



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

kierunek studiów: **Budownictwo**

specjalność: **Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie**

Praca dyplomowa magisterska

**STUDIUM PROJEKTOWE KONSTRUKCJI WIATY ROWEROWEJ
WYKONANEJ ZE SZKŁA BUDOWLANEGO**

DESIGN STUDY OF A BICYCLE SHED MADE OF STRUCTURAL GLASS

Loran Nermend

nr albumu: 44681

Opiekun:

Dr inż. Anna Jabłonka

Katedra Teorii Konstrukcji

Szczecin, 20.02.2024

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Teorii Konstrukcji

PRACA DYPLOMOWA [inżynierska/ magisterska] Nr/20.....

Kierunek: Budownictwo

Specjalność: Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie

Studia stacjonarne drugiego stopnia

Autor pracy: inż. Loran Nermend (nr albumu 44681)

Opiekun pracy: dr inż. Anna Jabłonka

**TEMAT PRACY: STUDIUM PROJEKTOWE KONSTRUKCJI WIATY ROWEROWEJ WYKONANEJ ZE
SZKŁA BUDOWLANEGO**

**TEMAT PRACY W JĘZYKU ANGIELSKIM: DESIGN STUDY OF A BICYCLE SHED MADE OF
STRUCTURAL GLASS**

Zakres pracy:

- opis wykorzystania szkła w budownictwie oraz rodzajów wyrobów ze szkła budowlanego,
- opis procedur i norm stosowanych do obliczeń wytrzymałościowych szklanych elementów nośnych,
- dobór geometrii konstrukcji wiaty rowerowej,
- zestawienie obciążeń działających na konstrukcję,
- opracowanie wariantów modelu numerycznego konstrukcji,
- przeprowadzenie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji,
- analiza wyników obliczeń.

Zakres pracy w języku angielskim:

- description of the use of glass in construction and types of structural glass products,
- description of procedures and standards used for strength calculations of glass load-bearing elements,
- selection of the geometry of the bicycle shed structure,
- list of structure loads,
- development of variants of the numerical model of the structure,
- carrying out static-strength calculations of the structure,
- analysis of calculation results.

Daty zatwierdzenia tematu pracy przez:

1. Opiekuna pracy: 09.05.2023 r.

2. Kierownika katedry: 10.05.2023 r.

3. Komisję programową kierunku: 06.06.2023 r.

Data wydania tematu pracy: 06.06.2023 r.

Planowany termin złożenia pracy dyplomowej przez studenta: 15.01.2024 r.

OŚWIADCZENIE
AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ

Oświadczam, że praca dyplomowa inżynierska/magisterska (podać rodzaj pracy) pn.

STUDIUM PROJEKTOWE KONSTRUKCJI WIATY ROWEROWEJ WYKONANEJ ZE SZKŁA
BUDOWLANEGO

napisana pod kierunkiem:

dr inż. Anny Jabłonki

jest w całości moim samodzielnym autorskim opracowaniem sporządzonym przy
wykorzystaniu wykazanej w pracy literatury przedmiotu i materiałów źródłowych.

Złożona w dziekanacie Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska treść mojej pracy
dyplomowej w formie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie ~~pisemnej~~/pisemnej i
graficznej*.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej fragmenty nie
były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związanych z uzyskaniem
tytułu zawodowego w uczelniach wyższych.

.....
podpis dyplomanta

Szczecin, dn. 20.02.2024 r.

*niepotrzebne skreślić

Streszczenie

W pracy przedstawiono przegląd obecnej wiedzy technicznej dotyczącej projektowania szklanych elementów nośnych oraz praktykę projektową. Przedstawiono przykłady konstrukcji całoszklanych oraz wykorzystujących szkło jako elementy nośne. Wykonano model obliczeniowy w programie RFEM 5 z wykorzystaniem dodatkowego modułu do wymiarowania elementów szklanych. Otrzymane wyniki z analizy w programie porównano do teoretycznej wytrzymałości elementu w oparciu o różne normy. Pracę zakończono wnioskami na temat obecnych możliwości projektowania konstrukcji szklanych oraz dokumentacją rysunkową obiektu, a także opisem technicznym.

Abstract

The paper presents an overview of current technical knowledge on the design of glass load-bearing elements and design practice. Examples of all-glass structures and those using glass as load-bearing elements are presented. A calculation model was carried out in RFEM 5 using the add-on module for the dimensioning of glass elements. The results obtained from the analysis in the program were compared to the theoretical strength of the element based on various standards. The work was closed with conclusions on the current possibilities for the design of glass structures and a drawing documentation of the object, as well as a technical description.

Słowa kluczowe

konstrukcje szklane, szkło konstrukcyjne, wiata rowerowa, szklane ściany nośne, szkło laminowane

Spis treści

1. Przedmiot, cel i zakres pracy	13
1.1 Przedmiot pracy	13
1.1.1 Uzasadnienie doboru konstrukcji.....	13
1.1.2 Inspiracje.....	14
1.2 Cel pracy	15
1.3 Zakres pracy.....	15
2. Ogólne informacje na temat szkła	17
2.1. Wstęp	17
2.2. Wykorzystanie szkła — tło historyczne	17
2.3. Współczesne wykorzystanie szkła.....	19
2.3.1 Konstrukcje całoszklane	19
2.3.2 Fasady budynków	24
2.3.3 Ochrona zabytków	27
2.3.4 Obiekty turystyczne (kładki, pomosty w górach).....	29
2.3.5 Elementy nośne wewnątrz konstrukcji	29
2.3.6 Szklane bariery samonośne.....	32
2.4. Właściwości materiałowe szkła	33
2.4.1 Skład chemiczny szkła.....	34
2.4.2 Struktura molekularna oraz wytrzymałość wyrobów szklanych	34
2.5. Typy szkła wykorzystywane w budownictwie	36
2.6 Połączenia elementów szklanych.....	39
2.6.1 Teoretyczne metody łączenia elementów szklanych	43
2.7 Odporność na korozję	44
2.8 Folie wykorzystywane do laminowania szkła	45

3. Obecne procedury obliczeniowe i sposoby określania nośności elementów szklanych oraz praktyka projektowa.....	49
3.1 Dostępne normy i metody obliczeniowe dotyczące szkła budowlanego.....	49
3.2. Wyznaczanie nośności według prEN 13474.....	50
3.2.1 Wartości współczynników obliczeniowych wg prenormy prEN 13474.....	51
3.3 Praktyka projektowa w odniesieniu do poradników niemieckich TRLV i normy DIN 18008.....	52
3.3.1 Zakres zastosowania	52
3.3.2 Istotne zagadnienia.....	53
3.3.3 Wyznaczenie nośności według DIN 18008	53
3.4 Wyznaczanie nośności według EN 16612 i EN 16613	55
3.5 Procedury obliczeniowe w kontekście CEN/TC 250/SC.....	56
3.5.1 Stan graniczny nośności w ujęciu prCEN/TS 19100.....	58
4. Część obliczeniowa.....	59
4.1. Problem projektowy.....	59
4.2. Geometria obiektu i układ statyczny.....	59
4.3. Założenia.....	60
4.3.1 Przyjęte materiały	61
4.4. Modelowanie nośnych elementów szklanych w programie RFEM 5	62
4.5. Przyjęte obciążenia i kombinacje obciążeń	70
4.5.1. Obciążenia stałe	70
4.4.2. Obciążenia zmienne	72
4.5. Wymiarowanie powierzchni szklanych z wykorzystaniem modułu RF – GLASS	75
4.5.1 Wyznaczenie podatności podpory dolnej.	75
4.5.2 Proces modelowania w module RF-GLASS.....	76
4.5.3 Wytężenie ścian w zależności od sztywności dachu	82
4.6 Wytężenie elementów w kontekście pozostałych norm	83

4.6.1 Wytyżenie szyby według EN 16612	83
4.6.2 Wytyżenie szyby względem prEN 13474	83
4.6.3 Wytyżenie szyby względem prCEN/TS 19100	84
4.7 Sytuacja awaryjna	85
4.8. Porównanie wyników	86
5. Wnioski	89
5.1. Wnioski dotyczące norm	89
5.2. Wnioski dotyczące szkła jako materiału konstrukcyjnego	89
5.3. Wnioski dotyczące modelowania elementów szklanych w programie RFEM 5	89
Spis literatury	91

1. Przedmiot, cel i zakres pracy

1.1 Przedmiot pracy

Przedmiotem pracy jest studium projektowe wiaty rowerowej, z wykorzystaniem szklanych ścian jako elementów nośnych.



Rysunek 1 Wizualizacja wiaty wygenerowana w programie Lumion

1.1.1 Uzasadnienie doboru konstrukcji

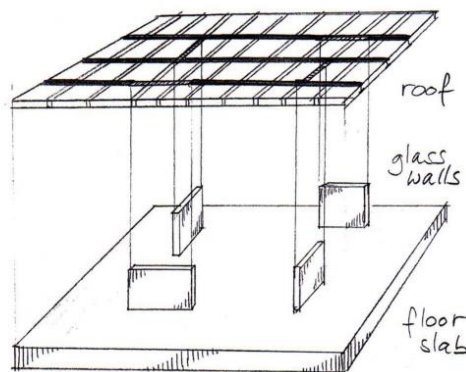
Ze względu na skomplikowany charakter pracy elementów szklanych w złożonych stanach naprężeń (brak jednoznacznych i powszechnie akceptowanych norm) elementy szklane projektuje się tak, aby pracowały w prosty do analizy sposób np. ściskane osiowo. Z reguły konstrukcje całoszklane są małymi obiektami użyteczności publicznej lub elementami fasad budynków czy barier, rzadziej elementami ustroju nośnego konstrukcji.

W tej pracy postanowiono podjąć się studium projektowego obiektu, rys.1, który realnie mógłby zostać wykonany z wykorzystaniem obecnej wiedzy technicznej. Dodatkowo dobór prostej konstrukcji pozwala na dokonywanie szybkiej analizy w programach obliczeniowych, co pozwala na porównanie różnych metod obliczeniowych oferowanych przez programy, wpływ współczynników czy zależność wyężenia od obciążeń.

Niewątpliwie prostota konstrukcji ułatwia prowadzenie studium projektowego.

1.1.2 Inspiracje

Na świecie istnieją konstrukcje opierające się na szklanych ścianach nośnych. W roku 1996 w Leerdam w Holandii odbył się konkurs na zaprojektowanie „domu” w pobliżu centrum miejscowości. Okolice miasta związane są z przemysłem szklarskim, dlatego projektowany obiekt miał mieć elementy szklane. Dwóch młodych architektów zaproponowało obiekt, opierający się na czterech szklanych ścianach nośnych, rys. 2.



Rysunek 2 Wstępny plan obiektu szklanego z nośnymi ścianami szklanymi

Źródło: Nijse, Rob. *Glass in Structures*. Berlin: Birkäuser, 2003

Ostatecznie obiekt nie został zrealizowany, gdyż projekt nie wygrał konkursu. Innym obiektem, w którym wykorzystano ściany wykonane ze szkła jako elementy nośne jest rezydencja w Santa Fe w Stanach Zjednoczonych fot. 1. Dodatkowo w Europie znajdują się obiekty małej architektury wykorzystujące szklane ściany na elementy nośne, są one przedstawione w dalszej części pracy. Podsumowując, na świecie istnieją obiekty gdzie wykorzystano szklane ściany w konstrukcji nośnej, co świadczy o tym, że obecna wiedza techniczna pozwala na wykonywanie takich obiektów.



Fotografia 1 Rezydencja Santa Fe

Źródło: architecturaldigest.com dostępne dnia: 02.12.2023

1.2 Cel pracy

Celem pracy jest zebranie aktualnego stanu wiedzy i praktyk wykorzystywanych przy przeprowadzaniu obliczeń wytrzymałościowych dla elementów szklanych, jak również zaznajomienie się z działaniem szkła, jego rodzajami, zastosowaniem w konstrukcjach oraz aktualnymi możliwościami technicznymi. Dodatkowo w pracy zostaną porównane wyniki wytrzymałości wybranego elementu w zależności od zastosowanej procedury obliczeniowej.

Efektem pracy jest projekt konstrukcji nośnej wiaty rowerowej wykonanej ze szkła pełniącecej funkcję nośną wraz z dokumentacją rysunkową oraz skróconym opisem technicznym.

1.3 Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- Opis wykorzystania szkła w budownictwie oraz rodzajów wyrobów ze szkła budowlanego.
- Opis procedur i norm stosowanych do obliczeń wytrzymałościowych szklanych elementów nośnych.
- Dobór geometrii konstrukcji wiaty rowerowej.
- Zestawienie obciążeń działających na konstrukcję.
- Opracowania wariantów modelu numerycznego konstrukcji.
- Przeprowadzenie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji.
- Analiza wyników obliczeń.
- Opracowanie wniosków końcowych.

2. Ogólne informacje na temat szkła

2.1. Wstęp

Szkło jest niezwykle interesującym materiałem pod względem architektonicznym. Ze względu na przezroczystość i transparentność jest chętnie wykorzystywane, ponieważ nie zakłóca ono widoku oraz nie burzy wewnętrznego ładu w pomieszczeniach. Szkło jest również wytrzymałe i dobrze znosi warunki pogodowe.

Wraz z rozwojem technologii szkło staje się atrakcyjnym materiałem dla inżynierów budownictwa. Obecnie szkło konstrukcyjne może osiągać wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu na poziomie 75 – 120 MPa, a wzmacniane chemicznie nawet 150 MPa. Niestety inżynierowie unikają tego materiału w obawie przed jego kruchością, a także ciężko dostępnymi, skomplikowanymi i niejasnymi procedurami obliczeniowymi oraz brakiem jednoznacznych charakterystyk mechanicznych tego materiału. Na świecie istnieją firmy specjalizujące się w tworzeniu szklanych elementów nośnych, jednak duża część innowacji w tej dziedzinie pozostaje sekretem handlowym i nie jest powszechnie dostępna.

2.2. Wykorzystanie szkła — tło historyczne

Szkło znane jest ludzkości od najdawniejszych czasów i zdaje się, że towarzyszy nam od momentu wytwarzania pierwszych narzędzi. Swoją przygodę z tym materiałem ludzkość rozpoczęła poprzez wykorzystanie naturalnego szkła w postaci tektytu oraz obsydianu, czyli szkła wulkanicznego. Naturalnie występujące szkło wykorzystywane było do produkcji narzędzi oraz ozdób i biżuterii.

Pierwszy przełom w technologii szkła nastąpił około 3500 lat p.n.e. w Mezopotamii, gdzie po raz pierwszy udało się wytworzyć sztuczne szkło, choć według innych źródeł miało to nastąpić już nawet 5000 lat p.n.e. Otrzymywane w tym czasie szkło było bardzo słabej jakości, a otrzymywane kawałki różniły się grubością oraz niejednorodną powierzchnią.

Przez gros ludzkiej historii produkowane szkło nie przechodziło gruntownych zmian, było obciążone wadami, a na kolejną rewolucję trzeba było czekać do początku XX wieku kiedy to Émile Fourcault opracował metodę produkcji szkła ciągnionego, które charakteryzowało się dużą falistością tafli. Metoda opracowana przez Belga była w późniejszych latach udoskonalana i ostatecznie zaadaptowana do produkcji industrialnej. Ze względu na rozwój technologii zaczęło być możliwe szersze stosowanie szkła w budynkach oraz poprawa

przeszklenia okien. Wcześniej okna były małe i składały się z wielu małych szyb, wraz ze wprowadzeniem szkła ciągnionego rozmiary szyb się zwiększyły.

Na największy przełom musieliśmy czekać, aż do roku 1952, kiedy to Sir Alestair Pilkington wraz z Kenneth'em Bickerstaff'em opracowali proces produkcji szkła float. Szkło float jest niemal idealnie płaskie, a otrzymywane produkty posiadają bardzo zbliżone właściwości, co wpływa na przewidywalne zachowanie materiału. Dzięki tym postępom elementy szklane mogą osiągnąć większe rozmiary jak również są stosowane jako elementy nośne małych konstrukcji.

Technologia szkła rozwija się prężnie ze względu na wykorzystanie szkła w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym oraz w elektronice konsumenckiej. Podobnie jak w przypadku metali, do szkła można wprowadzać dodatki np. w postaci tlenków, które zmieniają właściwości otrzymanej tafli. Przykładowo ZnO obniża współczynnik rozszerzalności cieplnej, a Al₂O₃ podwyższa właściwości mechaniczne, termiczne oraz chemiczne [1].

Rozwój technologii szkła jest w ogromnej mierze uzależniony od dużych prywatnych firm, które koncentrują się na zastosowaniach konsumenckich. Choć szkło wykorzystywane w telefonach, samochodach i innych produktach mogłoby być wykorzystane w budownictwie, firmy niechętnie dzielą się swoją własnością intelektualną. Inżynierowie, którzy potrzebują dostępu do pełnego potencjału tego materiału oraz informacji na temat jego właściwości, aby przeprowadzić obliczenia wytrzymałościowe, są w tym ograniczeni.

Na chwilę obecną nie istnieją, normy pozwalające projektować elementy szklane w takim zakresie jak w przypadku elementów betonowych, stalowych, drewnianych czy chociażby wykonanych z aluminium. Szczególnie kłopotliwe są połączenia elementów szklanych oraz niejednolite zasady projektowania elementów. W przygotowaniu jest Eurokod poświęcony konstrukcjom szklanym, który powinien uporządkować obecną sytuację normową i podać zasady wymiarowania elementów szklanych pracujących w bardziej złożonych stanach naprężenia (np. zginanie przy ściskaniu, dwuosiowe zginanie, zginanie ze skręcaniem itp.).

Obecnie można korzystać ze wzorów prezentowanych w różnych normach krajowych, jednak należy brać pod uwagę, że ich zakres dotyczy się głównie balustrad oraz elewacji.

2.3. Współczesne wykorzystanie szkła

Nowoczesne wykorzystanie szkła w budownictwie znacznie ewoluowało w ostatnich latach za sprawą rozwoju techniki produkcji szkła oraz wiedzy na temat działania tego materiału na zadane obciążenia. Szkło było niegdyś głównie elementem okien, zaś obecnie znajduje zastosowanie w wielu innych płaszczyznach, służąc jako podstawowy element nośny i estetyczny niektórych konstrukcji. Niniejszy podrozdział poświęcony jest wykorzystaniu szkła we współczesnych konstrukcjach, głównie z punktu widzenia inżyniera.

2.3.1 Konstrukcje całoszklane

Poprzez konstrukcje całoszklane rozumie się obiekty, w których konstrukcja szklana jest samonośna. Historycznie termin ten odnosił się głównie do fasad i balustrad. Ze względu na rozwój techniki szkło zyskało właściwości materiału nośnego i obecnie spotykane jest jako element fragmentu konstrukcji nośnej w wielu prestiżowych budynkach.

Należy zauważyć, że nie istnieje instytucja lub dokument posiadające pełny autorytet w ustalaniu definicji terminologii używanej do opisu konstrukcji szklanych, a podawane definicje różnią się od siebie. Analizując obecnie występujące konstrukcje wydaje się być zasadne, aby terminem „całoszklane” rozumieć obiekty, w których głównym materiałem nośnym jest szkło (w postaci szklanych ram, szyb bądź kształtowników). Dzięki takiej systematyce można odróżnić takie obiekty od wszelkiego rodzaju fasad opartych na metalowym szkielecie.

Szkło konstrukcyjne najczęściej jest kompozytem kilku rodzajów szyb oraz warstw folii. Łączniki elementów szklanych wykonuje się korzystając z metalowych połączeń. W niektórych przypadkach elementy mogą być sprężane przy pomocy stalowych cięgien. Często wykonuje się również stalowe stężenia w ramowych ustrojach szklanych. Uważam, że takie konstrukcje również powinny być klasyfikowane jako całoszklane, gdyż zasadniczo różnią się od przeszklonych fasad.

Konstrukcje całoszklane są najczęściej spotykane w miejscach turystycznych, reprezentacyjnych oraz obiektach małej architektury. Takimi elementami często bywają kładki dla pieszych łączące budynki znajdujące się w historycznych centrach miast. Szkło budowlane stosuje się również do budowy przystanków autobusowych, barier (na przykład przed budynkami parlamentów i ambasad), w ogrodach zoologicznych lub do konserwacji ruin archeologicznych.

Na poniższej fotografii znajduje się kładka dla pieszych położona w centrum Wiednia, sam podest kładki wykonany jest ze stali, jednak konstrukcja obudowy jest całoszklana. Szyby zamontowano do szklanych żeber dzięki czemu znajdując się wewnątrz kładki uzyskujemy niemal niezaburzony obraz ulicy, fot. 2.



Fotografia 2 Szklana kładka - Wiedeń 2023. Zdjęcie własne

Na fotografii 3 znajduje się inna szklana kładka, w tym przypadku jednak zastosowano również elementy stalowe jako szkielet fasady. Wykonywanie takich obiektów jako stalowo-szklanych jest bardzo popularne, głównie ze względu na małe gabaryty elementów stalowych oraz korzystną pracę na rozciąganie tego materiału.



Fotografia 3 Szklana kładka Graz 2023. Zdjęcie własne

Głównym ustrojem nośnym szklanych kładek dla pieszych są ramy wykonane z żeber i opierające się na samej kładce, która przeważnie jest stalowa bądź betonowa. Na poniższej fotografii widać szklane układy nośne, fot. 4, 5.



Fotografia 4 Szklana kładna-- Wiedeń 2023. Zdjęcie własne



Fotografia 5 Szklane ustroje nośne-- Wiedeń 2023. Zdjęcie własne

Kolejną liczną grupą konstrukcji całoszklanych są obiekty małej architektury, mogą to być przykładowo przystanki komunikacji miejskiej, fontanny czy kładki obserwacyjne. Poniżej zamieszczono zdjęcie szklanego przystanku autobusowego, fot. 6, 7.



Fotografia 6 Szklany przystanek autobusowy - Graz 2023. Zdjęcie własne



Fotografia 7 Szklany przystanek autobusowy - Linz 2023. Zdjęcie własne

2.3.2 Fasady budynków

Przeszkłone wieżowce, galerie czy budynki administracji można już spotkać praktycznie w każdym większym mieście. Widok szklanych monolitów znajdujących się w centrach miast nie budzi już zdziwienia. Na myśl nachodzi pytanie czy problematyka technologii szklanych fasad jest w obrębie zainteresowań konstruktora, czy nie zajmują się tym profesjonalne firmy dostarczające projektantom jedynie wartości obciążenia przekazywanego na szkielet budynku?

Na chwilę obecną rzeczywiście rzadko kiedy projektant ma wkład w wygląd fasady jednak już obecne normy pozwalają przeprowadzać obliczenia wytrzymałościowe dla fasad w relatywnie prosty sposób. Posiawszy wiedzę na temat projektowania elementów szklanych projektant może mieć wkład w takie cechy elewacji jak: wielkość poszczególnych elementów, grubość elementów czy technologię montażu.

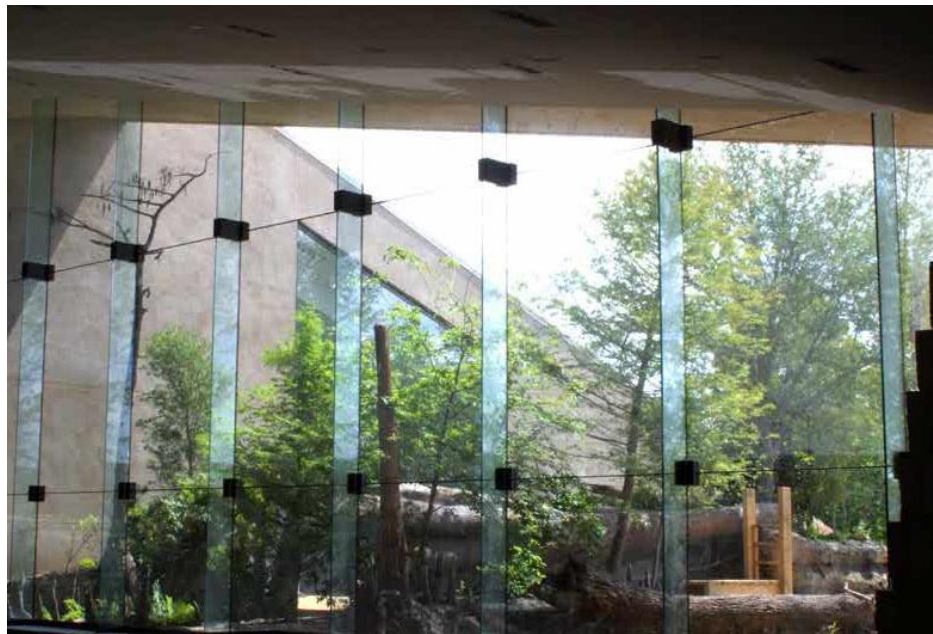
Umiejętność wykonywania obliczeń otwiera przed projektantem drzwi szerokich możliwości. Obecnie mamy do czynienia z dość dużym popytem na konstrukcję całoszklane zarówno wśród architektów, jak i prywatnych zleceniodawców. Pogłębiając swoją wiedzę projektant zdobywa konkurencyjność na rynku.

Typowym rozwiązaniem konstrukcyjnym szklanych fasad jest umieszczanie ich na stalowych bądź aluminiowych ramach. Rozwiązanie to z punktu widzenia projektanta nie jest złe, gdyż sprowadza obliczenia do zaprojektowania metalowej ramy i odpowiedniego doboru szklanych tafli. W większości sytuacji stalowe elementy nie wpływają na estetykę obiektu. Na ogół podkonstrukcję fasady można ukryć za elementami nośnymi budynku.

Istnieją jednak obiekty w których elementy fasady składają się całkowicie z elementów szklanych, fot. 8, 9, 10, 11, 12.



Fotografia 8 Szklana konstrukcja żebrowa zadaszenia przedsionka
Źródło: www.structuralglass.com dostępna dnia 25.02.2023



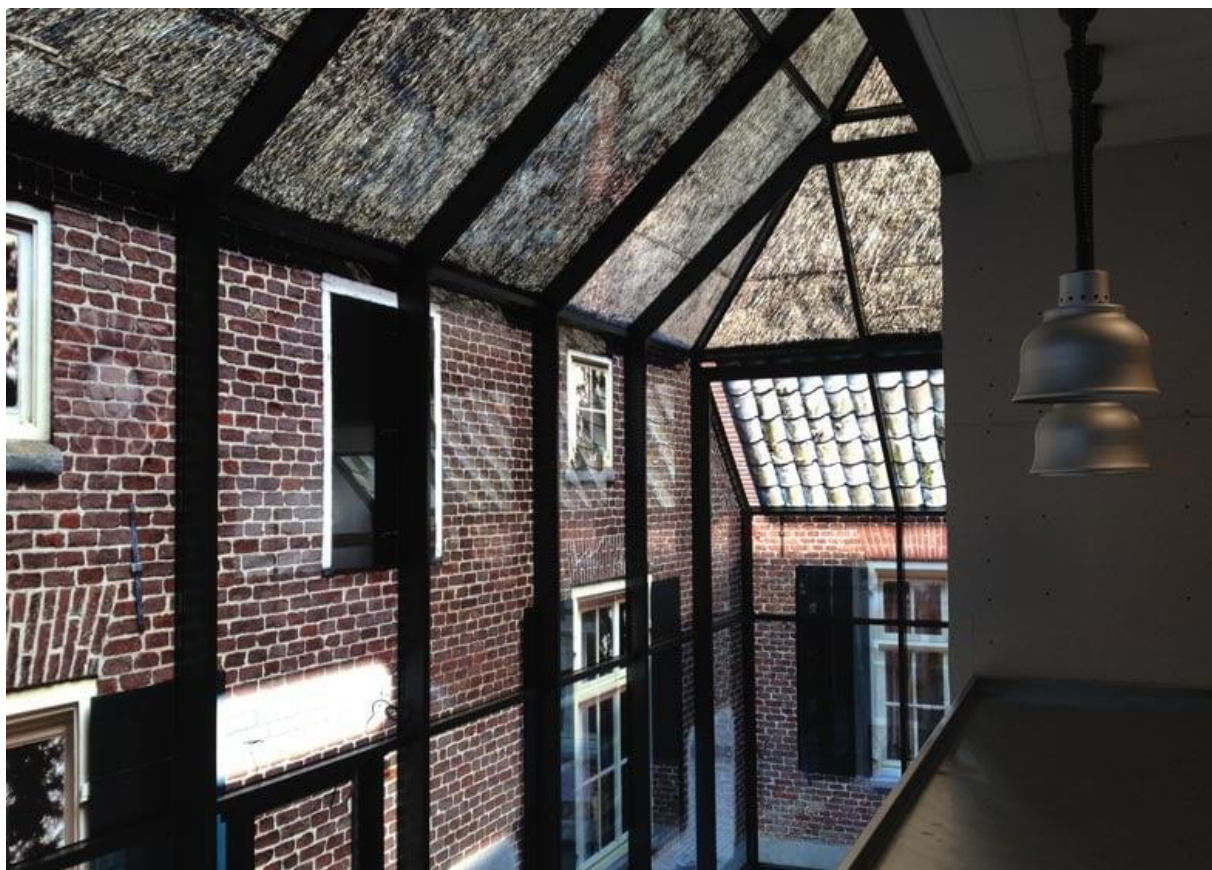
Fotografia 9 Szklana konstrukcja żebrowa
Źródło: www.structuralglass.com dostępna dnia 25.02.2023



Fotografia 10 Szklana fasada dobudówki na dachu starego budynku
Źródło: www.archdaily.com dostępna dnia 25.10.2023



**Fotografia 11 Hala o funkcji użyteczności publicznej ze szklaną fasadą w Niderlandach, Schijndel -
Holandia**
Źródło: www.inhabitat.com 25.10.2023



Fotografia 12 Hala o funkcji użyteczności publicznej ze szklaną fasadą w Niderlandach - Schijndel, Holandia

Źródło: www.inhabitat.com 25.10.2023

2.3.3 Ochrona zabytków

Opinie w kwestii sposobu konserwacji zabytków są podzielone, istnieją zwolennicy teorii, że stare obiekty powinny być przywracane do czasów swojej świetności i odbudowywane z największą starannością, inni konserwatorzy są jednak zdania, że ruiny starych konstrukcji są same w sobie bezcennymi artefaktami i należy nie ingerować w nie. Druga grupa postuluje ochronę miejsca odnalezienia ruin bądź częściową odbudowę z wyróżnieniem oryginalnych elementów.

Konstrukcje szklane idealnie odnajdują się w tej wąskiej niszy budownictwa. Ze względu na swą przejrzystość szkło jest w stanie chronić obiekt a jednocześnie nie wpływać na jego estetykę. Odwiedzający są w stanie podziwiać w pełni ruiny, przy czym są one zabezpieczone przed czynnikami niszczącymi, fot. 13, 14.



Fotografia 13 Przeszkłony dach zamku Juval- Tyrol Południowy, Włochy
Źródło: www.glassonweb.com dostępne dnia 27.10.2023



Fotografia 14 Przykrycie ruin katedry w Hamar- Hamar, Norwegia
Źródło: wikipedia.org dostępne dnia 27.10.2023

2.3.4 Obiekty turystyczne (kładki, pomosty w górach)

Po szkło chętnie sięga się w miejscach turystycznych, szczególnie w górach, gdzie zastosowanie szklanych tafli jako elementu podłogi kładki jest niezwykle atrakcyjne, gdyż pozwala to na nienaruszony obraz otoczenia, nad którym dany obiekt się znajduje, fot. 15. Przeszklenia chętniej stosuje się tylko jako elementy podłogi czy poręczy, natomiast sama konstrukcja nośna zazwyczaj pozostaje stalowa. W przypadku trudno dostępnych miejsc istnieje duży problem z transportem szklanych elementów nośnych, które są niezwykle wrażliwe na uszkodzenia powierzchniowe. Wykorzystanie stalowych szkieletów nie sprawia jednak, że zaprojektowanie takiego obiektu jest rzeczą trywialną. W regionach górskich panują ciężkie warunki atmosferyczne, a na dodatek konstrukcja może być obciążona tłumem bądź uszkodzona poprzez osuwające się skały. Dlatego zaprojektowanie takiego obiektu wymaga przeprowadzenia obliczeń weryfikujących nośność elementów szklanych.



Fotografia 15 Przeszklony most nad kanionem Zhangjiajie w Chinach
Źródło: news.cgtn.com/news dostępne dnia 22.10.2023

2.3.5 Elementy nośne wewnątrz konstrukcji

Procedury postępowania z elementami pracującymi jako słupy nie są dobrze opisane, istnieją pewne wzory proponowane przez instytuty badawcze oraz uczelnie, jednak z dostępnych informacji wydaje się, że nośność większości elementów weryfikowana jest eksperymentalnie w próbach obciążeniowych.

Na świecie istnieją również firmy, które produkują słupy i inne elementy nośne wykonywane ze szkła, fot. 16. Elementy te niekiedy potrafią przybierać zaskakujące kształty, fot. 17.

Niestety, aby przekonać się o zasadności stosowania tych elementów potrzeba czasu, przykładowo w przeszłości korzystano z kształtowników systemu *Profilit*, fot. 18, jednak dopiero po czasie okazało się, że są to elementy niebezpieczne i wydaje się, że już nie korzysta się z tego rozwiązania przy wykonywaniu elementów nośnych po mimo ich znacznej wytrzymałości.



(a)



(b)



(c)



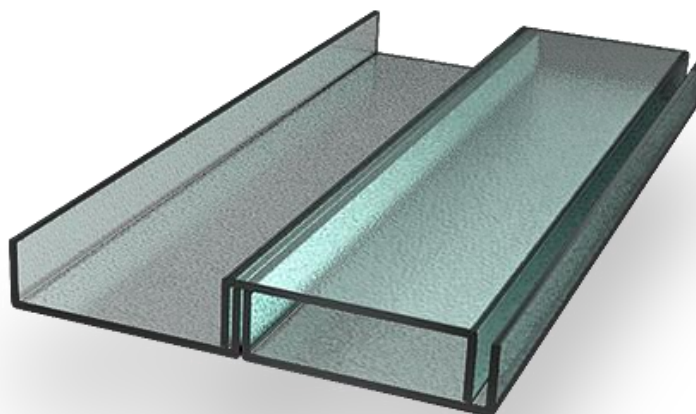
(d)

Fotografie 16 (a-d) Szklane słupy nośne w urzędzie w St, Germain en Laye – Saint-Germain-en-Laye, Francja

Źródło www.archdaily.com dostępne dnia 22.10.2023



Fotografia 17 Szklane filary nośne firmy Xinology
Źródło: www.xinology.com dostępne dnia 22.10.2023



Fotografia 18 System Profilfit firmy Pilkington
Źródło www.pilkington.com dostępne dnia 22.10.2023

2.3.6 Szklane bariery samonośne

Szklane bariery samonośne można spotkać na przykład w centrach handlowych, zoo, fot. 19, czy też w urzędach. Są one atrakcyjne pod względem estetycznym i architektki wnętrza wybierają tego typu rozwiązanie, gdyż wpisuje się ono w zamysł wystroju danej przestrzeni.

Z reguły na bariery szklane nie oddziałują w znaczny sposób (bądź wcale) obciążenia atmosferyczne. Istotne z punktu widzenia projektowania barier jest obciążenie opierającego się na barierach tłumy, fot. 20, jak również odporności na uderzenia ciałem miękkim (przewracający się człowiek), bądź ciałem twardym (na przykład metaliczny przedmiot upuszczony w centrum handlowym).

Balustrady szklane na ogół dobiera się z katalogów przygotowanych przez firmy wytwarzające te produkty. Przeważnie szyby balustrad umieszczane są w tłoczonych profilach aluminiowych specjalnie zaprojektowanych do danego rozwiązania, rys. 3.



Fotografia 19 Szklane bariery w Zoo – Bratysława 2023.
źródło: zdjęcie własne



Rysunek 3 Tłoczony aluminiowy profil z pletwą balustrady całoszkanlej
źródło: talglass.com, dostępne dnia 29.10.2023



Fotografia 20 bariery szklane obciążone tłumem
źródło: hiro.pl, dostępne dnia 29.10.2023

2.4. Właściwości materiałowe szkła

Szkło jest wyjątkowym materiałem pod kątem budowy oraz charakterystyk materiałowych. Aby zrozumieć specyfikę tego materiału należy przyrzeć się głębiej strukturze molekularnej materiału oraz jego właściwościach.

2.4.1 Skład chemiczny szkła

Ocenięcie dokładnej wytrzymałości szkła możliwe jest wyłącznie w wyniku badań niszczących. Na wytrzymałość danego rodzaju szkła ma nie tylko jego skład chemiczny, ale również proces produkcji i wykańczania. W zasadzie w produkcji szkła stosuje się dziesięć tlenków, które stanowią większość wyrobów szklanych, choć mogą one być pozyskiwane w wyniku różnych procesów. Na ogół szkło składa się w 60-80% z tlenków krzemu, przy czym SiO_2 pozyskiwane jest z piasku, gdyż jest jego głównym składnikiem. Możliwe jest wytworzenia szkła o większej zawartości tlenku krzemu do 96% jednak tego typu szyby są rzadko stosowane ze względu na wysoką cenę. Szkło o wysokiej zawartości tlenku krzemu cechuje się niską rozszerzalnością termiczną, dlatego odnajduje zastosowanie w bardzo wąskim zakresie, takim jak produkcja lusterek do teleskopów. Zdaje się, że na chwilę obecną szkło wysoko kwarcowe w kontekście budownictwa stosowane jest jedynie w formie włókien w powłokach oraz w klejach odpornych na wysoką temperaturę.

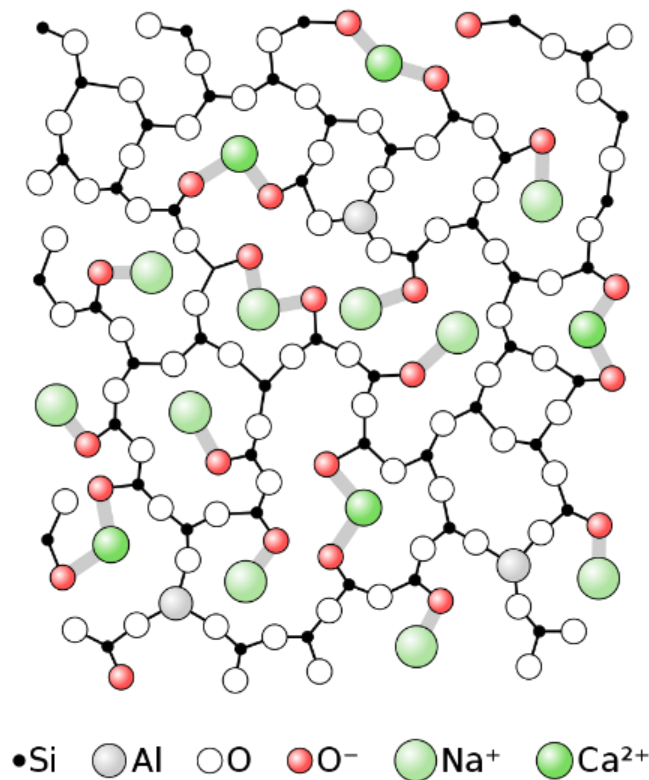
Po krzemie najważniejszym pierwiastkiem w produkcji szkła jest sód w postaci tlenku Na_2O . Tlenki sodu powstrzymują „pienie” się mieszanki oraz obniżają temperaturę topnienia. Szacuje się, że około 90% wytwarzanego obecnie szkła to właśnie szkło sodowo-krzemiankowe. Drugim pod względem popularności typem szkła jest szkło borowe, które również może być wykorzystywane w budownictwie jako materiał elementów nośnych. Pozostałe tlenki dodawane w celu regulacji właściwości materiału to ZnO , BaO , K_2O , PbO , Al_2O_3 , CaO , MgO . [2]

2.4.2 Struktura molekularna oraz wytrzymałość wyrobów szklanych

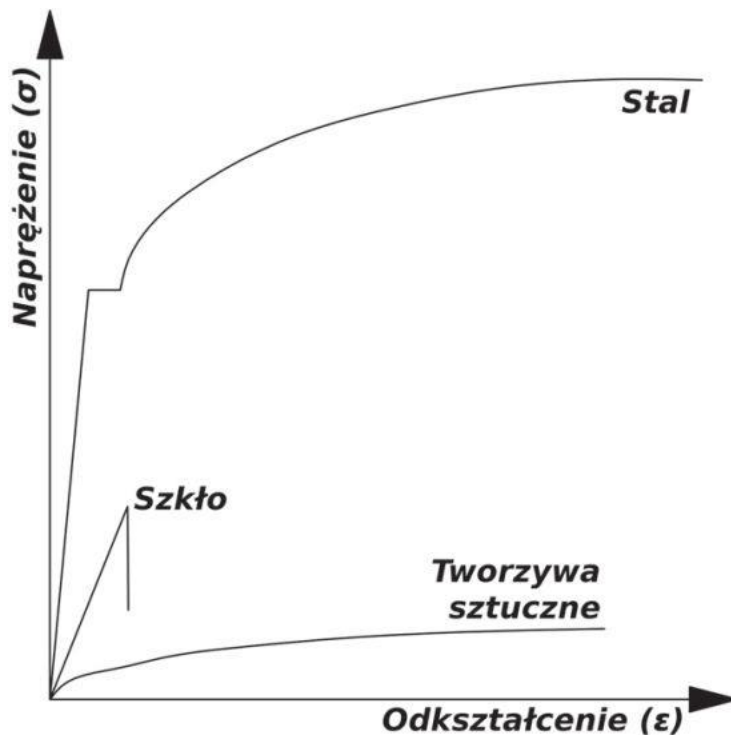
Choć dawniej w literaturze podawano, że szkło jest cieczą o bardzo dużej lepkości, to obecnie zdecydowana większość publikacji podaje, że szkło jest ciałem stałym o niekryształicznej strukturze molekularnej. [2]. W literaturze spotyka się również rzadki termin „ciała szkliste” w celu opisanego ciał stałych o tak nietypowej strukturze, rys. 4. [3].

Szkło posiada nieregularną strukturę i już na poziomie molekularnym powstają przerwy w „sieci krystalicznej” materiału, a ich wielkość jest kwestią losową. Dodatkowo podczas procesu produkcji do matrycy materiału wdają się mikroskopijne wtrącenia, czynniki te są potencjalnymi ogniskami powstawania rys i mogą prowadzić do zniszczenia materiału na poziomie dużo niższym od teoretycznej granicy wytrzymałości w wyniku zmęczenia materiału.

Określenie wytrzymałości materiałowych danego rodzaju szkła jest trudnym zagadnieniem. Jak zostało wcześniej zauważone już na etapie produkcji w szklanej tafli pojawiają się wtrącenia i niedoskonałości. Jako materiał bardzo kruchy, element szklany, okazuje przekroczenie nośności poprzez nagłe zniszczenie całego elementu, co gorsze przekroczenie nośności w jednym punkcie na ogół skutkuje gwałtownym i niepołączonym rozprzestrzenieniem się rysy na całą tafelę szkła, co jest bardzo niekorzystne w przypadku wielkogabarytowych elementów. Rysunek 5 przedstawia schemat wykresów naprężeń odkształceń dla wybranych materiałów, jak widać szkło pracuje wyłącznie w sprężystym zakresie. Tafle o dużych rozmiarach są niekorzystne również ze względu na fakt, iż prawdopodobieństwo wystąpienia imperfekcji w matrycy materiału jest proporcjonalne do powierzchni elementu.



Rysunek 4 Struktura molekularna szkła wapienno-sodowego
Źródło: wikipedia.org, dostępne dnia 01.12.2023



Rysunek 5 Schematyczny wykres odkształceń od naprężeń dla wybranych materiałów
 źródło: świat-szklo.pl dostępne: 01.12.2023

2.5. Typy szkła wykorzystywane w budownictwie

Obecnie wykorzystuje się wiele typów modyfikowanego szkła. Najpopularniejszymi typami szkła, z których się obecnie korzysta w konstrukcjach są: szkło float, odbarwione, powlekane, ornamentowane, piaskowane, hartowane, klejone, lodowe oraz krzywione.

Jedna szyba może należeć do kilku kategorii, gdyż podział przeprowadzany jest ze względu na wiele cech. Sprawę klasyfikacji wyrobów szklanych komplikuje również fakt, iż jest on różny w zależności od kraju i producenta w którym dany wyrób jest stosowany.

W zdecydowanej większości obiektów korzysta się z laminowanego szkła składającego się z wielu szyb. Specjaliści potrafią dobrać typy szkła w taki sposób, aby gotowy produkt w postaci szyby laminowanej posiadał pożądane właściwości. Przykładowo możliwe jest wykorzystanie szkła wzmacnianego chemicznie jako szyb zewnętrznych, ze względu na jego wytrzymałość na powstawanie mikro rys oraz normalnej tafli szkła float w środku szyby. Możliwych kombinacje szyb jest ogromna ilość, a ich stosowanie zależy od rozpatrywanego przypadku.

Poniżej zebrano listę nazw typów szkła, z którymi można się spotkać w zagranicznej literaturze branżowej oraz polskich publikacjach, nie wszystkie typy są wyróżnione w języku polskim lub nie są one wyróżniane na odrębne typy. Lista typów szkła jest w języku angielskim, ważniejsze typy szkła wykorzystywane na elementy nośne zostały opisane w dalszej części pracy. [4].

Typy szkła wyróżniane w literaturze branżowej:

1. Annealed Glass
2. Tempered Glass
3. Laminated Glass
4. Insulated Glass
5. Low-E Glass
6. Wired Glass
7. Tinted Glass
8. Mirrored Glass
9. Acid-Etched Glass
10. Bulletproof Glass
11. Fire-Rated Glass
12. Solar Control Glass
13. Self-Cleaning Glass
14. Electrochromic Glass
15. Photochromic Glass
16. Blast-Resistant Glass
17. Hurricane-Resistant Glass
18. Soundproof Glass
19. Decorative Glass
20. Fused Glass
21. Coated Glass
22. Ceramic Glass
23. Chemically-Strengthened Glass
24. Ultra-Clear Glass
25. Switchable Glass

Szkło typu float zazwyczaj używane jest do produkcji okien, fasad oraz przeszkleń w pojazdach mechanicznych. Gotowe szyby otrzymywane w procesie produkcji można następnie wykorzystać do wzmocnienia chemicznego bądź termicznego lub do laminacji.

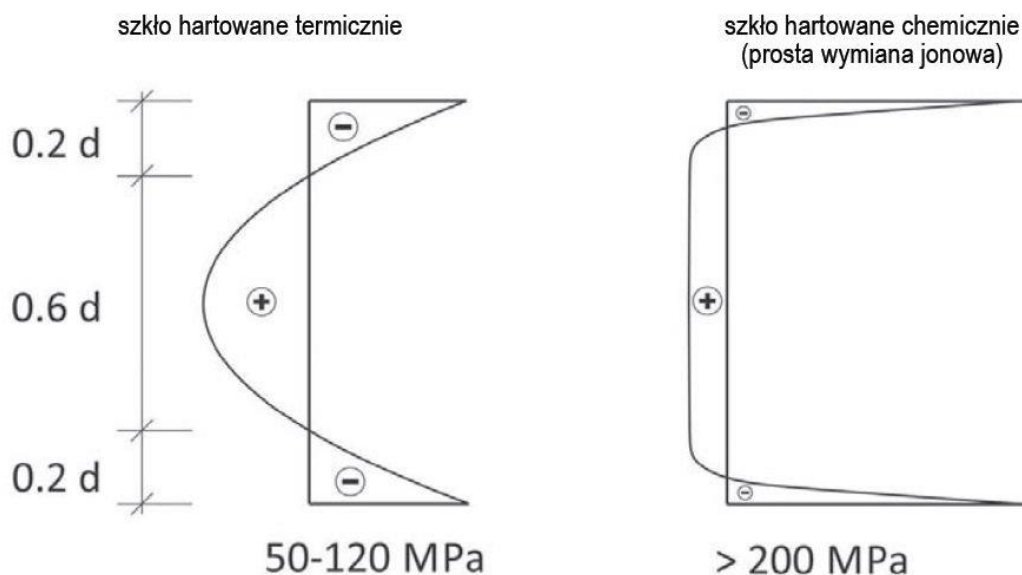
Szyby tworzone w technologii drawn sheet były wykorzystywane do lat 60 XX wieku, obecnie korzysta się z szyb „float glass”. Znajomość właściwości tego rodzaju szkła może być przydatna przy pracach renowatorskich starych obiektów, jednak z grubsza można je traktować tak samo jak float glass.

Szkło TTG (Thermally toughened glass – szkło termicznie hartowane) powstaje w wyniku obróbki termicznej szyb szkła float. Dzięki nierównomiernemu stygnięciu otrzymujemy korzystny układ naprężeń własnych materiału. Zewnętrzna powłoka pozostaje dłużej w strefie ściskanej, rys. 6, co przeciwdziała powstawaniu pęknięć.

Szkło HSG (Heat strengthened glass – szkło termicznie wzmocnione) pozyskuje się w wyniku obróbki termicznej. Otrzymuje się szkło o większej różnicy naprężeń wewnętrznych, z dużym ściskaniem zewnętrznej powierzchni. Szyby otrzymywane w tym procesie stosowane są w sytuacjach, gdy element musi wykazywać większą wytrzymałość na zginanie. Podczas zniszczenia szyba pęka na duże kawałki.

Szyby laminowane powstają w wyniku zespojenia dwóch lub większej ilości szyb. Historycznie najpopularniejszym laminatem był PVB (butyral poliwinylu) oraz żywice epoksydowe. Szkło laminowane jest najistotniejszym rodzajem szkła konstrukcyjnego, odpowiedni dobór szyb tego kompozytu, pozwala uzyskać korzystne cechy dla danego zastosowania.

Szkło CTG (wzmacniane chemicznie), lub szkło hartowane chemicznie powstaje w wyniku jonowej wymiany na powierzchni szklanej tafli. Na ogół jony potasu zastępują sód, przy czym ze względu na większą objętość atomu, w skrajnych włóknach przekroju powstaje strefa o zagęszczonej siatce atomowej, co powoduje powstanie znacznych naprężeń ściskających, rys. 6. Ze względu na wysoką cenę, szkło wzmacniane chemicznie raczej rzadko stosowane jest jako materiał konstrukcyjny, w związku z czym jest zastępowane szkłem hartowanym termicznie.



Rysunek 6 Naprężenia wstępne szkła hartowanego chemicznie oraz termicznie
 źródło: swiat-szkla.pl/article/18142-wyznaczanie-profilu-napre-w-szkle-hartowanym-chemicznie-za-pomoc-fotoelastycznosci dostępne dnia 08.10.2023

2.6 Połączenia elementów szklanych

Szkło jest bardzo kruchym materiałem i wszelkie połączenia działają jak karby mogące stanowić ogniska powstawania rys, powodujących zniszczenie całego elementu. Normy (DIN 18008, TRLV) oraz praktyka nakazują unikania sytuacji, w których szkło ma styczność z „twardymi” materiałami przykładowo innym szkłem lub metalami, dlatego w miejscach połączeń po między łącznikami (najczęściej wykonanymi z metalu) a szkłem stosuje się warstwę ochronną w postaci gumowych przekładek, bądź specjalnych silikonów do montażu elementów szklanych.

Według norm DIN 18008 oraz TRLV wyróżnia się dwa typy połączeń, punktowe oraz liniowe. W połączeniach punktowych szyby mocowane są za pomocą metalowych łączników przechodzących przez okrągłe otwory w szklanej tafli, przy czym otwory powinny znajdować się min. 80 mm od krawędzi tafli. Połączenia liniowe polegają na umieszczeniu tafli w metalowym „kanale”.

Przeglądając literaturę można zauważyć, że zakres stosowanych połączeń na świecie jest bardziej obszerny niż podział na „liniowe” oraz „punktowe”. Sądzę, że zaprezentowany poniżej podział jest bardziej odpowiedni, jednak należy podkreślić, iż zagadnienie połączeń w konstrukcjach szklanych nie jest zamknięte i wymaga dalszych wnikliwych badań.

Proponowany podział:

- a) Połączenia punktowe
- b) Połączenia kanałowe
- c) Połączenia zaciskowe

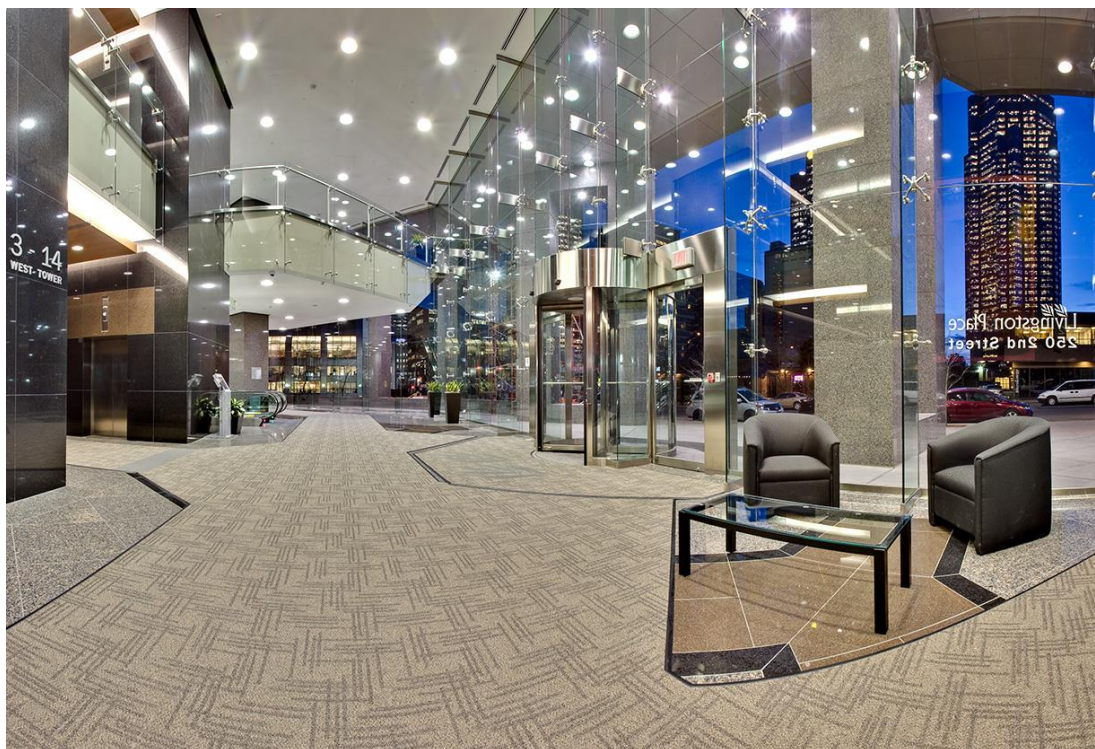
Uważam, że należy rozdzielić połączenia „kanałowe” w których elementy osadzone są w metalowym „bucie” i zabezpieczone są poprzez wysokie ściany łącznika, od połączeń zaciskowych, które mogą być zarówno punktowe jak i liniowe w swej geometrii, ale zasadniczo ich praca polega na zaciśnięciu elementu szklanego pomiędzy płaskimi ściankami metalowego łącznika.

Przykład połączenia punktowego przedstawiono na fotografii 21, 22.



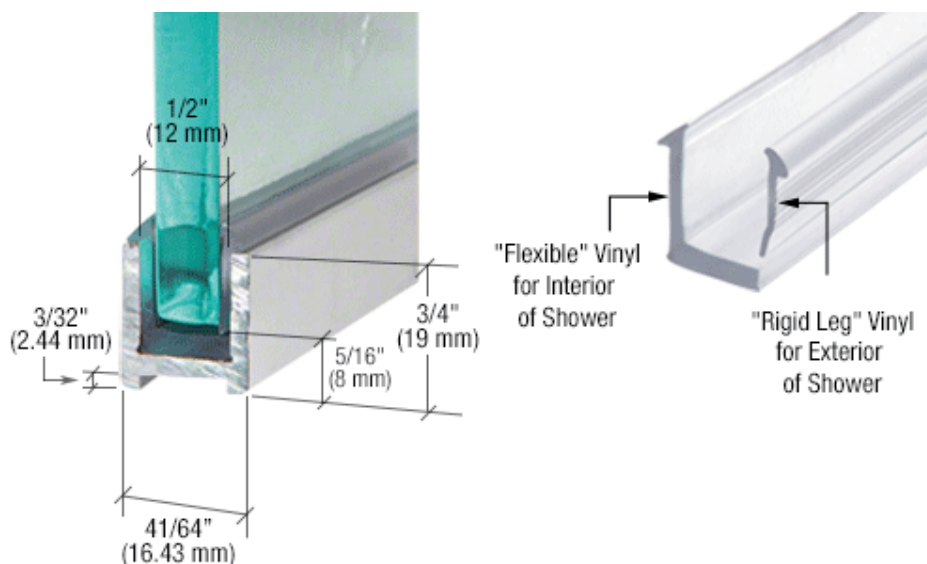
Fotografia 21 Łącznik punktowy

Źródło: www.stellaglasshardware.com dostępne dnia 01.12.2023



Fotografia 22 Szklana fasada zamocowana przy pomocy stalowych łączników punktowych
 Źródło: www.stellaglasshardware.com dostępne dnia 01.12.2023

Połączenia kanałowe często wykorzystywane są przy szklanych barierach oraz elementach osadzonych w orientacji pionowej, takich jak słupy czy ściany nośne, fot. 23.



Fotografia 23 Aluminiowy profil kanałowy (typu U) do mocowania szklanych barier
 Źródło: glasscomponents.co.uk dostępne dnia: 01.12.2023

Połączenia zaciskowe są niezwykle powszechne w przypadku szklanych barier, w szczególności, gdy są one częścią metalowo-szklanego systemu, fot. 24. Tego typu

połączenia są proste w konstrukcji, pozwalają na proste serwisowanie w przypadku uszkodzenia bariery. Biorąc pod uwagę, że rozwiązania te stosowane są np. w centrach handlowych jest to korzystne rozwiązanie.



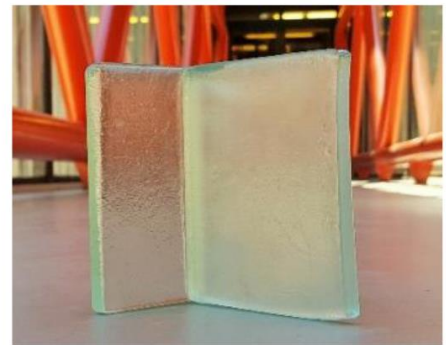
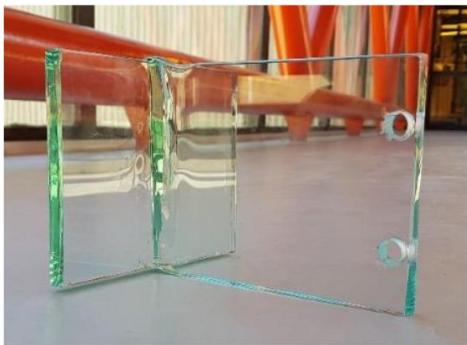
Fotografia 24 Połączenie zaciskowe

Źródło: <https://www.redshield.uk.com> dostępne dnia: 01.12.2023

2.6.1 Teoretyczne metody łączenia elementów szklanych

Rozważane są nowe metody łączenia elementów szklanych mające na celu eliminację potrzeby korzystania z metalowych łączników. Naukowcy z uniwersytetu w Delft w roku 2020 na konferencji w Gandawie, zaprezentowali wyniki wieloletnich badań gdzie z sukcesem złączyli ze sobą dwie tafle, korzystając z metod zgrzewania lokalnego (glass welding) i globalnego (heat bonding). W wyniku połączenia otrzymano próbki o przekroju teowym i poddano je badaniom niszczącym, fot. 25. Wyniki badań potwierdzają wzmocnienie otrzymanego produktu, co jest ogromnym sukcesem, gdyż podgrzewanie szklanej tafli do temperatury 500°C grozi powstaniem niekorzystnych naprężeń wewnętrznych w tafli. [5]

Opisane badania napawają optymizmem, jednak jak zauważają sami autorzy, wykonano zaledwie kilka próbek, a łączone tafle miały 10 mm grubości. Potrzeba wielu lat i badań, aby opisana metoda być może znalazła zastosowanie w łączeniu szklanych elementów nośnych. Opisywane połączenia najprawdopodobniej znajdą zastosowanie w szklanych barierach oraz elementach wyposażenia łazienek bądź basenów.



**Fotografia 25 Próbka zgrzana lokalnie (lewa) oraz globalnie (prawa)
Źródło: Artukul „The Production and Performance of Heat Bonded Glass Connections”**

2.7 Odporność na korozję

Szkło wykazuje dużą odporność na korozję i z reguły nie wymaga dodatkowych zabezpieczeń, jednak w specyficznych warunkach należy dokładnie rozważyć zasadność stosowania tego materiału.

Długotrwałe działanie wody w szczególności przy wysokiej temperaturze (powyżej 50 °C), może prowadzić do wypłukiwania słabo związanych pierwiastków z matrycy molekularnej szkła przyczyniając się do powstawania ognisk rys. Dodatkowo skorodowane szkło matowieje, staje się mętne i nieprzejryste, rys. 7.

Szkło szczególnie jest narażone na działalność ługów, czyli metalicznych wodorotlenków. W obecności kwasów szkło wykazuje dużo większą wytrzymałość, wyjątkiem jest jedynie kwas fluorowodorowy, który niesie największe zagrożenie z wymienionych czynników korozyjnych. Kwas ten tworzy przy nawet niskich stężeniach związek fluoru z krzemionką powodując szybkie rozpuszczenie szkła (w przeciągu kilku godzin).

Podsumowując korozja szkła zależy przede wszystkim od czasu trwania ekspozycji czynnika niszczącego, temperatury oraz wilgotności. W zdecydowanej większości przypadków korozja nie stanowi problemu przy projektowaniu elementów szklanych, należy mieć jednak na uwadze, aby nie stosować elementów szklanych w miejscach gdzie są one narażone na długotrwałe działanie wodorotlenków oraz kwasu fluorowodorowego. Dodatkowo postępującą korozję łatwo można wykryć poprzez zmiany w wyglądzie szklanej tafli. [6]



Rysunek 7 Skorodowane szkło

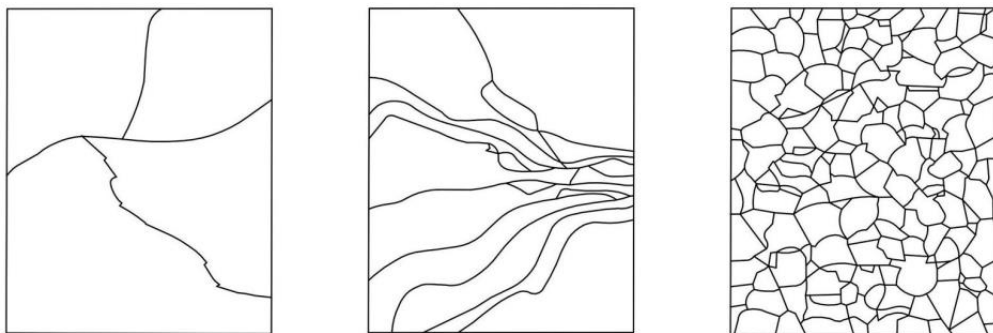
Źródło: www.corrosion-doctors.org dostępne dnia: 02.12.2023

2.8 Folie wykorzystywane do laminowania szkła

Folie pozwalają połączyć ze sobą kilka tafli szkła tworząc szkło laminowane. Połączenie kilku tafli szkła w oczywisty sposób zwiększa nośność elementu, ale co ważniejsze, w przypadku awarii element traci tylko część swojej nośności i daje możliwość zabezpieczenia konstrukcji przed postępującą katastrofą oraz naprawy usterki.

Poprawione bezpieczeństwo jest również ważnym powodem stosowania szkła laminowanego. Przeglądając normy i wytyczne, zauważa się, że nakazują one stosowanie szkła laminowanego w większości przypadków, a w szczególności w miejscach, gdzie pęknięte kawałki szkła mogłyby upaść na ludzi.

W zależności od sposobu wykończenia szkło posiada różną charakterystykę pęknięcia. Szkło odprężone, które jest powszechnie stosowane i tanie, pęka, dzieląc się na duże i ostre płyty. Szkło hartowane termicznie i chemicznie kruszy się na mniejsze kawałki o wygładzonych krawędziach. Z punktu widzenia bezpieczeństwa najlepiej sprawdza się szkło hartowane chemicznie, jednak jest ono drogie i mniej dostępne niż pozostałe odmiany. Dlatego laminacja jest tanim i efektywnym sposobem na zapewnienie bezpieczeństwa oraz poprawę nośności. Rysunek 8 przedstawia schematy pęknięcia szyb w zależności od ich wykończenia.



Rysunek 8 Wzór pęknięcia typów szkła. Szkło odprężone (z lewej), szkło hartowane termicznie (schemat środkowy), szkło hartowane chemicznie (schemat z prawej)

Źródło: Artykuł "Introduction to structural design of glass according to current European standards"

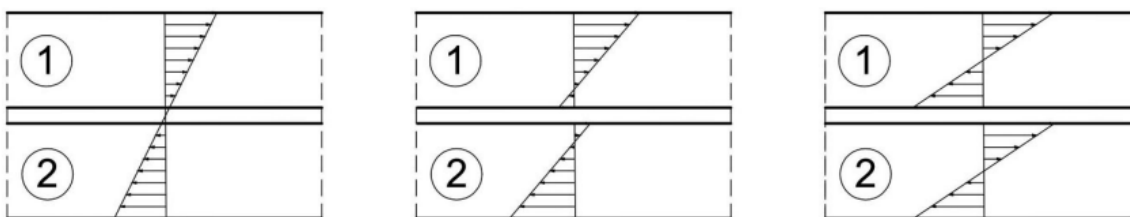
Do celów czysto konstrukcyjnych najpopularniejszym materiałem wykorzystywanym do laminowania tafli szklanych jest folia poliwinylbutyralowa (PVB), a zaraz po niej folia wykonana z polietylen-co-octanu winylu (EVA). Rzadziej stosuje się folię wykonaną z termoplastycznego poliuretanu. Folie te różnią się od siebie technologią laminacji (temperatura, transport), dostępnością i właściwościami materiałowymi (moduł Younga, moduł Kirchhoffa), a także różnym poziomem przezroczystości oraz takimi czynnikami jak pochłanianie promieni UV.

W zależności od rodzaju folii dostępne są one w różnych grubościach, dla folii PVB jest to 0,38; 0,76 lub 1,52 mm, a dla folii EVA 0,25; 0,38; 0,40 mm, możliwe jest jednak zamówienie folii o niestandardowych rozmiarach. Grubość folii podyktowana jest charakterem oraz miejscem pracy elementu szklanego. Norma Din 18008 oraz poradniki TRVL nakazują stosowanie folii o minimalnej grubości 1,52 mm dla elementów poziomych oraz umieszczonych nad miejscami, w których znajdują się ludzie (przeszklenia dachów, kładki). Dodatkowo folia musi zapewnić tak zwaną nośność szczątkową elementu, to znaczy być w stanie przenieść obciążenie własne zniszczonej szklanej płyty oraz od ciężaru jednej osoby.

Folie posiadają stosunkowo dużą wartość wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 20-40 MPa, natomiast mają stosunkowo niski moduł Younga. Należy dodać, że w przypadku folii moduł Younga zależy również od czasu przyłożonej siły oraz temperatury otoczenia. Przykładowo folia PVB posiada moduł Younga na poziomie 0,97 MPa w temperaturze 30°C po jednej godzinie, natomiast dla 50°C wartość modułu spada do 0,20 MPa.

Istnieją specjalistyczne folie oraz żywice, które posiadają korzystniejsze właściwości fizyczne i pozwalają na lepszą współpracę szklanych tafli. Przykładowo produkt Ionomer (SantryGlass®) posiada moduł Younga w temperaturze 30°C na poziomie 178 MPa po godzinie oraz moduł Kirchhoffa wynoszący 60 MPa w 30°C po godzinie.

Jak można zatem zauważyć w zależności od zastosowanej folii lub żywicy rozkład naprężeń w elemencie laminowanym będzie wyglądał różnie, w zależności od stopnia zespolenia elementów. Możemy wyróżnić trzy przypadki: pełne zespolenie, częściowe zespolenie, brak zespolenia, rys. 9.



Rysunek 9 Rozkład naprężeń od zginania w laminowanym przekroju dwuszybowym. Od lewej przekrój całkowicie zespolony, częściowo zespolony oraz brak zespolenia

Źródło: Artykuł "Introduction to structural design of glass according to current European standards"

Według najnowszej normy europejskiej EN 16612 efektywną grubość szkła laminowanego oblicza się z następującego wzoru:

$$t_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n h_i^3 + 12 \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^n (h_i + d_i^3)} \quad (1)$$

Gdzie:

h — Grubość szklanych tafli

ω — Współczynnik przenoszenia sił ścinających, przyjmuje wartości od 0 do 1

d — Odległość środka pojedynczej szyby od środka całego elementu laminowanego

W praktyce, dla większości przypadków normy przyjmują wartość współczynnika ω równą 0, w szczególności dla długotrwałych obciążeń. Współczynnik ω przyjmuje większe wartości dla schematów obciążenia z dominującymi chwilowymi podmuchami wiatru.

Folie poza zastosowaniem czysto konstrukcyjnym mają również odniesienie w kwestiach estetycznych wykonania elementu. Folię PVB można barwić lub nadawać jej wzory. Możliwe jest również umieszczenie świateł LED w warstwie folii. Dodatkowo nowoczesne folie mogą poprawiać izolacyjność cieplną oraz akustyczną jak i ograniczać przenikanie szkodliwego promieniowania UV. [7],[8]

3. Obecne procedury obliczeniowe i sposoby określania nośności elementów szklanych oraz praktyka projektowa

3.1 Dostępne normy i metody obliczeniowe dotyczące szkła budowlanego

Na chwilę obecną wciąż tworzone są jednolite procedury obliczeniowe, które będą zawarte w przyszłym Eurokodzie. Na podstawie zagranicznych publikacji można wyodrębnić kilka metod wykorzystywanych do określenia nośności elementów szklanych, są to:

1. Metoda naprężeń dopuszczalnych. Z metody tej często korzystają niemieckie poradniki techniczne TRLV. [9]
2. DELR (Damage Equivalent Load and Resistance), będąca pierwszą europejską metodą bazującą na częściowych współczynnikach bezpieczeństwa.
3. Metoda Siberta, która uwzględnia dwukierunkowe zginanie.
4. Metoda Shena, która jest uproszczoną metodą DELR bazującą częściowo na kanadyjskiej normie CAN/CGSB 12.20-M89.
5. Prenorma prEN 13474 bazujący na metodach DELR, Sibera oraz Shena. [10]
6. Norma ASRME 1300, będąca amerykańską normą bazującą na probabilistycznym modelu zniszczenia szkła.
7. Norma CEN/TS 19100- Design of glass structures. [11]
8. Niemiecka norma DIN 18008.[12]

Niestety, pomimo upływu czasu i rozwoju norm ich zastosowanie w przypadku elementów pracujących w bardziej skomplikowanych stanach naprężenia jest ograniczone. W normach rozpatrywane są przede wszystkim szklane balustrady oraz elementy fasad, a także duże przeszklenia.

Obecnie najpopularniejsze procedury obliczeniowe opierają się o normę DIN 18008 oraz o prenormę prEN 13474, [10].

Należy zauważyć, że wyniki otrzymywane w przy stosowaniu norm są obarczone dużym współczynnikiem bezpieczeństwa, co za tym idzie rozwiązania te nie są ekonomiczne. Biura projektowe oraz firmy produkujące elementy szklane opierają się na własnych metodach wypracowanych w wyniku badań w jednostkach naukowych oraz dzięki ogromnemu doświadczeniu, [13].

3.2. Wyznaczanie nośności według prEN 13474

Istota metody sprawdzenia nośności elementów szklanych w normie sprowadza się do porównania naprężeń efektywnych z naprężeniami dopuszczalnymi:

$$\sigma_{eff,d} \leq f_{g,d} \quad (2)$$

Przy czym naprężenia efektywne obliczane są zgodnie z poniższym wzorem:

$$\sigma_{eff,d} = \left[\frac{1}{A} \int_A (\sigma_1(x, y))^\beta dx dy \right]^{1/\beta} \quad (3)$$

Gdzie:

A — Całkowita powierzchnia tafli szklanej

$\sigma_1(x, y)$ — Naprężenia główne od obciążeń zewnętrznych w punkcie (x, y) występujące na powierzchni tafli

β — Parametr rozkładu Weibulla, który otrzymywany jest na podstawie badań próbek szklanych o sztucznie uszkodzonych powierzchniach poprzez piaskowanie. Wartość parametru wynosi $\beta = 25$

Naprężenia dopuszczalne wyznacza się korzystając z następujących wzorów:

Dla szkła float:

$$f_{g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} \cdot \gamma_n \quad (4)$$

Dla szkła hartowanego i półhartowanego:

$$f_{g,d} = \left(k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V} \right) \cdot \gamma_n \quad (5)$$

Gdzie:

$f_{g,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła niewzmacnionego float na rozciąganie przy zginaniu

$f_{b,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła wzmacnianego termicznie na rozciąganie przy zginaniu

γ_M — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla naprężeń

γ_V — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla naprężeń powstałych w wyniku hartowania

γ_n — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla według załącznika krajowego, w przypadku ogólnym równy 1

k_A — Współczynnik efektu skali wynoszący: $k_A = A^{0,04}$

A — Powierzchnia tafli szkła

k_{mod} — Współczynnik redukujący nośność w zależności od czasu trwania obciążenia

3.2.1 Wartości współczynników obliczeniowych wg prenormy prEN 13474

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla elementów szklanych zostały określone na następującym poziomie, tab. 1.

Tabela 1 Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla wybranych rodzajów szkła w ujęciu prEN 13474

Rodzaj szkła	Hartowane termicznie	Hartowane chemicznie
Float	1,8	2,3
Emaliowane	1,8	2,3
Wzorzyste i wzorzyste emaliowane	2,3	3,0
Szkło boro-krzemianowe	1,8	—

Wytrzymałości tafli szklanych mają się następująco, tab. 2.

Tabela 2 Wytrzymałości wybranych rodzajów szkła na rozciąganie przy zginaniu w ujęciu prEN 13474

Rodzaj szkła		Sposób formowania	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]
Szkło float niewzmacnianie		Płaskie	45
Szkło wzmacnianie termicznie	hartowane (ESG)	Płaskie	120
		Wzorzyste	90
		Emalionowane	75
	półhartowane (TVG)	Płaskie	70
		Wzorzyste	55
		Emalionowane	45
Szkło wzmacniane chemicznie		Płaskie	150

Wartości współczynnika k_{mod} są następujące, tab. 3

Tabela 3 Wartości współczynnika k_{mod} w zależności od rodzaju obciążenia w ujęciu prEN 13474

Czas oddziaływanie	typ obciążenia	Wartość współczynnika k_{mod}
Zmienne krótkotrwałe	użytkowe, wiatr	0,72
Zmienne długotrwałe	śnieg, temperatura	0,36
Stałe	ciężar własny	0,27

3.3 Praktyka projektowa w odniesieniu do poradników niemieckich TRLV i normy DIN 18008

Poradniki TRLV (Technische Regeln für die Verwendung) były tworzone na przestrzeni wielu lat przez Niemiecki Instytut Inżynierii Budowlanej (niem. DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik) i zawierają praktyczną wiedzę oraz wymagania w odniesieniu do tworzenia konstrukcji szklanych. Poradniki stanowią bazę na podstawie, której sporządzono o wiele bardziej rozbudowane i do niedawna aktualizowane normy DIN 18008.

Ze względu na powszechną dostępność poradników TRVL oraz faktu, że jest on bazą nowych norm DIN 18008, podrozdziały 3.3.1 oraz 3.3.2 poświęcono właśnie tym poradnikom.

3.3.1 Zakres zastosowania

Przepisy mają zastosowanie do oszklenia, które podparte jest co najmniej z dwóch przeciwległych stron. Przeszklenia dzielone są ze względu na nachylenie do pionu na:

- Pionowe — nachylenie do pionu poniżej do 10°
- Poziome — nachylenie od pionu powyżej 10°

Przepisy nie mają zastosowania do:

- elementów klejonych elewacji,
- zakrzywionych przeszkleń poziomych.

Przepisy dotyczące przeszkleń poziomych należy również stosować w przypadku, gdy elementy pionowe narażone są na długotrwałe oddziaływanie na kierunku poziomym do tafli szkła np. w świetlikach dachowych narażonych na gromadzenie się śniegu napierającego na szybę.

3.3.2 Istotne zagadnienia

Poniżej zostały zebrane istotne zagadnienia poruszane w normie:

- Szyby hartowane ESG (szyba hartowana) i ESG-H (szyba hartowana o podwyższonej wytrzymałości na pęknięcie) należy sprawdzać pod względem uszkodzenia krawędzi. Elementy z defektem, który wnika głębiej niż 15% grubości szyby nie mogą być instalowane dla szyb ESG, oraz 5% dla szyb ESG-H.
- Pod wpływem temperatury i obciążenia nie może dochodzić do kontaktu szkła z twardymi materiałami (np. szkło, metal).
- Krawędzie szkła drucianego nie mogą być narażone na działanie wilgoci.
- Zabrania się wiercenia otworów w szybach. Otwory mogą być wiercone jedynie w bezpiecznym szkłe laminowanym wykonanym co najmniej ze szkła półhartowanego. Odległość otworów między sobą jak i między krawędziami nie może być mniejsza niż 80 mm.
- W przypadku liniowego oparcia szkła powierzchnia zacisków nie może być mniejsza od 1000 mm^2 , a głębokość wsuwania tafli nie może być mniejsza niż 25 mm. Jednocześnie rozstaw zacisków krawędziowych nie może przekraczać 300 mm.

Dodatkowe wymagania dla szyb typu „walk-on”

- Obciążenie ruchem przekraczające 5 kN/m^2 jest niedozwolone.
- Dopuszcza się szyby złożone minimum z trzech warstw.
- Dolna szyba musi być wykonana ze szkła bezpiecznego oraz mieć co najmniej 10 mm grubości.
- Warstwy pośrednie folii PVB muszą mieć co najmniej 1,52 mm.
- Szyby muszą znajdować się w minimalnej odległości 10 mm od siebie.

3.3.3 Wyznaczenie nośności według DIN 18008

Założenia obliczeniowe normy DIN 18008 różnią się od pozostałych rozwiązań. Norma przewiduje dwa wzory na wytrzymałość w zależności od tego czy dany element jest wzmocniony termicznie czy nie.

Wytrzymałość szkła niewzmocnionego:

$$R_d = \frac{k_{mod} \cdot k_c \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (6)$$

Wytrzymałość dla szkła hartowanego:

$$R_d = \frac{k_c \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (7)$$

Gdzie:

f_k — Charakterystyczna wytrzymałość szkła na zginanie

k_c — Współczynnik zależny od typu konstrukcji. Współczynnik przykładowo wynosi 1,8 dla szkła hartowanego oraz 1,0 dla szkła normalnego w konstrukcjach „liniowo mocowanych” oraz 1,0 dla elementów mocowanych punktowo. W przypadku, gdy wartość współczynnika nie jest dokładnie określona przyjmuje się równą 1,0.

γ_M — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa równy 1,5 dla szyb hartowanych oraz 1,6 dla pojedynczych szyb o grubości 2 mm.

k_{mod} — Współczynnik redukujący nośność w zależności od czasu trwania obciążenia

Należy zwrócić uwagę na fakt, że współczynnik k_{mod} występuje jedynie dla szkła niewzmocnionego termicznie. W normie w punkcie 8.3.8 istnieje również zapis o redukcji wytrzymałości (80%) w strefie brzegów tafli szkła niewzmocnianego. W module RF-GLASS przejęta jest wartość 5 cm od końca tafli.

W tabeli 4 zebrano wartości współczynnika k_{mod} dla różnych typów obciążeń

Tabela 4 Wartości współczynnika k_{mod} w zależności od rodzaju obciążenia w ujęciu DIN 18008

Czas oddziaływanie	typ obciążenia	Wartość współczynnika k_{mod}
Zmienne krótkotrwałe	użytkowe, wiatr	0,70
Zmienne średniotrwałe	śnieg, temperatura, zmiana ciśnienia meteorologicznego	0,40
Stałe	ciężar własny, lokalna zmiana wysokości	0,25

3.4 Wyznaczanie nośności według EN 16612 i EN 16613

Norma w swoich założeniach korzysta z metody stanu granicznego nośności. Istotą metody jest zbadanie czy maksymalne naprężenia nie przekraczają maksymalnej wytrzymałości materiału oraz czy maksymalne ugięcia nie przekraczają wartości zadanych przez normę [7].

Dla stanu granicznego nośności musimy spełnić następujący warunek:

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d} \quad (8)$$

Naprężenia dopuszczalne wyznacza się korzystając z następujących wzorów:

Dla normalnego szkła

$$f_{g,d} = \frac{k_e \cdot k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} \quad (9)$$

Dla szkła sprężonego

$$f_{g,d} = \frac{k_e \cdot k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v(f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,V}} \quad (10)$$

Gdzie:

- $f_{g,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła na zginanie
- $f_{b,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła sprężonego na zginanie
- $\gamma_{M,A}$ — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla szkła odpężonego równy 1,8
- $\gamma_{M,V}$ — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla szkła sprężonego równy 1,2
- k_v — Współczynnik odpowiadający za wzmocnienie szkła sprężonego, dla szyb float równy 1,0
- k_e — Współczynnik wytrzymałości krawędzi
- k_{sp} — Współczynnik zależny od profilu powierzchni szkła, dla szkła float równy 1,0
- k_{mod} — Współczynnik redukujący nośność w zależności od czasu trwania obciążenia

Przyglądając się wzorowi na wytrzymałość elementu szklanego widać, że wartość wytrzymałości nie zależy jedynie od parametrów materiału, ale również od czasu

występowania danego obciążenia. Norma określa wartość współczynnika k_{mod} korzystając ze wzoru:

$$k_{mod} = 0,663 \cdot t^{-1/16} \quad (11)$$

Gdzie:

t — Czas obciążenia zadany w godzinach

Dla przypadków ogólnych zebrano wartości współczynnika k_{mod} w tabeli 5:

Tabela 5 Wartości współczynnika k_{mod} w odniesieniu do poradników TRVL oraz normy DIN 18008

Obciążenie	Czas trwania	Wartość k_{mod}
Podmuch wiatru	5 s (lub mniej)	1,0
Obciążenie wiatrem podczas burzy/ wichury	10 min	0,74
Obciążenie konserwatorskie	30 min	0,69
Obciążenie śniegiem — zewnętrzne zadaszania i dachy nieogrzewanych budynków	3 tygodnie	0,45
Obciążenie śniegiem — dachy ogrzewanych budynków	5 dni	0,49
Obciążenie stałe, ciężar własny, obciążenia wysokościowe dla szyb zespolonych	Permanentne (50 lat)	0,29

Na ogół na elementy nie działa jeden typ obciążenia, a kombinacja obciążeń. W takim przypadku norma zaleca przyjąć do obliczeń największą wartość k_{mod} , czyli dla obciążenia w kombinacji, które trwa najkrócej. Dopuszcza się również wyznaczenie wartości współczynnika jako średnią ważoną.

3.5 Procedury obliczeniowe w kontekście CEN/TC 250/SC

W związku z rosnącymi potrzebami kompleksowego zaplecza normowego w odniesieniu do projektowania konstrukcji szklanych, Europejska Komisja Standaryzacyjna (ang. European Committee for Standardization (CEN)) rozpoczęła prace nad stworzeniem i wydaniem Eurokodu 10: Projektowanie konstrukcji szklanych (prCEN/TS 19100).

Norma planowo ma być wydana w roku 2024 i będzie składała się z trzech części:

- Część 1: Podstawy projektowania i materiały.
- Część 2: Projektowanie elementów szklanych obciążonych poza płaszczyzną.
- Część 3: Projektowanie elementów obciążonych w płaszczyźnie i ich połączeń mechanicznych.

Eurokod 10 strukturą będzie nawiązywał do innych Eurokodów poświęconych projektowaniu konstrukcji, największa zmiana jest związana z kruchą naturą szkła. Na bazie analogii do klas konsekwencji z Eurokodu 0, wprowadzono scenariusze stanu granicznego (LSS) oraz dwa nowe stany graniczne; stan graniczny pęknięcia (ang. FLS – fracture limit state) oraz stan graniczny po pęknięciu (ang. PFLS – post fracture limit state), tab. 6.

Tabela 6 Tabela z preEurokodu 10 przedstawiająca scenariusze stanów granicznego oraz obliczane w nich stany graniczne.

	Scenariusz stanu granicznego			
	LSS-0	LSS-1	LSS-2	LSS-3
Projektowanie dla stanu niepękniętego szkła	SLS	SLS	SLS	SLS
	ULS	ULS	ULS	ULS
Projekt dla stanu pęknięcia szkła (bezpieczne pęknięcie szkła)		FLS		FLS
Projekt dla stanu po pęknięciu (nośność szczątkowa)			PFLS	PFLS

W zależności od rodzaju elementu należy rozpatryć inne scenariusze stanu granicznego, przykładowe elementy zostały zawarte w tabeli 7. Przykładowo dla elementu pracującego jako słup, należy przyjąć trzeci scenariusz stanów granicznych i zwymiarować go zgodnie ze wszystkimi czterema stanami granicznymi.

Tabela 7 Tabela z prenormy pokazująca zastosowanie scenariuszy oraz stanów granicznych nośności w zależności od elementów i ich zastosowania

Scenariusz Stanu Granicznego	LSS-0a	LSS-0b	LSS-1	LSS-2	LSS-3
Przykłady przeszkleń	Panel wypełniający $A < 2 \text{ m}^2$	Panel wypełniający większy	Balustrady, pionowe przeszklania mocowane punktowo, szklane drzwi	Poziome przeszklania górne (overhead), szklane fasady	Podłogi, słupy, belki
Niepęknięte	Stan graniczny użyteczności (SLS)				
	Stan graniczny nośności (ULS)				
Pęknięte	Stan graniczny pęknięcia (FLS)				
Po pęknięciu				Stan graniczny po pęknięciu (PFLS I, PFLS II)	

3.5.1 Stan graniczny nośności w ujęciu prCEN/TS 19100

Norma zakłada, że wartości charakterystyczne sił działających na konstrukcję E_d nie powinny przekraczać obliczeniowej wytrzymałości konstrukcji R_d

$$E_d \leq R_d \quad (12)$$

Wartość E_d może być wyznaczona na dwa sposoby. Po pierwsze możliwe jest wyznaczenie wartości obliczeniowej wytrzymałości na podstawie naprężeń głównych na powierzchni szkła σ_{prim,E_d} na kierunku głównym. Po drugie wartość E_d może się odnosić do maksymalnych sił przekrojowych N_{Ed} , M_{Ed} oraz V_{Ed} w najbardziej wyężonym przekroju.

Obliczeniowa wytrzymałość elementu na zginanie obliczana jest ze wzoru

$$f_{g,d} = k_e \cdot k_{sp} \cdot \lambda_A \cdot \lambda_l \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M} + k_p \cdot k_{e,p} \cdot \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_p} \quad (13)$$

Gdzie:

- $f_{g,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła odprężonego na zginanie
- $f_{b,k}$ — Charakterystyczna wytrzymałość szkła wzmocnionego na zginanie
- γ_M — Częściowy współczynnik materiałowy bezpieczeństwa dla szkła
- γ_p — Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla szkła sprężonego powierzchniowo
- k_e — Współczynnik wykończenia otworów lub krawędzi
- k_{sp} — Współczynnik profilu powierzchni szkła
- k_{mod} — Współczynnik modyfikujący (w przypadku wykorzystania szkła odprężonego należy przyjmować wartości z Tabeli B.3, w pozostałych przypadkach $k_{mod}= 1,0$)
- λ_A/λ_l — Współczynniki zależne od wielkości elementu. Wartość współczynników wynosi 1,0, poza przypadkami, gdy powierzchnia elementu przekracza 18 m² lub długość krawędzi elementu przekracza 6 m.
- k_p — Współczynnik uwzględniający proces sprężania (Tabela B.4)
- $k_{e,p}$ — Współczynnik uwzględniający sprężenie krawędziowe bądź otworów

4. Część obliczeniowa

4.1. Problem projektowy

Problemem rozpatrywanym w pracy jest wykonanie studium projektowego wiaty szklanej pełniącej funkcję użytkową oraz estetyczną. Docelowo wszelkie elementy nośne wiaty powinny być wykonane ze szkła. Wiata od góry obciążona jest znacznym ciężarem pochodzącym z donicy na kwiaty, rys. 10.

Docelowym miejscem wiaty jest niezagospodarowany obszar przed urzędem morskim w Szczecinie. Obiekt będzie posiadał funkcję użytkową chroniącą rowery przed czynnikami atmosferycznymi, jak i funkcję estetyczną. Oparta na szklanych taflach donica będzie sprawiała wrażenie unoszenia się w powietrzu, a dodatkowo ze względu na zastosowanie szkła jako elementu nośnego ścian obiektu, będzie można wygrawerować na nich półprzezroczyste logo, bądź iluminować szyby kolorowym światłem co może być atrakcyjne podczas imprez i ważnych wydarzeń.

W studium projektowym zostanie rozpatrzona możliwość wykonania takiej struktury jako całoszklanej w oparciu o dostępną wiedzę techniczną. Nośność konstrukcji zostanie również sprawdzona w sytuacji awaryjnej, kiedy to jedna ze ścian jest uszkodzona.

4.2. Geometria obiektu i układ statyczny

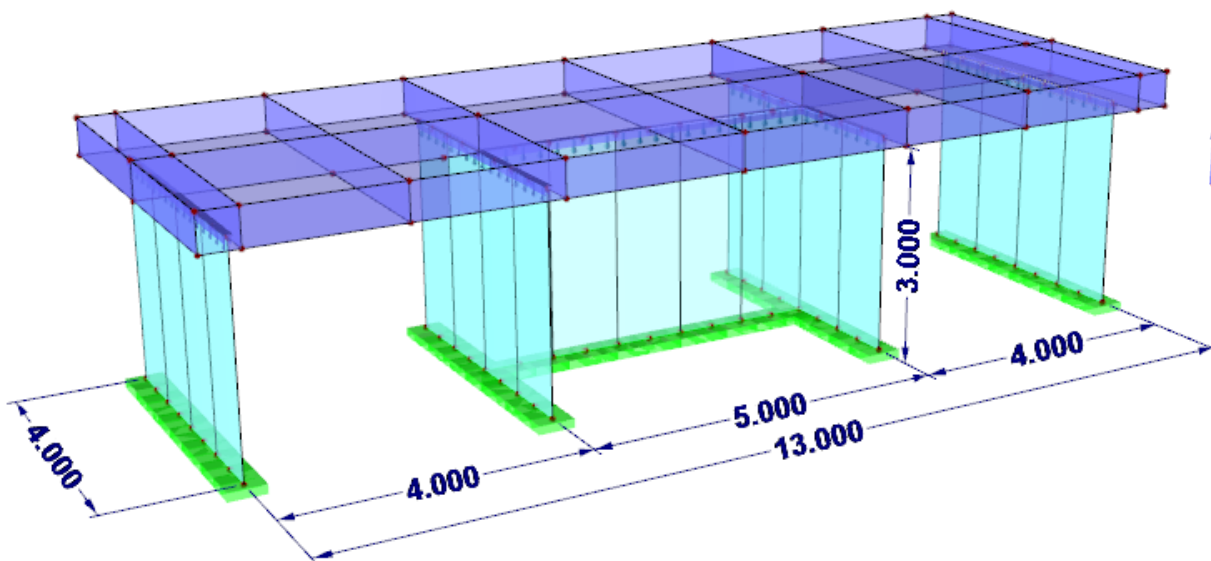
Hala składa się z 21 szklanych tafli o wymiarach 3x1 metr. Ułożone są one w 4 krótsze ściany po 4 m oraz długą ścianę o długości 5 m. Całość przykrywa stalowy dach służący również jako element dekoracyjny pełniący funkcje rzeźby i donicy. Ściany są połączone przegubowo z dachem oraz utwierdzone z fundamentem.

Pomimo faktu, iż istnieje techniczna możliwość wykonania wszystkich ścian z pojedynczych szyb, zdecydowano się postępować zgodnie z przyjętą praktyką i podzielić ściany na mniejsze elementy. Takie rozwiązanie jest korzystne w transporcie i montażu elementów, jak i przede wszystkim poprawia bezpieczeństwo konstrukcji, gdyż potencjalne pęknięcia zostaną ograniczone wyłącznie do tafli, na której się pojawiły.

Całkowite wymiary wiaty to 13x4x3 m dla elementów szklanych. Konstrukcja dachu wystaje na 0,5 m poza obrys wiaty oraz jest wysoka na 0,6 m, rys. 11.



Rysunek 10 Wizualizacja wiaty wykonana w programie Lumion



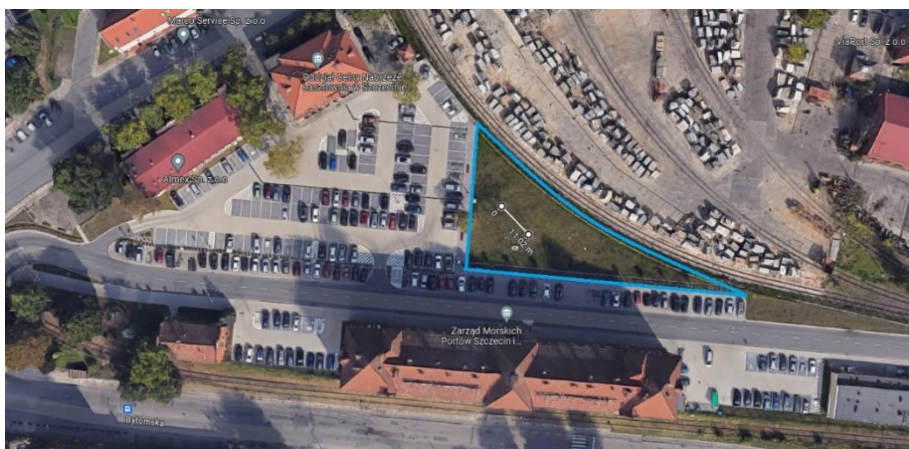
Rysunek 11 Model w programie RFEM5

4.3. Założenia

W celu przeprowadzenia obliczeń dokonano następujących uproszczeń i założeń:

1. Obciążenia atmosferyczne przyjęto tak jak dla Szczecina.
2. Obiekt będzie znajdował się na skwerze przy Zarządzie Morskich Portów w Szczecinie i Świnoujściu, rys. 12.

3. Podczas awarii konstrukcja będzie zabezpieczona stalowymi stemplami w przeciągu 24 godzin.



Rysunek 12 Przybliżona lokalizacja obiektu

4.3.1 Przyjęte materiały

Donica znajdująca się na górze wiaty wykonana jest z zespawanych blach ze stali nierdzewnej. Łączniki szyb zaprojektowano korzystając z blachy oraz dwóch kątowników. Przyjęto fundamenty z betonu zbrojonego.

W celu ograniczenia ugięć szyb zastosowano ściany szklane złożone z trzech warstw laminowane żywicą. Tego typu produkty oferowane są na przykład przez polską firmę Ligęza rys. 13.

Grubość szkła (warstw)	od 4mm do 19mm
Grubość lamiantu	1mm, 2mm
Wymiary	Maksymalne: 3210x6000mm W przypadku szyb o powierzchni > 5,00 m ² oraz przekraczających ciężar 200kg prosimy o kontakt z biurem handlowym.
Rodzaje szkła	szkło float szkło odzielane szkło antisol (barwione w masie) szkło satynowe (trawione chemicznie) szkło piaskowane szkło emaliowane oraz z sitodrukiem szkło zwykłe i hartowane
Kształt	prostokątny trapezowy, trójkątny owalny, kołowy inny nieregularny (na podstawie szablonu) wg plików CAD

Rysunek 13 Zrzut ekranu produktu oferowanego przez firmę Ligęza

4.4. Modelowanie nośnych elementów szklanych w programie RFEM 5

Program RFEM 5 umożliwia tworzenie modeli opierających się na metodzie elementów skończonych. Możliwe jest zamodelowanie konstrukcji szklanej wykorzystując podstawowe narzędzia oferowane przez program RFEM 5 bądź inny dowolny program pozwalający modelować elementy 2D oraz 3D metodą elementów skończonych.

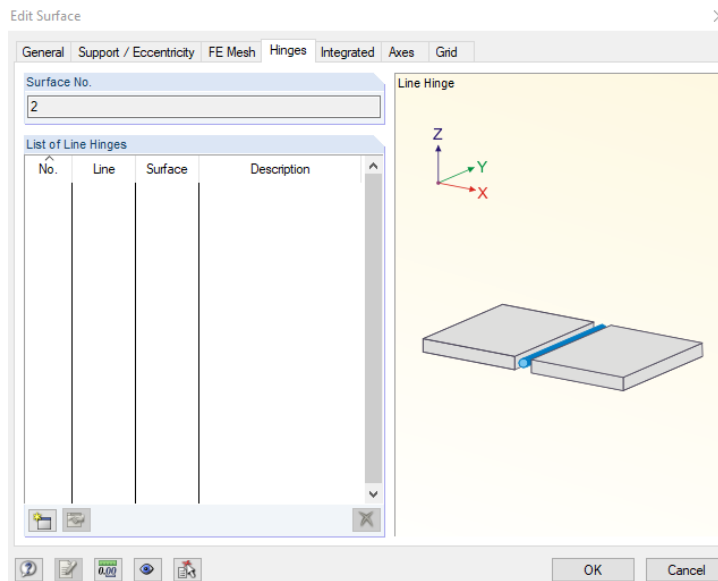
Jednakże firma DLUBAL oferuje moduł rozszerzający dedykowany do wymiarowania elementów szklanych. Moduł RF-GLASS pozwala przeprowadzić analizę zgodnie z niemieckimi poradnikami technicznymi TRVL, normą DIN 18008 oraz przeprowadzenie analizy zgodnie z teorią wytrzymałości materiałów. W czasie pisania tej pracy nie wydano jeszcze modułu RF-GLASS dla najnowszej wersji programu RFEM 6, jednak powinien się on pojawić po oficjalnym wydaniu Eurokodu 10.

Modelując szklane ściany, fasady i inne elementy należy mieć na uwadze, że są to elementy rozdzielne. Nawet, gdy możliwe jest techniczne wykonanie elementu wielkogabarytowego to z praktyki budowlanej wynika, że lepiej jest podzielić taki element na kilka części. Rysy w szkłe rozprzestrzeniają się niezwykle szybko i bez wcześniejszych objaw powstawania, ze względu na kruchą naturę materiału. Poza wymianą całego elementu nie istnieją skuteczne metody naprawy uszkodzonych elementów, dlatego należy ograniczać możliwe szkody dzieląc wielkogabarytowe elementy na mniejsze części. Szkło szczególnie narażone jest na powierzchniowe uszkodzenia powstałe w wyniku punktowego kontaktu z twardymi ciałami. Dlatego na miejscach styku elementów szklanych z innymi elementami szklanymi, bądź metalowymi stosuje się silikonowe wypełnienia mające na celu ochronę szklanej powierzchni.

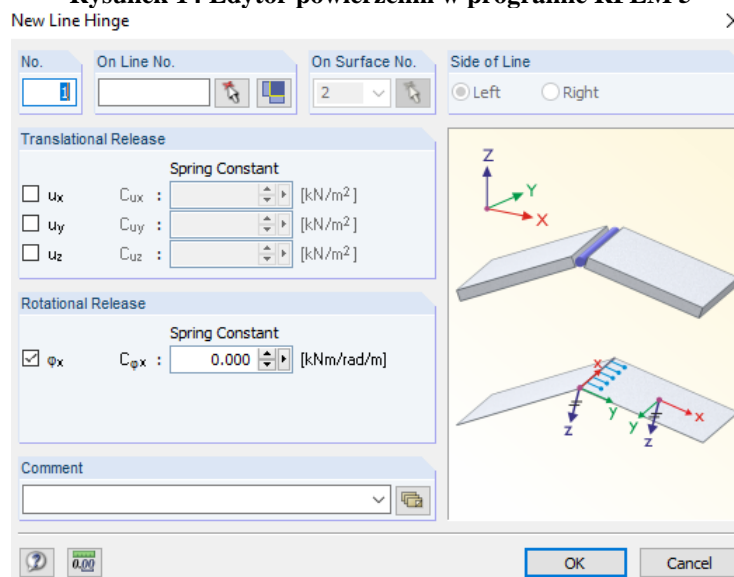
Okazuje się zatem, że przenoszenie obciążeń pomiędzy szklanymi elementami następuje w bardzo ograniczonym stopniu. Możliwe jest przenoszenie obciążeń ściskających przez docisk elementów, jednak nie można mówić o przenoszeniu rozciągania między elementami w żadnym znaczącym stopniu. Dlatego niezwykle istotne jest poprawne zamodelowanie elementów szklanych w programie obliczeniowym.

Wydawałoby się, że można skorzystać z opcji „line hinges” zawartej w edytorze powierzchni programu RFEM 5, rys. 14, 15, gdzie w ograniczonym stopniu można edytować interakcje między sąsiadującymi płaszczyznami. Nie jest to jednak najlepsze rozwiązanie do jakiego mamy dostęp. Co więcej, choć jest to anegdotyczna obserwacja, to opcja „hinges”

w ograniczonym stopniu współpracuje z modułem RF-GLASS, przynajmniej w analizowanym przypadku.

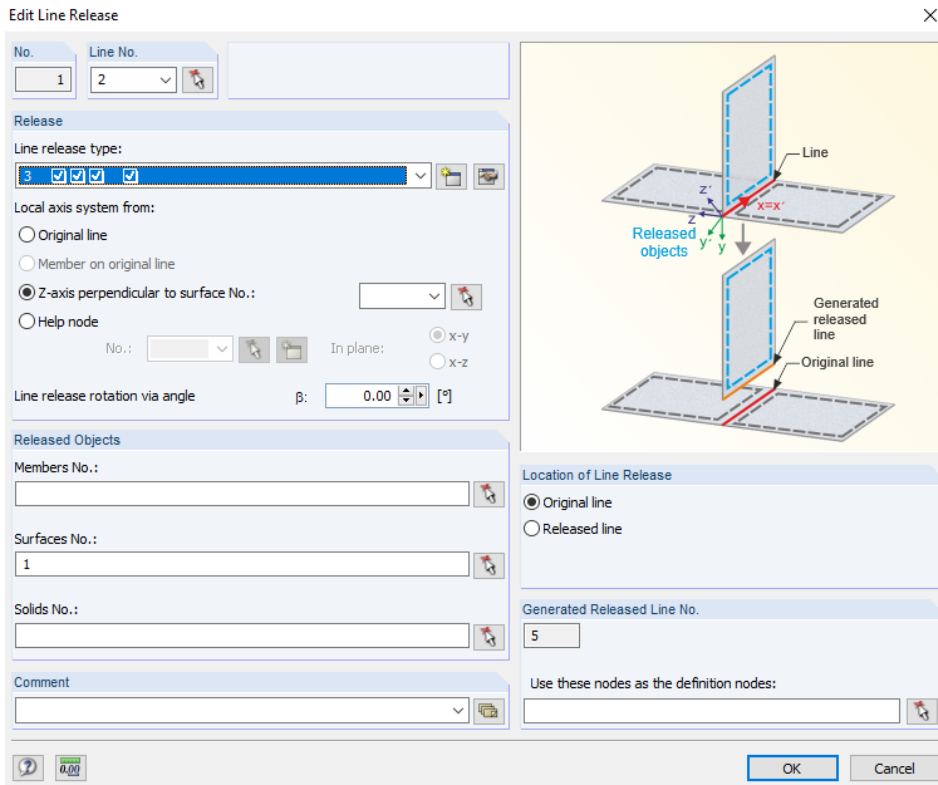


Rysunek 14 Edytor powierzchni w programie RFEM 5

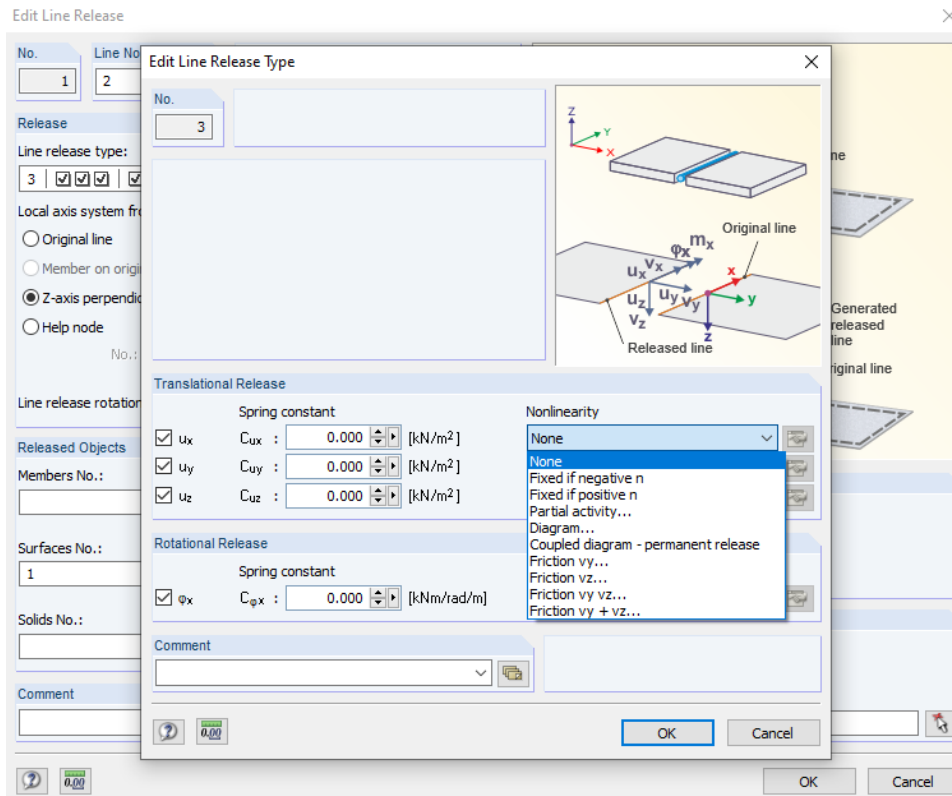


Rysunek 15 Edytor opcji "hinges"

Opcją sprawdzającą się lepiej w analizie z wykorzystaniem modułu RF-GLASS jest funkcja „line releases”, rys. 16, 17. Pozwala ona na dokładne zdefiniowanie interakcji między sąsiadującymi płaszczyznami.



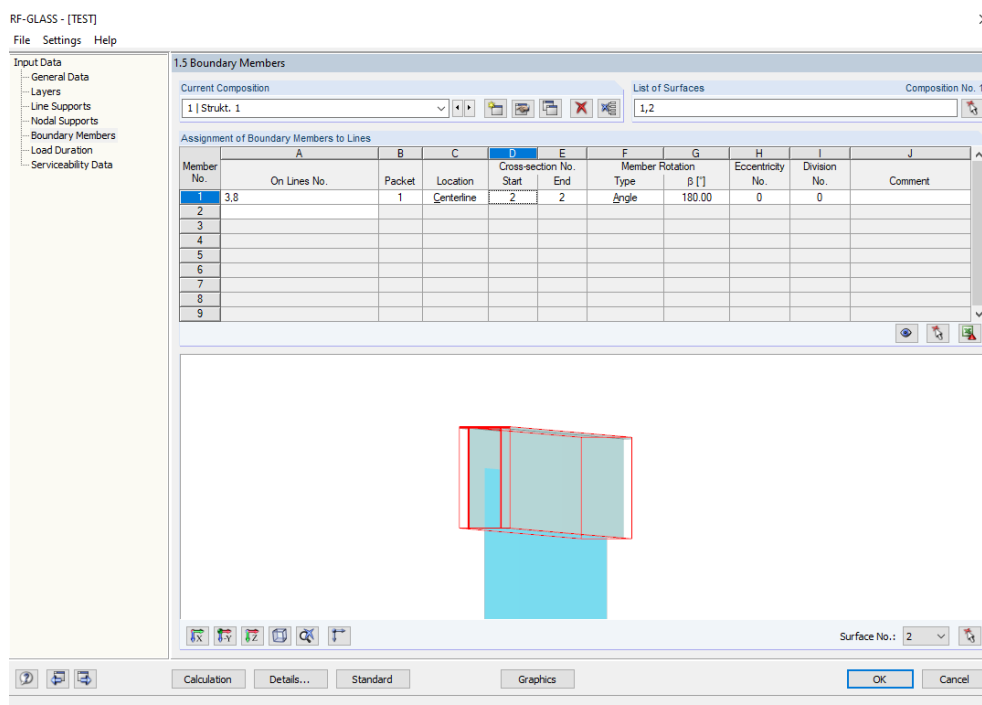
Rysunek 16 Okno edytora opcji „line releases”



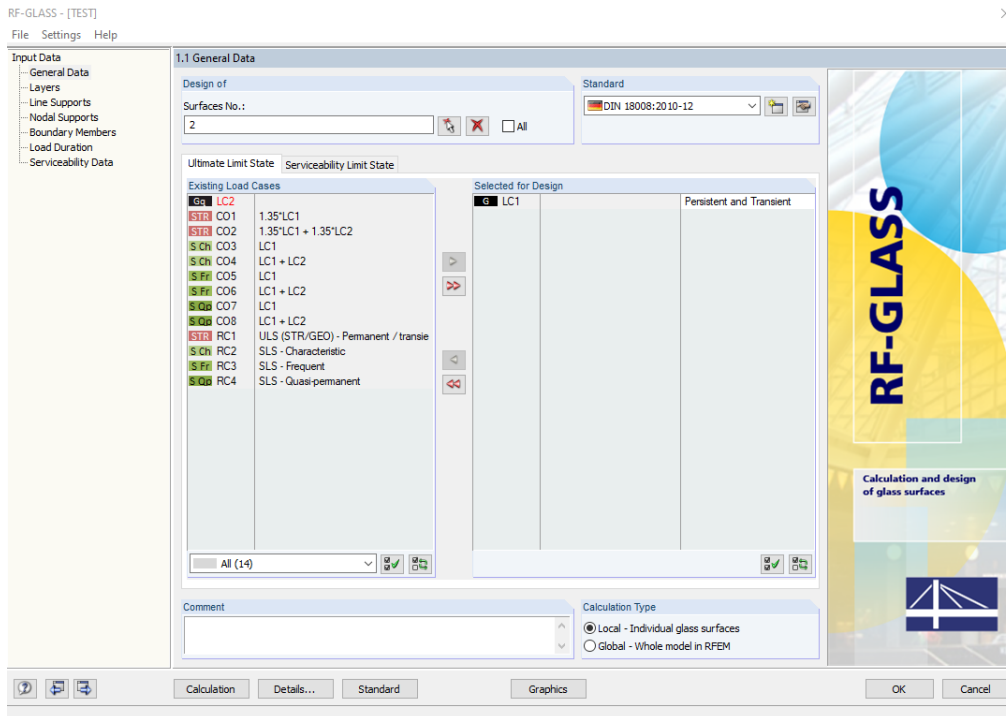
Rysunek 17 Edytor interakcji między płaszczyznami w "line releases"

W tym momencie należy zwrócić uwagę na bardzo ważny fakt dotyczący modułu RF-GLASS. W module możliwe jest przeprowadzenie analizy lokalnej oraz globalnej. Zarówno w analizie lokalnej jak i globalnej można wybrać, które elementy należy zwymiarować oraz można przypisać im zdefiniowane przez użytkownika warstwy. Model globalny odczytuje warunki zamocowania oraz pracę konstrukcji w ujęciu globalnym bazując na podstawowym modelu, dlatego istotne jest poprawne zdefiniowanie go w bazowym programie RFEM 5, gdzie dodatkowy moduł służy jedynie do zdefiniowania warstw szklanych, ich zwymiarowania oraz dokładniejszej analizy wyników.

W modelu lokalnym wszelkie warunki zamocowania oraz interakcji elementów szklanych należy przeprowadzić z wykorzystaniem okien dialogowych modułu RF-GLASS, rys. 18, 19. Modelowanie w modelu lokalnym pozwala w prosty i dogodny sposób zaprojektować i zwymiarować szklany element. Możliwe jest dokładne zdefiniowanie połączeń liniowych, bądź punktowych, wskazanie metalowych elementów wsporczych oraz wiele więcej. Jest to idealne narzędzie do wymiarowania barier czy fasad, jednak przy bardziej skomplikowanych konstrukcjach ciężko jest zapanować nad poprawnością modelu, a ręczne definiowanie wszelkich zależności jest żmudne.

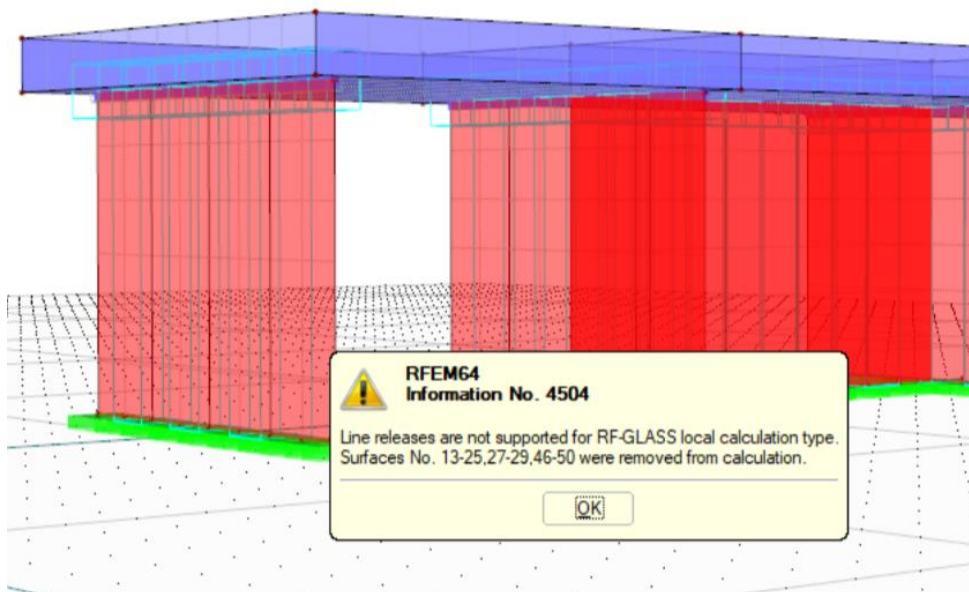


Rysunek 18 Zakładka modułu RF-GLASS umożliwiająca definicję wsporczych elementów metalowych przy mocowaniach szyb



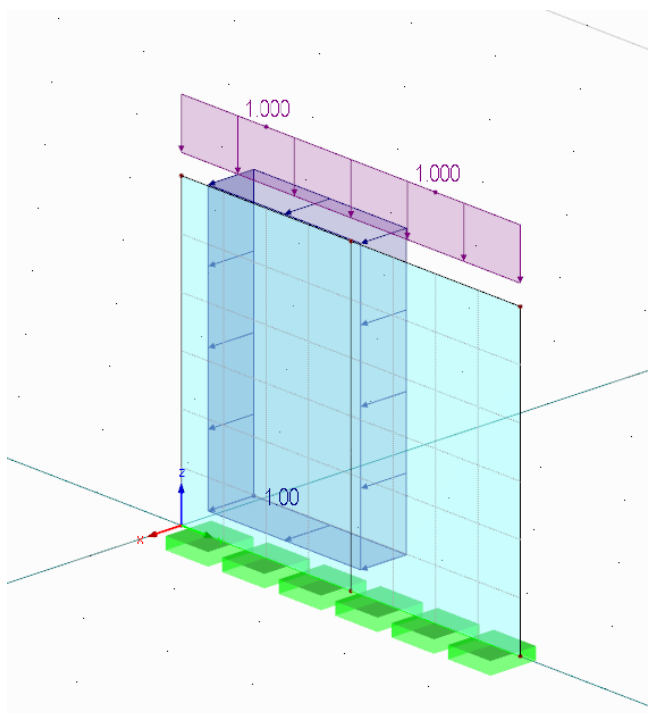
Rysunek 19 Okno wprowadzania głównych danych obliczeniowych w module RF-GLASS, takich jak norma, kombinacje względem, których należy przeprowadzić wymiarowanie, itp.

Trzeba zauważyć, że nie wszystkie funkcje podstawowego programu są wspierane w lokalnym modelu modułu RF-GLASS. Przykładowo opcja „line releases” nie działa dla modelu lokalnego, rys. 20. Ograniczenia te sprawiają, że dla bardziej skomplikowanych przypadków niż typowe i proste elementy szklane takie jak bariery czy fasady, lepiej jest na ogół korzystać z modeli globalnych.



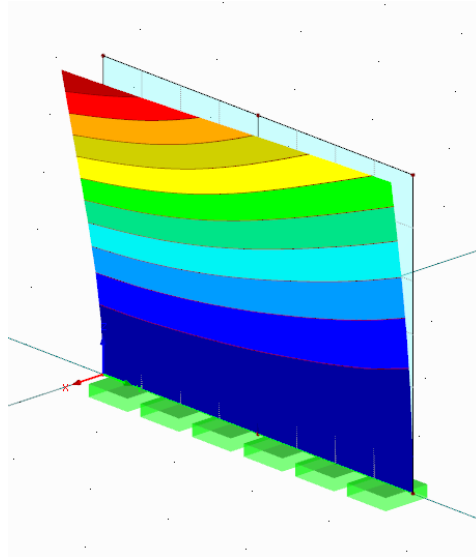
Rysunek 20 Informacja mówiąca o braku możliwości stosowania opcji "line releases" w modelu lokalnym modułu RF-GLASS

Poniżej zestawiono charakter pracy dwóch sąsiadujących powierzchni szklanych, na które działa obciążenie liniowe o wartości jednostkowej oraz poprzeczne obciążenie powierzchniowe na jedną z tafli również o wartości jednostkowej, rys. 21.



Rysunek 21 Obciążenie jednostkowe zadane na sąsiadujące elementy w modelu testowym

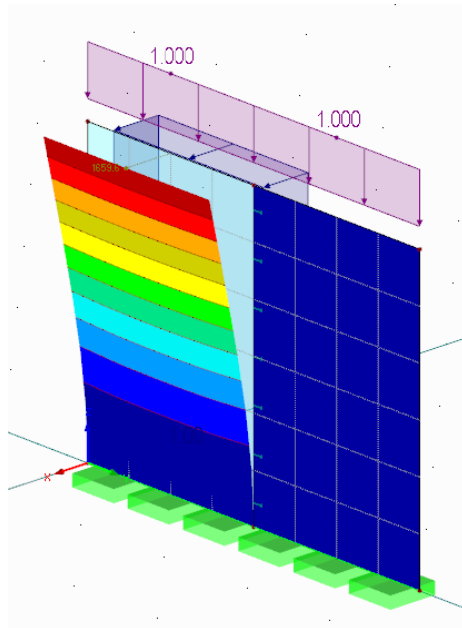
W pierwszym wariantcie nie wykonano żadnych dodatkowych operacji poza zamodelowaniem powierzchni i ich obciążeniem, rys. 22.



Rysunek 22 Odształcenia tafli szklanych o zadanym obciążeniu jednostkowym

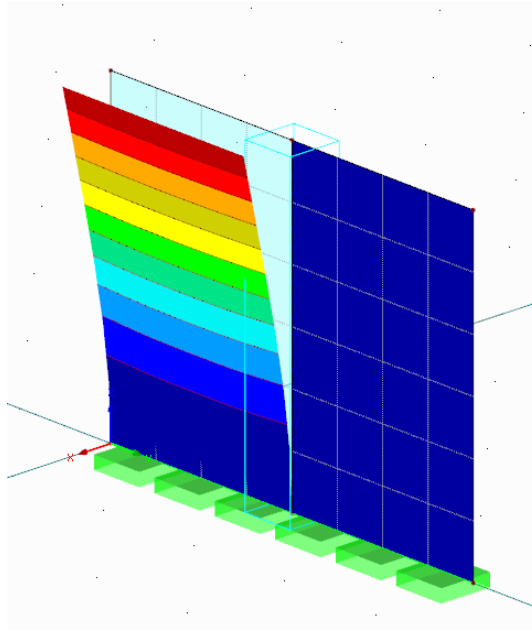
Na podstawie globalnych przemieszczeń widać, że elementy pracują jako jeden element.

Następnie sprawdzono jaki wpływ będzie miało skorzystanie z funkcji „line hinges” przy zastosowaniu zerowej podatności przegubu, rys. 23. Elementy pracują rozłącznie.



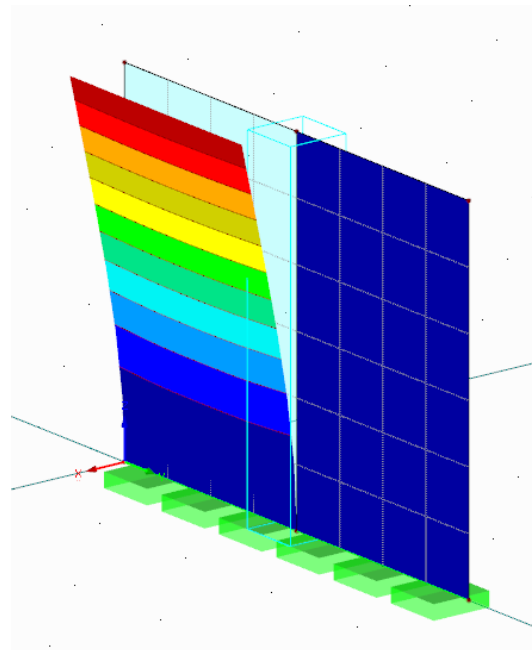
Rysunek 23 Mapa ugięć elementów szklanych po skorzystaniu z opcji "line hinges"

Na koniec sprawdzono działanie funkcji „line releases”, rys. 24.



Rysunek 24 Mapa ugięć elementów szklanych po zastosowaniu opcji "line releases"

Sprawdzono czy korzystając z opcji „line releases” oraz modułu RF-GLASS, model zachowa się poprawnie. Mapa ugięć wskazuje, że elementy pracują rozdzielnie również po zastosowaniu modułu, rys. 25.



Rysunek 25 Mapa ugięć korzystając z funkcji "line releases" oraz modułu RF-GLASS

4.5. Przyjęte obciążenia i kombinacje obciążeń

4.5.1. Obciążenia stałe

Ciężar własny elementów szklanych został zebrany automatycznie w programie obliczeniowym RFEM 5. Ciężar pochodzący od donicy może być znaczny w przypadku, gdy skorzysta się z zwykłej ziemi i założy się brak odwodnienia donicy. Analizując możliwą strukturę warstw dochodzi się do wniosku, że rozsądnie jest wykorzystać humusową ziemię do roślin zmieszaną z keramzytem. Dodatkowo w celu dalszego odciążenia konstrukcji można zamienić elementy stalowe na aluminiowe jeżeli okaże się to potrzebne po wykonaniu analizy wytrzymałościowej. Istotnym zagadnieniem jest również odwodnienie. Mieszanka gruntu do roślin jest porowata i przez nawodnienie jej ciężar zwiększa się znacznie.

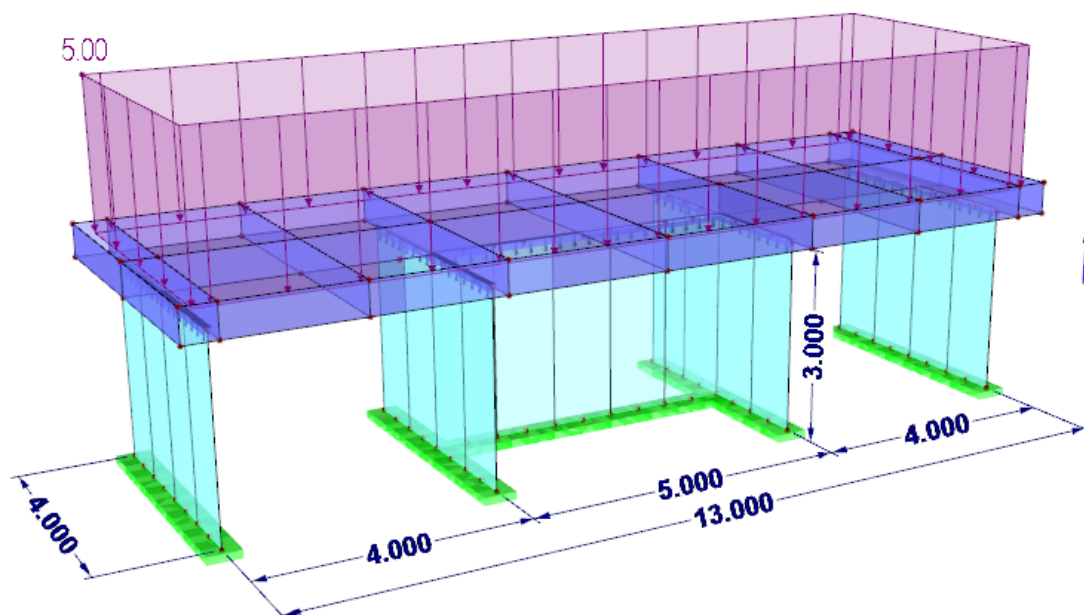
W rozważaniach przyjęto dwa możliwe scenariusze obciążenia donicą. Wariant ciężki oraz lekki, tab. 8, 9. Do obliczeń wykorzystano wariant lekki, gdyż jest on ekonomiczny.

Tabela 8 Zebranie obciążeń w wariantcie maksymalnych realistycznych obciążeń

Elementy obciążenia	Grubość [m]	Ciężar (zakładany ciężar) [kN/m ³]	Obciążenie [kN/m ²]
Konstrukcja stalowa	0,2	–	1,4
Warstwa ziemi (wilgotna)	0,3	22	6,6
Elementy osłonowe + Rośliny	–	–	1,4
			Suma: 9,4

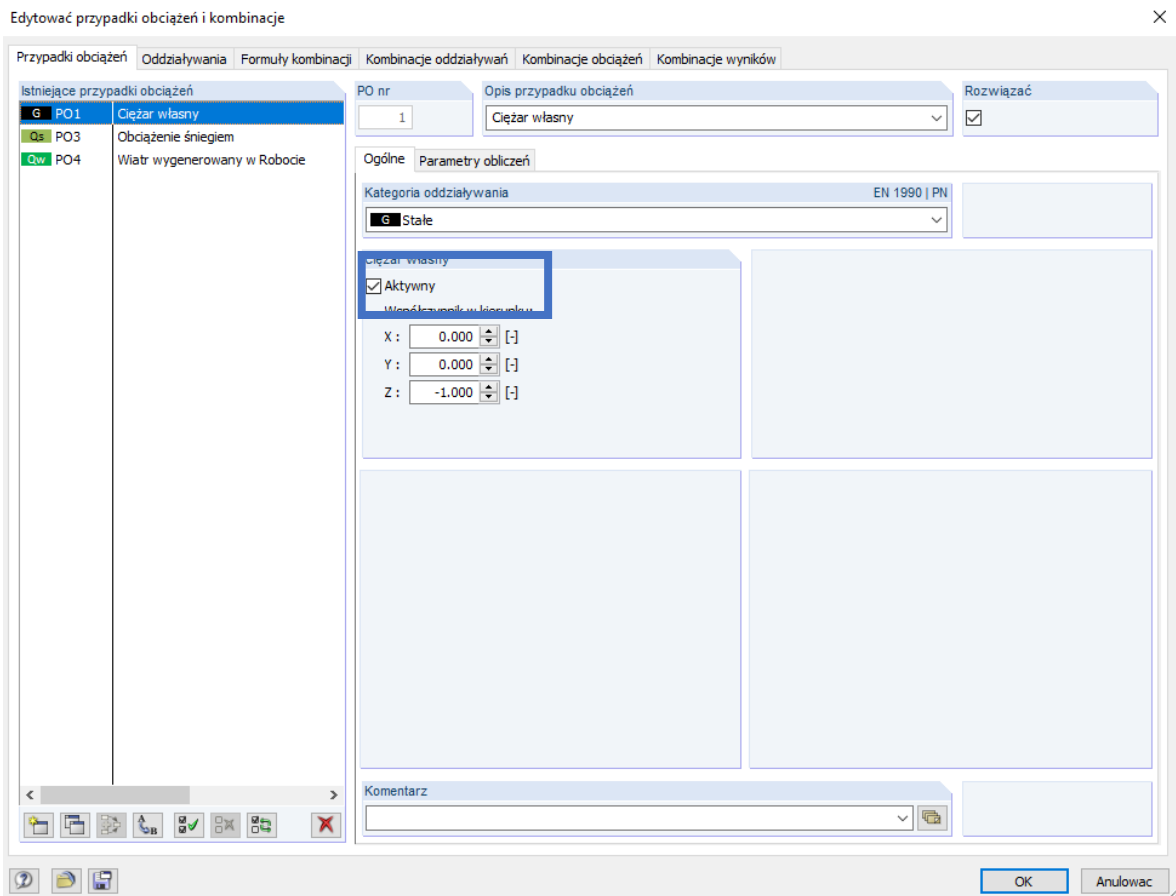
Tabela 9 Zebranie obciążeń w wariantcie minimalnych realnych obciążeń

Elementy obciążenia	Grubość [m]	Ciężar (zakładany ciężar) [kN/m ³]	Obciążenie [kN/m ²]
Konstrukcja stalowa	0,2	–	1,4
Mieszanka keramzyt+ziemia	0,3	7,3	2,2
Elementy osłonowe + Rośliny	–	–	1,4
			Suma: 6



Rysunek 26 Przypadek PO1 -Ciężar własny

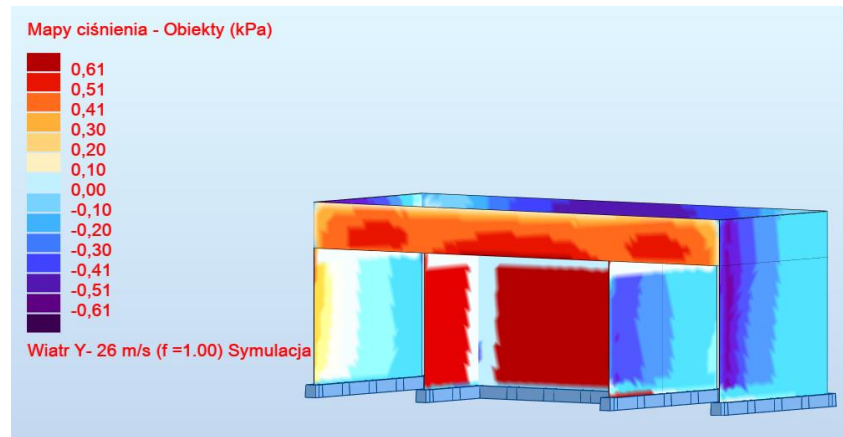
W przypadku PO1, rys. 26, 27, obciążenie elementów szklanych zostało zebrane automatycznie, a przewidywane obciążenia od konstrukcji dachu zostało rozłożone na powierzchni płyty dachu.



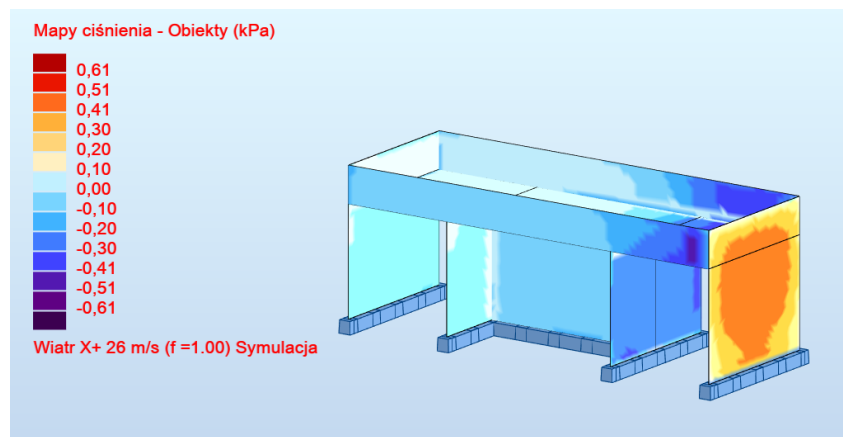
Rysunek 27 Uwzględnienie ciężaru własnego w przypadku PO1

4.4.2. Obciążenia zmienne

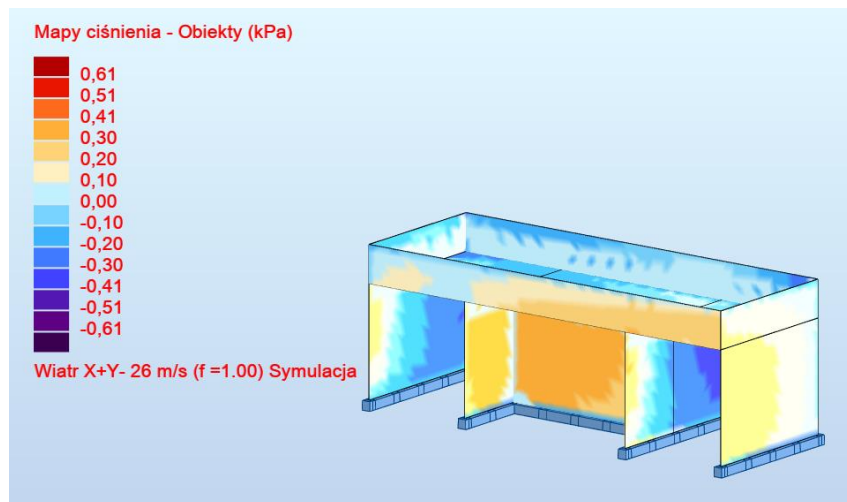
Obciążenie śniegiem przyjęto jak dla Szczecina z okresem nawrotu 50 lat. Odnalezienie kierunku wiatru powodującego największe naprężenia jest nieoczywiste. Obiekt ma otwartą geometrię oraz jest znacznie dłuższy na jednym z kierunków. Firma DLUBAL posiada program do symulacji obciążenia wiatrem RWIND jednak nie jest udzielana wersja studencka oprogramowania, a wersja DEMO nie pozwala odczytać wyników analizy. Sprawdzone zatem model w tunelu aerodynamicznym w programie ROBOT w celu wyznaczenia najniekorzystniejszego kierunku wiania wiatru, rys. 28,29,30.



Rysunek 28 Wyniki symulacji wiania wiatru w programie ROBOT

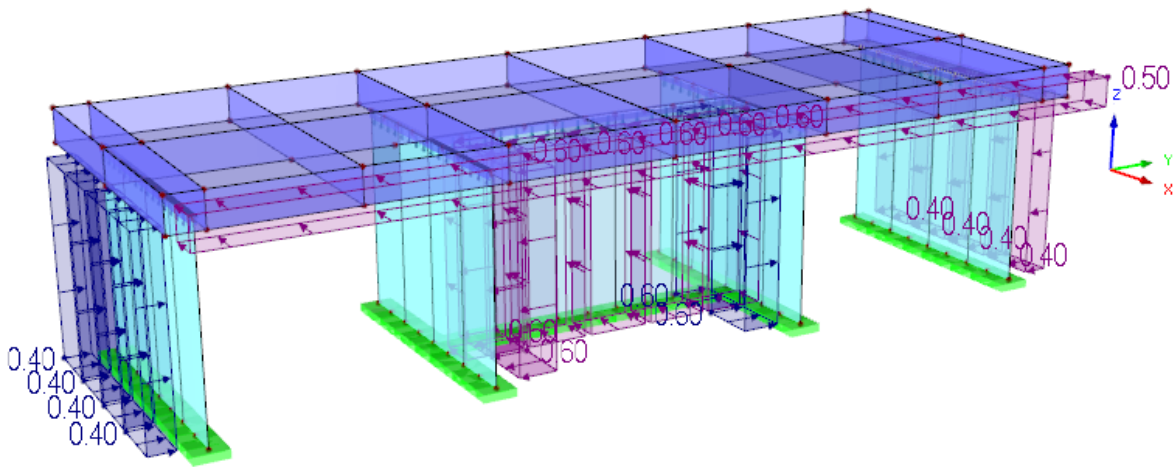


Rysunek 29 Mapa ciśnienia wiatru wiejącego prostopadle do mniejszej ściany



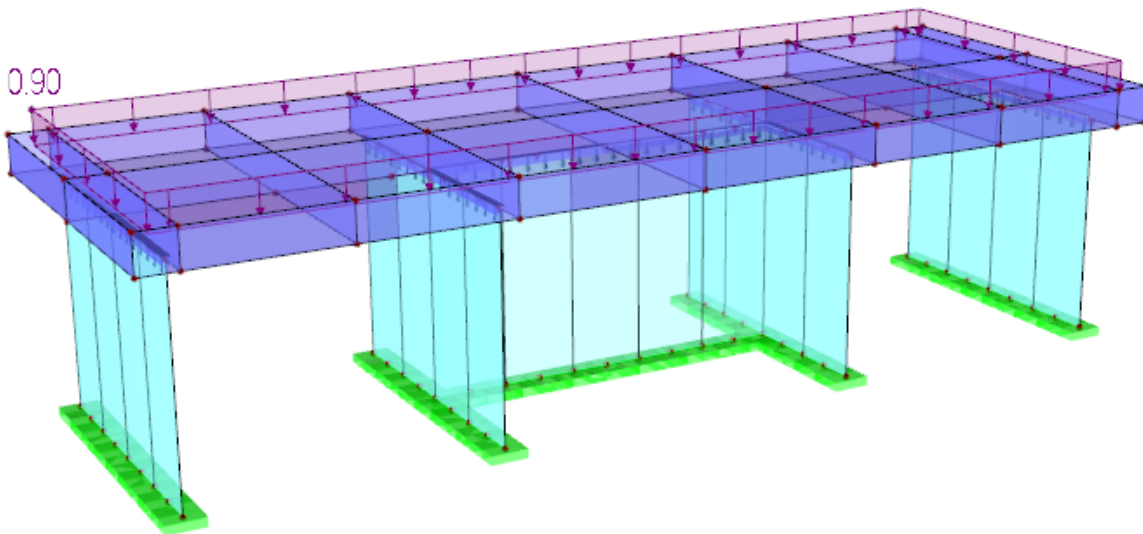
Rysunek 30 Mapa ciśnienia wiatru na kierunku pośrednim

Otrzymane wyniki ciśnienia z programu ROBOT dla wariantu wiatru wiejącego prostopadle do dłuższej krawędzi, rys. 28, przełożono do modelu obliczeniowego w RFEM 5, rys. 31.



Rysunek 31 Przypadek PO4 Maksymalne obciążenie wiatrem

Ostatni przypadek obciążenia pochodzi od maksymalnego obciążenia śniegiem, rys. 32.

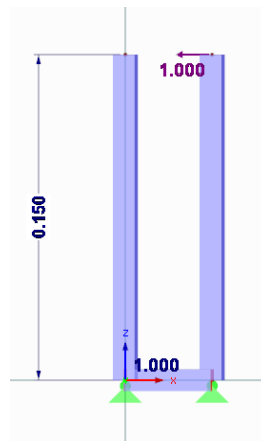


Rysunek 32 Przypadek PO3 Obciążenia śniegiem

4.5. Wymiarowanie powierzchni szklanych z wykorzystaniem modułu RF – GLASS

4.5.1 Wyznaczenie podatności podpory dolnej.

Z uwagi na brak propozycji połączeń sztywnych w literaturze postanowiono zamodelować podporę dolną szyb jako podporę podatną. Podatność podpory określono przez wykonanie dodatkowego modelu w programie RFEM 5. Do stalowego „buta” o wysokości 150 mm i wykonanego z blachy o grubości 10mm przyłożono siły jednostkowe, a następnie na podstawie uzyskanych deformacji wyznaczono podatność podpory, rys. 33.



Rysunek 33 Model podpory w programie RFEM 5

LC1			
Sum of loads in X	0.00	kN	
Sum of support forces in X	0.00	kN	
Sum of loads in Z	0.00	kN	
Sum of support forces in Z	0.00	kN	
Resultant of reactions about X	0.000	kNm	At center of gravity of model (X: 20.000, Y: 0.000, Z: 66.176 mm)
Resultant of reactions about Y	-0.150	kNm	At center of gravity of model
Resultant of reactions about Z	0.000	kNm	At center of gravity of model
Maximum displacement	-0.1	mm	Member No. 2, x: 150.0 mm
Maximum displacement in Z-direction	0.0	mm	Member No. 1, x: 17.1 mm
Maximum vectorial displacement	0.1	mm	Member No. 2, x: 150.0 mm
Maximum rotation about Y-axis	-0.8	mrad	Member No. 2, x: 150.0 mm
Method of analysis	Linear		Geometrically Linear Analysis
Reduction of stiffness	<input type="checkbox"/>		

Rysunek 34 Wyniki analizy od przyłożonej siły jednostkowej

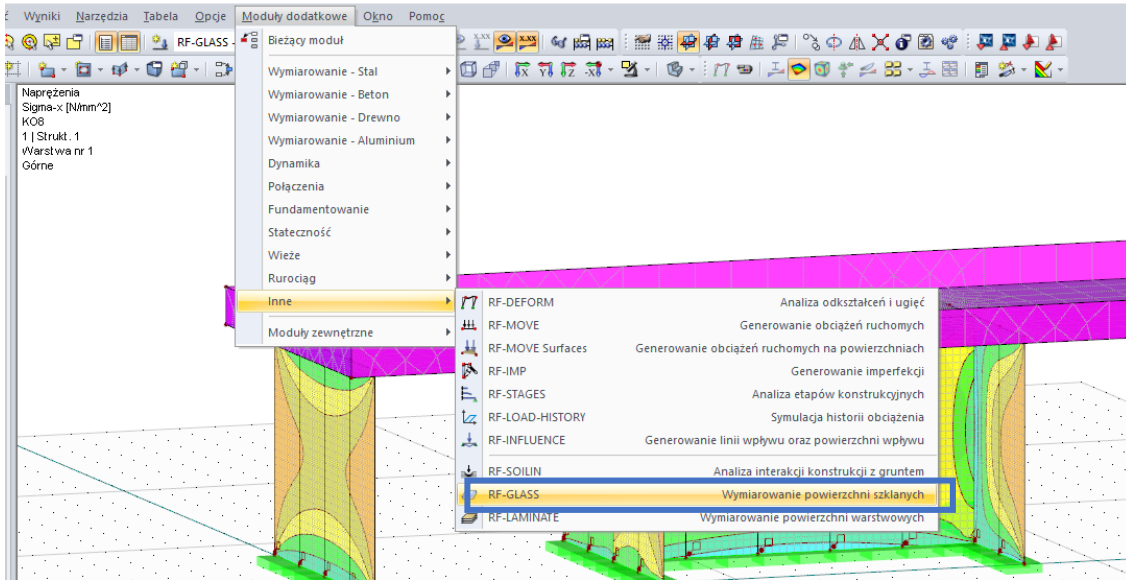
W programie RFEM 5 podatność zadana jest jako $kNm/rad/m$. W modelu moment o wartości 0,15 kNm wywołał obrót o wartości 0,8 mrad, rys. 34 zatem podatność podpory wynosi

$$\frac{0,15 \text{ kNm}}{0,8 \text{ mrad}} \cdot \frac{1}{1 \text{ m}} = 187,5 \text{ kNm/rad/m}$$

Wykonano również model dla blachy o grubości 5 mm, jednak przy tak małej grubości, ugięcia konstrukcji były zbyt duże.

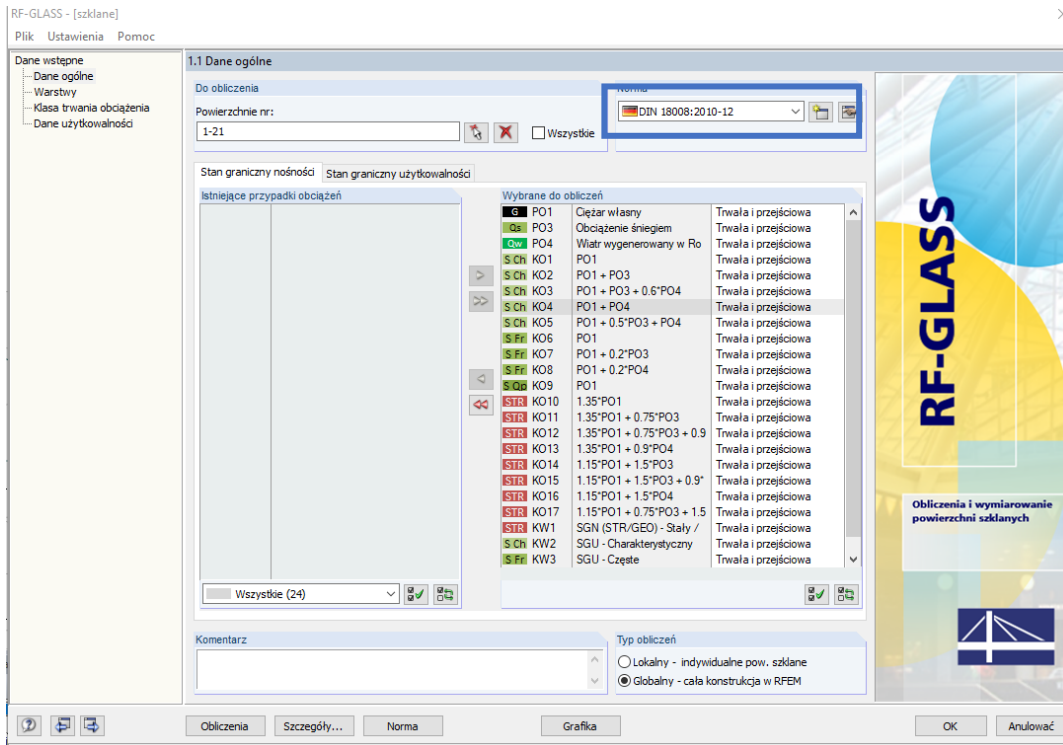
4.5.2 Proces modelowania w module RF-GLASS

Moduł RF-GLASS jest w zasadzie odrębnym programem, który można otworzyć korzystając z zakładki „moduły dodatkowe”, rys. 35.

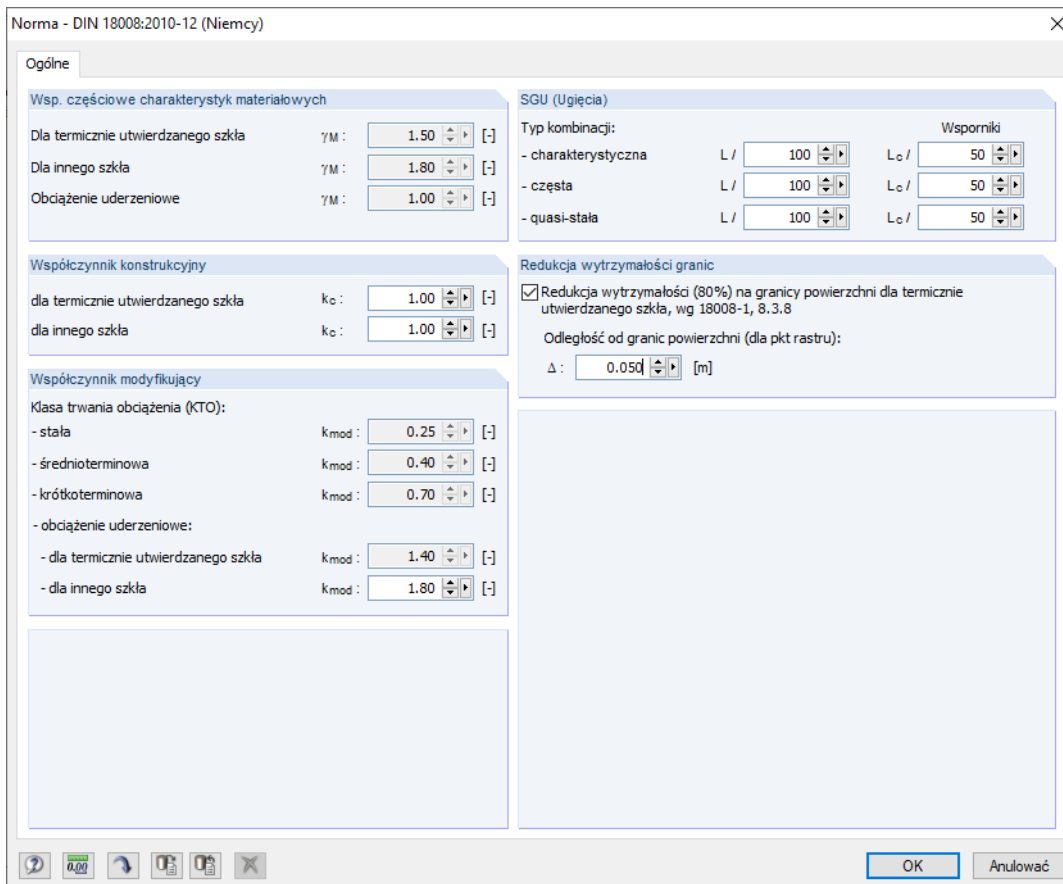


Rysunek 35 Moduł RF-GLASS

Moduł pozwala na wymiarowanie elementów zgodnie z niemieckimi normami DIN 18008:2010-12 oraz TRLV:2006-08 lub na przeprowadzenie analizy ogólnej z wykorzystaniem teorii płyt, rys. 36.



Rysunek 36 Wybór normy w module RF-GLASS



Rysunek 37 Parametry obliczeniowe normy DIN 18008:2010-12

Po zebraniu obciążeń oraz stworzeniu kombinacji obciążeń przystąpiono do wymiarowania elementów szklanych. Dostępne standardowe wymiary szklanych tafli to 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 oraz 25 mm a wymiary szyb sięgają do 6 metrów, choć możliwe jest pozyskanie większych elementów. W projekcie przyjęto trójwarstwowe szyby, przy czym zewnętrzne szyby wykonane są ze szkła hartowanego, a szyba wewnętrzna jest ze szkła float. Choć norma DIN 18008 oraz poradnik TRVL dopuszczają zastosowanie tańszego szkła float oraz tylko dwóch warstw na elementy nośne, to po przejrzaniu literatury stwierdzono, że ze względów bezpieczeństwa konstrukcji oraz użytkowników lepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie szyb hartowanych [14]. Szyby hartowane posiadają korzystny rozkład naprężeń wewnętrznych i są bardziej odporne na zniszczenia, a na dodatek w wyniku pęknięcia dzielą się na małe mniej groźne dla ludzi elementy.

Do obliczeń wykorzystano normę DIN 18008, gdyż jest ona nowsza oraz bardziej restrykcyjna. W przypadku ugięć dużą rolę ma współpraca tafli szklanych, zapewniana przez interakcje między folią a szkłem. W modelu postanowiono skorzystać z żywicy epoksydowej o grubości 1mm, gdyż odnaleziono takie rozwiązanie na polskim rynku oferowane przez firmę Ligęza (podrozdział 4.3.1).

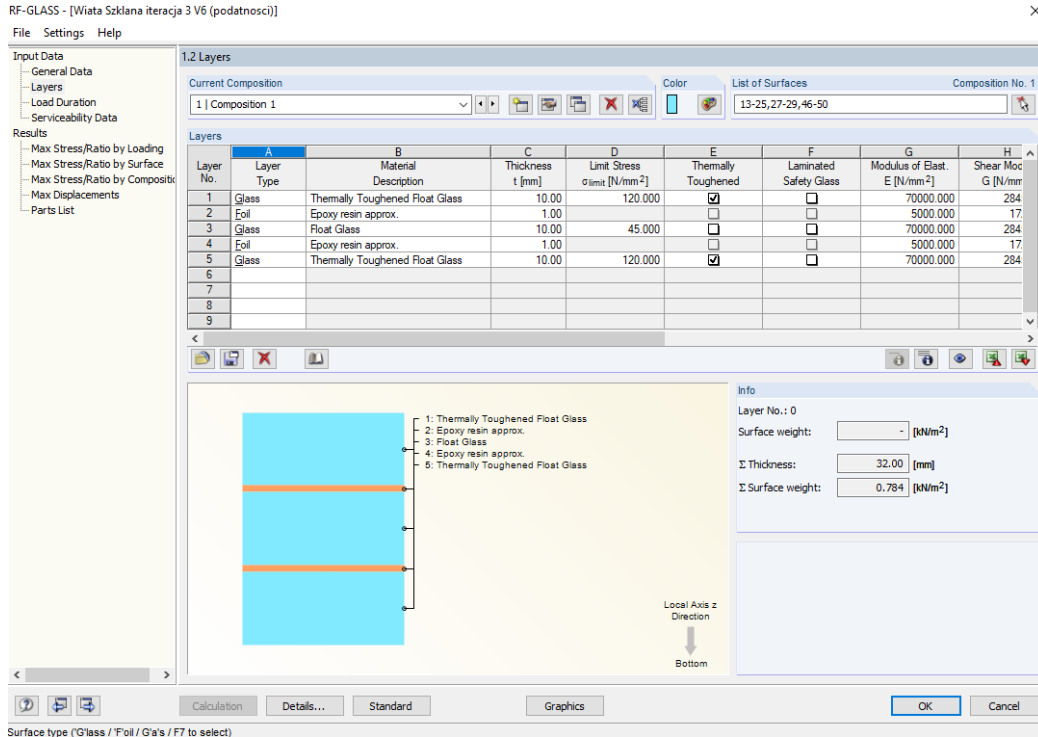
Należy zauważyć, że w przypadku szyb laminowanych, łączonych foliami istotna jest długość trwania obciążenia oraz temperatura, gdyż im wyższa temperatura i czas trwania obciążenia tym mniejszy moduł Younga. W przypadku żywicy epoksydowej również występuje ten problem jednak jest on mniejszy niż w przypadku folii. Żywica w znacznym stopniu zaczyna tracić swe właściwości dopiero przy około 50°C.

Na podstawie analizy wykonanej w module RF-GLASS przyjęto układ warstw szyby laminowanej przedstawiony w tabeli 10.

Tabela 10 Zestawienie warstw szyb

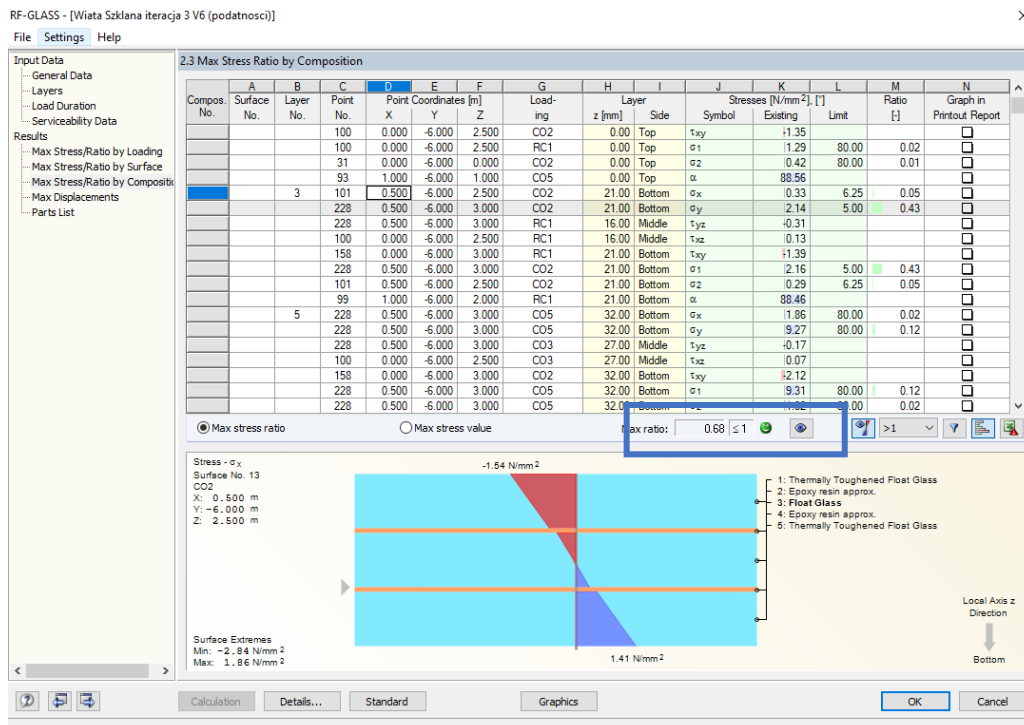
Typ warstwy	Materiał	Grubość t [mm]
Szkło	Szkło hartowane float [120 MPa]	10
Folia/Żywica	Żywica epoksydowa	1
Szkło	Szkło float [45 MPa]	10
Folia/Żywica	Żywica epoksydowa	1
Szkło	Szkło hartowane float [120 MPa]	10

Zdefiniowanie warstw w module RF-GLASS jest przedstawione na rysunku 38.



Rysunek 38 Panel definiowanie warstw w programie RFEM5

Otrzymano następujące wartości wyężenia szyby w stanie granicznym nośności rys. 39, oraz stanie granicznym użytkowności rys. 40:



Rysunek 39 Analiza wykorzystania nośności w module RF-GLASS

RF-GLASS - [Wiatra Szklana iteracja 3 V6 (podatności)]

File Settings Help

Input Data

- General Data
- Layers
- Load Duration
- Serviceability Data

Results

- Max Stress/Ratio by Loading
- Max Stress/Ratio by Surface
- Max Stress/Ratio by Composite
- Max Displacements
- Parts List

3.1 Max Displacements

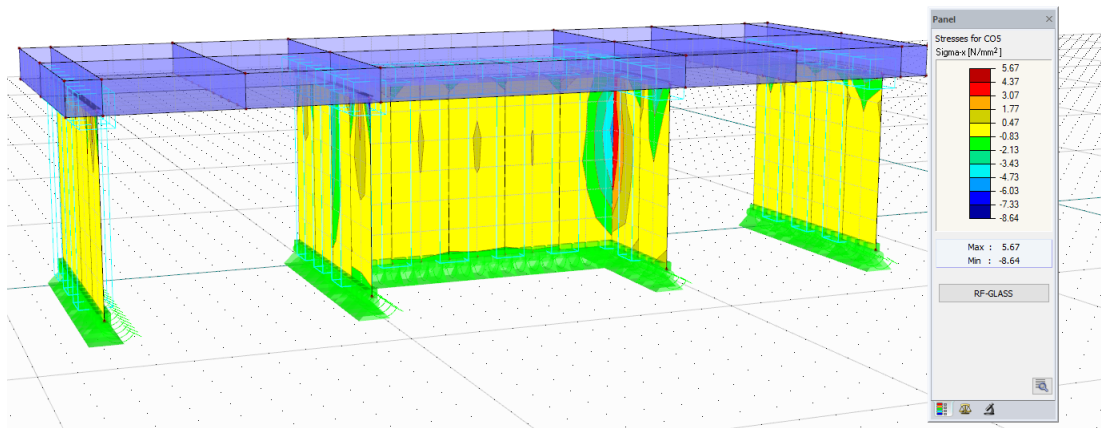
Surface No.	Point No.	Point Coordinates [m]			Loading	Type of Comb.	Packet No.	Displacements [mm]		Ratio u _z []
		X	Y	Z				u _z	Limit u _z	
13	97	0.000	-6.000	2.000	CO6	Characteristic	1	1.6	5.0	0.31
	97	0.000	-6.000	2.000	CO7	Characteristic	1	1.9	5.0	0.37
	97	0.000	-6.000	2.000	CO8	Characteristic	1	1.2	5.0	0.24
	100	0.000	-6.000	2.500	CO9	Characteristic	1	0.6	5.0	0.12
	100	0.000	-6.000	2.500	CO10	Characteristic	1	0.7	5.0	0.14
	97	0.000	-6.000	2.000	CO11	Frequent	1	1.6	5.0	0.31
	97	0.000	-6.000	2.000	CO12	Frequent	1	1.6	5.0	0.32
	97	0.000	-6.000	2.000	CO13	Frequent	1	1.3	5.0	0.27
	97	0.000	-6.000	2.000	RC2	Characteristic	1	1.9	5.0	0.37
	97	0.000	-6.000	2.000	RC3	Frequent	1	1.6	5.0	0.32
14	830	1.000	-6.000	2.000	CO6	Characteristic	1	1.1	5.0	0.22
	830	1.000	-6.000	2.000	CO7	Characteristic	1	1.3	5.0	0.26
	831	1.000	-6.000	2.500	CO8	Characteristic	1	0.7	5.0	0.15
	111	2.000	-6.000	1.000	CO9	Characteristic	1	-0.6	5.0	0.11
	111	2.000	-6.000	1.000	CO10	Characteristic	1	-0.5	5.0	0.10
	830	1.000	-6.000	2.000	CO11	Frequent	1	1.1	5.0	0.22
	830	1.000	-6.000	2.000	CO12	Frequent	1	1.1	5.0	0.23
	830	1.000	-6.000	2.000	CO13	Frequent	1	0.9	5.0	0.18
	830	1.000	-6.000	2.000	RC2	Characteristic	1	1.3	5.0	0.26
	830	1.000	-6.000	2.000	RC3	Frequent	1	1.1	5.0	0.23
15	129	3.000	-6.000	2.000	CO6	Characteristic	1	1.3	5.0	0.26
	129	3.000	-6.000	2.000	CO7	Characteristic	1	1.5	5.0	0.31
	129	3.000	-6.000	2.000	CO8	Characteristic	1	0.9	5.0	0.18
	833	2.000	-6.000	1.000	CO9	Characteristic	1	-0.6	5.0	0.11
	833	2.000	-6.000	1.000	CO10	Characteristic	1	-0.5	5.0	0.10
	129	3.000	-6.000	2.000	CO11	Frequent	1	1.3	5.0	0.26
	129	3.000	-6.000	2.000	CO12	Frequent	1	1.3	5.0	0.27
	129	3.000	-6.000	2.000	CO13	Frequent	1	1.1	5.0	0.21
	129	3.000	-6.000	2.000	RC2	Characteristic	1	1.5	5.0	0.31
	129	3.000	-6.000	2.000	RC3	Frequent	1	1.3	5.0	0.27
16	143	4.000	-6.000	2.000	CO6	Characteristic	1	1.4	5.0	0.29
	143	4.000	-6.000	2.000	CO7	Characteristic	1	1.7	5.0	0.35
	143	4.000	-6.000	2.000	CO8	Characteristic	1	1.1	5.0	0.22

Max ratio: 0.77 ≤ 1

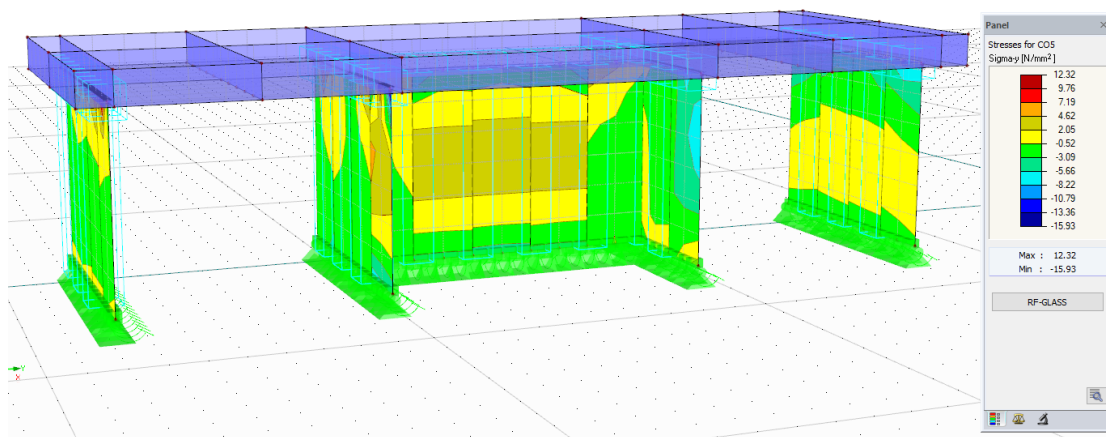
Calculation Details... Standard Graphics OK Cancel

Rysunek 40 Analiza przemieszczeń w module RF-GLASSNa rysunkach 41-43 mapy naprężeń dla kombinacji CO5 – 1,35LC1+0,75LC2+1,5LC3, gdzie:

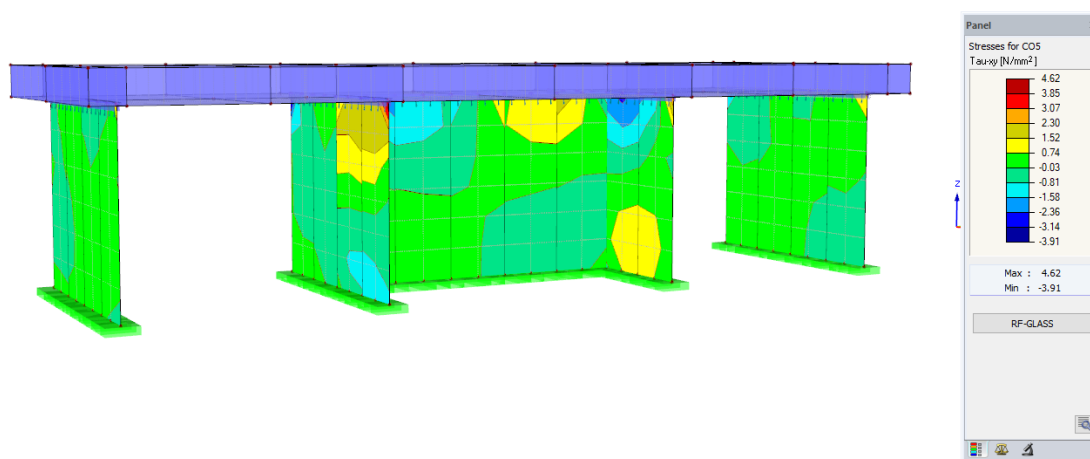
- LC1 to ciężar własny
- LC2 to obciążenie śniegiem
- LC3 to obciążenie wiatrem



Rysunek 41 Mapa naprężeń sigma x



Rysunek 42 Mapa naprężeń sigma y



Rysunek 43 Mapa naprężeń tau xy

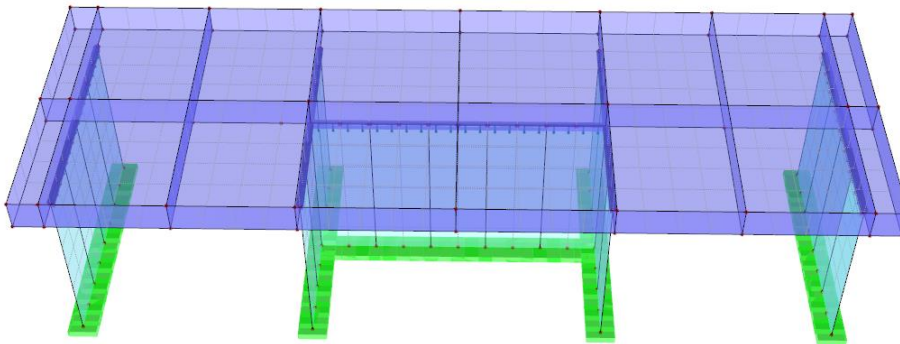
Jako element studium projektowego zamieniono warstwę żywicy epoksydowej na folię PVB, aby sprawdzić w jaki sposób zmieniają się ugięcia oraz wyężenie szyb. Jak wspomiano wcześniej moduł Younga dla folii zależy od temperatury oraz czasu trwania obciążenia. Dlatego do wyznaczenia wartości w stanie granicznym użytkowalności przyjęto wartości dla folii w 22°C do 3 min, a w przypadku stanu granicznego nośności przyjęto folię PVB obciążoną stale. Obie wartości są zdefiniowane w normie DIN 18008.

Wyniki analiz przedstawiono zbiorczo w późniejszym podrozdziale.

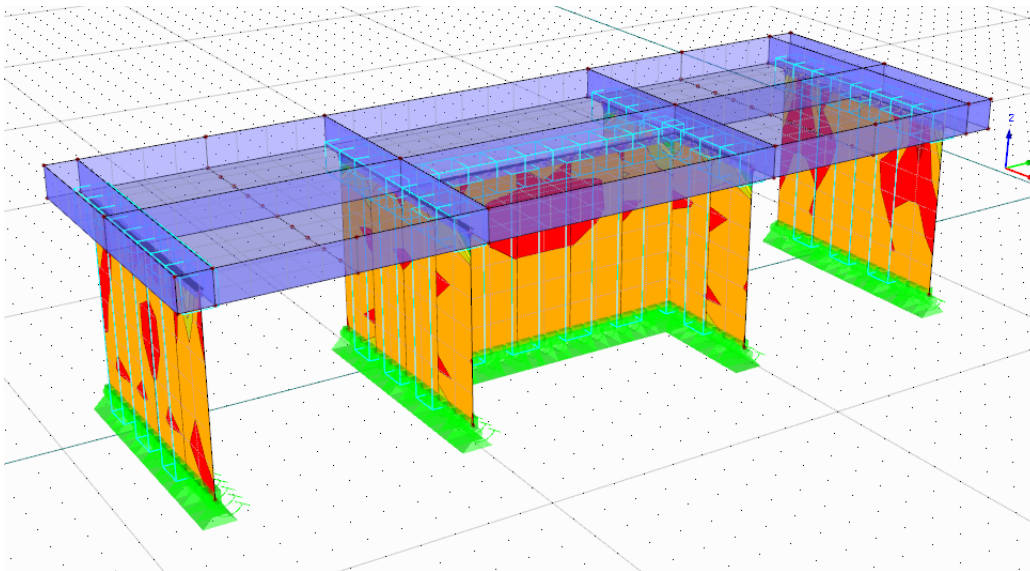
4.5.3 Wytężenie ścian w zależności od sztywności dachu

Podczas modelowania zauważono, że bardzo istotna dla pracy obiektu jest sztywność dachu. W celu oceny wpływu sztywności dachu na konstrukcję w początkowej fazie zamodelowano go jako nieskończenie sztywny, później zmieniono go na wiotką stalową blachę. Zaobserwowano, że wytężenie szklanych ścian stanowczo wzrosło w sytuacji, gdy zmniejszono sztywność dachu.

Konstrukcja dachu składa się z dolnej blachy o grubości 10 mm oraz serii żeber o grubości 5 mm. Całość wykonana jest ze stali klasy S235. Wszystkie połączenia w dachu są spawane.



Rysunek 44 Zadaszenie wiaty



Rysunek 45 Zadaszenie o mniejszej sztywności

W tabeli 11 zebrano maksymalne wykorzystanie nośności elementów szklanych w zależności od sztywności zadaszenia.

Tabela 11 Wartości największego wyężenia konstrukcji w zależności od wariantu dachu.

Wariant	Stan graniczny nośności	Stan graniczny użyteczności
Blacha spodu nieskończenie sztywna	9%	28%
Zadaszenie z uźebrowaniem, rys. 44	68%	77%
Zadaszenie bez poprzecznego uźebrowania, rys. 45	78%	85%

4.6 Wyężenie elementów w kontekście pozostałych norm

Otrzymałwszy maksymalne naprężenia dla konstrukcji, bazując na wynikach z programu RFEM5, wyznaczono maksymalne wyężenie korzystając według pozostałych norm. W obliczeniach wykorzystano wzory opisane w rozdziale 3. Maksymalne naprężenia rozciągające wynosiły $\sigma_{max} = 8,89 \text{ MPa}$

4.6.1 Wyężenie szyby według EN 16612

Sprawdzono wytrzymałość zewnętrznej warstwy, w której występują największe naprężenia rozciągające.

Wytrzymałość zewnętrznej szyby

$$f_{g,k} = 120 \text{ MPa}$$

Obliczeniowa wytrzymałość przekroju

$$f_{g,d} = \frac{k_e \cdot k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} = \frac{1 \cdot 0,74 \cdot 1 \cdot 120}{1,8} = 49,3 \text{ MPa}$$

Wyężenie przekroju:

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{g,d}} = \frac{8,89}{49,3} = 18,0\%$$

4.6.2 Wyężenie szyby względem prEN 13474

Norma prEN13474 przewiduje różne wzory na wytrzymałość szyb hartowanych oraz zwykłych. Wyznaczenie wartości współczynnika efektu skali:

$$k_A = A^{0,04} = 3^{0,04} = 1,06$$

Wytrzymałość dla szyby hartowanej

$$\begin{aligned} f_{g,d} &= (k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V}) \cdot \gamma_n = \\ &= (0,72 \cdot \frac{45}{1,8 \cdot 1,06} + \frac{120 - 45}{1,8}) \cdot 1 = 58,62 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Norma przewiduje wyznaczenie naprężenia efektywnego obliczonego poprzez odpowiednie scałkowanie naprężeń głównych, jednak ze względu na fakt, iż w tej pracy oparto się na obliczeniach w programie RFEM5, a nie na ręcznie przygotowanym modelu to postanowiono porównać normową wytrzymałość z maksymalnymi naprężeniami odczytanymi z programu RFEM5.

Wytężenie przekroju:

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{g,d}} = \frac{8,89}{58,62} = 15,16\%$$

4.6.3 Wytężenie szyby względem prCEN/TS 19100

Docelowo Eurokod 10 ma składać się ze trzech części. Część trzecia ma być dedykowana elementom pracującym w płaszczyźnie, czyli np. szklanym ścianom. Niestety w chwili pisania tej pracy część trzecia nie jest jeszcze gotowa, dlatego skorzystanie wyłącznie z ogólnego wzoru na maksymalne dopuszczalne naprężenia:

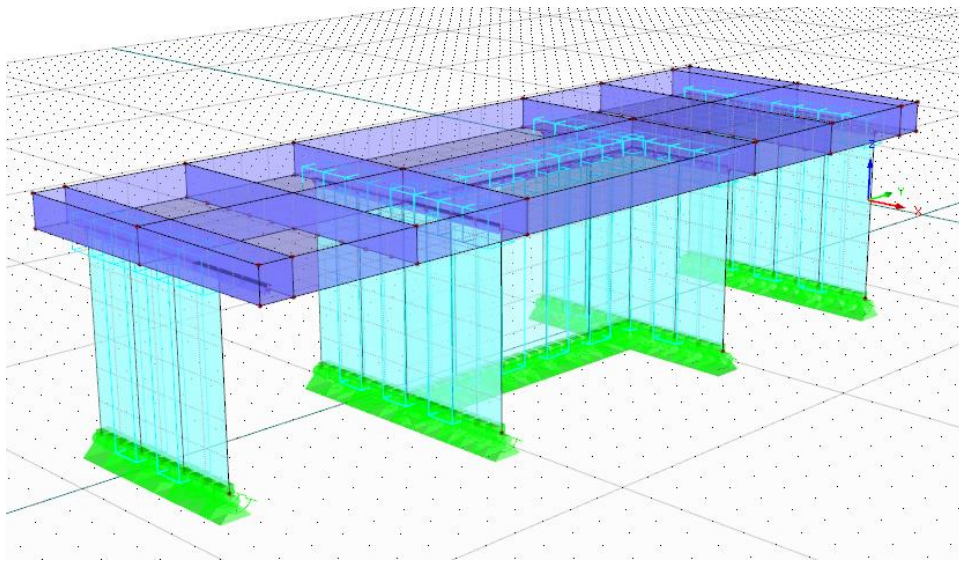
$$\begin{aligned} f_{g,d} &= k_e \cdot k_{sp} \cdot \lambda_A \cdot \lambda_l \cdot k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M} + k_p \cdot k_{e,p} \cdot \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_p} = \\ &= 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,74 \cdot \frac{45}{1,2} + 0,6 \cdot 0,8 \cdot \frac{120 - 45}{1,2} = \\ &= 44,80 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Maksymalne wytężenia wynosi:

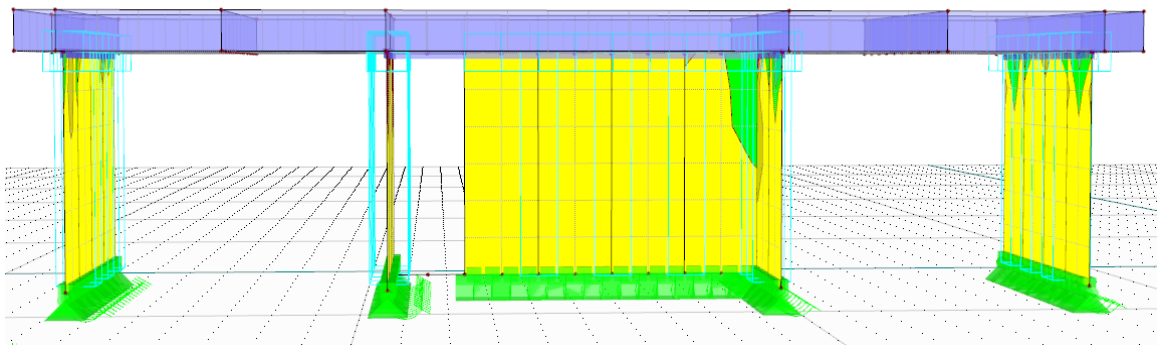
$$\frac{\sigma_{max}}{f_{g,d}} = \frac{8,89}{44,80} = 19,84\%$$

4.7 Sytuacja awaryjna

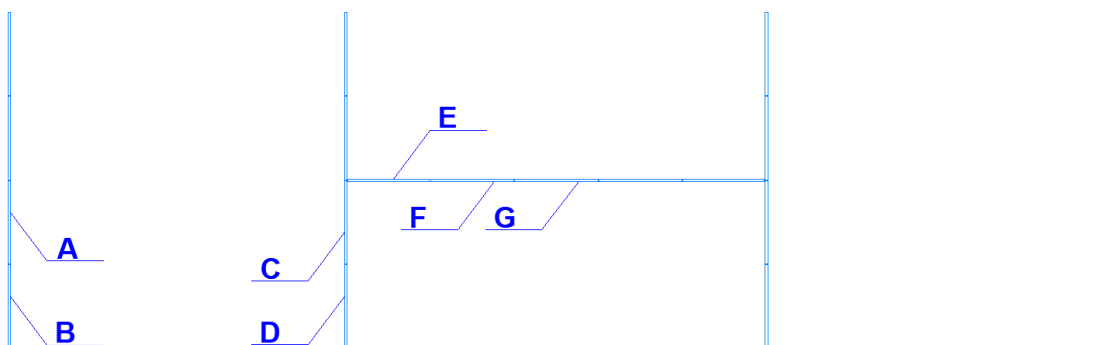
Rozpatrzono sytuacje, w której jedna z szyb ulegnie awarii. Rozważono 7 możliwych scenariuszy uszkodzenia wiaty przy czym założono, że maksymalnie jedna z szyb laminowanych ulegnie uszkodzeniu, rys. 46, 47. Podczas awarii wiaty obciążona jest ciężarem własnym. Założono, że wiaty w przeciągu jednego dnia zostanie zabezpieczona przy pomocy odpowiednich stempli. W rzeczywistości mało prawdopodobne jest, aby wszystkie trzy szyby uległy jednoczesnej awarii, jednak na potrzeby tej analizy przyjęto skrajnie pesymistyczny wariant.



Rysunek 46 Pierwszy wariant modelu w sytuacji awaryjnej



Rysunek 47 Piąty wariant modelu w sytuacji awaryjnej



Rysunek 48 Schemat rozpatrywanych ścian w sytuacji awaryjnej

Ściany w scenariuszach awarii nazwano zgodnie z rysunkiem 48.

Tabela 12 Porównanie maksymalnego wyężenia w zależności od lokalizacji awarii

Scenariusz awarii	Maksymalne wyężenie
1. Zewnętrzna ściana, zewnętrzna tafla (B)	58%
2. Zewnętrzna ściana, wewnętrzna tafla (A)	57%
3. Wewnętrzna ściana, zewnętrzna tafla (D)	61%
4. Wewnętrzna ściana, wewnętrzna tafla (C)	57%
5. Środkowa ściana, skrajna tafla (E)	56%
6. Środkowa ściana, pośrednia tafla (F)	25%
7. Środkowa ściana, środkowa tafla (G)	22%

Z analizy wynika, iż najmniejsze znaczenie dla wyężenia konstrukcji mają szyby będące częścią środkowej ściany podłużnej, tab. 12. Uszkodzenie szyb znajdujących się od strony zewnętrznej ścian poprzecznych ma większy wpływ na wyężenie konstrukcji niż uszkodzenie szyb wewnętrznych. Z wyłączeniem środkowych szyb środkowej ściany podłużnej, uszkodzenie w dowolnym miejscu skutkuje porównywalnym wyężeniem obiektu.

4.8. Porównanie wyników

Z analizy wynika, że wyężenie tego samego elementu w ujęciu różnych norm osiąga drastycznie różne wartości, tab. 13. Analizując otrzymane wartości największego wyężenia elementu widać jak duży wpływ na ugięcie ma zastosowany materiał pośredni między szybami. Żywica epoksydowa posiada znacznie większy moduł Younga i zapewnia częściowe zespolenie szyb, co za tym idzie wskaźnik wytrzymałości takiego elementu jest znacznie większy niż w przypadku, gdy elementy pracują rozłącznie. Widać również, że poradniki TRVL, na których bazuje norma DIN 18008 nie sprawdzają się w szacowaniu wytrzymałości elementów pracujących w bardziej skomplikowanych schematach (przykładowo rozciąganie przy zginaniu ze ściskaniem). Taki rezultat nie jest zaskakujący, gdyż poradniki są

najstarszymi z rozpatrywanych dokumentów i stanowiły one wytyczne w celu poprawnego projektowania fasad szklanych oraz barier. W przypadku obliczeń dokonanych ręcznie otrzymane wartości są pośrednie między tymi otrzymanymi z obliczeń na podstawie normy DIN 18008 oraz poradników TRVL. Problematyczny jest fakt, iż wzory zawarte w normach EN 16612 oraz prEN 13474 nie uwzględniają materiału zespalającego szyby, co za tym idzie wartości zespolenia. Normy nie podają również procedur uwzględniania takich zjawisk jak wyboczenie, które w znaczny sposób może mieć wpływ na wartość wyężenia elementu. Wyjątkiem jest norma prCEN/TS 19100, która docelowo będzie uwzględniać wyżej wymienione zagadnienia, niestety w momencie pisania tej pracy jedynie część 1 normy jest na etapie pozwalającym jej użytkowanie, część 3 zajmująca się przeszkleniami pionowymi, gdzie uwzględnione są wzory pozwalające oszacować wyboczenie jest niekompletna.

Tabela 13 Porównanie wyników analizy

Metoda	Wykorzystanie nośności	Wykorzystanie przemieszczenia
RF-GLASS DIN 18008 Żywica epoksydowa (blacha stopy gr. 5mm)	68%	102%
RF-GLASS DIN 18008 Żywica epoksydowa	68%	77%
RF-GLASS TRLV:2006 Żywica epoksydowa	13%	59%
RF-GLASS DIN 18008 folia PVB	42%	181%
RF-GLASS TRLV:2006 folia PVB	8%	112%
EN 16612 ręcznie	18,0%	—
prEN 13474 ręcznie	15,16%	—
prCEN/TS 19100 ręcznie	19,84%	—

5. Wnioski

5.1. Wnioski dotyczące norm

Obecne procedury i wiedza umożliwiają projektowanie konstrukcji z wykorzystaniem elementów szklanych jako elementów nośnych, jednakże wciąż istnieje wiele pytań i niepewności. Z zarysu przyszłego Eurokodu 10 wynika, że wiele niejasności zostanie rozwiązanych a procedury zostaną uproszczone i ujednoczone bazując na dotychczasowej wiedzy technicznej.

5.2. Wnioski dotyczące szkła jako materiału konstrukcyjnego

Zdaje się, że przed szkłem jako materiałem budowlanym stoi ogromny potencjał. Jako materiał przezroczysty jest pożądanym przez architektów i inwestorów, a wraz z pojawieniem się Eurokodu 10, inżynierowie będą mieli podstawę do przeprowadzania skomplikowanych obliczeń wytrzymałościowych. Szkło w istocie jest bardzo kruchym materiałem, jednak jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w szczególności po wzmocnieniu termicznym lub chemicznym jest znaczna. Stosując odpowiednie środki projektant jest w stanie zapewnić bezpieczną pracę konstrukcji. Okazuje się, że istnieje bardzo dużo rodzajów szkła oraz folii i żywic, a ich dobór w istotny sposób wpływa na pracę konstrukcji. Bez przeglądu literatury branżowej ciężko jest dobrać warstwy szyb zgodnie z praktyką w sposób minimalizujący zagrożenia względem użytkowników obiektu. Problematyczne pozostaje zagadnienie łączeń w konstrukcjach szklanych. Można przyjąć, że obecne rozwiązania są wystarczające dla fasad czy barier, jednak brakuje jednoznacznych procedur i praktyk wskazujących na dokładny wygląd podpór. W istniejących na świecie rozwiązaniach przewija się kilka typów podpór jednakże ich wykonanie i dokładna praca pozostają częścią „know-how” firm specjalizujących się w konstrukcjach szklanych i wiedza ta nie jest rozpowszechniana. Szkło bardzo słabo znosi naprężenia rozciągające, dlatego warto jest korzystać również z elementów metalowych, które mogą przenieść część obciążeń w sytuacjach awaryjnych.

5.3. Wnioski dotyczące modelowania elementów szklanych w programie RFEM 5

Moduł do wymiarowania konstrukcji szklanych oferowany przez firmę DLUBAL świetnie sprawdza się przy prostych elementach szklanych. Poprawność obliczeń w przypadku bardziej skomplikowanych elementów jest jednak wątpliwa. Jest to zrozumiałe, gdyż w momencie powstawania modułu nie istniały normowe podstawy do implementacji takich zagadnień jak zwichrzenie czy wyboczenie. Problematyczne jest również definiowanie

połączeń. Moduł przewiduje typowe połączenia występujące w elementach szklanych, jednak nie są one dostępne w modelu globalnym. Obecnie rozwijany jest program RFEM 6 i prawdopodobnie wraz ze stworzeniem Eurokodu 10 rozpoczną się prace nad nowym modułem do wymiarowania elementów szklanych. Możliwe, że będzie on uwzględniał bardziej skomplikowany charakter pracy elementów oraz takie rozwiązania jak sprężanie elementów.

Spis literatury

- [1] L.B. Klindt, W. Klein, Szkło jako materiał budowlany, Arkady, Warszawa, 1982.
- [2] Rachel Lynn White, GLASS AS A STRUCTURAL MATERIAL, KANSAS STATE UNIVERSITY, Manhattan, Kansas, 2007.
- [3] Marcin Kozłowski, Właściwości i odmiany szkła konstrukcyjnego, Świat Szkła (2010).
- [4] Marian Gwóźdź, Konstrukcje szklane i aluminiowo-szklane, Politechnika Krakowska, Kraków, 2020.
- [5] Anna Eskes, Diana de Kroma, Telesilla Bristogianni, Lisa Rammig, Fred Veer, Rob Nijse, The Production and Performance of Heat Bonded Glass Connections: an Experimental Study, in: Ghent University, Belgia, 2020.
- [6] Martyna Melska, Sandra Lasok, Kinga Mazur, Tomasz Tański, Charakterystyka korozji szkieł, stali konstrukcyjnych i odpornych na korozję, Inst. Mater. Inż. Biomed. Zesz. Stud. Kół Nauk. (2019).
- [7] Anna Józwik, Introduction to structural design of glass according to current European standards, Pol. Akad. Nauk (2022).
- [8] Magdalena Prokop-Duchnowska, Folie do laminowania szkła, Świat Szkła (2017).
- [9] TRVL 2006: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen, (n.d.).
- [10] prEN 16612 Determination of the load resistance of glass panes, (n.d.).
- [11] CEN/TS 19100:2021 Design of glass structures, (n.d.).
- [12] DIN 18008:2010-12 Glas im Bauwesen, (n.d.).
- [13] Artur Piekarczyk, Metody projektowanie szkła budowlanego, Nauka (2013).
- [14] Marcin Kozłowski, Szklane ściany nośne, Świat Szkła (2011).



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Budownictwa
i Inżynierii Środowiska

ZAŁĄCZNIK DO PRACY MAGISTERSKIEJ nt.

STUDIUM PROJEKTOWE KONSTRUKCJI WIATY ROWEROWEJ WYKONANEJ ZE SZKŁA BUDOWLANEGO

DESIGN STUDY OF A BICYCLE SHED MADE OF STRUCTURAL GLASS

Szczecin, 20.02.2024

OPIS TECHNICZNY DO PROJEKTU BUDOWLANO-WYKONAWCZEGO

WIATY ROWEROWEJ WYKONANEJ ZE SZKŁA BUDOWLANEGO

1 Dane ogólne

1.1 Przedmiot i zakres opracowania

Przedmiotem opracowania jest opis techniczny wiaty rowerowej położonej na działce nr 3/11 w Szczecinie przy ulicy Bytomskiej.

1.2 Podstawa opracowania

Norma DIN 18008

Eurokody

1.3 Zakres opracowania

Niniejsze opracowanie projektowe obejmuje projekt budowlany konstrukcji rowerowej wiaty szklanej na działce nr 3/11 w Szczecinie.

2 Dane konstrukcyjno-obliczeniowe

2.1 Układ konstrukcyjny

Układ konstrukcyjny wiaty opiera się na czterech rzędach ścian szklanych oraz jednej ścianie prostopadłej do głównego układu nośnego.

2.2 Zastosowane schematy statyczne

Podatność doleń podpory została wyznaczona z wykorzystaniem programu obliczeniowego. Górną podporę przyjęto jako przegubową.

2.3 Założenia przyjęte do obliczeń konstrukcyjnych

Założono obciążenia atmosferyczne jak dla Szczecina.

3 Rozwiązania budowlane konstrukcyjno-materiałowe

3.1 Roboty ziemne

Obiekt znajduje się w obrębie występowania gruntów aluwialnych. Jeżeli podczas prac napotka się na soczewki gruntów organicznych należy o tym fakcie poinformować projektantów w celu weryfikacji nośności fundamentów.

3.2 Ściany szklane

Ściany szklane wykonane są z trzech warstw o grubości 10 mm. Tafle zewnętrzne wykonano ze szkła hartowanego termicznie natomiast środkowa warstwa wykonana jest ze szkła float. Szyba jest laminowana żywicą epoksydową.

3.3 Zadaszenie stalowe

Stalowe zadaszenie wykonane jest z blach stalowych o grubościach 5 i 10 mm. Konstrukcja wykonana jest ze stali nierdzewnej.

3.4 Odwodnienie

Odwodnienie jest zapewnione poprzez układ sączków oraz odpowiednie spadki wykonturowane za pomocą styropianu w stalowym zadaszeniu.

4 Wytyczne techniczne wykonywania prac budowlanych

Prace należy wykonywać z najwyższą starannością. Szczególną uwagę należy przyłożyć przy przenoszeniu oraz montażu elementów szklanych. Szkło nie może bezpośrednio się stykać z twardymi materiałami i należy pozostawić odstępy min. 10 mm, które powinny być wypełnione silikonem do szkła. Wszelkie elementy szklane należy przed zamontowaniem zbadać pod kątem rys i uszczerbień.