

EUROKODY

praktyczne komentarze

Niniejszy skrypt to kolejne opracowanie w cyklu publikacji na temat podstaw projektowania konstrukcji budowlanych według aktualnie obowiązujących norm opartych na EUROKODACH. Każdy skrypt to teoria przedstawiona w przystępny sposób oraz przykłady, które prowadzą krok po kroku przez proces wymiarowania.

Skrypt 5

1. WPROWADZENIE	E02
2. MATERIAŁY	E02
2.1. Drewno lite	E02
2.2. Drewno klejone	E04
2.3. Materiały płytowe	E04
2.3.1. Płyty OSB	E05
2.3.2. Sklejka	E05
2.3.3. Pozostałe elementy drewnopochodne	E06
3. PODSTAWY PROJEKTOWANIA	E07
3.1. Założenia ogólne	E07
3.2. Wpływ środowiska	E07
3.2.1. Klasy użytkowania	E07
3.2.2. Klasy trwania obciążenia	E08
3.2.3. Współczynniki modyfikujące	E08
3.2.4. Temperatura drewna	E12
3.3. Wartości obliczeniowe właściwości materiałowych	E12
4. STANY GRANICZNE NOŚNOŚCI	E12
4.1. Jednokierunkowe i złożone stany naprężeń	E12
5. STANY GRANICZNE UŻYTKOWALNOŚCI	E14
5.1. Pionowe i poziome odkształcenia	E14
5.2. Drgania	E16
5.3. Poślizg w złączach	E16
6. PRZYKŁADY	E16
6.1. Element ze sklejki	E16

Część 5. Eurokod 5

Projektowanie konstrukcji drewnianych

1. Wprowadzenie

Podstawowy pakiet norm europejskich PN-EN 1995 Eurokod 5 obejmuje zagadnienia związane z projektowaniem konstrukcji drewnianych. Obecnie tworzą go następujące normy wraz z poprawkami:

- [1] PN-EN 1995-1-1:2010 Eurokod 5 - Projektowanie konstrukcji drewnianych - Część 1-1: Postanowienia ogólne - Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków; poprawki: PN-EN 1995-1-1:2010/NA:2010
- [2] PN-EN 1995-1-2:2008 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych - Część 1-2: Postanowienia ogólne - Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe; poprawki: PN-EN 1995-1-2:2008/NA:2010; PN-EN 1995-1-2:2008/AC:2009
- [3] PN-EN 1995-2:2007 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych - Część 2: Mosty; poprawki: PN-EN 1995-2:2007/Ap1:2010

Jednak posiadanie tylko tych norm nie zapewni pełnego źródła informacji niezbędnych do projektowania konstrukcji z drewna i materiałów drewnopochodnych.

W tym opracowaniu przedstawiono najważniejsze powiązania normatywne oraz ich interpretację po zmianach, jakie nastąpiły w stosunku do ostatniej wersji PN-B-03150:2000, będącej w swym szkielecie prenormą Eurokodu 5 oraz jej bezpośrednio poprzedniczki PN-B-03150:1980, w której jeszcze cytowano właściwości materiałów.

2. Materiały

Zanim zacznie się omawiać projektowanie konstrukcji drewnianych na podstawie normy Eurokod 5, należy podkreślić, że świat zrobił duży krok do przodu w zakresie materiałów drewnopochodnych, w których surowcem wyjściowym jest drewno, i że fakt ten znajduje odzwierciedlenie w obecnej normie. Z uwagi na specyfikę te-

go surowca (drewna) powstał szereg technologii „porządkujących” jego strukturę, dając bardziej przewidywalne właściwości w zakresie projektowania. Wśród podstawowych materiałów występujących w Eurokodzie 5, dla których przewidziane są współczynniki obliczeniowe, należy wymienić: drewno lite w układach prętowych, drewno klejone, elementy LVL, sklejkę, płyty OSB czy płyty pilśniowe. Im bardziej rozdrobnione włókna tworzą ponownie element, tym coraz bardziej przewidywalne są jego właściwości. Grupę materiałową pochodzenia naturalnego, jakim jest drewno, uzupełnia grupa łączników mechanicznych (dziś głównie na bazie stali), bez których współczesne konstrukcje drewniane nie mogą się obyć.

Tak szeroka gama produktów nie pozwala dziś zawrzeć w normie podstawowej cech niezbędnych do projektowania. Tak więc należy uzupełnić biblioteczkę konstruktora konstrukcji drewnianych o narzędzia pozyskiwania danych materiałowych. Zazwyczaj jest to kolejna norma, ale, niestety, nie zawsze.

2.1. Drewno lite

Właściwości i dane materiałowe dotyczące drewna litego należy pozyskać z normy PN-EN 338. Obecnie obowiązująca wersja to *PN-EN 338:2011 Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości*. W normie tej określono **system klas**¹ wytrzymałości oparty na **klasyfikacji wytrzymałościowej**. Należy tu nadmienić, że jeszcze w tym roku jest szansa na wprowadzenie ujednolicenia zasad sortowniczych z europejskimi wymaganiami (obecnie w tym zakresie jesteśmy białą plamą na mapie Europy).

W normie PN-EN 338:2011 podano **wartości charakterystyczne** istotnych cech dotyczących wy-

¹ **Klasa drewna** - cecha jakości drewna odpowiadająca wartości wytrzymałości charakterystycznej na zginanie (np. C24)

Tablica 1. Klasy wytrzymałości – Wartości charakterystyczne wg PN-EN 338:2011

		Gatunki iglaste												Gatunki liściaste							
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Właściwości wytrzymałościowe (w N/mm ²)																					
Zginanie	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Rozciąganie wzdłuż włókien	$f_{t0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Rozciąganie w poprzek włókien	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ściskanie wzdłuż włókien	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Ściskanie w poprzek włókien	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,6	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Ścinanie	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Właściwości sprężyste (w kN/mm ²)																					
Średni moduł sprężystości wzdłuż włókien	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5 % kwantyl modułu sprężystości wzdłuż włókien	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8	8,5	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Średni moduł sprężystości w poprzek włókien	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Średni moduł odkształcenia postaciowego	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Gęstość (w kg/m ³)																					
Gęstość charakt.	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	550	620	700	900
Średnia gęstość	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
UWAGI: 1. Podane wyżej wartości wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie, ścinanie, 5 % kwantylu modułu sprężystości, średniego modułu sprężystości oraz średniego modułu odkształcenia postaciowego zostały obliczone z zastosowaniem wzorów pocinanych w załączniku A. 2. Właściwości zamieszczone w tablicy są określone dla wilgotności drewna odpowiadającej temperaturze 20 °C i wilgotności powietrza 65 %. 3. Zachodzi możliwość ograniczonej dostępności drewna klas C45 i C50. 4. Wartości wytrzymałości na ścinanie odnoszą się do drewna bez splekań, wg EN 408. Wpływ splekań należy uwzględnić w zasadach projektowania.																					

trzymałości, sztywności i gęstości dla wszystkich gatunków drewna iglastego (oznaczone symbolem C) i liściastego (oznaczone symbolem D), przeznaczonego do stosowania w konstrukcjach budowlanych.

Wśród klas objętych normą na polskim rynku występują przede wszystkim klasy C20, C22, C24, C27. Klasy niższe nie nadają się na elementy konstrukcyjne, a wyższe są na naszym rynku nieosiągalne. Dla projektantów przydatna może być informacja nawiązująca do poprzednich klasyfikacji drewna: klas oznaczanych symbolem K np. K33 lub oznaczeniami klas spotykanych jeszcze na naszym rynku budowlanym. Zaczniemy od klas jakości oznaczanych cyframi rzymskimi na podstawie normy PN-57/D96000 i ich możliwymi przejściami klasy jakości tarcicy sortowanej metodami wytrzymałościowymi wg PN-82/D-94021.

Również w obecnej wersji normy, czyli w Eurokodzie 5, mamy załączoną do arkusza krajowego tablicę relacji klas sortowniczych krajowego drewna konstrukcyjnego wg PN-D-94021 w stosunku do klas wytrzymałościowych według PN-EN 338 (tablica NA.2).

Tablica 2. Współzależność klas jakości ogólnej i tarcicy sortowanej metodami wytrzymałościowymi

Klasa jakości tarcicy ogólnego przeznaczenia wg PN-57/ D-96000	Klasa jakości tarcicy sortowanej metodami wytrzymałościowymi wg PN-82/D-94021 przy grubości tarcicy			
	38 - 100 mm		25 - 32 mm	
	w zależności od charakteru drewnianych konstrukcji budowlanych			
	stałych	tymczasowych	stałych	tymczasowych
III	MKW lub KW	MKS lub KS	MKW	MKS lub KW
IV	MKS lub KS	MKG lub KG	MKS lub KW	MKG lub KS
V	MKG lub KG	-	MKG lub KS	KG

gdzie klasy jakości przy sortowaniu **wizualnym** oznaczają: **KW** – klasa wyborowa, **KS** – klasa średniej jakości, **KG** – klasa gorszej jakości; przy poprzedzeniu tych oznaczeń literą M otrzymujemy analogiczne klasy jakości przy sortowaniu **maszynowym**.

W praktyce istnieje jeszcze problem klas pośrednich jakie występowały w normie PN-B-03150:1981 – K21, K27, K33, K39. Klasy tarcicy cienkiej sortowanej wizualnie na elementy konstrukcji wg PN-81/B-03150 można przyjąć, że odpowiadają klasom jakości wg PN-EN 338 w następującym zakresie: **K21** to ok. **C24**, K27 ok. C30, K33 ok. C35, K39 ok. C40. Różnica ta wynika z definiowania wartości charakterystycznych przy różnych wilgotnościach drewna. Klasy K by-

ły badane przy wilgotności 15%, a klasy C są oznaczane przy wilgotności 12% i z tego powodu, mimo z pozoru zbieżnej definicji wartości charakterystycznej, obu klas nie można bezpośrednio przyrównać.

Tablica 3. Współzależność klas jakości tarcicy sortowanej metodami wytrzymałościowymi wg PN-82/D-94021 oraz klas wg EN 1912 (źródło EC5 tablica NA.2.)

Gatunek drewna	Grubość [mm]	KW	KS	KG
Sosna zwyczajna	≥22	wg EN 1912		
Sosna zwyczajna zgodnie z EN 1912		C35	C24	C20
Świerk pospolity		C30	C24	C18
Jodła pospolita		C22	C18	C14
Modrzew europejski		C35	C30	C24

2.2. Drewno klejone

Zgodnie z zapisem normy PN-EN 1194:2000 „norma zawiera system klasyfikacji wytrzymałościowej dla drewna klejonego warstwowo o poziomym układzie czterech i więcej warstw tarcicy. Określono w niej liczbę klas wytrzymałości oraz podano charakterystyczne wartości wytrzymałości, sztywności oraz gęstości. Przedmiot normy czasowo ograniczono do drewna klejonego warstwowo z tarcicy iglastej. Należy tu podkreślić, że norma ta może nam posłużyć jedynie w zakresie projektowania elementów prętowych wykonanych z drewna klejonego oznaczonych symbolem GL.

Elementy płytowe CLT (HBE) i GLT nie są objęte tą normą i charakterystyk należy szukać u producenta.

2.3. Materiały płytowe

Wśród tej grupy materiałów najbardziej rozpoznawalne na naszym rynku budowlanym są: sklejka

i płyty OSB. Jednak nie zamykają one grupy materiałów płytowych. Bez względu na rodzaj materiału płytowego opartego na bazie fornirów (V), wiórów (S) i włókien (D), istotne jest określenie kierunku oddziaływania w stosunku do włókien (warstw pracujących).

Tu warto zwrócić uwagę na ilustrację z poprzedniej wersji normy, której zabrakło w EC5, a która równocześnie stwarza wielu osobom trudności interpretacyjne w zapisach norm materiałowych.

W przeciwieństwie do drewna litego (C) i klejonego warstwowo (GL), dla których oznaczamy tylko jedną wytrzymałość na zginanie ($f_{m,k}$), dla sklejki czy płyt OSB oznaczamy wytrzymałość na zginanie prostopadłe do płaszczyzny płyty ($f_{m,90,k}$) i zginanie w płaszczyźnie płyty ($f_{m,0,k}$) – porównaj z ilustracją 1.

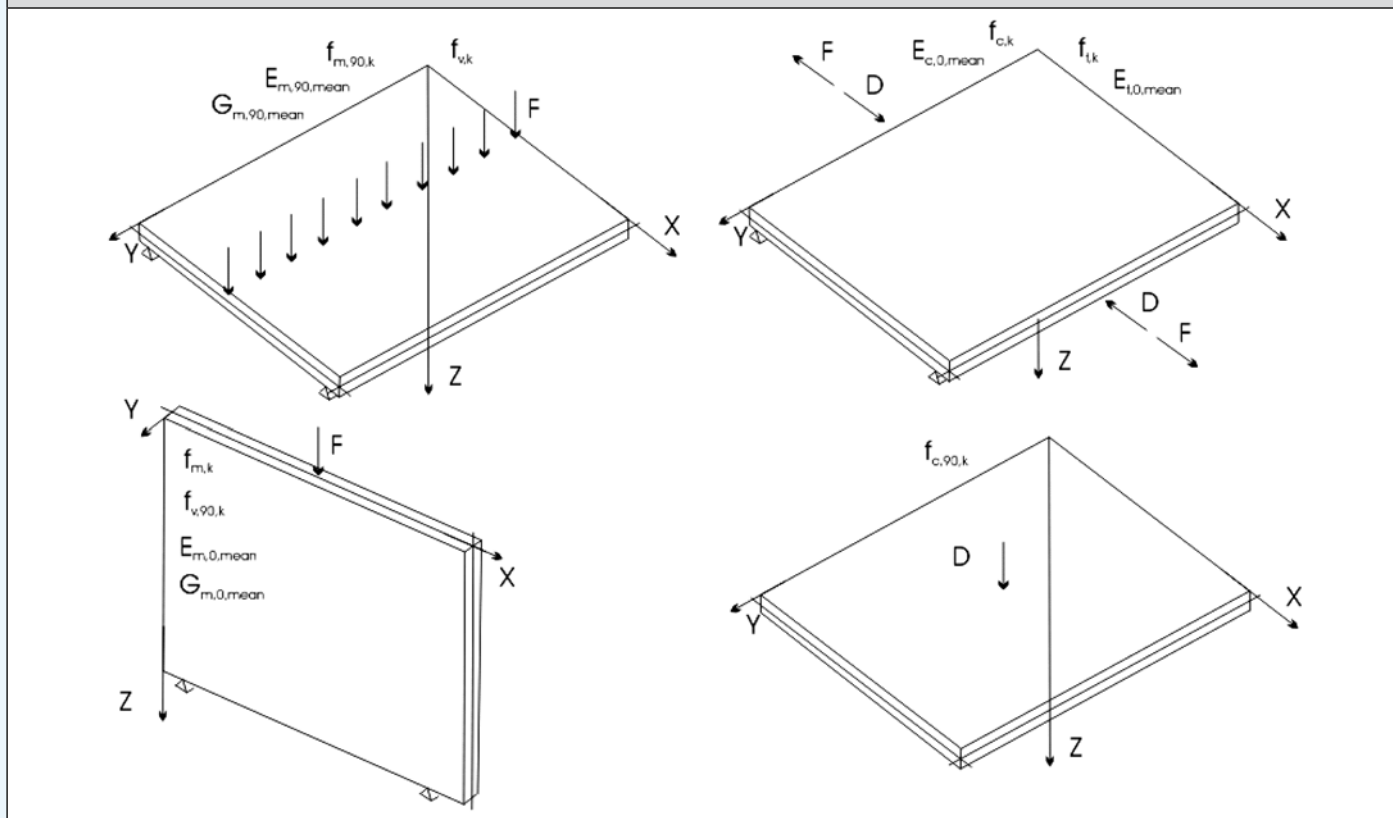
2.3.1. Płyty OSB

Płyty OSB w zakresie właściwości objęte są normą PN-EN 12369-1:2002 *Płyty drewnopochodne. Wartości charakterystyczne do projektowania, Część 1: Płyty OSB, płyty wiórowe i płyty pilśniowe*. Zakres tej normy obejmuje **dane dotyczące wartości charakterystycznych** oraz gęstości, do stosowania podczas projektowania konstrukcji objętych EC5-1-1 następujących rodzajów płyt: **OSB/2, OSB/3 i OSB/4; wiórowych P4, P5, P6, P7**; pilśniowych twardych HB.HLA2; pilśniowych półtwardych MBH.LA2; MDF.LA i MDRHLS. Natomiast wartości charakterystyczne sklejek, płyt z drewna litego, płyt z fornirów klejonych warstwowo (LVL) i płyt wiórowo-cementowych są objęte kolejnymi częściami tej normy.

Tablica 4. Charakterystyczne wartości wytrzymałości i sprężystości w N/mm² oraz gęstości w kg/m³ (dla jednorodnego drewna klejonego warstwowo – w oznaczeniu litera h)

Klasa wytrzymałości drewna klejonego		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Wytrzymałość na zginanie	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Wytrzymałość na rozciąganie	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Wytrzymałość na ściskanie	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Wytrzymałość na ścinanie	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Moduł sprężystości	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Moduł odkształcenia postaciowego	$G_{0,mean}$	720	780	850	910
Gęstość	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Ilustracja 1. – Oznaczenia (indeksy) stosowane przy odpowiednich wytrzymałościach i modułach dla elementów płytowych (pracujących jako płyty lub tarcze) wg PN-EN 03150:2000



Dalej, jako reprezentanta problemu w tabelicy 5, przedstawiono wartości charakterystyczne dla płyt OSB/2 i OSB/3.

Oprócz wartości charakterystycznych w normie podkreślono, że w przypadku stosowania płyt OSB zgodnie z PN-EB 1995-1-1 wartości charakterystyczne właściwości mechanicznych i gęstości podane w tabelicy 6 należy zmodyfikować ze względu na czas trwania obciążenia i warunki użytkowania współczynnikami k_{mod} i k_{def} (co dotyczy również innych materiałów, o czym poniżej).

Po wartości pozostałych materiałów objętych tą normą należy sięgać już bezpośrednio do jej zawartości.

2.3.2. Sklejka

Kolejna norma z zakresu płyt drewnopochodnych obejmuje właściwości sklejki – PN-EN 12369-2:2005 *Płyty drewnopochodne. Wartości charakterystyczne do projektowania, Część 2: Sklejka* (obecnie zastąpiona wersją 2011 w języku angielskim). Z uwagi na bardzo dużą liczbę kombinacji surowca wyjściowego (drzew liściastych i iglastych), grubości fornirów, ilości warstw, norma

ta w załączniku A podaje jedynie zalecenia form prezentacji wartości charakterystycznych.

Ale patrząc tylko do załącznika A, możemy nie zauważyć jeszcze jednego problemu związanego z interpretacją danych wytrzymałościowych podawanych dla sklejki. Widać to było w poprzedniej wersji normy PN-B-03150:2000 – patrz tabela 6. Jakby było mało rozróżniania wytrzymałości na zginanie prostopadłej do płaszczyzny płyty ($f_{m,90,k}$) i w płaszczyźnie płyty ($f_{m,k}$), wytrzymałości w tabelicach mają jeszcze po dwie wartości dotyczące tego samego zagadnienia, a w stopce można było znaleźć UWAGĘ: Wartości górne dotyczą kierunku wzdłuż włókien fornirów zewnętrznych, dolne – w poprzek włókien fornirów zewnętrznych. Uwaga ta była niezmiernie ważna i nakładała na projektanta konieczność sprecyzowania w projekcie ukierunkowania włókien zewnętrznych płyty.

Obecnie wartości do projektowania należy szukać u producentów, określając po drodze istotne informacje m.in. pochodzenie sklejki, np. liściasta z brzozy, liczbę warstw fornirów, grubość oraz bardzo istotne założenie – **układanie płyty sklejki w konstrukcji** (patrz przykład oblicze-

Tablica 5. Wartości charakterystyczne płyt zgodnych z EN 300: OSB/2: Płyty nośne przeznaczone do stosowania w warunkach suchych i OSB/3: Płyty nośne przeznaczone do stosowania w warunkach wilgotnych wg PN-EN 12369-1:2002

Grubość mm	Gęstość charakterystyczna (kg/m ³) i wytrzymałości charakterystyczne (N/mm ²)								
	Gęstość	Zginanie		Rozciąganie		Ściskanie		Ścinanie prostopadłe do płasz- czyzny płyty	Ścinanie w płaszczy- źnie płyty
	ρ	f_m		f_t		f_c		f_v	f_r
t_{nom}		0	90	0	90	0	90		
> 6 do 10	550	18,0	9,0	9,9	7,2	15,9	12,9	6,8	1,0
> 10 do 18	550	16,4	8,2	9,4	7,0	15,4	12,7	6,8	1,0
> 18 do 25	550	14,8	7,4	9,0	6,8	14,8	12,4	6,8	1,0

Grubość mm	Sprężystość średnia (N/mm ²)							
	Zginanie		Rozciąganie		Ściskanie		Ścinanie prostopadłe do płaszczyzny płyty	Ścinanie w płasz- czyźnie płyty
	E_m		E_t		E_c		G_v	G_r
t_{nom}	0	90	0	90	0	90	0	90
> 6 do 10	4 930	1 980	3 800	3 000	3 800	3 000	1 080	50
> 10 do 18	4 930	1 980	3 800	3 000	3 800	3 000	1 080	50
> 18 do 25	4 930	1 980	3 800	3 000	3 800	3 000	1 080	50

niowy). Warto również popatrzeć na tablice producentów, zwracając uwagę na stosowane indywidualne oznaczenia (niekoniecznie „zgodne” z normą). Nie są one trudne do „rozpracowania” pod warunkiem, że wiemy jak powstaje sklejka² i dlaczego tak istotne jest prawidłowe ukierunkowanie płyty w konstrukcji. Jak widać po przykładowych wartościach (tablica 6), zmiana kierunku ułożenia płyty może mieć istotne znaczenie dla nośności danego elementu. Podkreślając ponownie, wymaga to od projektanta starannego opisanie rysunku, aby na budowie nie doszło do błędnego zamontowania elementu płytowego (porównaj przykład obliczeniowy).

2.3.3. Pozostałe elementy drewnopochodne

Obecnie dostępna jest już w języku oryginału (w języku angielskim) PN-EN 12369-3:2008 Płyty drewnopochodne. Wartości charakterystyczne do projektowania, Część 3: Płyty z drewna litego. Ta norma obejmuje rzadko stosowane na naszym rynku płyty z drewna litego SWP (Solid Wood Panel) – ilustracja obok. Tak jak i w poprzednich materiałach drewnopochodnych, istotne właściwości różnicowane są w zależności od grubości i ukierunkowania pracujących włókien.

Tablica 6. – wyciąg z tablicy Z.2.4.2 PN-B-03150:2000 dla sklejki bukowej produkcji krajowej

Rodzaje właściwości	Oznaczenia	Liczba fornirów (warstw)				
		≤ 7	9	11	13	15
		Grubość sklejki, w mm				
		8-10	12	15	18	≥ 20
Wytrzymałość, w N/mm ² (MPa)						
Zginanie prostopadłe do płaszczyzny płyty	$f_{m,90,k}$	68 11	61 18	52 28	46 34	41 39
Zginanie w płaszczyźnie płyty	$f_{m,k}$	27 18	27 18	27 18	27 18	27 18

² SKLEJKA – sklejka symetryczna – płyta sklejona z nieparzystej liczby warstw forniru, w której wewnętrzne i zewnętrzne warstwy są, z uwagi na grubość i rodzaj, symetryczne względem warstwy środkowej p. 1.3.3 PN-B-03150:2000; czyli zewnętrzne warstwy fornirów mają ten sam kierunek włókien.

Ilustracja 2. Płyta z drewna litego SWP [1]



Tablica 7. Wybrane parametry dla płyt SWP wg EN12369-3 (oryg)

grubość [mm]		12-20	> 20 ÷ 30	> 30 ÷ 42	> 42
ρ [kg/m ³]		410	410	410	410
f_m [N/mm ²]	0	35	30	16	12
	90	5,0	5,0	9,0	9,0
E_m [N/mm ²]	0	10000	8200	7600	7100
	90	550	550	1500	1500

3. Podstawy projektowania

3.1. Założenia ogólne

Konstrukcje drewniane, z uwagi na zmienność właściwości materiału w czasie i wrażliwość na oddziaływanie środowiska, są trudnym polem działań dla projektanta. Wymagają dobrej znajomości tworzyw drewnianych omówionych powyżej, jak i poprawnego określenia środowiska, w jakim przyjdzie pracować konstrukcji.

W modelach obliczeniowych odnoszących się do poszczególnych stanów granicznych analizowanych dla konstrukcji drewnianych należy uwzględnić następujące zagadnienia (wg EC5-1-1 p.2.2.1):

- różnice we właściwościach materiałów (np. wytrzymałość i sztywność oraz zagadnienia omówione powyżej), np. dla złożonych belek dwuteowych o różnych materiałowo pasach i środku,
- różnice w zachowaniu się materiałów w czasie (czas trwania obciążenia, pełzanie), patrz **klasa trwania obciążenia**,
- różnice w warunkach klimatycznych (temperatura, zmiany wilgotności), patrz zagadnienia **klas użytkowania**,

- różnice w sytuacjach obliczeniowych (etapy realizacji, zmiany warunków podparcia).

Do analizy konstrukcji drewnianych używamy, analogicznie jak w pozostałych konstrukcjach, metody stanów granicznych. Analizę konstrukcji prowadzi się stosując następujące założenia związane ze sztywnością:

- w analizie pierwszego rzędu w zakresie liniowo-sprężystym, jeżeli na rozkład sił wewnętrznych i momentów w elementach nie ma wpływu rozkład sztywności w konstrukcji (np. **jeżeli wszystkie elementy charakteryzuje jednakowa zmienność właściwości w czasie**), w projektowaniu należy przyjmować **wartości średnie**,
- w analizie pierwszego rzędu w zakresie liniowo-sprężystym, jeżeli na rozkład sił wewnętrznych i momentów w elementach ma wpływ rozkład sztywności w konstrukcji (np. **elementy są złożone z materiałów o różnej zmienności właściwości w czasie**), należy przyjmować wartości **średnie właściwości, dostosowane do czasu trwania składowej obciążenia**, która wywołuje największe naprężenie w odniesieniu do wytrzymałości materiału,
- w analizie drugiego rzędu w zakresie liniowo-sprężystym należy przyjmować **wartości obliczeniowe bez uwzględniania czasu trwania obciążenia** (wg EC5-1-1 p.2.2.2).

Na początek skupmy się na jednorodnych rozwiązaniach (z jednego materiału) bez analizowania złożonych elementów cechujących się różnym wpływem czasu na właściwości materiału.

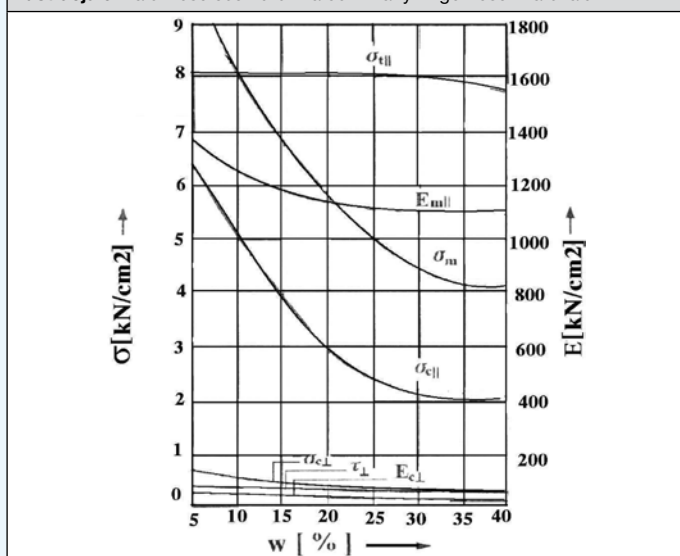
3.2. Wpływ środowiska

3.2.1. Klasy użytkowania

Ponieważ drewno jak i jego pochodne są bardzo wrażliwe na niestabilne warunki wilgotnościowe (wraz ze wzrostem wilgotności maleją parametry wytrzymałościowe drewna - patrz ilustracja 3), przy analizie konstrukcji wykonanych z tych materiałów należy uwzględnić, w jakich warunkach wilgotnościowych pracuje konstrukcja. Dotychczasowy wzór Bauschingera został zastąpiony ogólnym opisem warunków środowiskowych nazwanych klasami użytkowania. Konstrukcje powinny być zaliczane do jednej z podanych niżej klas użytkowania:

1. **Klasa użytkowania 1** charakteryzuje się wilgotnością materiału odpowiadającą temperaturze 20 °C i wilgotnością względną otaczającego powietrza przekraczającą 65% tylko przez kilka tygodni w roku. W klasie użytkowania 1 przeciętna wilgotność większości gatunków drewna iglastego nie przekracza 12%,

Ilustracja 3. Zależność cech drewna od zmiany wilgotności materiału



2. **Klasa użytkowania 2** charakteryzuje się wilgotnością materiału odpowiadającą temperaturze 20 °C i wilgotnością względną otaczającego powietrza przekraczającą 85% tylko przez kilka tygodni w roku. W klasie użytkowania 2 przeciętna wilgotność większości gatunków drewna iglastego nie przekracza **20%**.

3. **Klasa użytkowania 3** odpowiada warunkom powodującym wilgotność drewna wyższą niż odpowiadająca klasie użytkowania 2.

Podstawowym celem utworzonego systemu klas użytkowania jest przypisanie wartości wytrzymałości i obliczenie odkształceń w dostosowaniu do określonych warunków środowiska. W literaturze przedmiotu można znaleźć odbiegające nieco od zdefiniowanych w normie zakresów wilgotności drewna w odpowiednich klasach (tablica 8).

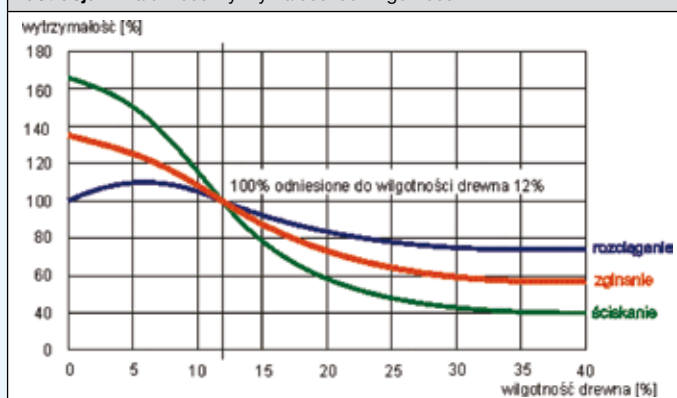
Tablica 8. Orientacyjne wilgotności w poszczególnych klasach użytkowania i przykładowe obiekty

klasa użytkowania	1	2	3
wilgotność drewna	5–15% (12%)	10–20% (20%)	12–24%
przykład konstrukcji	dach budynku mieszkalnego	przekrycie hali sportowej	wieża widokowa

A w załączniku krajowym (NA.8.1) określone są zalecenia zakresu wilgotności drewna litego stosowanego na elementy konstrukcyjne. Nie powinny one przekraczać:

- 18% wilgotności w konstrukcjach chronionych przed zawilgoceniem
- 23% wilgotności w konstrukcjach pracujących na otwartym powietrzu.

Ilustracja 4. Zależność wytrzymałości od wilgotności



3.2.2. Klasy trwania obciążenia

Konstrukcje wykonane z drewna i materiałów drewnopochodnych oprócz zmiennej wilgotności źle znoszą długotrwałe obciążenia. Do odzwierciedlenia tego zagadnienia wprowadzono pojęcie klasy trwania obciążenia. W przypadku oddziaływań zmiennych, odpowiednia klasa jest określona na podstawie oszacowania typowej zmienności obciążenia w czasie. W obliczeniach dotyczących wytrzymałości i sztywności konstrukcji, oddziaływania powinny być zaliczone do jednej z klas trwania obciążenia wymienionych w tablicy 9.

Tablica 9. Klasy trwania obciążenia

klasa trwania obciążenia	rzęd wielkości skumulowanego czasu trwania obciążenia charakterystycznego	przykład obciążenia
stałe	ponad 10 lat	ciężar własny
długotrwałe	6 miesięcy – 10 lat	obciążenie magazynu (składowanie)
średniotrwałe	1 tydzień – 6 miesięcy	obciążenie użytkowe, śnieg
krótkotrwałe	mniej niż 1 tydzień	śnieg, wiatr
chwilowe		wiatr, obciążenie awaryjne

3.2.3. Współczynniki modyfikujące

3.2.3.1. k_{mod} – współczynnik modyfikujący wytrzymałość

Jednym z istotniejszych współczynników modyfikujących wpływ wilgotności i czasu trwania obciążenia podczas weryfikowania SGN jest współczynnik k_{mod} . Współczynnik ten ustalany jest na podstawie stabelaryzowanych wartości podanych w zależności od rodzaju materiału (drewno czy materiał drewnopochodny), klasy użytkowania i klasy trwania obciążenia. Wybrane materiały przedstawia tablica 10 (naturalnie całości należy poszukiwać w normie). Poprawne odczytanie wartości na

Tablica 10. Wartości współczynnika k_{mod} (fragment wg EC5-1-1 tab. 3.1)

materiał	norma	klasa użytkowania	Klasa trwania obciążenia – działanie				
			stałe	długotrwałe	średniotrwałe	krótkotrwałe	chwilowe
drewno lite	EN 14081-1	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
drewno klejone warstwowo	EN 14080	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
sklejka	EN 636	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9
OSB	EN 300 OSB/2 OSB/3, OSB/4 OSB/3, OSB/4	1	0,3	0,45	0,65	0,85	1,1
		2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1
		3	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9

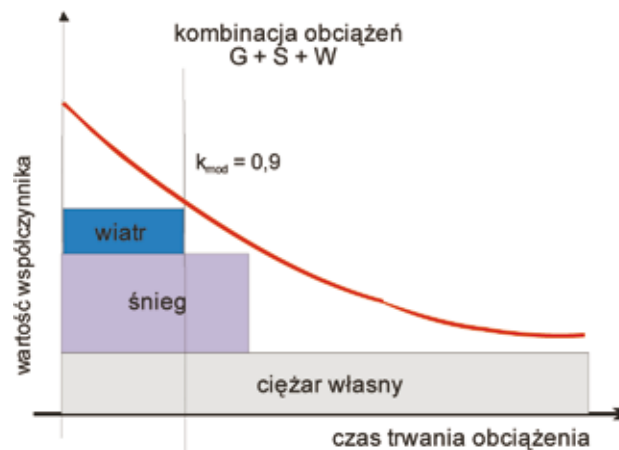
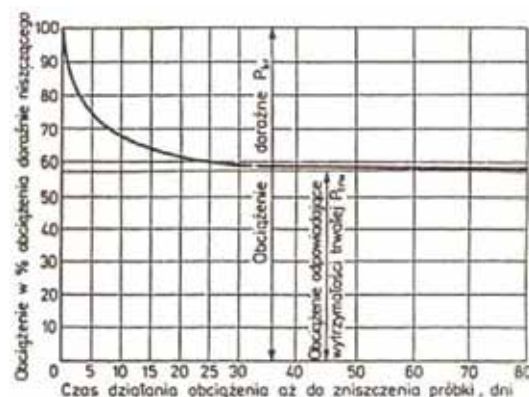
pozór nie powinno nastręczać żadnych trudności, jednak użytkownicy poprzedniej wersji normy, po zmianach wprowadzonych arkuszem zmian, czują się niepewnie przy wymiarowaniu. W obecnej normie powrócił zapis obowiązujący we wszystkich krajach. „Jeżeli **kombinacja** obciążeń składa się z oddziaływań **należących do różnych klas trwania obciążenia**, to należy wybrać taką wartość współczynnika k_{mod} , która odpowiada oddziaływaniu krótszemu, np. dla kombinacji działanie stałe i działanie krótkotrwałe należy zastosować wartość k_{mod} odpowiadającą działaniu krótkotrwałemu (EC5-1-1 p.3.1.3(2)).

Istota problemu polega na rozpatrywaniu wszystkich kombinacji obciążeń, jeżeli nie jesteśmy pewni, która jest najistotniejsza. Dla każdej kombinacji każdorazowo należy ustalić zgodnie z zasadami współczynnika k_{mod} . Na przykład analizując płatek z drewna klejonego w hali pod uwagę możemy brać następujące obciążenia: ciężar własny konstrukcji (G), obciążenie śniegiem (S), obciążenie wiatrem (przy małych nachyleniach połączi zazwyczaj ssanie – W) i ewentualnie użytkowe obciążenie połączi dachu (choć przy zwykłych halach co najwyżej człowiek z narzędziami – Q_1). Tak przyjęte obciążenie wygeneruje różne kombinacje obciążeń, a co za tym idzie różne wartości współczynnika k_{mod} – patrz tablica 11.

Tablica 11. Wartości współczynnika k_{mod} w zależności od kombinacji obciążeń

wariant kombinacji obciążeń	uwzględnione obciążenia	klasa użytkowania (KU)	Klasa trwania obciążenia (KTO)	k_{mod}
1	G	2	stałe	0,6
2	G + S	2	średniotrwałe	0,8
3	G + W	2	krótkotrwałe	0,9
4	G + S + Q_1	2	chwilowe	1,1

Ilustracja 5. Wpływ czasu oddziaływania na nośność



Naturalnie nie widać jeszcze w tym miejscu istotności zagadnienia. Pokaże się ono dopiero w momencie ustalenia wytrzymałości materiału, a właściwie w momencie oszacowania wyężenia przekroju w zależności od dominujących obciążeń (o czym poniżej).

3.2.3.2. k_{def} – współczynnik odzwierciedlający wpływ pełzania

Drugim istotnym współczynnikiem odzwierciedlającym zachowanie drewna i materiałów drewnopochodnych w różnych warunkach użytkowania jest współczynnik k_{def} , który uwzględniany jest w zagadnieniach stanów granicznych. Jego przykładowe wartości przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12. Wartości współczynnika k_{def} (fragment wg EC5-1-1 tab.3.2)				
materiał	norma	klasa użytkowania		
		1	2	3
drewno lite	EN 14081-1	0,6	0,8	2,0
drewno klejone warstwowo	EN 14080			
LVL	EN 14374, EN 14279			
sklejka	EN 636-1	0,8	–	–
	EN 636-2	0,8	1,00	–
	EN 636-3	0,8	1,00	2,5
OSB	OSB/2	2,25	–	–
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	–

Na podstawie tej tabelki łatwo też zauważyć, w jakich warunkach wilgotnościowych powinny pracować poszczególne płyty (sklejki i OSB).

W przypadku połączeń elementów wykonanych z materiałów o jednakowym wpływie czasu na ich właściwości, wartość k_{def} należy podwoić.

3.2.3.3. k_h – współczynnik wymiarów elementów

Drewno w swej podstawowej budowie jest mało „uporządkowanym” tworem dla potrzeb konstrukcyjnych. Nieostrzegalne gołym okiem „dziury”, nierówne przyrosty, sęki itp. wady powodują, że drewno w badaniach wytrzymałościowych ma niestabilne wartości i m.in. z tego powodu posługujemy się wartościami charakterystycznymi³. Jednak im bardziej uporządkowane tworzywa drzewne, tym bar-

dziej rosną wytrzymałości np. na zginanie. Jest to jeden z powodów, dla których możemy sięgnąć w projektowaniu po wyższe parametry wytrzymałościowe. Z tego powodu możemy dla wielu materiałów stosować współczynnik k_h .

Drewno lite

Zgodnie z zaleceniami normy EC5-1-1 należy uwzględnić wpływ wymiarów elementów na wytrzymałość. Dokonuje się tego dla drewna litego o przekroju prostokątnym i gęstości charakterystycznej $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$. Wartość odniesienia dla **wysokości** elementu **zginanego** lub **szerokości** elementu **rozciąganego** wynosi 150 mm. Dla wysokości przy zginaniu lub szerokości przy rozciąganiu drewna litego o wartości mniejszej niż 150 mm, wartości charakterystyczne $f_{m,k}$ i $f_{t,0,k}$ należy pomnożyć przez współczynnik k_h obliczony ze wzoru:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\}$$

gdzie:

h jest wysokością elementu zginanego lub szerokością elementu przy rozciąganiu podaną w mm.

Drewno klejone warstwowo

Analogicznie jak dla drewna litego drewno klejone warstwowo ma swój współczynnik k_h . Punkt odniesienia dla przekroju jest nieco inny ponieważ wynika z powyżej omówionych zasad. Dla elementów z drewna klejonego warstwowo o przekroju prostokątnym, wartość odniesienia wysokości przy zginaniu lub szerokości przy rozciąganiu wynosi 600 mm. Dla wysokości przy zginaniu lub szerokości przy rozciąganiu drewna klejonego warstwowo o wartości mniejszej niż 600 mm wartości charakterystyczne $f_{m,k}$ i $f_{t,0,k}$ należy pomnożyć przez współczynnik k_h obliczony ze wzoru:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\}$$

gdzie:

$h[\text{mm}]$ jest wysokością elementu zginanego lub szerokością elementów rozciąganych.

³ Wartość charakterystyczna właściwości materiału LUB wyrobu (X_k lub R_k) – wartość właściwości materiału lub wyrobu, odpowiadająca założonemu prawdopodobieństwu nie przekroczenia w teoretycznej nieograniczonej serii prób. Zwykle odpowiada ona określonej kwantyli przyjętego rozkładu statystycznego określonej właściwości materiału lub wyrobu. (EC0 p.1.5.4.1) np. dla sklejki **wartości charakterystyczne wytrzymałości** definiuje się jako 5. percentyl licznosci, uzyskany w wyniku badań przeprowadzonych w ciągu 300 s przy wilgotności równoważnej próbek odpowiadającej temperaturze 20 °C i wilgotności względnej powietrza 65% (czyli próbka ma 12% wilgotności); **wartości charakterystyczne sztywności** definiuje się analogicznie jako 5. percentyl licznosci lub jako wartości średnie, uzyskane w warunkach określonych powyżej. Wartości sztywności podane w tablicach normy są wartościami średnimi, gdyż takie najczęściej stosuje się w projektowaniu; **gęstość charakterystyczna** definiuje się jako 5. percentyl licznosci, gdzie masa i objętość odpowiadają wilgotności równoważnej przy temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza 65%. Wartość ta jest stosowana w projektowaniu złączy zgodnie z PN-EN 1995-1-1. (wg PN-EN 12369-2 p.3.1.1)

LVL – Laminated Vener Lumber, czyli fornir klejony warstwowo

Jest to ostatni z elementów, który został objęty współczynnikiem k_h . Zasada jego stosowania jest analogiczna do poprzednich, chociaż wzory uległy podziałowi na zginanie i rozciąganie.

Wartość odniesienia dla wysokości przy zginaniu wynosi 300 mm. Dla wysokości przy zginaniu innych niż 300 mm, wartość charakterystyczną przy zginaniu $f_{m,k}$ należy pomnożyć przez współczynnik k_h obliczony ze wzoru:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{300}{h} \right)^s, 1,2 \right\}$$

gdzie:

h [mm] jest wysokością elementu zginanego, s współczynnikiem wpływu rozmiarów wg EN 14374. Wartość tę podaje również producent, np. dla elementów LVL Kerto-S $s = 012$, dla Kerto-T $s = 015$.

Przy rozciąganiu elementów LVL wartość odniesienia dla długości wynosi 3 000 mm. Dla długości przy rozciąganiu innej niż 3 000 mm, wartość charakterystyczną $f_{t,0,k}$ należy pomnożyć przez współczynnik k_h obliczony ze wzoru:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{3000}{l} \right)^{s/2}, 1,1 \right\}$$

gdzie:

l [mm] jest długością elementu.

3.2.3.4. γ_M – częściowy współczynnik bezpieczeństwa właściwości materiału

Współczynnik γ_M to współczynnik bezpieczeństwa właściwości materiału, uwzględniający także niedoskonałości modelowania i odchyłki wymiarowe. Należy on do podstawowych parametrów projektowania. Służy on do określania wartości obliczeniowych właściwości materiałowych. Jego wartości podano w tabelicy 13.

Tabela 13. Zalecane wartości częściowego współczynnika bezpieczeństwa właściwości materiałów (wg EC5-1-1 tab. 2.3)	
Stan graniczny nośności – kombinacje podstawowe	γ_M
drewno lite; płyty wiórowe, pilśniowe twarde, pilśniowe półtwarde, pilśniowe MDF, pilśniowe miękkie; złącza	1,3
drewno klejone warstwowo; płytki kolczaste	1,25
LVL, sklejka, płyty OSB	1,2
kombinacje wyjątkowe	1,0

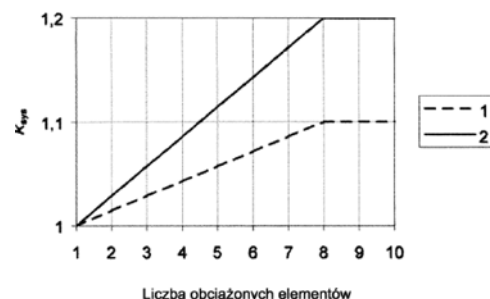
3.2.3.5. k_{crit} – współczynnik stateczności giętej

Współczynnik k_{crit} uwzględniający redukcję wytrzymałości ze względu na zwichrzenie elementów dotyczy belek obciążonych wyłącznie momentem M_y (wg normy oś y to oś przekroju, względem której sztywność belki ma największą wartość). Współczynnik ten może przyjmować wartość 1,0 w przypadku belek, które w strefie ściskanej są zabezpieczone na całej swej długości – przed przemieszczeniami bocznymi, a na podporach przed obrotem wskutek skręcania.

3.2.3.6. k_{sys} – współczynnik modyfikujący wytrzymałość zależny od rozwiązań konstrukcyjnych

Kolejny współczynnik to współczynnik wpływu dogrego rozwiązania konstrukcyjnego. Stosowany jest dla elementów lub konstrukcji wieloelementowych o jednakowych rozstawach, w których dzięki wzajemnym połączeniom można uwzględnić redystrybucję obciążeń ciągłych. Właściwości wytrzymałościowe tych elementów można pomnożyć przez współczynnik k_{sys} , uwzględniający wpływ rozwiązania konstrukcyjnego. „Jeżeli system redystrybucji obciążeń zapewnia przenoszenie obciążeń z danego elementu na elementy sąsiednie, można przyjąć współczynnik $k_{sys} = 1,1$. **Nośność systemu redystrybucji obciążeń** należy sprawdzać, przyjmując **obciążenia krótkotrwałe**. W przypadku kratownicowych **wiazarów** dachowych o rozstawie nie większym niż 1,2 m można założyć, że łąty, płatywie lub płyty mogą przekazywać obciążenie na wiazary sąsiednie, pod warunkiem że te elementy systemu dystrybucji obciążeń są ciągle co najmniej w obrębie dwóch przęseł, a wszystkie złącza są usytuowane przemienianie. W przypadku **poszyc** dachowych lub stropowych z drewnianych płyt warstwowych, należy przyjmować wartości k_{sys} wg ilustracji 6. [EC5-1-1 p.6.6]

Ilustracja 6. współczynnik wpływu rozwiązania konstrukcyjnego k_{sys} w przypadku poszyc z drewnianych płyt warstwowych



objaśnienia

- 1 – element redystrybucji obciążeń łączone na gwoździe lub wkręty
2 – element redystrybucji obciążeń sprężone lub klejone

3.2.3.7. kolejne współczynniki

W konstrukcjach drewnianych występuje jeszcze szereg innych współczynników. Nie omówiono ich wszystkich od razu, ponieważ można je dostrzec w prosty sposób bezpośrednio przy zagadnieniu, którego dotyczą modyfikując wytrzymałość związaną z danym problemem.

3.2.4. Temperatura drewna

Drewno, tak jak na wilgoć, wrażliwe jest na oddziaływanie termiczne – wraz ze wzrostem temperatury traci swoje właściwości. W analizie konstrukcji należy rozpatrywać temperatury w przedziale do 100 °C i wyższe, aż do temperatur pożarowych. Zagadnienia związane z temperaturami pożarowymi objęte są odrębną częścią Eurokodu – częścią EC5-1-2. Natomiast w załączniku krajowym NA.8.2 cz. EC5-1-1 dla prostszych przypadków (niższych temperatur) podano kolejny współczynnik k_{temp} .

Temperatura drewna w konstrukcjach drewnianych nie powinna przekraczać 60 °C. W warunkach okresowego występowania temperatur wyższych, nie przekraczających jednak 75 °C, zaleca się stosowanie współczynnika zmniejszającego właściwości wytrzymałościowe $k_{temp} = 0,80$.

3.3. Wartości obliczeniowe właściwości materiałowych

Zgodnie z normą EC5-1-1 wartość obliczeniową X_d właściwości wytrzymałościowej należy obliczać ze wzoru:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad \text{wzór 1}$$

gdzie:

- X_k – wartość charakterystyczna właściwości wytrzymałościowej np. $f_{m,k}$
- γ_M – częściowy współczynnik bezpieczeństwa właściwości materiału
- k_{mod} – współczynnik modyfikujący wytrzymałości z uwagi na czas trwania obciążenia i wilgotność

Aby jednak nie zapomnieć o wyżej omówionych współczynnikach, w wielu źródłach ta ogólna formuła dotycząca ustalania wartości obliczeniowych podstawowych wytrzymałości przyjmuje postać (tu na przykładzie wytrzymałości na zginanie względem osi y):

$$f_{m,y,d} = \frac{k_{crit} k_{sys} k_h k_{mod} f_{m,y,k}}{\gamma_M} \quad \text{wzór 2}$$

Wróćmy więc do naszego przykładu z tablicy 14 i ustalmy wytrzymałość na zginanie dla elementu usztywnionego przed przemieszczeniami i obrotem, wykonanego z drewna klasy GL24h, o przekroju 18/40 cm, KU jak wyżej. Bez rozwiązań elementów pozwalających przyjąć założenia re-dystrybucji obciążeń ciągłych ($k_{sys} = 1,0$). Tak więc analizując wzór 2, otrzymujemy $k_{crit} = 1,0$, ponieważ mamy usztywniony element na podporach. Współczynnik k_h należy uwzględnić, ponieważ dla elementu z drewna klejonego wysokością odniesienia jest 600 mm, stąd

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\} = \left\{ \left(\frac{600}{400} \right)^{0,1}, 1,1 \right\}$$

stąd $k_h = 1,04$. Dla klasy GL24h $f_{m,g,k} = 24$ MPa, a współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_M = 1,25$.

Tablica 14. Wartości wytrzymałości $f_{m,y,d}$ w zależności od kombinacji obciążeń						
kombinacji obciążeń	uwzględnione obciążenia	k_{crit}	k_h	k_{mod}	γ_M	$f_{m,d}$ [MPa]
1	G	1,0	1,04	0,6	1,25	11,98
2	G + S			0,8		15,97
3	G + W			0,9		17,97
4	G + S + Q _i			1,1		21,96

4. Stany graniczne nośności

Rozdział 6 – stany graniczne nośności podzielono na zagadnienia obejmujące:

- obliczanie przekrojów pracujących w jednokierunkowym stanie naprężeń,
- obliczanie przekrojów pracujących w złożonym stanie naprężeń,
- stateczność elementów,
- obliczanie elementów o przekroju zmiennym lub elementów zakrzywionych,
- elementy podcięte,
- oraz omówiony już współczynnik wpływu rozwiązania konstrukcyjnego.

Zgodnie ze wstępnymi założeniami w tym opracowaniu omówione zostaną jedynie podstawowe zagadnienia.

4.1 Jednokierunkowe i złożone stany naprężeń

Rozdział 6.1 dotyczy elementów konstrukcyjnych o stałym przekroju, wykonanych z materiałów omówionych na wstępie, o kierunku włókien na ogół równoległym do osi podłużnej elementu. Zakłada się, że element jest poddany naprężeniom skiero-

wanym wyłącznie wzdłuż jednej ze swych osi głównych. W rozdziale 6.2 zakłada się, że element jest poddany naprężeniom wywołanym kombinacjami oddziaływań lub naprężeniom skierowanym wzdłuż dwóch lub trzech jego osi głównych.

Na początek dobrze jest oswoić się z indeksami, o których pisaliśmy powyżej (zwłaszcza dla elementów płytowych).

Norma rozpoczyna od rozciągania i ściskania wzdłuż włókien

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad \sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,0,d}}{A_{netto}}$$

$f_{t,0,d}$

wytrzymałość obliczeniowa na rozciąganie wzdłuż włókien (ustalona wg omówionych na wstępie właściwości charakterystycznych i współczynników)

$F_{t,0,d}$

wartość obliczeniowa oddziaływania działającego wzdłuż włókien

A_{netto}

przekrój netto (należy uwzględnić osłabienia dot. połączeń i łączników wg zasad omówionych przy połączeniach)

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad \sigma_{c,0,d} = \frac{F_{c,0,d}}{A_{netto}}$$

$f_{c,0,d}$

wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie wzdłuż włókien (ustalona wg omówionych na wstępie właściwości charakterystycznych i współczynników)

$F_{c,0,d}$

wartość obliczeniowa oddziaływania działającego wzdłuż włókien

A_{netto}

przekrój netto (należy uwzględnić osłabienia dot. połączeń i łączników wg zasad omówionych przy połączeniach)

postanowienia dotyczące niestateczności elementu omówione są w normie w p. 6.3

Rozciąganie i ściskanie w poprzek włókien

Praktycznie unikamy rozciągania w poprzek włókien, ponieważ poczynając od drewna litego poprzez materiały drewnopochodne zjawisko to jest niekorzystne dla konstrukcji z uwagi na bardzo małą wytrzymałość w tym kierunku (porównaj $f_{t,0,k}$ i $f_{t,90,k}$ dla drewna litego w tablicy 1)

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d}$$

$f_{c,90,d}$

wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie w poprzek włókien

$F_{c,90,d}$

wartość obliczeniowa oddziaływania działającego w poprzek włókien

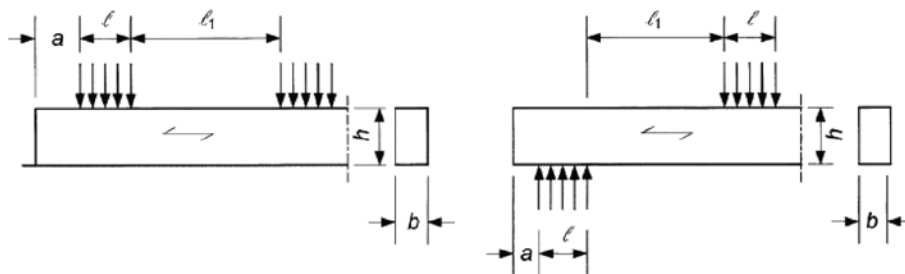
A_{ef}

efektywne pole docisku

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

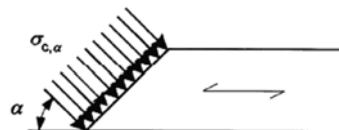
$k_{c,90}$

współczynnik uwzględniający rozkład obciążenia, możliwość powstania pęknięć oraz stopień odkształcenia przy ściskaniu, normowa wartość współczynnika uzależniona jest od rodzaju drewna i istotnych odległości wg rysunku



Ściskanie pod kątem do włókien

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$



Zginanie

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$\sigma_{m,y,d}$ i $\sigma_{m,z,d}$

obliczeniowe naprężenia zginające, określone względem głównych osi przekroju poprzecznego

$f_{m,y,d}$ i $f_{m,z,d}$

obliczeniowe wytrzymałości na zginanie odpowiadające naprężeniom

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

k_m

współczynnik redystrybucji naprężeń zginających w przekroju; w normie dla przekroju prostokątnego $k_m = 0,7$ dla C, GL i LVL (w literaturze istnieje jeszcze ograniczenie $h/b \leq 4$ oraz dla przekrojów kołowych 0,8), w pozostałych przypadkach przyjmuje wartość 1,0;

Ścinanie i bardziej złożone stany naprężeń przedstawimy w następnym artykule.

5. Stany graniczne użytkowości

Odształcenie konstrukcji, w następstwie oddziaływań (takich jak siły podłużne i poprzeczne, momenty zginające oraz poślizg w złączach) i wilgotności, nie powinno przekraczać odpowiednich wielkości granicznych wyznaczonych z uwagi na możliwość zniszczenia materiałów, z których wykonano sufit, stropy, przegrody wewnętrzne i warstwy wykończeniowe, oraz z uwagi na wymagania funkcjonalne i estetyczne. Zanim przypatrzymy się zagadnieniom odształceń w konstrukcjach drewnianych, warto uporządkować sobie ogólne założenia Eurokodów.

5.1. Pionowe i poziome odształcenia

Zgodnie z zapisem Eurokodu 0 (zał. A 1.4.3) zaleca się, aby pionowe i poziome odształcenia były obliczane zgodnie z odpowiednią normą materiałową, posługując się odpowiednią **kombinacją** oddziaływań zgodnie z wyrażeniami (6.14a) do (6.16b), z uwzględnieniem wymagań użytkowości podanych w 3.4(1). Zaleca się zwrócenie szczególnej uwagi na rozróżnienie odwracalnych i nieodwracalnych stanów granicznych⁴.

Dla SGU zaleca się przyjmowanie współczynników γ_m dla materiałów **równe 1,0**, z wyjątkiem przypadków kiedy w EN 1992 do EN 1999 postanowiono inaczej.

Kombinacje oddziaływań dla stanów granicznych użytkowości ustalają symbolicznie następujące wyrażenia:

a) *kombinacja charakterystyczna* (EC0 w.6.14a)

$$E_d = E \{G_{k,j}; P; Q_{k,i}; \psi_{0,i} Q_{k,i}\} j \geq 1, i \geq 1$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa efektów oddziaływań (analizowanych oddziaływań)

E – {...} oddziaływania

$G_{k,j}$ – wartość charakterystyczna oddziaływania stałego j

P – miarodajna wartość reprezentatywna oddziaływania sprężającego

$Q_{k,1}$ – wartość charakterystyczna dominującego oddziaływania zmiennego 1

$Q_{k,i}$ – wartość charakterystyczna towarzyszących oddziaływań zmiennych i

$\psi_{0,i}$ – współczynnik dla wartości kombinacyjnej oddziaływania zmiennego

⁴ **Nieodwracalne stany graniczne użytkowości** – stany graniczne użytkowości, w których pewne konsekwencje oddziaływań, przekraczające określone wymagania użytkowe, pozostają po usunięciu tych oddziaływań (EC0; 1.5.2.14.1); **odwracalne stany graniczne użytkowości** – stany graniczne użytkowości, w których nie pozostają żadne konsekwencje oddziaływań, przekraczające określone wymagania użytkowe, po ustąpieniu tych oddziaływań (EC0; 1.5.2.14.2);

Kombinacja charakterystyczna stosowana jest zwykle **dla nieodwracalnych stanów granicznych**.

b) *kombinacja częsta* (EC0 w.6.15a)

$$E_d = E \{G_{k,j}; P; \psi_{1,i} Q_{k,i}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} j \geq 1, i \geq 1$$

Kombinacja częsta stosowana jest zwykle **dla odwracalnych stanów granicznych**.

c) *kombinacja quasi-stała* (EC0 w.6.16a)

$$E_d = E \{G_{k,j}; P; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} j \geq 1, i \geq 1$$

Kombinacja quasi-stała stosowana jest zwykle **dla oceny efektów długotrwałych i wyglądu konstrukcji**

Czyli jeżeli rozważa się **wygląd konstrukcji** drewnianych, zaleca się zastosowanie kombinacji quasi-stałej i formuły:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Jeżeli rozważa się **komfort użytkowy** lub **sprawność działania maszyn**, zaleca się uwzględnienie przy sprawdzaniu efektów odpowiednich oddziaływań **zmiennych**.

Zestawiając te formuły należy zwrócić uwagę na współczynniki „jednoczesności” obciążeń stojące przy oddziaływaniach zmiennych.

Tablica 15. Zasady kombinacji obciążeń dla SGU				
KOMBINACJA	kiedy? – zwykle dla ...	oddziaływanie stałe	zmiennie wiodące	zmiennie pozostające
charakterystyczna	nieodwracalnych SGU	$\sum G_{k,j}$	$Q_{k,1}$	$\sum \psi_{0,i} Q_{k,i}$
częsta	odwracalnych SGU	$\sum G_{k,j}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$
quazi – stała	oceny efektów długotrwałych i wyglądu konstrukcji	$\sum G_{k,j}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$

Zalecane wartości współczynników ψ dla budynków należy pozyskiwać z tablicy A 1.1 EC0. Przykładowe wartości dla trzech pierwszych typów powierzchni pokazano w tablicy 16.

Przemieszczenia chwilowe u_{inst} (w_{inst} – w obecnej wersji normy EC5 istnieje niezgodność oznaczeń patrz Rysunek 7.1 EC5 – tu ilustracja 7) należy obliczać na podstawie **kombinacji oddziały-**

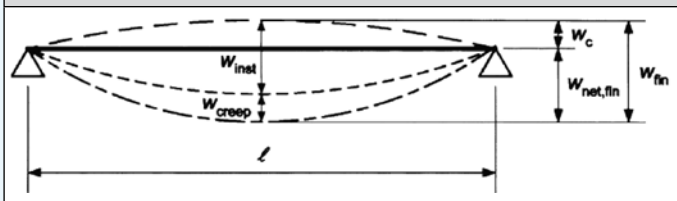
wań charakterystycznych (patrz EN 1990, 6.5,3(2) a)), stosując wartości średnie odpowiednich modułów sprężystości, odkształcenia postaciowego oraz modułów podatności.

Przemieszczenia końcowe u_{fin} (w_{fin} – patrz Rysunek 7.1) należy obliczać na podstawie **kombinacji oddziaływań quasi-stałych** (zasady opisane powyżej).

Tablica 16. Zalecane wartości współczynników ψ dla budynków (fragment wg EC0 tablica A 1.1)

Oddziaływania	ψ_0	ψ_1	ψ_2
obciążenia zmienne w budynkach, kategoria (patrz EN 1991-1-1)			
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrania	0,7	0,7	0,6
... pozostałe patrz EC0 tablica A 1.1			

Ilustracja 7. Składowe ugięcia (EC5 rys. 7.1)



Jednak w przypadku konstrukcji złożonych z elementów, składników i złączy o **jednakowym przebiegu pełzania** i przy założeniu liniowej zależności między oddziaływaniami i odpowiednimi przemieszczeniami, przemieszczenie końcowe w_{fin} **można obliczyć w sposób uproszczony** (sposób ten objęty jest wzorami 2.2-2.5 EC5). Ugięcie finalne od kombinacji różnych oddziaływań należy rozpatrywać jako sumę oddzielnie określonych ugięć dla każdego z oddziaływań (w. 2.2 EC5).

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q_1} + u_{fin,Q_i}$$

gdzie:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} (1 + k_{def})$$

w przypadku oddziaływania stałego, G

$$u_{fin,Q_1} = u_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def})$$

w przypadku oddziaływania zmiennego, Q_i (pierwszego istotnego oddziaływania zmiennego)

$$u_{fin,Q_i} = u_{inst,Q_i} (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def})$$

w przypadku oddziaływania zmiennych, Q_i dla $i > 1$ (kolejne rozpatrywane oddziaływania zmienne).

Jeżeli stosuje się powyższe wzory, należy pominąć współczynniki ψ_2 występujące we wzorach EC0.

Z klasycznej teorii belek wynika, że doraźne ugięcia sprężyste ($w_{inst,0}$) obliczane są jako suma wpływu sił zginających ($w_{inst,M}$), ścinających ($w_{inst,V}$) i osiowych ($w_{inst,N}$) za pomocą tzw. całki Mohra. W przypadku konstrukcji drewnianych nie można pominąć drugiego składnika równania (z powodu bardzo małej relacji G/E ok. 1/16). Dlatego też w załączniku krajowym (NA.8.3) zachowano pomocne formuły analizy ugięć belek swobodnie podpartych tu dla belek od obciążeń równomiernie rozłożonych. Jeżeli nie prowadzi się dokładnych obliczeń, dla belek o stosunku $l/h \geq 20$ doraźne ugięcia można wyznaczyć ze wzoru:

$$u_{inst} = u_M = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E_{0,mean} I}$$

a jeżeli stosunek $l/h < 20$ dochodzi człon uwzględniający wpływ siły ścinającej i formuła przyjmuje postać:

$$u_{inst} = u_M + u_V = u_M \left[1 + 19,2 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E_{0,mean} I} \left[1 + 19,2 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]$$

Naturalnie dla belki obciążonej siłą skupioną w środku rozpiętości można przyjąć formułę:

$$u_{inst} = u_M = \frac{1}{48} \frac{Pl^3}{E_{0,mean} I}$$

Graniczne wartości – ugięć

Zalecane zakresy granicznych ugięć belek o rozpiętości l podano w Tablicy 7.2 EC0 (tablica 17), w zależności od akceptowanej wielkości odkształcenia. Informacje dotyczące krajowych wielkości ugięć zostały zamieszczone w załączniku krajowym NA.3.

Tablica 17. Przykładowe graniczne wartości ugięć belek (wg EC5 tablica 7.2)

	w_{inst}	$w_{inst,lim}$	w_{lim}
Belka na dwóch podporach	od $\ell/300$ do $\ell/500$	od $\ell/250$ do $\ell/350$	od $\ell/150$ do $\ell/300$
Wspornik	od $\ell/150$ do $\ell/250$	od $\ell/125$ do $\ell/175$	od $\ell/75$ do $\ell/150$

Wartości graniczne ugięć belek w postaci przykładów podanych w Tablicy 7.2 zostają uzupełnione wartościami granicznymi ugięć elementów konstrukcji drewnianych w_{lim} w sposób następujący:

- dźwigany kratowe $1/500$ (obliczenia przybliżone) i $1/300$ (obliczenia dokładne)
- belki stropowe $1/250$ lub $1/300$ (ostatnia wartość dotyczy stropów wrażliwych na ugięcie, np. sufity z płyt GK)
- płyty dachowe $1/150$
- elementy belkowe więźb dachowych $1/200$
- wsporniki $1/150$

z jednoczesnym dopuszczalnym ich zwiększeniem o 50% przy obliczeniach elementów obiektów stałych, remontowanych.

Ugięcia w dwóch kierunkach

To co może umknąć początkującemu konstruktorowi, to uwzględnienie wypadkowego ugięcia dla elementów pracujących w dwóch kierunkach.

5.2. Drgania

Analiza drgań konstrukcji drewnianych to nowość w ujęciu normowym. Zgodnie z obecną wersją normy należy upewnić się, że racjonalnie przewidywalne oddziaływanie na dany element lub konstrukcję nie generują drgań, które mogą wpływać na stan konstrukcji lub powodować niedopuszczalne niedogodności dla jej użytkowników.

W stanach granicznych użytkowalności odnoszących się do drgań należy stosować **średnie** wartości odpowiednich modułów sprężystości. (EC5 2.2.3(6))

Należy **oszacować** – obliczeniowo lub za pomocą pomiarów – poziom drgań, uwzględniając przewidywaną sztywność elementu lub konstrukcji, jak również modalny współczynnik tłumienia.

W przypadku stropów, jeżeli nie wykazano, że inne wartości są odpowiedniejsze, należy przyjąć **modalny współczynnik tłumienia** $\zeta = 0,01$ (tzn. 1%).

Dla stropów w budynkach **mieszkalnych**, w celu uniknięcia nieprzyjemnych wrażeń drgań, zaleca się (w literaturze obcej) w sytuacjach kombinacji charakterystycznej i quasi-stałej spełnienie następującego warunku:

$$w_{inst,G} + \psi_{2winst} Q \leq 6 \text{ [mm]}$$

Jednak dla stropów o przeznaczeniu na sale taneczne lub w obiektach sportowych itp. zaleca się szczegółową analizę wg EC5.

5.3. Poślizg w złączach

Poślizg jest bardzo istotnym zagadnieniem SGU, jednak z uwagi na występowanie tego zagadnienia wraz z łącznikami zostanie omówiony przy okazji analizowania połączeń.

6. Przykłady

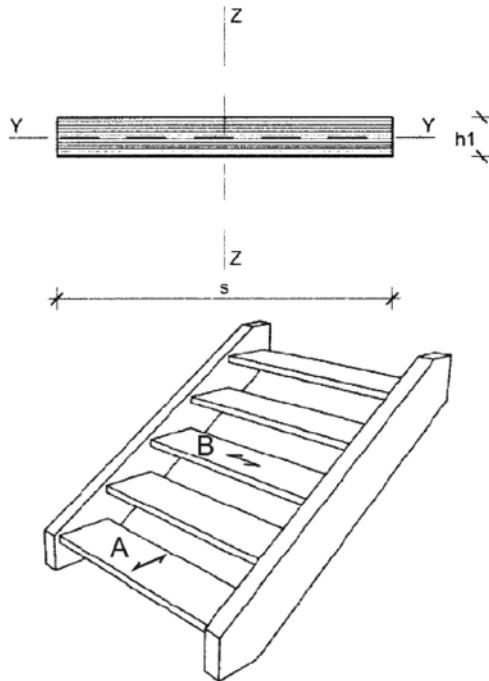
Ponieważ u podstaw tej części opracowania leży przekazanie ogólnych zasad EC5, przykłady obejmują ilustracje przyjmowania właściwości i współczynników oraz mają za zadanie oswojenie z tak zróżnicowanym materiałem, jakim jest drewno (w postaci litej i materiałów drewnopochodnych).

Pozostałe zagadnienia, takie jak złożone ustroje, połączenia i łączniki (tu też nowinka w postaci efektu blokowego) oraz konstrukcje dużych rozpiętości omówimy w kolejnych numerach.

6.1. Element ze sklejki

Na początek prosty przykład pokazujący **dobór właściwości elementów płytowych i współczynnika k_{mod}** . Chcemy wykonać stopień schodów ze sklejki, np. schody wsuwane o geometrii wg rysunku 8. Na początek zakładamy sklejkę bukową grubości „h1” mm. Dane dotyczące parametrów wytrzymałościowych będziemy pobierać z tablicy 6 naszego opracowania. Do analizy, oprócz geometrii, istotne jest założenie, jak owa sklejka będzie montowana w naszej konstrukcji – płyta o włóknach równoległych do podpór (wariant A) czy ukierunkowanych prostopadle (wariant B). Dla takiego elementu obciążenia, jakie mogą wystąpić w konstrukcji, są proste: G – ciężar własny konstrukcji, q_1 – obciążenie użytkowe równomiernie rozłożone zgodnie z EC1 tablica 6.2 oraz Q_1 – siła skupiona wg tego samego źródła. Niestety, obecne wartości normowe są na dość wysokim poziomie w porównaniu z poprzednimi normami obciążeniowymi PN-B-20xx.

Ilustracja 8. Przekrój poprzeczny stopnia i zróżnicowane układy płyt w stopniu A – włókna ułożone równoległe do podpór; B – włókna ułożone prostopadle do podpór



Tablica 18. Wartości oddziaływań wg EC1-1-1 tab.6.2 – fragment

Kategorie obciążonych powierzchni	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Kategoria A		
– Stropy	od 1,5 do 2,0	od 2,0 do 3,0
– Schody	od 2,0 do 4,0	od 2,0 do 4,0
– Balkony	od 2,5 do 4,0	od 2,0 do 3,0

Zakładając więc minimalne wartości normowe $q_1 = 2 \text{ kN/m}^2$, Q_1 [kN], gęstość sklejki bukowej przyjmujemy za tablicą starej normy (PN-B-03150:2000 tablica Z.2.4.2) na poziomie 480 kg/m^3 . Naturalnie w naszym zadaniu to drugorzędny problem, ale sklejka może charakteryzować się gęstością do 7 kN/m^3 . Na początek przyjęto grubość płyty $h_1 = 28 \text{ mm}$, a szerokość stopnia $s = 30 \text{ cm}$.

Zestawienie obciążeń na stopień			
Rodzaj obciążenia	X_k	γ_m	X_d
1. Stałe			
1.1. Ciężar własny G	0,04 [kN/mb]	1,35	0,054 [kN/mb]
$4,8 \text{ [kN/m}^2] \times 0,028 \text{ [m]} \times 0,3 \text{ [m]}$			
2. Zmienne			
2.1. Obciążenie krótkotrwałe q_1	0,600 [kN/mb]	1,5	0,900 [kN/mb]
$2,0 \text{ [kN/m}^2] \times 0,3 \text{ [m]}$			
2.2 Obciążenie chwilowe Q_1	2,0 [kN]	1,5	3 [kN]
2,0 [kN]			

SGN dla stopnia

$$E_d \leq R_d \quad (\text{EC0 w.6.8})$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa efektu oddziaływań, takiego jak siła wewnętrzna, moment lub wektor, reprezentującego kilka sił wewnętrznych lub momentów;

R_d – wartość obliczeniowa odpowiedniej nośności.

Analiza tak prostego elementu wymaga sprawdzenia jedynie (zgodnie z normą EC5) formuł

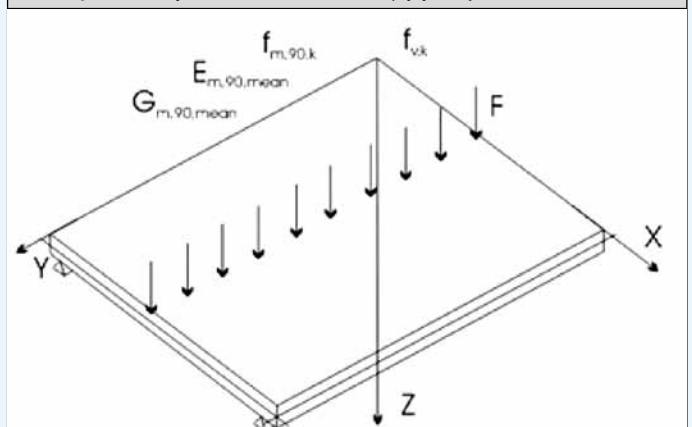
$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (\text{EC51.1 w. 6.11})$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (\text{EC51.1 w. 6.12})$$

co dla tego przykładu sprowadza się do porównania $\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,y,d}$

Dla sklejki zgodnie z ilustracją 9 poszukujemy $f_{m,90,d}$

Ilustracja 9. Zasady doboru właściwości dla płyty sklejki



Wartość obliczeniową uzyskamy podstawiając do ogólnej formuły

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (\text{EC5.1-1 w. 2.14})$$

gdzie:

X_k – wartość charakterystyczna właściwości wytrzymałościowej tu $f_{m,y,90,k}$

γ_M – częściowy współczynnik bezpieczeństwa właściwości materiału

k_{mod} – współczynnik modyfikujący wytrzymałości z uwagi na czas trwania obciążenia i wilgotność

Z uwagi na fakt, że do sklejki nie stosujemy innych współczynników jak w formule ogólnej, uzyskujemy najprostsza postać

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M}$$

gdzie:

- $f_{m,y,90,k}$ – wytrzymałość charakterystyczna na zginanie prostopadle do płaszczyzny płyty
- $f_{m,y,90,d}$ – wytrzymałość obliczeniowa na zginanie prostopadle do płaszczyzny płyty

Dla przyjętej w rozwiązaniu sklejki otrzymujemy

dla wariantu A

(sklejka pracuje poprzecznie do włókien – podczas zginania chcemy włókna od siebie oderwać)

$f_{m,y,90,k} = 39 \text{ MPa}$ (dla sklejki bukowej produkcji krajowej PN-B-03150:2000 tablica Z.2.4.2; tu wyciąg – tab. 8)

dla wariantu B

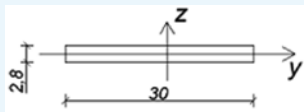
(sklejka pracuje wzdłuż włókien – podczas zginania ciągniemy włókna po długości)

$f_{m,y,90,k} = 41 \text{ MPa}$ (dla sklejki bukowej produkcji krajowej PN-B-03150:2000 tablica Z.2.4.2; tu wyciąg – tab. 8)

Naturalnie im sklejka cieńsza, tym te rozbieżności są większe (patrz tablica 8 naszego opracowania).

dla wariantu A, kombinacja 1 – tylko G_d

wskaźnik wytrzymałości względem osi y



$$W_y = \frac{s h_1^2}{6} = \frac{30 \text{ cm} (2,8 \text{ cm})^2}{6} = 39,2 \text{ cm}^3$$

moment względem osi y

$$M_y = \frac{G_d l^2}{8} = \frac{0,054 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (1,02 \text{ m})^2}{8} = 0,007 \text{ kNm}$$

naprężenia względem osi y

$$\sigma_{m,y,90,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{0,007 \text{ kNm}}{39,2 \text{ cm}^3} = 0,18 \text{ MPa}$$

Ponieważ w tej kombinacji mamy tylko jedno oddziaływanie nie ma wątpliwości jaki przyjąć współczynnik k_{mod} zakładając 1 klasę użytkowania

$k_{mod} = 0,6$ (wg EC5.1-1 tab. 3.1, w opracowaniu tab. 13)

$\gamma_M = 1,2$ (wg EC5.1-1 tab. 2.3, tu tab. 16)

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{39 \text{ MPa}}{1,2} = 19,5 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,y,90,d} = 0,18 \ll f_{m,y,90,d} = 19,5 \text{ MPa}$ warunek spełniony

Naturalnie było to do przewidzenia, jednak dla porządku stosowania zasad kombinacji obciążeń wykonano tę czynność. Procentowe wykorzystanie niecały 1%.

kombinacja 1 dla wariantu B – tylko G_d

analogicznie

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 0,6 \cdot \frac{41 \text{ MPa}}{1,2} = 20,5 \text{ MPa}$$

$\sigma_{m,y,90,d} = 0,18 \ll f_{m,y,90,d} = 20,5 \text{ MPa}$ warunek spełniony

kombinacja 2: dla wariantu A: $G_d + q_{d1}$

moment względem osi y

$$M_y = \frac{(G_d + q_{d1}) l^2}{8} = \frac{0,954 \frac{\text{kN}}{\text{m}} (1,02 \text{ m})^2}{8} = 0,124 \text{ kNm}$$

naprężenia względem osi y

$$\sigma_{m,y,90,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{0,124 \text{ kNm}}{39,2 \text{ cm}^3} = 3,16 \text{ MPa}$$

tu zgodnie EC5.1-1 p.3.1.3(2) o wartości współczynnika zadecyduje najkrótsze oddziaływanie. Pozostaje jedynie w tym zadaniu zadać sobie pytanie, czy traktować to obciążenie jak użytkowe (średniotrwałe), czy jako krótkotrwałe lub nawet chwilowe. Tu pomocne powinny być podane w tab. 2.1 EC5.1-1 orientacyjne czasy oddziaływania. Naturalnie rząd wielkości, jaki występuje w naszym przykładzie nie zdeterminuje krytycz-

nego warunku, dlatego przyjmijmy to oddziaływanie jako „chwilowe”, stąd $k_{mod} = 1,1$ (wg EC5.1-1 tab. 3.1, w opracowaniu tab. 13). Ale często to jest istotny problem projektowania konstrukcji z drewna i materiałów drewnopochodnych. Nie zawsze kombinacja jest pod względem czasu trwania obciążenia klarowna.

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{39 MPa}{1,2} = 35,75 MPa$$

$$\sigma_{m,y,90,d} = 3,16 \ll f_{m,y,90,d} = 35,75 MPa \text{ warunek spełniony}$$

kom kombinacja 2: dla wariantu B: $G_d + Q_{d1}$

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{41 MPa}{1,2} = 37,58 MPa$$

$$\sigma_{m,y,90,d} = 3,16 \ll f_{m,y,90,d} = 37,58 MPa \text{ warunek spełniony}$$

Pozostaje nam jeszcze dla porządku spojrzenie na „człowieka z narzędziami”.

kom kombinacja 3: dla wariantu A: $G_d + Q_{d1}$

moment względem osi y

$$M_y = \frac{G_d l^2}{8} + \frac{Q_{d1} l}{4} = \frac{0,054 \frac{kN}{m} (1,02 m)^2}{8} + \frac{3 kN \cdot 1,02}{4} = 0,772 kNm$$

naprężenia względem osi y

$$\sigma_{m,y,90,d} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{0,772 kNm}{39,2 cm^3} = 19,69 MPa$$

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{39 MPa}{1,2} = 35,75 MPa$$

$$\sigma_{m,y,90,d} = 19,69 < f_{m,y,90,d} = 35,75 MPa \text{ warunek spełniony}$$

kom kombinacja 3: dla wariantu B: $G_d + Q_{d1}$

$$f_{m,y,90,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,90,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{41 MPa}{1,2} = 37,58 MPa$$

$$\sigma_{m,y,90,d} = 19,69 < f_{m,y,90,d} = 37,58 MPa \text{ warunek spełniony}$$

SGU dla stopnia

$$E_d \leq C_d \quad (EC0 \text{ w.6.13})$$

gdzie:

C_d – graniczna wartość obliczeniowa odpowiedniego kryterium użytkowalności,

E_d – wartość obliczeniowa efektów oddziaływań w jednostkach kryterium użytkowalności, wyznaczona dla odpowiedniej kombinacji oddziaływań.

Niech nikogo nie zmylą indeksy „d” i sformułowanie „wartość obliczeniowa”. Nadal SGU sprawdzamy na wartościach charakterystycznych, co wynika z zapisów kolejnych wzorów, np. dla kombinacji charakterystycznej (EC0 w.6.14a) $E_d = E \{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i}\} j \geq 1, i \geq 1$

Co do danych materiałowych przy sprawdzaniu SGU mamy analogiczny problem. Tu zmienny jest średni moduł sprężystości przy zginaniu prostopadłym do płaszczyzny płyty. Interpretacja jest analogiczna: dla wariantu A średni moduł sprężystości przyjmuje wartość 3 GPa, dla wariantu B 7 GPa.

dla wariantu A

$E_{m,90,mean,k} = 3 GPa$ (dla sklejki bukowej produkcji krajowej PN-B-03150:2000 tablica Z.2.4.2; tu ciąg powyżej)

Ilustracja 19. Moduł sprężystości dla sklejki fragment wg PN-03150:200 Z.2.4.2

Rodzaje właściwości	Oznaczenia	Liczba fornirów (warstw)				
		≤ 7	9	11	13	15
		Grubość sklejki, w mm				
		8-10	12	15	18	≥ 20
Sprężystość, w kN/mm ² (GPa)						
Średni moduł sprężystości przy zginaniu prostopadłym do płaszczyzny płyty	$E_{m,90,mean}$	7 3	7 3	7 3	7 3	7 3

dla wariantu B

$E_{m,90,mean,k} = 7 \text{ GPa}$ (dla sklejki bukowej produkcji krajowej PN-B-03150:2000 tablica Z.2.4.2; tu ciąg powyżej)

Ponieważ omawiane obciążenia użytkowe nie mogą wystąpić równocześnie pozostaje sprawdzić najniekorzystniejszą kombinację. Wiemy już która kombinacja daje najniekorzystniejszy wariant, więc decyzja jest prosta

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q_1}$$

gdzie:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} (1 + k_{def})$$

w przypadku oddziaływania stałego, G

$$u_{fin,Q_1} = u_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def})$$

w przypadku oddziaływania zmiennego, Q_1 (pierwszego istotnego oddziaływania zmiennego)

$k_{def} = 0,8$ (wg EC5.1-1 tablica 3.2)

współczynnik $\psi_{2,1} = 0,3$ (wg EC0 tablica A 1.1)

Ponieważ $l/h_1 = 1,02 \text{ m} / 0,028 \text{ m} = 36 > 20$, dla obciążenia ciężarem stałym mamy zależność jak dla obciążenia równomiernie rozłożonego (EC5.1-1 w.NA.1), pozostaje uwzględnić dominujący wpływ momentu w całości Mohra.

dla wariantu A

ugięcie doraźne

$$u_{inst,G} = u_M = \frac{5}{384} \frac{G_k l^4}{E_{m,90,mean} I_y} = \frac{5}{384} \frac{0,04 \frac{kN}{m} \cdot (1,02m)^4}{3 \text{ GPa} \cdot 54,88 \text{ cm}^4} = 0,35 \text{ mm}$$

gdzie

$$I_y = \frac{s \cdot h_1^3}{12} = \frac{30 \text{ cm} \cdot (2,8 \text{ cm})^3}{12} = 54,88 \text{ cm}^4$$

ugięcie końcowe

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} (1 + k_{def}) = 0,35(1 + 0,8) = 0,62 \text{ mm}$$

odpowiednio dla siły skupionej

$$u_{inst,Q_1} = u_M = \frac{1}{48} \frac{Q_1 k l^3}{E_{m,90,mean} I_y} = \frac{1}{48} \frac{2 \text{ kN} \cdot (1,02m)^3}{3 \text{ GPa} \cdot 54,88 \text{ cm}^4} = 2,68 \text{ cm}$$

$$u_{fin,Q_1} = u_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 2,68 \text{ cm} (1 + 0,3 \cdot 0,8) = 2,68 \text{ cm} \cdot 1,24 = 3,32 \text{ cm}$$

co przekracza wartość dopuszczalną
Wartość graniczna wynosi

$$u_{dop} = 1/150 = 102 \text{ cm} / 150 = 0,68 \text{ cm}$$

dla wariantu B

$$u_{inst,G} = u_M = \frac{5}{384} \frac{G_k l^4}{E_{m,90,mean} I_y} = \frac{5}{384} \frac{0,04 \frac{kN}{m} \cdot (1,02m)^4}{7 \text{ GPa} \cdot 54,88 \text{ cm}^4} = 0,15 \text{ mm}$$

ugięcie końcowe

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} (1 + k_{def}) = 0,15(1 + 0,8) = 0,27 \text{ mm}$$

dla siły skupionej

$$u_{inst,Q_1} = u_M = \frac{1}{48} \frac{Q_1 k l^3}{E_{m,90,mean} I_y} = \frac{1}{48} \frac{2 \text{ kN} \cdot (1,02m)^3}{7 \text{ GPa} \cdot 54,88 \text{ cm}^4} = 1,15 \text{ cm} > u_{dop}$$

jak widać sama zmiana kierunku włókien nie wystarczy, należałoby przy tych założeniach dla obciążenia zmienić grubość elementu.

SGU jest newralgicznym kryterium wymiarowania konstrukcji drewnianych i bardzo często decyduje o wymiarowaniu konstrukcji.

Literatura:

[1] http://www.dataholz.com/Public/Baustoffe/Datenblaetter/en/swp_en.pdf

Dorota Kram