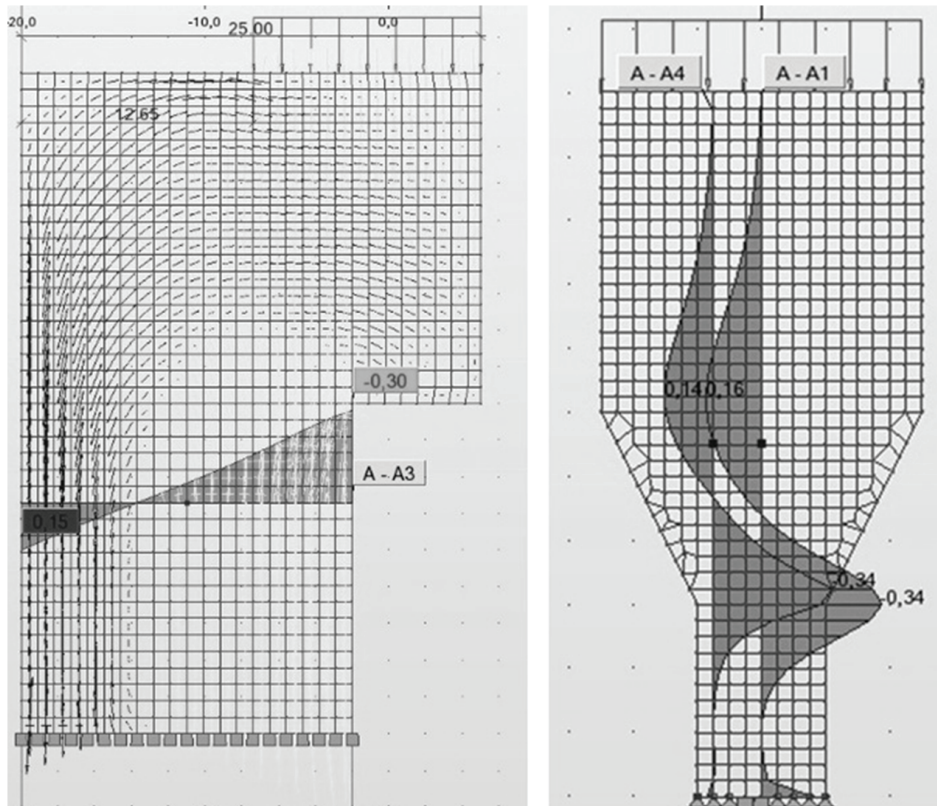
Fig. 6. Physical models of streams of forces generated in the geometry type walls called a “bottle” interpreted by students of architecture. A special feature of the models presented here is their spatial structure¹⁰

do dwóch tarcz – ścian podłużnych widocznych na ilustracji 10 i 11. W celu uwolnienia cennej przestrzeni parterowej, główne podłużne ściany nośne oparte zostały na rozbudowanych przestrzennie podporach typu „A” oraz „X”. Dzięki zastosowaniu podpór tego typu możliwe było otwarcie dla usług atrakcyjnej przestrzeni parterowej. Niestety, mimo tych zabiegów, widok fasady tylko w nieznaczny sposób sygnalizuje interesującą konstrukcję parteru i warto, by w przyszłości jego architektura pozwalała na ekspozycję tej ciekawej konstrukcji. Przykładowo, na ścianach szczytowych mogłyby pojawić się odpowiednie pilastry sygnalizujące układ dwóch tarcz podłużnych budynku oraz zasadę podwieszenia poszczególnych komórek pokoi, a przeszklenie strefy parteru mogłoby mieć mniejsze optycznie szpros. Poza tym budynki par-

which was in accordance with the laws of physics of matter and at the same time closely corresponded to the specified usable requirements. It soon turned out that such an approach also gave interesting architectural results. It was the architects' environment that saw “refreshing” and intriguing forms in his designs, which resulted from synergy and often a pure synthesis of function with laws of matter behaviour under a load. Uniqueness of this building structure consists in a bold idea of suspending repeatable cells of rooms to two “shields” – longitudinal walls presented in Figures 10 and 11. In order to release a valuable ground floor space, the main longitudinal bearing walls were based on spatially developed supports of “A” and “X” types. Thanks to the application of this type of supports it was possible

¹² Autorzy – model lewy: P. Rynowiecka, A. Haligowska, M. Bober, S. Żybort, K. Jurkanis, M. Eisler, A. Guderska; model środkowy: M. Szydłowska, J. Sielska, A. Sawicka, J. Żyłowska, J. Woś, K. Kołodziejka, N. Ładżyńska; model prawy: A. Jezierska, M. Mstowska, A. Kozieł, M. Leśniowska, E. Marciniak, J. Serwadcak.

¹⁰ Authors – left model: P. Rynowiecka, A. Haligowska, M. Bober, S. Żybort, K. Jurkanis, M. Eisler, A. Guderska; central model: M. Szydłowska, J. Sielska, A. Sawicka, J. Żyłowska, J. Woś, K. Kołodziejka, N. Ładżyńska; right model: A. Jezierska, M. Mstowska, A. Kozieł, M. Leśniowska, E. Marciniak, J. Serwadcak.



Il. 7. Wykresy krzyży naprężeń głównych oraz przekroje naprężeń normalnych wykonane za pomocą programu MES. Po lewej widoczne są krzyże naprężeń głównych oraz wykres naprężeń normalnych w przekroju A-A3 ściany wspornikowej obciążonej mimośrodowo

Fig. 7. Graphs of crosses of main stresses and sections of normal stresses made by means of FEM program. On the left we can see crosses of main stresses and a graph of normal stresses in section A-A3 of the support wall loaded eccentrically



Il. 8. Po lewej – widok elewacji hotelu z lat 90. Po prawej – aksonometryczny widok jego konstrukcji. Widoczne są komórki pokoi zawieszane do dwóch ścian podłużnych (por. il. 9 i 11) wspartych na podłużnej belce skrzynkowej wspartej z kolei na podporach o geometrii typu „A” oraz „X” [4]

Fig. 8. On the left – view of the hotel facade from the 1990s. On the right – axonometric view of its construction. Cells of rooms suspended to two longitudinal walls can be seen (cf. Fig. 9 and 11) based on a longitudinal box beam that leans on supports of “A” and “X” of geometry types [4]

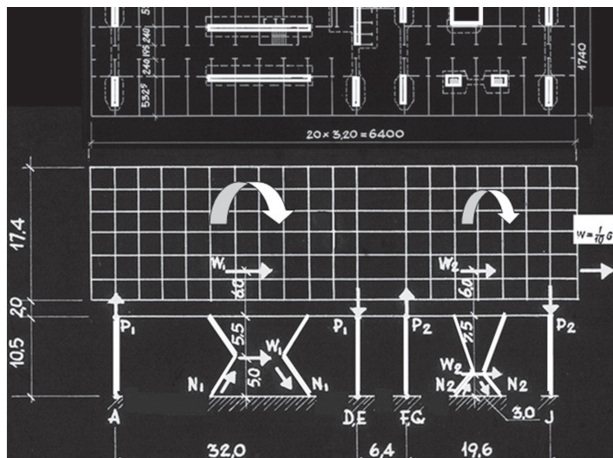
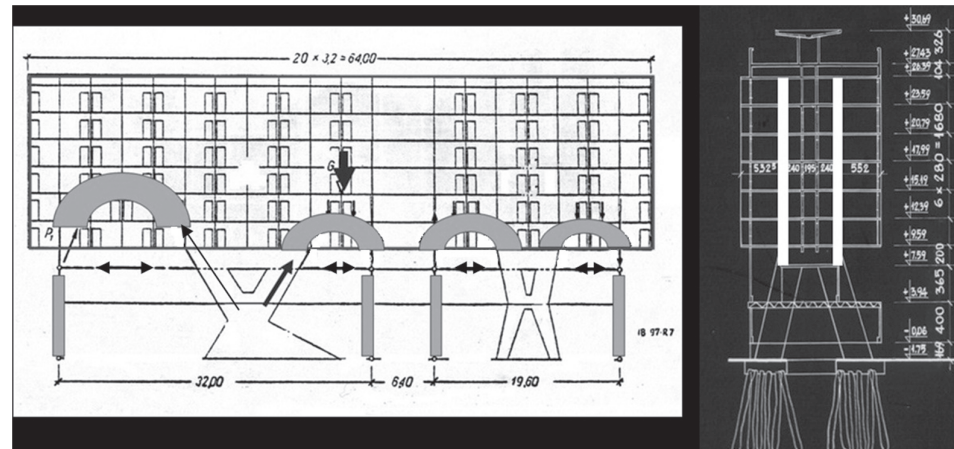
terowe powinny zostać tak ulokowane, by nie przysłaniały efektownych podpór typu „A” i „X”.

Między ścianami podłużnymi zrealizowano ciągi komunikacyjne, a otwory drzwiowe w podłużnych ścianach głównych rozmieszczono zgodnie z zasadami przepływu strumieni sił (il. 9) w taki sposób, by mogły się one odpowiednio uformować, przekazując obciążenia ciężarem własnym oraz obciążeniami zewnętrznymi na podpory. Konfiguracja ta pozwala na likwidację „zgięciowej” pracy belek nadprożowych, a łuki strumieni sił spięte są ściągami przebiegającymi w belce skrzynkowej wspiera-

to open functionally an attractive ground floor space. Unfortunately, in spite of these procedures, a view of the facade signals an interesting structure of the ground floor only in a slight way and it is advisable that its future architecture should allow the exposition of this interesting construction. For example, on gable walls there could appear suitable pilasters signalling a system of two longitudinal shields of the building and a rule of suspending the particular cells of rooms, whereas the ground floor glazing could have had optically smaller muntins. Apart from that, the one-storey building ought

Il. 9. Schemat konstrukcji hotelu. Widoczny jest przekrój podłużny oraz poprzeczny budynku. Schematy obrazują analizę pracy tarczy oraz systemu podpór pod wpływem ciężaru własnego budynku [na podst. 4]

Fig. 9. Scheme of the hotel construction. Longitudinal section and cross-section of the building can be seen. The schemes depict an analysis of work of shield and support system under the building's own weight [based on 4]



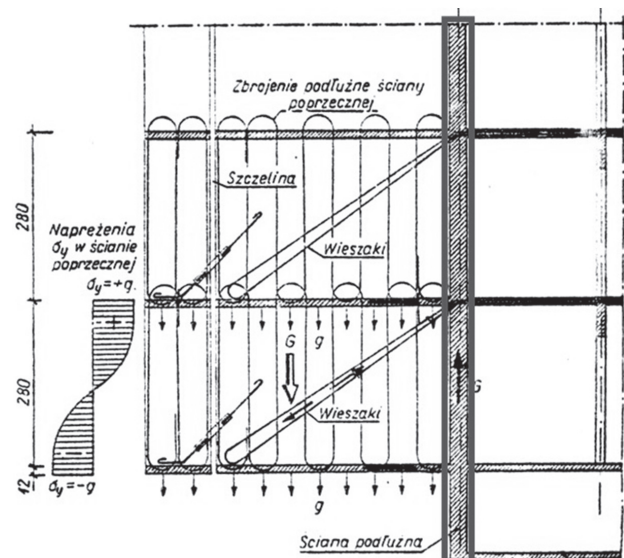
Il. 10. Schemat konstrukcji hotelu. Widoczny jest rzut przyziemia oraz widok podłużny budynku. System podpór analizowany był również na działanie wstrząsu sejsmicznego, generującego siłę poziomą na wysokości środka ciężkości o wartości $0,1 G^{13}$. Siła ta rozłożona została proporcjonalnie do sztywności podpór¹⁴ na składowe siły poziome W_1 oraz W_2 , a także na momenty: większy $-M_1$ oraz mniejszy $-M_2$, generujące siły prostopadłe P_1 oraz P_2 w wahaczach (A, D-E, F-G, J) na ramionach 32 m oraz 19,6 m [na podst. 4]

Fig. 10. Scheme of the hotel construction. We can see a projection of the basement and a longitudinal section of the building. The support system was also analysed with regard to the seismic shock activity that generates a horizontal force at the height of the centre of gravity of $0.1 G^{11}$. This force was distributed proportionally to the stiffness of supports¹² to component horizontal forces W_1 and W_2 , as well as moments: greater $-M_1$ and smaller $-M_2$, generating perpendicular forces P_1 and P_2 in rockers (A, D-E, F-G, J) at the arms at 32 m and 19.6 m [based on 4]

jącej krawędzie dolne ścian podłużnych widocznych na ilustracji 8.

Wnioski

W artykule przedstawiono metody przybliżonego określania „prawidłowego” przebiegu sił w materii, w obszarze i granicach wyznaczonych warunkami i potrzebami danego projektu. Cele te można realizować przy



Il. 11. Przekrój poprzeczny konstrukcji hotelu. Widoczne są wieszaki, za pośrednictwem których komórki żelbetowe podwieszane są do głównej ściany podłużnej. Interesujące jest również odizolowanie szczeliny części balkonowej od głównego budynku. Zapobiega ono przenikaniu ciepła wewnętrznego na zewnątrz oraz wyziębieniu płyt podłogowych i stropowych [4]

Fig. 11. Longitudinal section of the hotel construction. We can see hangers by means of which reinforced concrete cells are suspended to the main longitudinal wall. It is interesting that the balcony part is separated by fissure from the main building. This prevents penetration of internal heat outside and chilling of the floor and ceiling plates [4]¹³

to be located in a way that does not cover impressive supports of “A” and “X” types.

Between longitudinal walls transportation routes were situated, while doors in longitudinal main walls were placed in accordance with rules of flow of streams of forces (Fig. 9) in a way that enabled their correct for-

¹¹ G – building's own weight.

¹² Type “X” and the neighbouring pairs of rockers.

¹³ *Szczelina* – dilatation, *Wieszaki* – hangers, *Ściana podłużna* – longitudinal wall, *Napreżenia normalne w ścianie poprzecznej* – normal tension in the perpendicular wall, *Zbrojenie podłużne ściany poprzecznej* – longitudinal reinforcement of the perpendicular wall.

¹³ G – ciężar własny budynku.

¹⁴ Typu „X” i sąsiadujących z nimi par wahaczy.

zastosowaniu trzech sposobów: programu wykorzystującego metodę elementów skończonych, metody strumieni sił wraz z metodą prętowo-ciężnową oraz metody budowy fizycznych modeli wirtualnych kratownic.

Będącą tematem artykułu metoda dotyczy rzadko omawianych zasad praktycznych, których znajomość wydatnie może skrócić proces projektowania i przyspieszyć podejmowanie decyzji. Może ona również pomóc w całościowym zrozumieniu zagadnień rządzących kształtowaniem konstrukcji i skupić uwagę projektanta na zasadniczych zależnościach, których rozumienie może zostać przesłonięte zbyt wielką liczbą szczegółów. Metoda może także przybliżyć przyszłym projektantom techniki wykorzystywane przez prof. Zalewskiego podczas projektowania jego szczególnych obiektów, symbiotycznie łączących w sobie walory architektoniczne i konstrukcyjne.

Uzupełniając powyższe, można również zanotować, iż bardzo pozytywne doświadczenia autora wyniesione z pracy z przyszłymi architektami dowodzą łatwej aplikacji i wysokiego potencjału „twórczo-kontrolnego” metody, jako narzędzia kształtowania nowej architektury konstrukcji.

mation transferring loads with their deadweight and external loads on supports. This configuration makes it possible to get rid of “flexion” work of lintels whereas arches of streams of forces are coupled with tie-beams placed in a box beam supporting the lower edges of longitudinal walls presented in Figure 8.

Conclusions

The article presents methods of approximate determination of “correct” course of forces in matter, in the area and within the borders designated by conditions and needs of a particular design. These objectives can be pursued with the use of three methods, i.e. a program using a finite element method, a streams of forces method along with a strut and tie method and a method of building physical models of virtual trusses.

The method discussed here refers to rarely tackled practical rules whose knowledge can significantly shorten a designing process and speed up a decision making process. It can also be useful in the overall understanding of issues managing construction formation and focus designer’s attention on basic dependencies which are hard to understand if obscured by too many details. This method may also familiarise the future designers with techniques used by Professor Zalewski while designing his special structures which symbiotically combine architectural and constructional values.

Apart from the above, the author’s positive experiences of working with future architects prove easy application and a high “creative-controlling” potential of the method as an instrument shaping new architecture of construction.

Translated by
Bogusław Setkiewicz

Bibliografia/References

- [1] Allen E., Zalewski W., *Form and Forces, Designing efficient expressive structures*, John Wiley & Sons, Hoboken 2010.
- [2] Kuś S., *Szybkie metody sprawdzania sił wewnętrznych w konstrukcjach*, [w:] A. Reichhart (red.), *Kształtowanie konstrukcji, konstrukcje ciężnowe, konstrukcje z blach faldowych. Nowe osiągnięcia nauki i techniki w budownictwie, materiały konferencyjne*, Oficyna Wydawnicza PR, Rzeszów 2005, 135.
- [3] Kuś S., *Ogólne zasady kształtowania konstrukcji*, [w:] L. Lichołai (red.), *Budownictwo ogólne. T. 3: Elementy budynków – podstawy projektowania*, Arkady, Warszawa 2008, 11–71.
- [4] Rękopisy Profesora Wacława Zalewskiego [w posiadaniu autora].

Streszczenie

Celem artykułu jest przybliżenie metody strumieni sił – fragmentu warsztatu prof. Wacława Zalewskiego, służącego do jednoczesnego tworzenia atrakcyjnych form architektonicznych wraz z ich systemem konstrukcyjnym, kształtowanym odpowiednio do zadanych warunków projektowych, zgodnym z warunkami naturalnego przepływu sił oraz zasadami minimum energii. Metoda ta może lepiej przemówić do młodego projektanta i rozbudować w nim intuicyjne „czucie konstrukcji” oraz wzmocnić możliwości przeprowadzenia samodzielnej analizy wytworów własnej wyobraźni.

Słowa kluczowe: strumienie sił, przepływ sił, tarcza, kształtowanie konstrukcji, metoda prętowo-ciężnowa

Abstract

The article focuses on a method of streams of forces – a fragment of Professor Wacław Zalewski’s work aimed at simultaneous creation of attractive architectural forms along with their constructional system which is shaped in accordance with given design conditions and according to conditions of a natural flow of forces and energy minimum principles. This method can appeal to young designers and help them develop an intuitive “feeling of a construction” as well as enhance possibilities to carry out an independent analysis of products of their own imagination.

Key words: stream of forces, flow of forces, load bearing walls, shaping structures, strut and tie method