

**Česká Zemědělská Univerzita**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Porovnání dvou metod dimenzování dřevěných panelů  
určených k nosným konstrukčním účelům (CLT)**

Bakalářská práce

Autor: Ondřej Fiedler

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Horáček

2021

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Fiedler

Dřevařství  
Dřevařství

Název práce

**Porovnání dvou metod dimenzování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT)**

Název anglicky

**Design of load-bearing structural wooden panels (CLT) – comparison of two methods**

### Cíle práce

Cílem práce je porovnat dvě nezávislé metody navrhování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT). První metoda bude vycházet z Eurokódu 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Druhá metoda bude založena (1) na matematické teorii pružnosti momentového a osového namáhání desek a (2) na mechanice vrstvených desek. Pro obě metody bude vytvořen výpočetní postup (a) odpovídající Eurokódu 5 a (b) umožňující dimenzovat dřevěné panely numerickou metodou, např. metodou konečných prvků.

Obě metody budou použity pro dimenzování stejné geometrie dřevěného lepeného masivního panelu vyráběného z lamel křížově skládaných do vrstev (CLT) při různých zátěžových stavech (stálá, užitková a nahodilá zatížená) a daných okrajových podmínkách (vetknutí a podepření). Porovnání metod bude založeno na (a) vyhodnocení výsledků dimenzování panelu, (b) porovnání postupů výpočtu z pohledu jejich obecnosti a (c) možností použití metod v praxi.

### Metodika

1. Vyberte příklad komerčně vyráběného CLT panelu, pro který provedete výpočet podle cílů práce.
2. Sestavte výpočetní model podle Eurokódu 5 (resp. příbuzných norem).
3. Sestavte výpočetní model podle matematické teorie pružnosti a mechaniky vrstvených desek.
4. Definujte zátěžové stavy a okrajové podmínky, které použijete u obou výpočetních metod.
5. Vypočítejte pro zvolený CLT panel mezní stavy únosnosti podle Eurokódu 5 a stanovte podmínky únosnosti.
6. Vypočítejte napětí vznikající v CLT panelu podle matematické teorie pružnosti a tato srovnajte s návrhovými pevnostmi dřeva.
7. Výsledky obou metod navzájem porovnejte a vyhodnoťte.

**Doporučený rozsah práce**

100 str.

**Klíčová slova**

masivní dřevěný panel, dřevostavba, mechanická stabilita, dimenzování, Eurokód 5, matematická teorie pružnosti

---

**Doporučené zdroje informací**

BODIG, J. – JAYNE, B A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. ISBN 0-89464-777-6.

BORGSTROM, E. Design of timber structures. Volume 1-3, 2016. SWEDISH WOOD. ISBN 978-91-980304 EN 1995-1. Eurocode 5: Design of timber structures. CEN Brussels 2004.

KOLB, J. – KOŽELOUH, B. *Dřevostavby : systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4071-3.

NETTLES, A.T. Basic Mechanics of Laminated Composites Plates. MSFC, Alabama: NASA, 1994. NASA Ref. Pub. 1351.

POŽGAJ, A. *Návka o dreve. : Metódy zistovania mechanických vlastností dreva a drevných veľkoplošných kompozitných materiálov*. ZVOLEN: VŠLD, 1987.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FLD

**Vedoucí práce**

prof. Dr. Ing. Petr Horáček

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

Ing. Michal Bošanský, Ph.D.

V Praze dne 24. 03. 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Porovnání dvou metod dimenzování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT)“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Petra Horáčka a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze, dne .....

Podpis:

*Poděkování:*

*Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Petrovi Horáčkovi za jeho vstřícný přístup, odborné vedení, rady a připomínky, které velkou měrou napomohly vzniku této bakalářské práce. Mé poděkování patří též Ing. Michalovi Bošanskému a Bc. Václavovi Valáškovvi za rady a konzultace, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.*

*Poděkování patří také mé rodině, přítelkyni a přátelům za jejich vytrvalou podporu a pomoc při mém studiu.*

ONDŘEJ FIEDLER

**Porovnání dvou metod dimenzování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT)**

Design of load-bearing structural wooden panels (CLT) – comparison of two methods

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou nezávislých metod dimenzování – metodou navrhování podle Eurokódu a metodou Matematické teorie pružnosti a laminární teorie. Na základě těchto metod, byl vytvořen výpočetní model pro posouzení únosnosti CLT panelu odpovídající geometrii a zátěžovým stavům uvedených v technické dokumentaci Novatop Solid. Porovnání bylo provedeno na základě výsledků a výstupů, které tyto metody nabízejí.

Klíčová slova: masivní dřevěný panel, dřevostavba, mechanická stabilita, dimenzování, Eurokód 5, matematická teorie pružnosti

Abstract:

The bachelor thesis deals with the comparison of two independent design methods – the design method according to the Eurocode and according to mathematical theory of elasticity and classical lamination theory. Based on these methods, a computational model was created for load assessment check of the CLT that is based on geometry and load conditions specified in the Novatop Solid technical documentation. The comparison was demonstrated based on the results and outputs that these methods offer.

Keywords: solid wood panel, timber structure, mechanical stability, design, Eurocode 5, mathematical theory of elasticity

## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Cíl práce.....	9
3	Literární přehled .....	10
3.1	Dřevěné konstrukce .....	10
3.1.1	Konstrukční systémy dřevostaveb .....	10
3.1.2	Navrhování podle Eurokódu 5.....	16
3.2	Navrhování dřevěných konstrukcí.....	17
3.2.1	Základní požadavky EC5 .....	17
3.2.2	Mezní stav únosnosti (ULS) .....	18
3.2.3	Mezní stav použitelnosti (SLS).....	18
3.2.4	Třídy trvání zatížení.....	19
3.2.5	Třídy provozu .....	19
3.2.6	Kombinace zatížení .....	20
3.2.7	Další modifikační faktory.....	21
3.2.8	Materiálové vlastnosti pro standardizované dřevěné produkty.....	22
3.2.9	Mezní stavy únosnosti konstrukčního dřeva.....	23
3.2.10	Základní zátěžové modely nosníku .....	30
3.3	Navrhování podle matematické teorie pružnosti .....	31
3.3.1	Anizotropie mechanických vlastností dřeva .....	31
3.3.2	Mechanické namáhání .....	31
3.3.3	Základní deformace.....	33
3.3.4	Deformace v prostoru .....	35
3.3.5	Pružnost .....	39
3.3.6	Mechanika anizotropních a ortotropních materiálů.....	41
3.3.7	Transformace napětí a deformací.....	48
3.3.8	Ohyb.....	50
3.3.9	Okrajové podmínky .....	55
3.3.10	Laminární teorie .....	56
3.3.11	Pružná nestabilita.....	62
4	Metodika .....	64
4.1	Vícevrstvá masivní deska Novatop Solid .....	64
4.2	Okrajové podmínky / Zátěžové stavy.....	64
4.3	Navrhování podle Eurokódu 5 .....	65
4.3.1	Výpočet .....	65
4.3.2	Příklad výpočtu podle EC5.....	67
4.4	Navrhování podle matematické teorie pružnosti .....	68

4.4.1	Výpočet .....	68
4.4.2	Struktura skriptu .....	69
4.5	Srovnání výsledků navrhování dle Eurokódu 5 a matematické teorie pružnosti 72	
5	Výsledky.....	73
5.1	Osově zatížení <b>Nd</b> .....	73
5.2	Únosnost panelu NOVATOP SOLID dle EC5.....	74
5.2.1	Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm.....	74
5.2.2	Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm.....	76
5.2.3	Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm.....	78
5.3	Únosnost panelu NOVATO SOLID dle MaTeP .....	80
5.3.1	Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm.....	81
5.3.2	Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm.....	99
5.3.3	Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm.....	114
5.4	Srovnání výsledků navrhování dle Eurokódu 5 a matematické teorie pružnosti 129	
5.4.1	Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm.....	129
5.4.2	Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm.....	131
5.4.3	Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm.....	133
6	Diskuse .....	135
6.1	Navrhování podle Eurokódu 5 .....	135
6.2	Navrhování podle MaTeP.....	136
6.3	Srovnání postupů, návrh na použití výsledků v praxi.....	137
6.4	Návrh na úpravu řešení.....	138
7	Závěr.....	139
7.1	Sestavení výpočetního modelu .....	139
7.2	Geometrie panelu a zátěžové stavy .....	139
7.3	Panely s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách.....	140
7.4	Panely s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách.....	141
7.5	Návrh na úpravu a použití výsledků v praxi .....	143
8	Použitá Literatura .....	144
9	Přílohy.....	146
9.1	Příloha 1 – Technické dokumentace Novatop SOLID (vybrané kapitoly).....	146
9.2	Příloha 2 – Výpočetní skript FlexPDE (2400 mm – 84Q) .....	148



## Seznam obrázků a tabulek

### Seznam obrázků

Obrázek 1 - Cross-laminated timber NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	12
Obrázek 2 - Standardní tloušťky NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	12
Obrázek 3 - Standardní formáty NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	13
Obrázek 4 - zatížení a uložení panelu Novatop SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	14
Obrázek 5 - orientace vláken v povrchových vrstvách (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	15
Obrázek 6 - Propojení norem Eurokódu (Swedish Wood, 2016).....	16
Obrázek 7 - Požadavky a terminologie používaná u navrhování konstrukcí (SWEDISH WOOD CHAP1).....	18
Obrázek 8 - Tlak šikmo na vlákna (Eurokód 5, EN 1995) .....	25
Obrázek 9 - zatížení vně a příčně ke směru stěny při vertikálním směru povrchové vrstvy – okrajovou podmínkou je jeden pevný a jeden posuvný kloub (Technická dokumentace Novatop Solid, [online]).....	28
Obrázek 10 - zátěžový stav nosníku - "vzpěr" .....	31
Obrázek 11.: Orientace složek napětí v kostce dřeva dle pravoúhlého souřadného systému (Požgaj et. al., 1997) .....	32
Obrázek 12 - Změna tvaru tělesa při tahu (Požgaj et. al., 1997).....	34
Obrázek 13 - Deformace tělesa navozené smykovým napětím. (Požgaj et. al., 1997).....	34
Obrázek 14 - Deformace tělesa normálovými a tangenciálními silami ve dvourozměrném prostoru (radiální rovina) (Požgaj et. al., 1997) .....	35
Obrázek 15 - Posunutí (Požgaj et. al., 1997).....	36
Obrázek 16 - Celkové posunutí v rovině (Nettles, 1994.).....	37
Obrázek 17 – Zakřivení desky po ose x (Nettles, 1994) .....	38
Obrázek 18 – Zakřivení desky po ose y (Nettles, 1994) .....	38
Obrázek 19 - závislost deformace a napětí (Požgaj et. al., 1997).....	39
Obrázek 20 - Závislost pružné deformace, deformace pružné v čase a plastické deformace od od napětí (Požgaj et. al., 1997).....	41
Obrázek 21 - mechanické chování izotropního a anizotropního materiálu (Vrbka 2008).....	42
Obrázek 22 - Rozdíl mezi izotropním a ortotropním materiálem (Nettles, 1994) .....	43
Obrázek 23 - hlavní ortotropní souřadnicový systém (Nettles, 1994).....	45
Obrázek 24 - Obecně ortotropní těleso (Nettles, 1994) .....	45
Obrázek 25 - Zatížení elementu obecného ortotropního materiálu v hlavních ortotropních směrech .....	46
Obrázek 26 - čistý ohyb dřeva (nedeformovaný nosník a), deformovaný nosník b, c) (Požgaj et. al., 1997) .....	51
Obrázek 27 - Ohyb nosníku (Vybíral, [online]).....	51
Obrázek 28 - ohybová čára nosníku (Šmirák, 2000).....	52
Obrázek 29 - Deska – předpoklad o normálech (Brožovský, 2012) .....	54
Obrázek 30 - Napětí a vnitřní síly na desce (Brožovský, 2012) .....	54

Obrázek 31 - vnitřní síly na elementu desky (Brožovský 2012).....	55
Obrázek 32 - Definice výslednice napětí (Nettles, 1994) .....	57
Obrázek 33 - Směr působení napětí a momentů (Nettles, 1994).....	59
Obrázek 34 - Průřez laminátu (Nettles, 1994).....	60
Obrázek 35 - parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b).....	81
Obrázek 36 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	81
Obrázek 37 - distribuce napětí po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	83
Obrázek 38 - distribuce napětí po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	83
Obrázek 39 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	85
Obrázek 40 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	85
Obrázek 41 - parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b).....	86
Obrázek 42 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	86
Obrázek 43 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	88
Obrázek 44 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	88
Obrázek 45- distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	90
Obrázek 46 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	90
Obrázek 47 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	92
Obrázek 48- distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	92
Obrázek 49 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	94
Obrázek 50 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	94
Obrázek 51 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	96
Obrázek 52 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	96

Obrázek 53 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	98
Obrázek 54 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) .....	98
Obrázek 55 - parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b) .....	99
Obrázek 56 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	99
Obrázek 57 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 4. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	101
Obrázek 58 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	101
Obrázek 59 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	103
Obrázek 60 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	103
Obrázek 61 - parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b) .....	105
Obrázek 62 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	105
Obrázek 63 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	107
Obrázek 64 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	107
Obrázek 65 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	109
Obrázek 66 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	109
Obrázek 67 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	111
Obrázek 68 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	111
Obrázek 69 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	113
Obrázek 70 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	113
Obrázek 71 - parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b) .....	114

Obrázek 72 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	114
Obrázek 73 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	116
Obrázek 74 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	116
Obrázek 75 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	118
Obrázek 76- distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	118
Obrázek 77- parabolické rozložení napětí $\sigma_1$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_1$ v základních jednotkách [Pa]; S1_1a – napětí $\sigma_1$ na horním povrchu (a) první vrstvy, S1_4b – napětí $\sigma_1$ na spodním povrchu (b) .....	120
Obrázek 78 - parabolické rozložení napětí $\sigma_2$ po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí $\sigma_2$ v základních jednotkách [Pa]; S2_3a – napětí $\sigma_2$ na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2_6b – napětí $\sigma_2$ na spodním povrchu (b) šesté vrstvy. ....	120
Obrázek 79- distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	122
Obrázek 80 - distribuce napětí $\sigma_1$ po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	122
Obrázek 81 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	124
Obrázek 82 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	124
Obrázek 83 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním horním 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	126
Obrázek 84 - distribuce napětí $\sigma_1$ po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	126
Obrázek 85 - distribuce napětí $\sigma_2$ po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	128
Obrázek 86 - distribuce napětí $\sigma_2$ po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa]) ...	128

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vybraný popis (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) ..	11
Tabulka 2 - vybrané průřezové hodnoty (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	13
Tabulka 3 - předběžné dimenzování pro panel h = 2400 mm (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]) .....	15
Tabulka 4 - Návrhové situace a jejich potřebné ověření (Swedish wood, vol 1-2016).....	19
Tabulka 5 - Třídy trvání zatížení (Swedish wood, vol 2-2016) .....	19
Tabulka 6 - Modifikační faktor pevnosti $k_{mod}$ (Swedish wood, 2016).....	19
Tabulka 7 - Kombinační faktory (Swedish Wood, vol 2-2016).....	20
Tabulka 8 - Modifikační faktor materiálu $\gamma_m$ pro ULS (Swedish Wood, vol 2-2016).....	21
Tabulka 9 - Hodnoty $k_{def}$ kostrukční dřevo a materiály na bázi dřeva (Swedish Wood, vol 1-2016).....	21
Tabulka 10 - Charakteristické pevnostní a tuhostní vlastnosti pro konstrukční dřevo (Swedish Wood, vol 2-2016).....	22
Tabulka 11 - Efektivní délka jako poměr rozpětí (Eurokód 5, EN 1995).....	27
Tabulka 12 - Základní zátěžové modely pro nosník (M. Johansson, 2017).....	30
Tabulka 13 - Poissonova čísla vybraných domácích dřevin (Požgaj et. al., 1997) .....	40
Tabulka 14 - přehled diferenciálních závislostí – čárky nad w označují derivaci průhybu podle x (Šmiřák, 2000).....	53
Tabulka 15 - Použité osově zatížení $Nd$ [kN] odpovídající trvalému a nahodilému zatížení. (124L – panel o šířce 124 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách, 62Q – panel o šířce 62 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách).....	73
Tabulka 16 - Panel o tloušťce 124 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti .....	74
Tabulka 17 - Panel o tloušťce 124 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti .....	75
Tabulka 18 - Panel o tloušťce 84 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti .....	76
Tabulka 19 - Panel o tloušťce 84 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti.....	77
Tabulka 20 - Panel o tloušťce 62 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti .....	78
Tabulka 21 - Panel o tloušťce 62 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti.....	79
Tabulka 22 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN) .....	82
Tabulka 23 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$ kN; $q_k=50$ kN) .....	84
Tabulka 24 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=50$ kN; $q_k=50$ kN).....	87
Tabulka 25 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=50$ kN; $q_k=50$ kN).....	89

Tabulka 26 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=40 kN).....	91
Tabulka 27 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=40 kN).....	93
Tabulka 28 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	95
Tabulka 29 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	97
Tabulka 30 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	100
Tabulka 31 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	102
Tabulka 32 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=10 kN; qk=40 kN).....	106
Tabulka 33 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=10 kN; qk=40 kN).....	108
Tabulka 34 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	110
Tabulka 35 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	112
Tabulka 36 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	115
Tabulka 37 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	117
Tabulka 38 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=30 kN; qk=50 kN).....	121
Tabulka 39 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=30 kN; qk=50 kN).....	123
Tabulka 40 - $\sigma_1$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	125
Tabulka 41 - $\sigma_2$ - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách (gk=60 kN; qk=50 kN).....	127
Tabulka 42 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (124L).....	129
Tabulka 43 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (124Q).....	130
Tabulka 44 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (84L).....	131
Tabulka 45 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (84Q).....	132
Tabulka 46 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (62L).....	133
Tabulka 47 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (84Q).....	134

## 1 Úvod

Rozsah dřevěného stavení a jeho konstrukční technologické formy v našich klimatických podmínkách stále neodpovídají evropským a celosvětovým trendům. Příčin tohoto neutěšeného stavu je určitě více, ale jednou z nich jsou jistě i nedostatečné znalosti a zkušenosti architektů a projektantů se zmíněnou materiálovou základnou. Nové možnosti uplatnění dřeva v soudobém stavebnictví jsou jednoznačně spjaty s rozvojem inovativních technologií jeho zpracování, které podporují vývoj soudobých dřevěných konstrukcí (Pavlík, 2016).

Dřevo bylo už od dávných dob a zůstává i dnes jedním z nejvšestrannějším a nejrozšířenějším materiálem, který člověk používá. I přes úspěch vědy a techniky na úseku výroby materiálů a plastů pro průmysl, stavebnictví, hornictví, zemědělství i každodenní život dřevo bylo a nadále zůstává nejvyhledávanějším materiálem (Požgaj et al., 1997).

Je materiálem nabízející odpověď na současně diskutovanou problematiku obnovitelnosti zdrojů a energetické náročnosti stavební produkce. Posouzení dřevostavby z hlediska LCA (life cycle assessment) prokazuje výrazně nižší emise CO<sub>2</sub> než stavba betonová, po zahrnutí uloženého biogenního uhlíku. Dlouhodobé směřování k nízkenergetické náročnosti budov související s procesem technologické inovace a uspořádáním sledovaných parametrů v souladu s principy trvalé udržitelnosti může být jedním z nejdůležitějších faktorů (Pavlík, 2016), (Shaobo Liang et al., 2020).

Právě vícepodlažní dřevostavby z CLT panelů by mohly být odpovědí na problematiku energetické náročnosti stavební produkce. U těchto staveb je zásadní problematikou jejich požární odolnost, tuhost a akustika. Z hlediska výroby již existuje výrobová norma, je ale třeba zpracovat technické normy, které by daly projektantům podklady pro navrhování konstrukcí za běžné teploty a za požárů. V České republice významně roste počet realizací staveb na bázi dřeva, stejně tak o vícepodlažní obytné a administrativní budovy. Česká republika si takový nárůst dovolit může. Lesy pokrývají 34% plochy celého území a zásoba dřeva v těchto lesích se dlouhodobě zvětšuje. Samotný zájem o dřevostavby je vidět na příkladu rodinných domů, kde dřevostavby tvoří již 15 % celkového podílu. (ČSÚ, 2018), (Kuklík, [online]).

Dřevostavby z vrstvených CLT panelů se přirozeně z pohledu udržitelné výstavby mohou zdát ideální technologií. Rychlost výstavby, která je dána prefabrikací panelů, a tedy přesnou výrobou stavebních dílů ve výrobní hale za použití CNC techniky a automatizace za zaběhnutých a ověřených procesů v kontrolovaném prostředí, dále pak možnost stavět i během zimních měsíců a nakonec skutečnost, že dřevo je recyklovatelným materiálem s nízkým obsahem „šedé energie“ a to zejména v kombinaci s tepelně izolačními materiály na bázi dřevěných vláken. Z těchto hledisek lze dřevostavby z CLT panelů považovat za ekologické stavby (Doležel, [online]).

Tím hlavním, co momentálně brzdí rozvoj nejen výškových dřevostaveb, je nedostatek technických postupů a metod pro navrhování. Projektanti si musí vystačit s postupy, které nezohledňují existující teorii. Použití nepřesných postupů vede k naddimenzování těchto staveb, což fakticky boří tvrzení, že dřevostavby lze považovat za ekologické nebo až carbon-neutral. I z tohoto důvodu zůstává potenciál budov z vrstveného dřeva (CLT) nenaplněn.

Má práce si dává za cíl porovnat a analyzovat stávající používanou normativní metodu pro navrhování CLT panelů s existující teorií matematické pružnosti a navrhnout možné úpravy v řešení a postupu navrhování CLT panelů.

## 2 Cíl práce

Cílem mé bakalářské práce je porovnat dvě nezávislé metody navrhování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT) - navrhování podle eurokódu a podle matematické teorie pružnosti, vytvořit výpočetní postup odpovídající normám Eurokódu a normám příbuzným, a vytvořit výpočetní numerický model podle matematické teorie pružnosti, Kirchhoffovy teorie tenkých desek a laminární teorie. Tyto dvě metody aplikovat při různých zátěžových stavech a daných okrajových podmínkách na křížem lepené masivní panely, vyráběné z lamel křížově skládaných do vrstev a následně porovnat výstupy a výsledky, které tyto metody poskytují.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- a) První část práce je zaměřena na sestavení výpočetního modelu pro posouzení únosnosti podle Eurokódu a normám příbuzným,
- b) Druhá část práce je zaměřena na sestavení výpočetního modelu pro posouzení únosnosti podle matematické teorie pružnosti,
- c) Třetí část je zaměřena definování zátěžových stavů použitých v každé z výpočetních metod,
- d) Čtvrtá část je zaměřena na výpočet mezních stavů únosnosti podle EC5 a stanovení podmínky únosnosti
- e) Pátá část je zaměřena na výpočet napětí působících v panelu podle matematické teorie pružnosti a porovnat s návrhovými pevnostmi
- f) Šestá část je zaměřena na porovnání a zhodnocení obou metod
- g) Sedmou částí je návrh použití výsledků v praxi



### 3 Literární přehled

Dřevo představuje pružný, pevný, a přitom lehký materiál, který má velmi dobré tepelněizolační vlastnosti a je schopný přenášet velká zatížení, tlumit vibrace, lehko se opracovává reznými nástroji, umožňuje vlastní spojování, zpevňování kovovými i jinými výplněmi (Požgaj et al., 1997).

Díky těmto vlastnostem je dřevo často používáno pro výrobu konstrukčních prvků staveb. Konstrukční dřevěné prvky jsou vhodné zejména pro přenos tahových, tlakových a ohybových namáhání. Vzhledem k vysokému poměru pevnosti k hmotnosti se dřevo často používá jako konstrukční materiál pro střechy (Horáček, 2010).

#### 3.1 Dřevěné konstrukce

Nové materiály na bázi dřeva a efektivní zdvihadací přepravní zařízení umožňují nové formy pro stavění se dřevem. Díky vzdělávacím programům pro podporu dřeva v různých evropských zemích a spolehlivým pomůckám pro projektanty a uživatele ve formě informačních, projekčních a výpočetních podkladů, výrazně vzrůstá kvalita dřevěných konstrukcí.

Ještě před třiceti lety byly větší dřevěné stavby výjimkou. Dnes zaznamenávají vícepodlažní nebo velkoobjemové dřevěné stavby trvale vzestupný trend. V oblasti nízkoenergetických pasivních domů dřevěné stavby udávají směr. Vícepodlažní dřevěné stavby se dnes prosazují jako alternativa k doposud převládajícím materiálům – kancelářské, administrativní budovy, domy pro více rodin, školy a nemocnice (Kolb, 2007).

##### 3.1.1 Konstrukční systémy dřevostaveb

V dřevěných stavbách se v technické oblasti objevují s ohledem na skladbu a uspořádání vrstev pláště budovy novodobá a výhodná řešení. Rovněž je patrná nová orientace v různých nosných systémech, a tedy i ve vlastních systémech dřevěných staveb.

Základní typy jsou:

- Srubové stavby
- Hrázděné stavby
- Balloon-Frame, Platform-Frame
- Rámové stavby
- Skeletové stavby
- Stavby z masivního dřeva
  - Křížově spojované dřevo (lepené, spojované kolíky/hřebík)
  - Lamelově spojované dřevo (lepené, spojované kolíky/hřebíky)
  - Plošně lisované desky a materiály na bázi dřeva

V současné době převážně používané konstrukční systémy jsou rámové, skeletové stavby a stavby z masivního dřeva (Kolb, 2007).

### 3.1.1.1 Křížově spojované řezivo

Křížově spojované řezivo, v němčině „Brettsperholz“, se sestává z několika křížově spojovaných vrstev prken. Na základě omezujícího účinku symetricky sestavených vrstev mají dílce vysokou tvarovou stálost. Křížovým uspořádáním prken vznikají plošné nosné dílce, které mohou přenášet zatížení v obou směrech. Přitom se rozlišuje mezi hlavním nosným směrem a vedlejším nosným směrem (Kolb, 2007).

Technologie křížení spojovaných vrstev má ve světě mnoho označení, které přesněji definují jejich tloušťky vrstev, použité řezivo, způsob spojování (lepidlo, kolík, ...). Vedle německého označení Brettsperholz se ještě používá „Kreuzlagenholz“, „Grossformatplatten“, „Blockholz“, „Cross-laminated timber“, „X-LAM“, „Biodesky“, „SWP“ nebo „BSP“.

Mezi největší výrobce tohoto konstrukčního materiálu v Evropě se řadí (FPInnovations, 2010):

- KLH (Rakousko, VB, Švédsko)
- Binderholz (Rakousko)
- Martinsons (Švédsko)
- Moelven (Norway)
- Stora Enso (Rakousko)
- Thoma Holz GmbH (Rakousko)
- FinnForest Merk (Německo, VB)
- HMS (Německo)
- AGROP NOVA – Novatop-system (ČR)

### 3.1.1.2 Vícevrstvá masivní deska NOVATOP SOLID

NOVATOP SOLID je velkoplošný vícevrstvý panel typu CLT (cross laminated timber). Každá vrstva panelu je tvořena z lamel z rostlého smrkového dřeva a orientace vláken jednotlivých vrstev je vždy kolmá k sousedním vrstvám. Lamely v každé vrstvě jsou slepeny v podílném i příčném směru a vrstvy jsou slepeny mezi sebou.

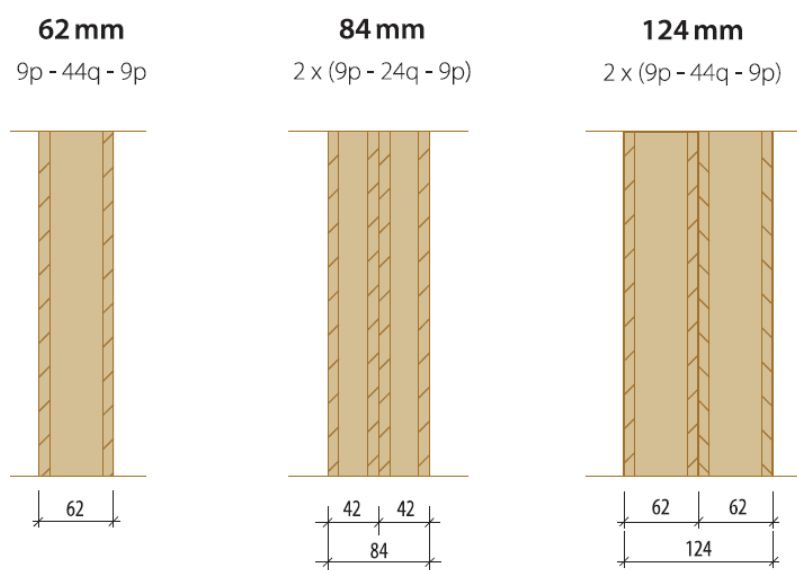
Tabulka 1 - Vybraný popis (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

Použití	Pro svislé konstrukce – stěny
Požadavky	ETA – 12/0079
Kvalita povrchu	Nepohledová konstrukční (odpovídá C) Pohledová interiérová (odpovídá B) Třídění kvalit dle interních předpisů AGROP NOVA a.s.
Velkoplošný formát	Max 12.000 x 2.950 mm (spojení jednotlivých panelů: podélným přeplátováním nebo s příložkou)
Standardní formáty (mm)	Tloušťka 62, 84 (42/42), 124 (62/62), aj. Základní standardní formáty 6000 x 2500, 6000 x 2100, 5000 x 2500, 5000 x 2100 Další formáty vycházejí z těchto základních formátů.
Rozměrové tolerance dle EN 13 353	Tolerance jmenovité šířky a délky: +- 2 mm Přímost boků +- 1 mm/m Pravoúhlost +- mm/m
Lepení	D4 podle EN 204
Vlhkost	10% +- 3%
Koeficient sesychání a bobtnání	Alfa (%/%) 0,002 – 0,012%
Teplená vodivost	0,13 W/mK podle EN ISO 10456
Měrná tepelná kapacita	1.600 J/kg.K podle EN ISO 10456



Obrázek 1 - Cross-laminated timber NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

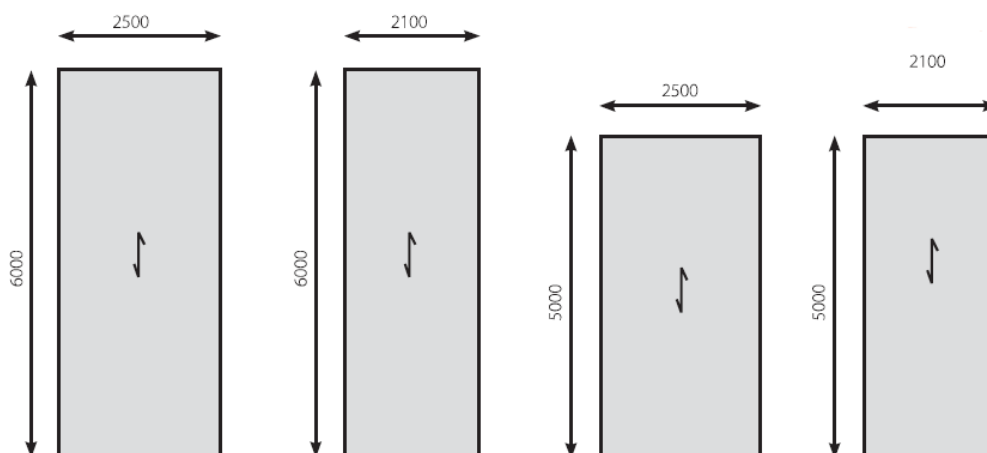
Pro výrobu panelu je použito řezivo smrku ztepilého (*Picea abies*). Panely se vyrábí v tloušťkách 62, 84 a 124 mm.



Obrázek 2 - Standardní tloušťky NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

Použití panelů je pro svislé konstrukce stěn, které se vyrábí ve čtyřech standardních formátech (další formáty vychází z těchto základních formátů)

- 2500x6000 mm
- 2100x6000 mm
- 2500x5000 mm
- 2100x5000 mm



Obrázek 3 - Standardní formáty NOVATOP SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

### 3.1.1.2.1 Průřezové hodnoty pro CLT stěny

Průřezové hodnoty charakterizují mechanické vlastnosti konstrukčního prvku. Moduly pružnosti, moduly setrvačnosti apod. jsou známy pro většinu dřev. V případě konstrukčních prvků, které jsou složeny z různých druhů dřevin a spojovány například lepení, tyto hodnoty z počátku neznáme a musí být změřeny nebo vypočteny. Změřené (vypočtené) hodnoty nazýváme průřezové hodnoty.

Průřezové hodnoty mechanických vlastností vycházejí z Evropského technického schválení ETA-12/0079 ze dne 28. 3. 2012 a jsou stanoveny pro čtyři výšky stěn (h). Údaje slouží pro první předběžné dimenzování.

Tabulka 2 - vybrané průřezové hodnoty (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

Tloušťka panelu	62 mm	84 mm	124 mm
Konstrukce panelu	9p – 44q – 9p	2x (9p – 24p – 9p)	2x (9p – 44q – 9p)
Plocha průřezu	62000 mm <sup>2</sup>	84000 mm <sup>2</sup>	124000 mm <sup>2</sup>
Výška stěny h = 2400 mm			
$E_{\text{eff}} - E_f$ - Ohybová tuhost – podélně	$1,37 \cdot 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup>	$2,77 \cdot 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup>	$6,03 \cdot 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup>
$W_{\text{eff}}$ – Modul průřezu – podélně	$3,82 \cdot 10^5$ mm <sup>3</sup>	$5,69 \cdot 10^5$ mm <sup>3</sup>	$8,39 \cdot 10^5$ mm <sup>3</sup>
$E_{\text{eff}} - E_f$ - Ohybová tuhost – příčně	$8,23 \cdot 10^{10}$ Nmm <sup>2</sup>	$2,53 \cdot 10^{11}$ Nmm <sup>2</sup>	$1,01 \cdot 10^{12}$ Nmm <sup>2</sup>
$W_{\text{eff}}$ – Modul průřezu – příčně	$3,23 \cdot 10^5$ mm <sup>3</sup>	$6,61 \cdot 10^5$ mm <sup>3</sup>	$1,65 \cdot 10^6$ mm <sup>3</sup>

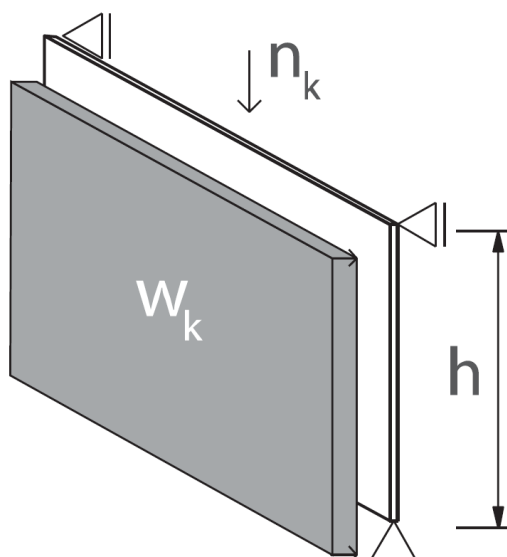
Základní šířka panelu činí 1000 mm.

Konstrukce panelu (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online]):

- p – podélně: Povrchová vrstva probíhá ve směru rozpětí. Příčné vrstvy mohou obsahovat spoje natupo.
- q – příčně: Povrchová vrstva probíhá kolmo ke směru rozpětí (obě vnější vrstvy zůstávají zohledněny). Příčné vrstvy nesmí obsahovat spoje natupo.

### 3.1.1.2.2 Předběžné dimenzování pro stěny Novatop Solid

Zatížení jsou charakteristická zatížení. V tabulkách je zohledněno charakteristické zatížení větrem  $w_k = 0,5 \text{ kN/m}$ . Z hlediska bezpečnosti bylo dimenzování pro zatížení větrem provedeno rovněž se součinitelem  $k_{mod}$  (kapitola 3.2.7).



Obrázek 4 - zatížení a uložení panelu Novatop SOLID (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

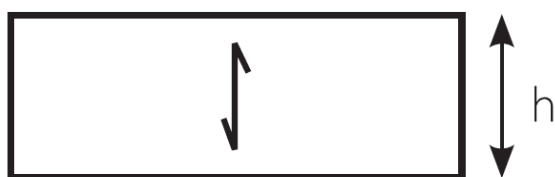
Zohledněná excentricita uložení činí:

- 10 mm pro panely NOVATOP Solid 62 mm
- 15 mm pro panely NOVATOP Solid 84 mm
- 40 mm pro panely NOVATOP Solid 124 mm

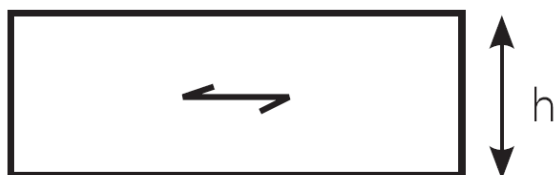
Tabulka 3 - předběžné dimenzování pro panel  $h = 2400$  mm (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

Stálé zatížení (gk)	Užitné zatížení (nk)	$h = 2400$ mm
10	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / 62Q
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / 62Q
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	50	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
20	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / 62Q
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	50	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
30	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	50	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
40	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	50	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
50	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / 62L / -----
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	50	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
60	10	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	20	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	30	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	40	124L / 124Q / 84L / 84Q / ----- / -----
	50	124L / 124Q / ----- / ----- / ----- / -----

Číselné označení je tloušťka v milimetrech, L a Q odpovídá orientace vláken v povrchových vrstvách, jak je zobrazeno na obrázku 5 (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])



L – povrchová vrstva  
probíhá ve směru rozpětí



Q – povrchová vrstva  
probíhá kolmo ke směru rozpětí

Obrázek 5 - orientace vláken v povrchových vrstvách (Technická dokumentace Novatop Solid, [Online])

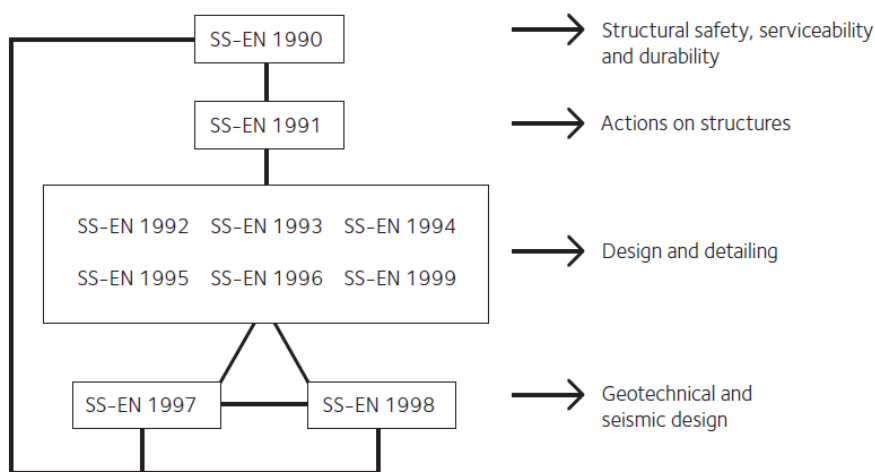
### 3.1.2 Navrhování konstrukcí

Navrhování konstrukcí lze provádět podle (a) Eurokódu (EC) anebo podle (b) Matematické teorie pružnosti (MaTeP).

Eurokód (EC) je soubor technických norem z oblasti stavebnictví, vytvořených na základě rozhodnutí Komise Evropského společenství. Cílem tohoto celku bylo odstranění technických překážek a neshod v technických specifikacích jednotlivých členských států Evropské Unie, harmonizace a zjednodušení obchodu ve stavebním sektoru (Eurokód, EN 1995).

Struktura Eurokódu je složena s následujícími standardy:

EN 1990:2002	Eurocode: Basic of Structural Design
EN 1991	Eurocode 1: Actions on Structures
EN 1992	Eurocode 2: Design of Concrete Structures
EN 1993	Eurocode 3: Design of Steel Structures
EN 1994	Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures
<b>EN 1995</b>	<b>Eurocode 5: Design of Timber Structures</b>
EN 1996	Eurocode 6: Design of Masonry Structures
EN 1997	Eurocode 7: Geotechnical Design
EN 1998	Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance
EN 1999	Eurocode 9: Design of Aluminium Structures



Obrázek 6 - Propojení norem Eurokódu (Swedish Wood, 2016)

Normy Eurokódu uznávají odpovědnost regulačních orgánů členských států, které mají plné právo sami určovat související regulační hodnoty souvisejícími s geografickým umístěním státu, podnebí apod.

Členské státy EU používají normy Eurokódu jako podklad pro své vlastní standardy (Swedish Wood, 2016).

Matematická teorie pružnosti je teorie vyplňující mezery mezi předměty – „Stavební fyzika“, „Pružnost a plasticita“ a navazujícím předmětem „Metoda konečných prvků“ (Brožovský, 2012).

## **3.2 Navrhování dřevěných konstrukcí podle Eurokódu 5**

### **3.2.1 Základní požadavky EC5**

Základním požadavkem stanoveným Evropským standardem EN 1990 je spolehlivost konstrukce v následujících aspektech:

- Konstrukční bezpečnost (structural safety)
- Robustnost (robustness)
- Provoznost (serviceability)

Důležité vlastnosti materiálu pro navrhování dřevěných konstrukcí jsou (Swedish Wood, vol 1–2016):

- Doba trvání zatížení pro různé typy zatížení
- Obsah vlhkosti ve dřevě a třída provozu
- Modifikační faktory pro použitý materiál
- Anizotropie použitého materiálu

#### **3.2.1.1 Strukturální bezpečnost**

Konstrukce by měla být navržena a provedena tak, aby během zamýšlené životnosti s odpovídajícím stupněm spolehlivosti, byla schopna odolat všem jevům spojeným s jejím užíváním. Hlavním předpokladem je ochránit uživatele, strukturu konstrukce a její obsah (Swedish Wood, vol 1–2016).

#### **3.2.1.2 Robustnost**

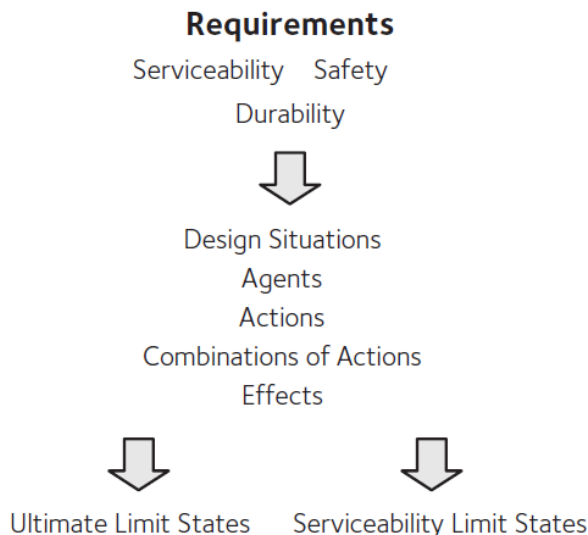
Konstrukce by měla být navržena a provedena tak, aby nebyla poškozena jevy/událostmi jako jsou (Swedish Wood, vol 1–2016):

- Výbuchy
- Nárazy
- Důsledky lidských chyb



### 3.2.1.3 Provozní schopnost

Konstrukce by měla být navržena a provedena tak, aby během své životnosti plnila veškeré požadavky spojené s funkcí, pohodlím a vzhledem.



Obrázek 7 - Požadavky a terminologie používaná u navrhování konstrukcí (SWEDISH WOOD CHAP1)

Eurokód je založený na mezním stavu únosnosti a mezním stavu použitelnosti (Swedish Wood, vol 1–2016).

### 3.2.2 Mezní stav únosnosti (ULS)

Stav únosnosti definuje hranici, za kterou navrhovaná konstrukce neodpovídá požadavkům uvedených. Zahrnuje bezpečnost spojenou s kolapsem nebo selháním konstrukce (Swedish Wood, vol 1–2016).

Mezní stavy únosnosti řeší

- Porušení
- Kolaps
- Ztráta rovnováhy
- Porucha způsobená únavou materiálu

### 3.2.3 Mezní stav použitelnosti (SLS)

Mezní stav použitelnosti se vztahuje k těm stavům, ve kterých se struktura chová neuspokojivým způsobem, například v důsledku nadměrné deformace nebo vibrací.

Mezní stavy použitelnosti řeší (Swedish Wood, vol 1-2016):

- Deformace
- Praskliny
- Vibrace
- Poškození ovlivňující použití

Tabulka 4 - Návrhové situace a jejich potřebné ověření (Swedish wood, vol 1-2016)

Design situations		Verifications
Persistent	Normal use	ULS, SLS
Transient	Execution, temporary conditions, applicable to the structure, e.g. maintenance or repair	ULS, SLS
Accidental	Normal use	ULS
	During execution	ULS
Seismic	Normal use	ULS, SLS
	During execution	ULS, SLS

### 3.2.4 Třídy trvání zatížení

Dřevo zaznamenává výrazný pokles pevnosti v čase. Pro stanovení ztráty pevnosti, byly vytvořeny třídy trvání zatížení.

Tabulka 5 - Třídy trvání zatížení (Swedish wood, vol 2-2016)

Třída trvání zatížení	Délka trvání zatížení	Příklady zatížení
Permanentní (P)	> 10 let	Vlastní váha
Dlouhodobý (L)	6 měsíců – 10 let	Vybavení (nábytek, ...)
Střednědobý (M)	1 týden – 6 měsíc	Sníh
Krátkodobý (S)	< 1 týden	Vítr
Okamžitý (I)		Nárazy větru Nahodilé zatížení Koncentrované zatížení

### 3.2.5 Třídy provozu

Třídy provozu rozlišují použitý materiál na základě podílu vlhkosti ve dřevě a byly stanoveny v normě SS-EN 1995.

**Třída provozu 1** – průměrná vlhkost ve dřevě nepřesáhne 12% (to odpovídá prostředí o teplotě 20°C a relativní vlhkosti nepřesahující 65% po dobu více než několika týdnů v roce).

**Třída provozu 2** – průměrná vlhkost ve dřevě nepřesáhne 20% (to odpovídá prostředí o teplotě 20°C a relativní vlhkosti nepřesahující 85% po dobu více než několika týdnů v roce).

**Třída provozu 3** – průměrná vlhkost ve dřevě přesáhne 20% (to odpovídá hodnotám vyšším, než je zmíněno u třídy provozu 2)

(Swedish Wood, vol 1,2–2016)

Každé ze zmíněných tříd trvání zatížení v kombinaci s třídou provozu, byl přidělen modifikační faktor pevnosti  $k_{mod}$ , který se pohybuje v intervalu  $< 0,2 ; 1,1 >$  a to na základě třídy trvání zatížení, třídy provozu a použitého materiálu (konstrukční dřevo, lepené laminované dřevo, překližka, MDF, dřevotřísková deska atd.).

Tabulka 6 - Modifikační faktor pevnosti  $k_{mod}$  (Swedish wood, 2016)

Materiál	Odpovídající norma	Třída provozu	Třídy trvání zatížení				
			P	L	M	S	I
Konstrukční dřevo	SS-EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,60	0,55	0,65	0,70	0,90
Lepené lamelové dřevo	SS-EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,80	0,90

### 3.2.6 Kombinace zatížení

Pro kombinaci působících zatížení se používají kombinační faktory, kterými se upravuje velikost těchto zatížení. Hodnota kombinačního faktoru závisí na typu konstrukce, účelu konstrukce, typu a velikosti působícího zatížení, a hlavně doby zatížení (Swedish Wood, vol 2-2016).

Tabulka 7 - Kombinační faktory (Swedish Wood, vol 2-2016)

Zatížení	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Zatížení v budově, kategorie:</b>			
A: Rezidenční prostory	0,7	0,6	0,3
B: Kancelářské prostory	0,7	0,5	0,3
C: Montážní prostory	0,7	0,7	0,6
D: Nákupní prostory	0,7	0,7	0,6
E: Úložné prostory	0,1	0,9	0,8
F: Dopravní prostory při hmotnosti vozidla $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
G: Dopravní prostory při $30\text{kN} \leq$ hmotnost vozidla $\leq 150$ kN	0,7	0,5	0,3
H: Střechy	0	0	0
<b>Zatížení sněhem</b>			
$s_k \geq 3,0$ kN/m <sup>2</sup>	0,8	0,6	0,2
$2,0 \leq s_k < 3,0$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,4	0,2
$1,0 \leq s_k < 2,0$ kN/m <sup>2</sup>	0,6	0,3	0,1
<b>Zatížení větrem</b>	0,3	0,2	0
<b>Tepelné zatížení v budovách</b>	0,6	0,5	0

Každý z kombinačních faktorů  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  odpovídá délce trvání a intenzitě zatížení.

- **Kombinační hodnoty  $\psi_0 Q_k$**  – používají se pro ověření výpočtu ULS a pro charakteristiku nevratných SLS (důsledky nereversibilních akcí přesahující specifikované požadavky).
- **Opakované hodnoty  $\psi_1 Q_k$**  – používají se pro ověření ULS a reversibilní akcí SLS. Specifické požadavky jsou překročeny po 1% času.
- **Kvazi-permanentní hodnoty  $\psi_2 Q_k$**  – používá se pro působení dlouhodobých až permanentních akcí SLS jako jsou průhyby nebo praskliny.

Působící akce jsou označovány jako *proměnné akce*  $Q_k$  (Swedish Wood, vol 1-2016).

### 3.2.7 Další modifikační faktory

Aby se zohlednili charakteristické vlastnosti dřevěných materiálů nebo materiálů na bázi dřeva, byly definovány modifikační faktory odpovídající těmto charakteristickým vlastnostem (Swedish Wood, vol 2-2016).

Tabulka 8 - Modifikační faktor materiálu  $\gamma_m$  pro ULS (Swedish Wood, vol 2-2016)

Materiál	$\gamma_m$
Konstrukční dřevo	1,3
Lepené laminované dřevo	1,25
LVL, Překližka, OSB	1,2
Dřevotříška	1,3
Dřevovláknitá deska (HDF, MDF)	1,3
Dřevěné spoje	1,3
Spoje na kovové pláty (gussed plate)	1,25

Dalšími běžně využívanými modifikačními faktory jsou například

- $k_n$  – faktor velikosti konstrukce
- $k_{c,90}$  – faktor redukce tlakové pevnosti kolmo na vlákna
- $k_{crit}$
- $k_{dis}$
- $k_m$
- $k_{sys}$

Pro zohlednění účinku tečení na pevnost se okamžitá deformace násobí faktorem zohledňující přidanou deformaci dotvarování. Tento modifikační faktor označujeme  $k_{def}$  (Swedish Wood, vol 2-2016).

Tabulka 9 - Hodnoty  $k_{def}$  konstrukční dřevo a materiály na bázi dřeva (Swedish Wood, vol 1-2016)

Materiál	Odpovídající norma	Třída provozu		
		1	2	3
Konstrukční dřevo	SS-EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Lepené lamelové dřevo	SS-EN 14080	0,60	0,80	2,00

### 3.2.8 Materiálové vlastnosti pro standardizované dřevěné produkty

Pro produkty vyrobené z konstrukčního dřeva nebo z materiálů na bázi dřeva byly stanoveny pevnostní třídy. Každá pevnostní třída obsahuje pevnostní hodnoty, moduly pružnosti a hustoty (Swedish Wood, vol 2-2016).

Tabulka 10 - Charakteristické pevnostní a tuhostní vlastnosti pro konstrukční dřevo (Swedish Wood, vol 2-2016)

<b>Konstrukční dřevo</b>	<b>C14</b>	<b>C16</b>	<b>C18</b>	<b>C20</b>	<b>C22</b>
<b>Charakteristické pevnostní hodnoty</b>					
Ohyb rovnoběžně k vláknům $f_{m,k}$	14	16	18	20	22
Tah rovnoběžně k vláknům $f_{t,90,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13
Tah kolmo na vlákna $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Tlak rovnoběžně k vláknům $f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20
Tlak kolmo na vlákna $f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4
Smyk $f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
<b>Moduly pružnosti pro kapacitní analýzu</b>					
Elastic modulus $E_{0,05}$	4700	5400	6000	6400	6700
<b>Moduly pružnosti pro dané výpočty, střední hodnoty</b>					
Modul pružnosti rovnoběžně k vláknům $E_{0,mean}$	7000	8000	9000	9500	10000
Modul pružnost kolmo k vláknům $E_{90,mean}$	230	270	300	320	330
Smykový modul pružnost $G_{mean}$	440	500	550	590	630
<b>Hustota</b>					
Hustota $R\ddot{O}$ k	290	310	320	330	340
Hustota $R\ddot{O}$ mean	350	370	380	400	410
<b>Konstrukční dřevo</b>	<b>C24</b>	<b>C27</b>	<b>C30</b>	<b>C35</b>	<b>C40</b>
<b>Charakteristické pevnostní hodnoty</b>					
Ohyb rovnoběžně k vláknům $f_{m,k}$	24	27	30	35	40
Tah rovnoběžně k vláknům $f_{t,90,k}$	14,5	16,5	19	22,5	26
Tah kolmo na vlákna $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Tlak rovnoběžně k vláknům $f_{c,0,k}$	21	22	24	25	27
Tlak kolmo na vlákna $f_{c,90,k}$	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8
Smyk $f_{v,k}$	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
<b>Moduly pružnosti pro kapacitní analýzu</b>					
Elastic modulus $E_{0,05}$	7400	7700	8000	8700	9400
<b>Moduly pružnosti pro dané výpočty, střední hodnoty</b>					
Modul pružnosti rovnoběžně k vláknům $E_{0,mean}$	11000	11500	12000	13000	14000
Modul pružnost kolmo k vláknům $E_{90,mean}$	370	380	400	430	470
Smykový modul pružnost $G_{mean}$	690	720	750	810	880
<b>Hustota</b>					
Hustota $R\ddot{O}$ k	350	360	380	390	400
Hustota $R\ddot{O}$ mean	420	430	460	470	480

### 3.2.9 Mezní stavy únosnosti konstrukčního dřeva

Následující vztahy platí pro konstrukční dřevo, lepené lamelové dřevo, a další materiály s orientací vláken rovnoběžně po délce prvku. Vztahy pro další materiály na bázi dřeva se mohou výrazně lišit (Koželouh, 1998).

#### 3.2.9.1 Tah rovnoběžně s vlákny

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (1.1)$$

kde:  $f_{t,0,d}$  je návrhová pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny

$\sigma_{t,0,d}$  je návrhové napětí v tahu rovnoběžně s vlákny

(Koželouh, 1998)

#### 3.2.9.2 Tlak rovnoběžně s vlákny

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (1.2)$$

kde:  $f_{c,0,d}$  je návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

$\sigma_{c,0,d}$  je návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny

(Koželouh, 1998)

#### 3.2.9.3 Tah kolmo na vlákna

Tah kolmo na vlákna je závislý na rozměrech, pevnosti a dalším vlastnostem prvku (Koželouh, 1998).

#### 3.2.9.4 Tlak kolmo na vlákna

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \leq 1 \quad (1.3)$$

kde  $f_{c,90,d}$  je návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům

$\sigma_{c,90,d}$  je návrhové napětí v tlaku kolmo na vláknům

$k_{c,90}$  je součinitel vyjadřující míru deformace v tlaku kolmo na vlákna na základě distribuce zatížení. Pohybuje se v intervalu  $< 1,0 ; 4,0 >$  (Koželouh, 1998).

#### 3.2.9.5 Jednoosý ohyb

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (1.4)$$

kde  $f_{m,d}$  je návrhová pevnost v ohybu

$\sigma_{m,d}$  je návrhové napětí v ohybu

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.6 Dvouosý (šikmý) ohyb

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.5)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.6)$$

kde  $\sigma_{m,y,d}$ ;  $\sigma_{m,z,d}$  jsou návrhová napětí v ohybu k hlavním osám

$f_{m,y,d}$ ;  $f_{m,z,d}$  jsou návrhové napětí v ohybu v hlavních osách

$k_m$  je součinitel vyjadřující nedokonalosti materiálu v průřezu a odpovídající rozložení napětí. Pro konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo s obdélníkovým průřezem je  $k_m = 0,7$  a pro ostatní průřezy je  $k_m = 1,0$  (Koželouh, 1998).

### 3.2.9.7 Smyk

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (1.7)$$

kde  $\tau_{v,d}$  je návrhové napětí ve smyku

$f_{v,d}$  je návrhová pevnost ve smyku

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.8 Krut

$$\frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape} f_{v,d}} \leq 1 \quad (1.8)$$

kde  $f_{v,d}$  je návrhová pevnost ve smyku pro příslušný případ

$\tau_{tor,d}$  je návrhové napětí ve smyku od kroucení

$k_{shape}$  je součinitel závislý na průřezu prvku, která odpovídá vztahu:

$$k_{shape} = \begin{cases} 1,2 & \text{pro kruhový průřez} \\ \min \left\{ 1 + 0,5 \frac{h}{b}, 2,0 \right\} & \text{pro obdélníková průřez} \end{cases} \quad (1.9)$$

kde  $h$  je větší rozměr průřezu

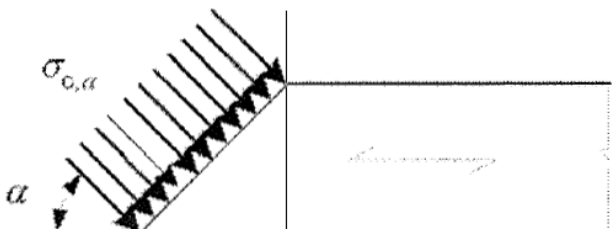
(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.9 Tlak šikmo na vlákna

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.10)$$

kde  $\sigma_{c,\alpha,d}$  návrhové napětí v tlaku pod úhlem  $\alpha$  k vláknům

$k_{c,90}$  je součinitel pro působení jakéhokoliv napětí kolmo na vlákna



Obrázek 8 - Tlak šikmo na vlákna (Eurokód 5, EN 1995)

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.10 Kombinace ohybu a osového tahu

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.11)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.12)$$

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.11 Kombinace ohybu a osového tlaku

$$\left( \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.13)$$

$$\left( \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.14)$$

(Koželouh, 1998)



### 3.2.9.12 Vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (1.15)$$

kde  $k_c$  je součinitel vzpěrnosti, definovaný jako:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (1.16)$$

kde  $k$  je definováno jako:

$$k = \frac{1}{2} (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \quad (1.17)$$

kde  $\beta_c$  je součinitel imperfekce pro prvky splňující zakřivení  $\frac{L}{500}$  pro lepené lamelové dřevo a  $\frac{L}{300}$  pro rostlé dřevo.

- $\beta_c = 0,2$  pro rostlé dřevo
- $\beta_c = 0,1$  pro lepené lamelové dřevo

$\lambda_{rel}$  je poměrná štíhlost materiálu, definovaný jako:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (1.18)$$

kde  $E_{0,05}$  je pátý percentil modulu pružnosti v podélném směru (Koželouh, 1998).

### 3.2.9.13 Kombinace ohybu a vzpěru

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.19)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (1.20)$$

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.14 Klopení

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit}f_{m,d}} \leq 1 \quad (1.21)$$

kde  $k_{crit}$  je součinitel klopení, který vyjadřuje míru redukované pevnosti v ohybu příčné a torzní nestability, definovaný jako:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{pro } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{pro } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{pro } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (1.22)$$

kde  $\lambda_{rel,m}$  je poměrná štíhlost v ohybu, definovaná jako:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (1.23)$$

kde  $\sigma_{m,crit}$  je kritické napětí v ohybu, definované jako:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi\sqrt{E_{0,05}I_z G_{0,05}I_{tor}}}{l_{ef}W_y} \quad (1.24)$$

Pro konstantní obdélníkový průřez ze dřeva jehličnatých dřevin se dá uvažovat:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78*b^2}{hl_{ef}} E_{0,05} \quad (1.25)$$

kde  $l_{ef}$  je efektivní délka prvku (Koželouh, 1998).

Tabulka 11 - Efektivní délka jako poměr rozpětí (Eurokód 5, EN 1995)

Typ nosníku	Typ zatížení	$l_{ef}/l$ *)
Prostě podepřený	Konstantní moment	1,0
	Spojité zatížení	0,9
	Soustředěná síla uprostřed rozpětí	0,8
Konzole	Spojité zatížení	0,5
	Soustředěná síla uprostřed rozpětí	0,8

\*) Poměr mezi délkou  $l_{ef}$  a rozpětím  $l$  platí pro nosník, který je zajištěn proti kroucení v podpěrách a zatěžován v těžišti. Jestliže zatížení působí na tlačném okraji nosníku, má se  $l_{ef}$  zvýšit o  $2h$  a může se snížit o  $0,5h$  pro zatížení na taženém okraji nosníku.

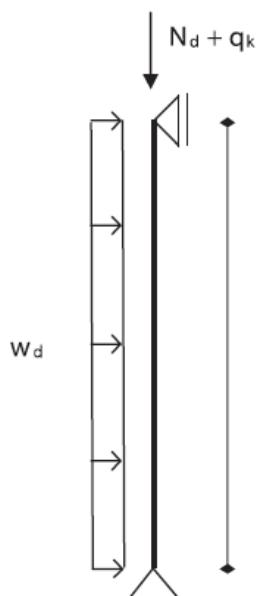
### 3.2.9.15 Kombinace klopení a vzpěru

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit}f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (1.26)$$

(Koželouh, 1998)

### 3.2.9.16 Výpočet podle ETA-12/0079 – DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02

Norma DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02 vychází z Eurokódů, je adaptací všeobecné normy na lokální (Německo), a tedy charakteristické pevnostní hodnoty a modifikační faktory jsou podobné hodnoty, ne však stejné (kapitola 2.2.1). ETA-12/0079 stanovuje požadavky evropské unie na konkrétní konstrukční produkt (v tomto případě Novatop Solid). Tento požadavek ETA ověřil Technický a zkušební ústav Praha. Norma udává postup pro řešení zatížení vně a příčně ke směru stěny při vertikálním směru povrchové vrstvy. Na této normě Novatop zakládá své výpočty pro předběžné dimenzování (DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02, 2012), (ETA-12/0079, 2012), (Technická dokumentace Novatop Solid, [online]).



Obrázek 9 - zatížení vně a příčně ke směru stěny při vertikálním směru povrchové vrstvy – okrajovou podmínkou je jeden pevný a jeden posuvný kloub (Technická dokumentace Novatop Solid, [online])

#### 3.2.9.16.1 Kombinace zatížení vně a příčně ke směru stěny

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad (1.27)$$

kde  $f_{c,0,d}$  je návrhová pevnost v tlaku v hlavní ose, definovaná jako:

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k}k_{mod}}{\gamma_m} \quad (1.28)$$

$f_{m,d}$  je návrhová pevnost v ohybu, definovaná jako:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}k_{mod}}{\gamma_m} \quad (1.29)$$

$k_{c,y}$  je součinitel vzpěrnosti, definovaný jako:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (1.30)$$

$\gamma_m$  je modifikační faktor materiálu z tabulky 8.

$k_{mod}$  je modifikační faktor pevnost z tabulky 6.

$\sigma_{c,0,d}$  je návrhové napětí v tlaku, definované jako:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{eff}} \quad (1.31)$$

$A_{eff}$  je efektivní plocha průřezu, která odpovídá ploše, která je ve vertikálním směru. Plocha horizontální je zanedbávána ve výpočtu efektivní ploše.

$\sigma_{m,d}$  je návrhové napětí v ohybu, definované jako:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \quad (1.32)$$

$k_y$  je definováno jako:

$$k_y = \frac{1}{2} [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2] \quad (1.33)$$

kde  $\beta_c$  je součinitel imperfekce pro prvky splňující zakřivení  $\frac{L}{500}$  pro lepené lamelové dřevo a  $\frac{L}{300}$  pro rostlé dřevo.

- $\beta_c = 0,2$  pro rostlé dřevo
- $\beta_c = 0,1$  pro lepené lamelové dřevo

$\lambda_{rel,y}$  je poměrná štíhlost materiálu, definovaný jako:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{l_{eff}}{\pi i} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,0,05}}} \quad (1.34)$$

$l_{eff}$  je efektivní délka (tabulka 11).

$E_{0,0,05}$  je pátý percentil modulu pružnosti ve směru vláken (tabulka 10).

$W$  je průřezový modul, definovaný jako:

$$W = \frac{EI_{eff}}{E_{0,mean} z_s} \quad (1.35)$$

kde  $EI_{eff}$  je efektivní ohybová tuhost, definovaná v tabulce 2 průřezových hodnot.

$E_{0,mean}$  je průměrný modul pružnosti v podélném směru, definovaný v tabulce 2 průřezových hodnot.

$z_s$  je vzdálenost neutrální roviny od povrchu.

$i$  je poloměr setrvačnosti, definovaný jako:

$$i = \sqrt{\frac{EI_{eff}}{E_{0,mean} A_{eff}}} \quad (1.36)$$

Maximální normálová osová síla  $N_d$  ze vztahu 1.31 je definována na základě kombinace působících zatížení z tabulky 3 a kombinačních faktorů zmíněných v kapitole 2.2.7. Stejně tak je definováno návrhové nahodilé zatížení větrem  $w_d$ .

Působení maximálního návrhového momentu  $M_d$  ve stěně s okrajovými podmínkami zobrazenými na obrázku 9, je definováno jako:

$$M_d = \frac{w_d l^2}{8} + N_d e \quad (1.37)$$

kde  $e$  je excentricita.

Maximální příčná smyková síla návrhová je definovaná jako:

$$V_d = \frac{w_d l}{2}, \quad (1.38)$$

(DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02, 2012), (ETA-12/0079, 2012), (Technická dokumentace Novatop Solid, [online]).

### 3.2.10 Základní zátěžové modely nosníku

Pro následující příklady zátěžových modelů nosníku předpokládáme, že:

$$EI = \text{konstantní} \quad (1.39)$$

a že:

$M_A$  je maximální moment působící na rameni nosníku v maximální vzdálenosti od podpěry A

$y_{max}$  je maximální průhyb

$R_A$  je silová reakce podpěry A

$L$  je délka nosníku

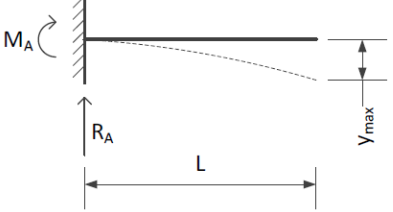

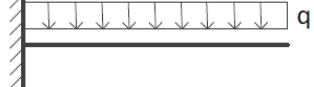
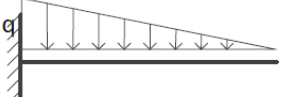
$P$  je osamělá síla

$q$  je plošné zatížení

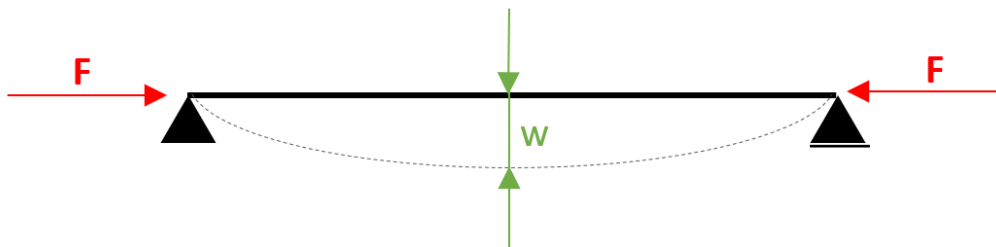
$M$  je ohybový moment

(M. Johansson, 2017)

Tabulka 12 - Základní zátěžové modely pro nosník (M. Johansson, 2017)

	$EI = \text{konst.}$		
	$R_A$	$M_A$	$y_{max}$
	$P$	$-PL$	$\frac{PL^3}{3EI}$
	$qL$	$-\frac{qL^2}{2}$	$\frac{qL^4}{8EI}$
	$\frac{qL}{2}$	$-\frac{qL^2}{6}$	$\frac{qL^4}{30EI}$

Příkladem dalšího zátěžového stavu nosníku může být působení osových sil v ose nosníku, jak je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10 - zátěžový stav nosníku - "vzpěr"

Pro takový případ lze výpočet momentu odvodit z všeobecně známé definice momentu síly z mechaniky – tedy že velikost momentu síly vzhledem k momentovému bodu je přímo úměrná velikosti působící síly a vzdálenosti tohoto bodu od vektorové přímky síly, který moment vyvolává. Tedy rameno  $L$ .

$$M = FL \quad (3.80)$$

Pro zátěžový stav z obrázku 10 je maximální moment  $M$  určen ramenem síly vektorové velikosti  $w$  – tedy maximálním průhybem navozeným vzpěrem.

### 3.3 Navrhování podle matematické teorie pružnosti

#### 3.3.1 Anizotropie mechanických vlastností dřeva

Dřevo jako každý jiný materiál tvoří atomy a molekuly, které jsou náhodně nebo zákonitě uspořádaná v daném prostoru. Stupeň homogenity uspořádání atomů a molekul v objemu dřeva a orientace zejména kovalentních a vodíkových vazeb určuje velikost a orientaci mechanických vlastností na úrovni mikrostruktury a makrostruktury. Různost mechanických vlastností v objemu dřeva a jejich závislost od směru nazýváme anizotropií mechanických vlastností (Požgaj et al., 1997).

Rovnoběžně s vlákny, tj. ve směru kmene, je pevnost materiálu zvláště vysoká, zatímco kolmo k vláknům jsou pevnostní vlastnosti nízké (Horáček, 2010).

#### 3.3.2 Mechanické namáhání

Mechanickým namáháním rozumíme proces, při kterém nastává interakce mezi mechanickými silami anebo jinými činiteli namáhání a dřevem. Výsledkem tohoto procesu jsou dočasné nebo trvalé změny tvaru dřeva.

Reakce dřeva na mechanické namáhání nezávisí jen od vazeb chemických složek dřeva a jejich vzájemného spojení (celulózy, lignin, hemicelulózy), ale často v rozhodující míře od samotné geometrie tělesa. Proto se každá mechanická vlastnost dřeva musí posuzovat z hlediska samotné geometrie zkušební tělesa, nehomogenity, struktury a chemického složení, stejně tak i vznikající anizotropií vlastností (Požgaj et al., 1997).

### 3.3.2.1 Základní druhy mechanického namáhání

Základní druhy mechanického namáhání rozlišujeme podle druhu napětí, které v tělese vzniká v důsledku působení vnější síly. Napětí ve dřevě představuje míru vnitřních sil, které se v tělese objevují jako odpověď na působení vnějších mechanických sil. Tyto síly působící na tělese mohou být v prostoru orientovány v různých směrech a působit u tělesa až na šest vzájemně kolmých rovin.

Příkladem mechanického namáhání je osový tah (tlak), který působí pouze v jedné rovině tělesa (průřezu). Napětí  $\sigma$  definujeme jako velikost vnitřní síly, která je vztažena na jednotku plochy tělesa podle vztahu

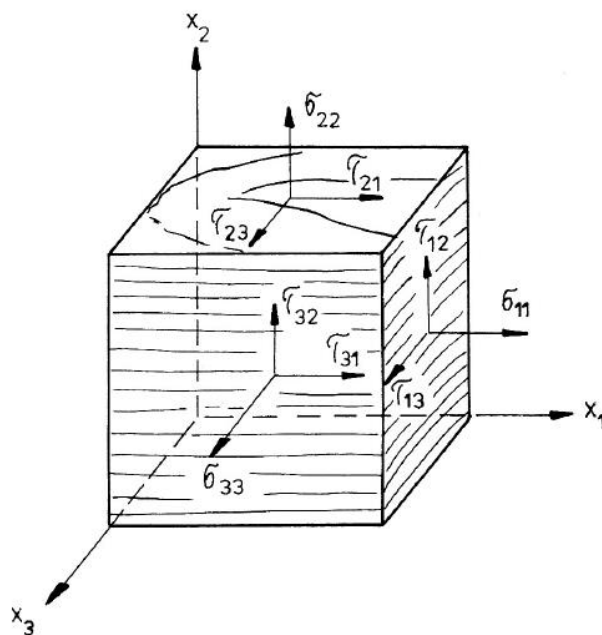
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (Pa) \quad (3.1)$$

kde  $F$  je vnější síla,  $S$  je plocha tělesa.

Jestliže síly působí kolmo na průřezovou plochu tělesa, jedná se o normálové napětí ( $\sigma$ ). Příkladem může být napětí v tahu nebo tlaku. Působí-li síly v rovině průřezu, vzniká tangenciální (smykové) napětí (THETA). Příkladem je napětí ve smyku. Kombinaci normálového a tangenciálního napětí představuje ohyb. Speciálním případem tangenciálního napětí je napětí v krutu. (Horáček, 2010)

Každý systém napjatosti v libovolném bodě prostoru je možné zobrazit pravoúhlým elementem jakým může být například jednoduchá kostka, a to tak aby její hrany byli rovnoběžné se zvoleným souřadnicovým systémem – karteziánský souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (Požgaj et. al., 1997).

Dřevo, ale i další materiály a kompozity, které jsou tvořeny vlákny, se nejčastěji potýkají se stavy napjatosti nejméně ve dvou směrech – podél vláken a napříč vláken. Tyto směry vláken ale nemusí nutně odpovídat samotnému založení orientace karteziánské souřadné soustavy ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).



Obrázek 11.: Orientace složek napětí v kostce dřeva dle pravoúhlého souřadného systému (Požgaj et. al., 1997)

Vektory napětí mohou být na každé ploše rozloženy do třech složek. Při označování vektorů napětí platí, že první dolní index označuje plochu, na kterou napětí účinkuje a druhý index označuje samotný směr složky napětí.

Na každou z ploch, ze které se kostka skládá tak připadají tři složky napětí (označující směr a plochu), což dává dohromady 18 složek napětí. Pro specifikaci kompletního stavu napjatosti kostky nám bude stačit složek napětí devět, tedy 3 pro každou základní rovinu odpovídající pravoúhlé soustavě souřadnic. Pro podmínku rovnováhy uvažujeme pravidlo:

$$\sigma_{11} = -\sigma_{11} ; \sigma_{22} = -\sigma_{22} ; \sigma_{33} = -\sigma_{33} \quad a \quad \tau_{21} = \tau_{12} ; \tau_{13} = \tau_{31} ; \tau_{32} = \tau_{23}$$

Těleso je tedy ve statické rovnováze (Požgaj et. al., 1997).

Tuto úvahu, lze zevšeobecnit rovnicí

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \quad (3.2)$$

kteřá je abstraktním vyjádřením všeobecně známé Einsteinovy sumační konvence.

Složky  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  a  $\sigma_{33}$  představují normálové napětí. Ostatní složky působí na plochu tangenciálně a jsou označeny jako smykové napětí. Tento stav napětí lze vyjádřit pomocí maticového zápisu, který dává do vztahu vektory třech složek sil a vektory jednotlivých ploch, z čehož dostáváme tenzor napětí  $\sigma$ :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Vztah 4.3.3 zobrazuje symetrii matice napětí (Požgaj et. al., 1997).

### 3.3.3 Základní deformace

Deformace je změna tvaru a rozměru dřeva vyvolaná působením mechanických sil. Po kvalitativní stránce se deformace dřeva rozdělují na deformace pružné, deformace pružné v čase a deformace plastické.

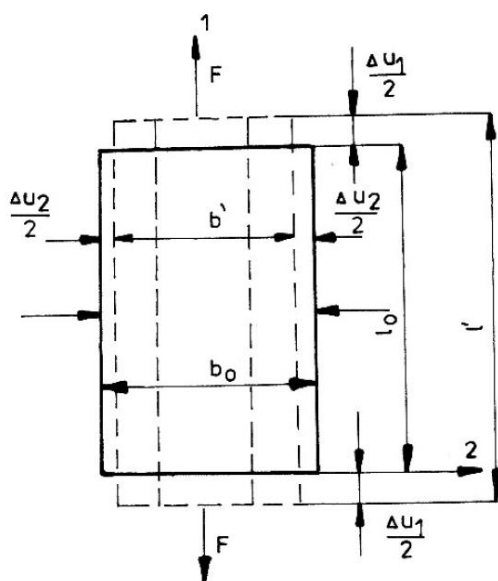
Deformace pružná je návratná změna dřeva po odstranění působících vnějších sil. Když je dřevo namáhané napětím, které vyvolá jen pružné deformace, mluvíme o stavu napjatosti v pružné oblasti. Pružná deformace v čase je změna vratná po uvolnění vnějších sil, která nenastává okamžitě, ale za určitý čas. Tyto deformace zařazujeme do pružné oblasti.

Trvalá deformace je nenávratná ani po uvolnění působících sil v jakémkoliv čase. Tělesu zůstávají deformace způsobené působícími silami. Stav napětí dřeva, při kterém se těleso trvale deformuje a vznikají i deformace pružné a pružné v čase, je stavem napjatosti v pružně-viskózně-plastické oblasti.

Dle působících napětí těleso reaguje příslušnou změnou svého tvaru, a tedy se deformuje (pružně nebo pružně a plasticky). Mezi působícím napětím a vnitřním odporem materiálu proti deformaci vzniká rovnováha.

Představme si dřevo namáhané v tahu ve směru vláken (obr.11)





Obrázek 12 - Změna tvaru tělesa při tahu (Požgaj et. al., 1997)

Vlivem působících vnějších sil se prodlouží a šířka tělesa se zúží o absolutní deformace  $\Delta u_1$  a  $\Delta u_2$ .

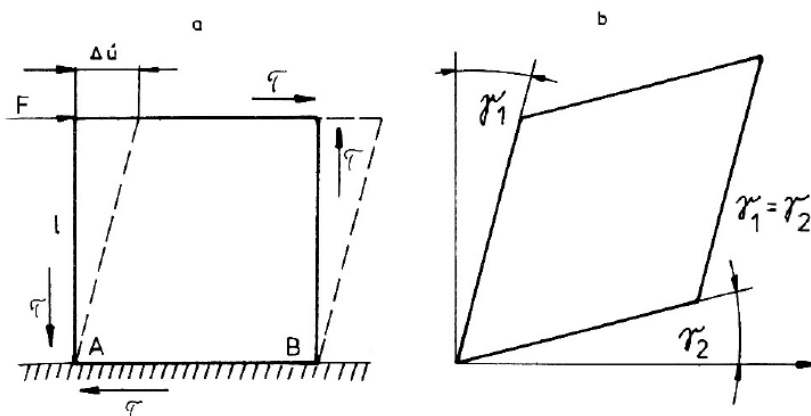
Poměrná pružná deformace ve směru působící síly se vypočítá

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta u_1}{l_0} \quad (3.4)$$

Poměrné příčné zkrácení se vypočítá

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta u_2}{b_0} \quad (3.40)$$

Kromě hlavních deformací vyvolaných normálovými napětími  $\sigma$  vznikají v tělese ještě deformace smykové působením tangenciálním napětím  $\tau$ . Tyto deformace vznikají posunutím dvou sousedních přířezů, ve kterých tangenciální napětí působí. Podoba tangenciálních deformací je zobrazena na obrázku 13.



Obrázek 13 - Deformace tělesa navozené smykovým napětím. (Požgaj et. al., 1997)

Pravý úhel základny tělesa se změní o hodnotu

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3.6)$$

a to proto, že těleso musí být po uvolnění sil v rovnováze.

Při tangenciálním napětí se mění pravoúhlost stran. V tom je hlavní rozdíl mezi deformacemi smykovými a deformacemi normálovými (Požgaj et. al., 1997).

Deformace vzniklé působením mechanických sil mohou mít podobu jednoduchého prodloužení nebo zkrácení. Kromě toho se dřevo může zkroutit. Prodloužení a zkrácení rozměrů jsou charakteristická pro normálová napětí a nazýváme je normálovými deformacemi  $\varepsilon$ . Kroucení tělesa vzniká při tangenciálních napětích a nazýváme jej smykovou (tangenciální) deformací  $\gamma$  (Horáček, 2010).

### 3.3.4 Deformace v prostoru

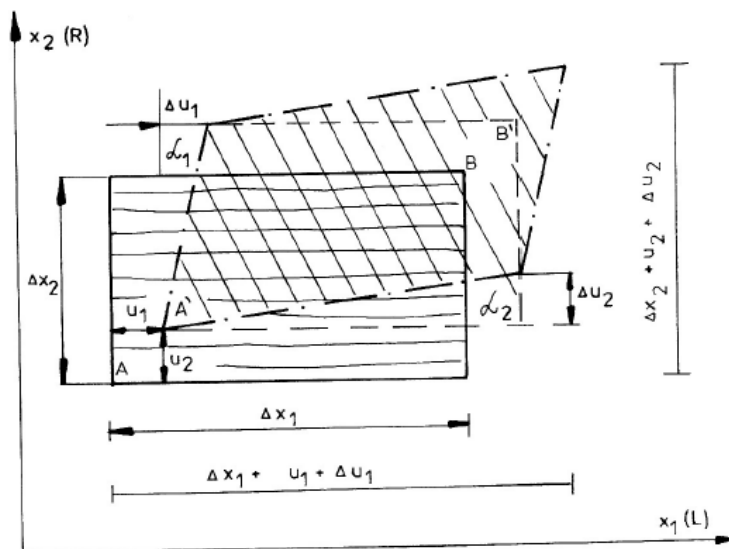
Prostorovými deformacemi označujeme deformace v rámci prostoru pravoúhlého souřadného systému.

Poměrná deformace  $\varepsilon_{11}$  ve směru osy  $x$  se potom definuje jako limita podílu

$$\varepsilon_{11} = \lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1} \quad (3.7)$$

Když uvažujeme s ortogonálním systémem, můžeme všeobecně vyjádřit všechny tři směry  $x, y, z$  ( $x_1, x_2, x_3$ ) ve tvaru

$$\varepsilon_{ij} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i} \quad (3.8)$$



Obrázek 14 - Deformace tělesa normálovými a tangenciálními silami ve dvourozměrném prostoru (radiální rovina) (Požgaj et. al., 1997)

Poměrnou smykovou deformace ve všeobecném tvaru definujeme jako

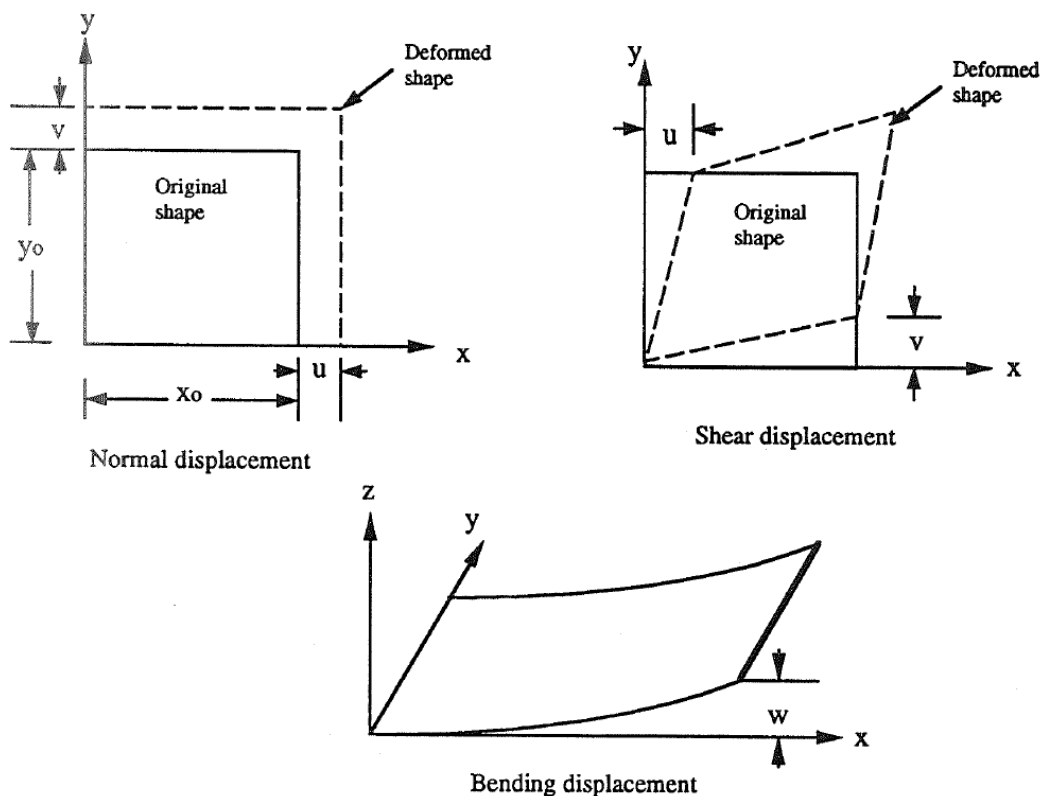
$$\gamma_{ij} = \lim_{\substack{\Delta x_i \rightarrow 0 \\ \Delta x_k \rightarrow 0}} \left( \frac{\Delta u_i}{\Delta x_j} + \frac{\Delta u_j}{\Delta x_i} \right) \quad (3.9)$$

Pro další použití v následujících kapitolách, lze deformace v jednotlivých směrech zapsat jako sloupcovou matici

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(Požgaj et. al., 1997).

Jednotlivé deformace po osách  $x$ ,  $y$  a  $z$  se dají pozorovat na základě posunutí daných bodů na tělese. Posunutí po ose  $x$  označujeme jako  $u$ , posunutí po ose  $y$  označujeme jako  $v$ . Jednotlivé deformace po osách a jejich posunutí působením smykových a normálových napětí je zobrazeno na obrázku 15 (Nettles, 1994).



Obrázek 15 - Posunutí (Požgaj et. al., 1997)

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} ; \varepsilon_y = \frac{dv}{dy} ; \gamma_{xy} = \left( \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (v)$$

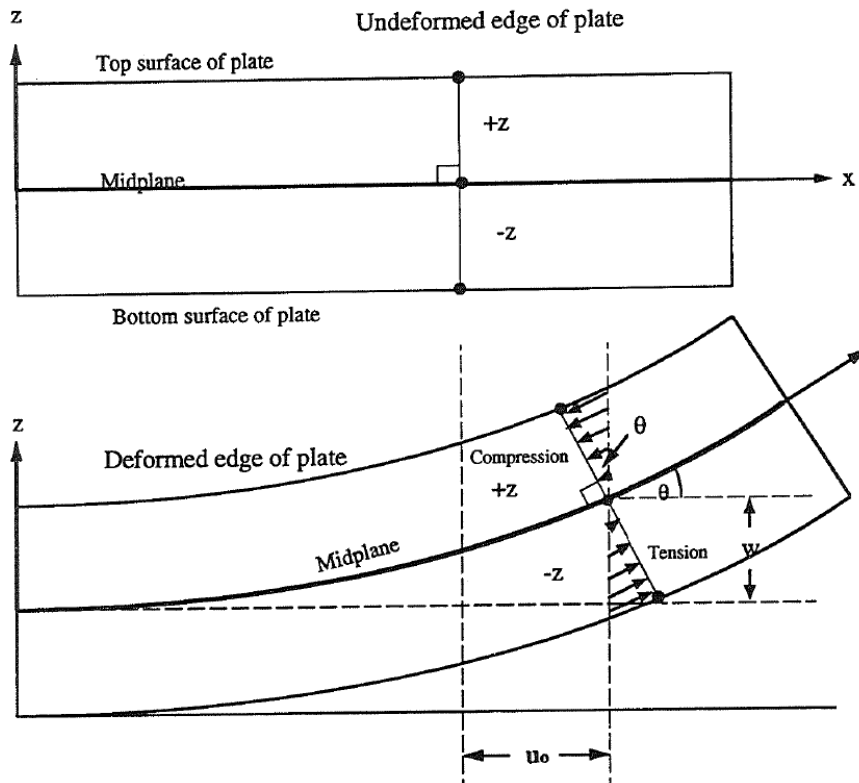
Změna ohybu desky po ose je definováno jako:

$$\frac{dw}{dx} \quad \text{po ose } x \quad (3.11)$$

$$\frac{dw}{dy} \quad \text{po ose } y \quad (3.12)$$

Celkové posunutí v rovině v jakémkoliv daném bodě je součtem normálových posunutí a posunutí navozené ohybem. Výsledné posunutí neutrální ve směrech osy  $x$  a  $y$ , respektive  $u_0$  a  $v_0$ , zobrazené na obrázku 16, jsou:

$$u = u_0 - z \frac{dw}{dx} ; \quad v = v_0 - z \frac{dw}{dy} \quad (3.13)$$



Obrázek 16 - Celkové posunutí v rovině (Nettles, 1994.)

Z předchozích rovnic:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} = \frac{du_0}{dx} - z \frac{d^2w}{dx^2} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} = \frac{dv_0}{dy} - z \frac{d^2w}{dy^2} \quad (3.15)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} = \frac{du_0}{dy} + \frac{dv_0}{dx} - 2z \frac{d^2w}{dxdy} \quad (3.16)$$

Deformace a posunutí bodu definujeme jako:

$$\frac{du_0}{dx_0} \quad \text{jako } \varepsilon_x^0 \quad (3.17)$$

$$\frac{dv_0}{dy_0} \quad \text{jako } \varepsilon_y^0 \quad (3.18)$$

$$\frac{du_0}{dx_0} + \frac{dv_0}{dy_0} \quad \text{jako } \gamma_{xy}^0 \quad (3.19)$$

Deformace zakřivení desky definujeme jako:

$$-\frac{d^2w}{dx^2} \text{ jako } K_x \quad (3.20)$$

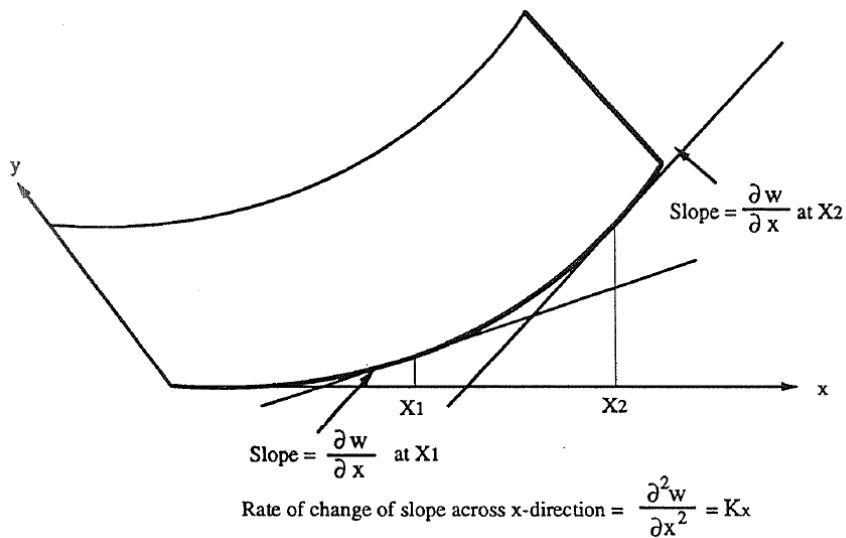
$$-\frac{d^2w}{dy^2} \text{ jako } K_y \quad (3.21)$$

$$-2 \frac{d^2w}{dxdy} \text{ jako } K_{xy} \quad (3.22)$$

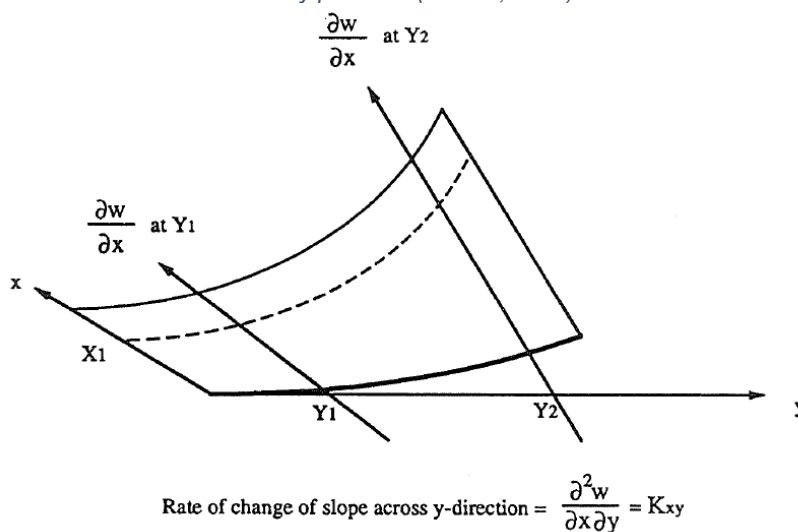
Rovnice 3.14, 3.15 a 3.16 mohou být tedy zapsány jako:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Zakřivení desky  $K_x, K_y$ , zobrazené na obrázku 17, je míra zakřivení vlivem ohybu v x-ové nebo y-ové ose. Zakřivení desky  $K_{xy}$  je potom míra zakřivení vlivem ohybu ve směru x-ové osy po délce osy y. (Nettles, 1994)



Obrázek 17 – Zakřivení desky po ose x (Nettles, 1994)



Obrázek 18 – Zakřivení desky po ose y (Nettles, 1994)

### 3.3.5 Pružnost

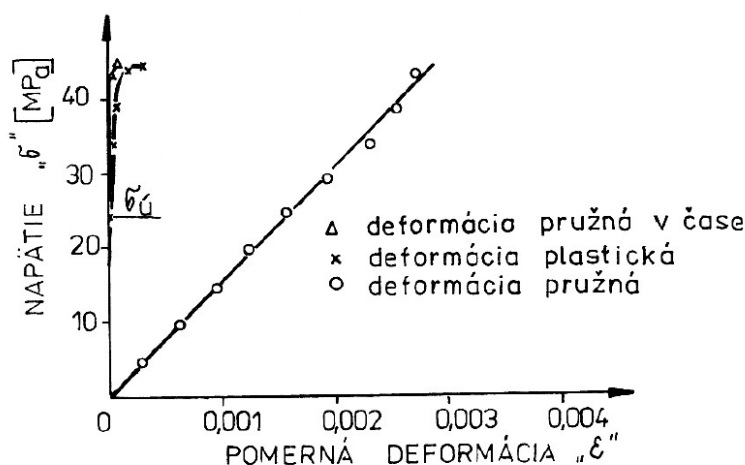
Pružnost kvantifikujeme těmito charakteristikami:

- Modul pružnosti (E)
- Poissonovo číslo ( $\mu$ )
- Mez úměrnosti ( $\sigma_{\dot{u}}$ )

#### 3.3.5.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřeba na vyvolání deformace.

Ze základních rozlišujeme moduly pružnosti E při normálových namáháních jako je tah, tlak a ohyb a moduly pružnosti G při tangenciálních namáháních jako jsou krut nebo smyk.



Obrázek 19 - závislost deformace a napětí (Požgaj et. al., 1997)

Z diagramu napětí-deformace vyplývá, že mezi úměrnosti jsou vztahy lineární (Požgaj et. al., 1997).

Vztah pro výpočet modulu pružnosti při normálových namáhání je

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (3.24)$$

kde  $\sigma$  je normálové napětí a  $\varepsilon$  je normálová deformace.

Vztah pro výpočet modulu pružnosti při smykových namáhání je

$$G = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (3.25)$$

kde  $\tau$  je smykové napětí a  $\gamma$  je smyková deformace.

Moduly pružnosti – jinak nazývané Youngovy moduly – vycházejí z Hookova zákona. představují důležité materiálové konstanty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí (Horáček, 2010).

Hodnoty modulů pružnosti E pro tuzemské dřeviny se pohybují v rozpětí od 7000 do 15000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti dřeva 12 %. Modul pružnosti G se pohybuje v rozpětí od 100 do 2000 MPa (Požgaj et. al., 1997).

### 3.3.5.2 Poissonovo číslo

Poissonova čísla jsou důležitou charakteristikou pružnosti dřeva a využívají se především při změnách objemových vlivem mechanického tažení.

Při namáhání tělesa tlakem nebo tahem dochází k prodloužení anebo zkrácení tělesa a s tím spojená deformace kolmo na směr tahové/tlakové síly. Takové deformace nazýváme deformacemi příčnými.

Poissonova čísla vyjadřují poměr příčné deformace k deformaci podélné. Například při tlaku rovnoběžně s vlákny vystupují dvě Poissonova čísla

$$\mu_{LT} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad a \quad \mu_{LR} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (3.26)$$

kde  $\varepsilon_3$  je příčná poměrná deformace v tangenciálním směru,  $\varepsilon_2$  je příčná poměrná deformace v radiálním směru,  $\varepsilon_1$  je poměrná příčná deformace ve směru vláken a v tomto případě i ve směru síly.

Tahovým deformacím přikládáme kladné znamínko a tlakovým záporné (Požgaj et. al., 1997).

Tabulka 13 - Poissonova čísla vybraných domácích dřevin (Požgaj et. al., 1997)

Dřevo	Zatížení podélné roviny v podélný směr		Zatížení příčné roviny		Zatížení podélné roviny v příčném směru	
	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$	$\mu_{32}$	$\mu_{21}$	$\mu_{31}$
Smrk	0,489	0,557	0,990	0,687	0,023	0,014
Dub	0,365	0,452	0,601	0,328	0,014	0,038
Topol	0,507	0,590	1,190	0,356	0,037	0,014

Poissonovo číslo  $\mu_{21}$  lze odvodit jako

$$\mu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \mu_{12} \quad (3.27)$$

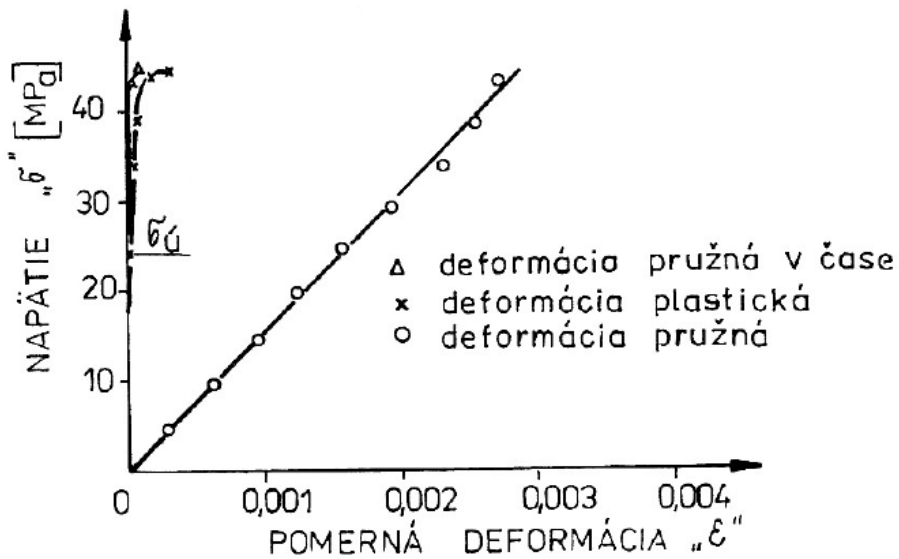
(Nettles, 1994).

### 3.3.5.3 Meze úměrnosti

Meze úměrnosti se stanovují vizuálně na diagramech napětí-deformace. Přesněji se určují na základě plastických deformací vznikajících ve dřevě. Zjednodušeně řečeno – jedná se o napětí, při kterém nevznikají plastické deformace.

Pokud napětí dřeva, ale i dřevěných kompozitů překročí mez úměrnosti, lineární úsek diagramu se odklání a pozvolně přechází do nelineárního průběhu.

Při trvalém zatížení se na rozdíl od krátkodobého dřeva chová jako viskózně-pružný materiál až po mez úměrnosti. Při trvalém zatížení už i při napětích pod mezí úměrnosti vznikají kromě pružných deformací i deformace pružné v čase a plastické deformace (Požgaj et. al., 1997).



Obrázek 20 - Závislost pružné deformace, deformace pružné v čase a plastické deformace od od napětí (Požgaj et. al., 1997)

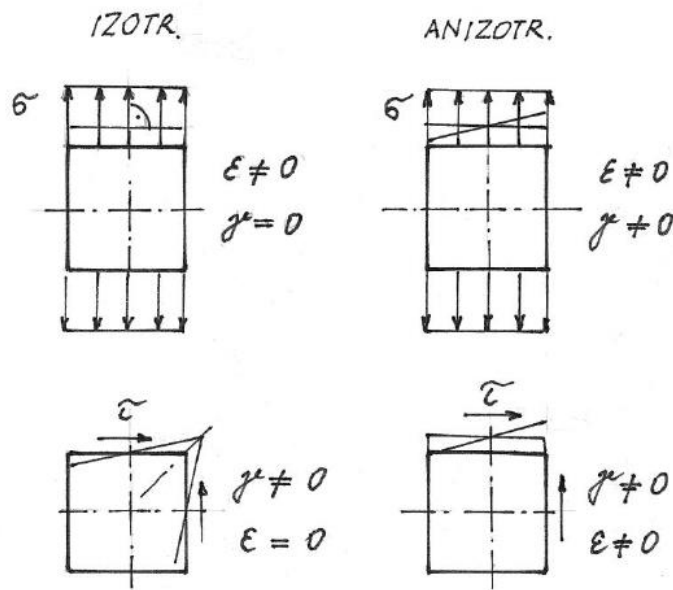
### 3.3.6 Mechanika anizotropních a ortotropních materiálů

Normálové napětí je definováno jako síla na jednotku plochy působící kolmo na rovinu. Odpovídající přetvoření je definováno jako prodloužení materiálu na jednotku délky ve směru působící síly. Pro izotropní materiály, vztah mezi napětím a přetvořením je nezávislý na směru působící síly, tím pádem je pro definování vztahu napětí-deformace potřeba jen jedna pružnostní konstanta (Youngův modul pružnosti) při síle působící v jedné ose. Pro ne-izotropické materiály je potřeba pro definici napětí-deformace alespoň dvou pružnostních konstant (Nettles, 1994).

Pokud je izotropní materiál namáhán v určitém směru pouze normálovým napětím  $\sigma$ , potom dochází pouze ke změně rozměrů a nikoliv tvaru, platí tedy  $\varepsilon = 0$ ,  $\gamma = 0$ . V případě působení smykového napětí dojde pouze ke změně tvaru, nikoliv rozměrů, tedy platí  $\varepsilon = 0$ ,  $\gamma \neq 0$ .

Pokud je anizotropní materiál namáhán v určitém směru pouze normálovým napětím  $\sigma$ , potom dochází ke změně rozměrů i tvaru, platí tedy  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\gamma \neq 0$ , což platí i v případě působení smykového napětí  $\tau$  (Vrbka, 2008).





Obrázek 21 - mechanické chování izotropního a anizotropního materiálu (Vrbka 2008)

Obrázek 21 je schéma celistvého izotropního materiálu. Houževnatost takového materiálu je definována jednou hodnotou, modulem  $E$  materiálu, a to nezávisle na orientace zatížení. Tuhost ortotropního (~ anizotropního) materiálu je musí být popsána alespoň dvěma materiálovými konstantami, jedna definující vlastnosti podél vláken a druhá napříč vlákny. Běžně jde o  $E_L$  (modul pružnosti materiálu ve směru vláken) a  $E_T$  (modul pružnosti materiálu napříč vláken).

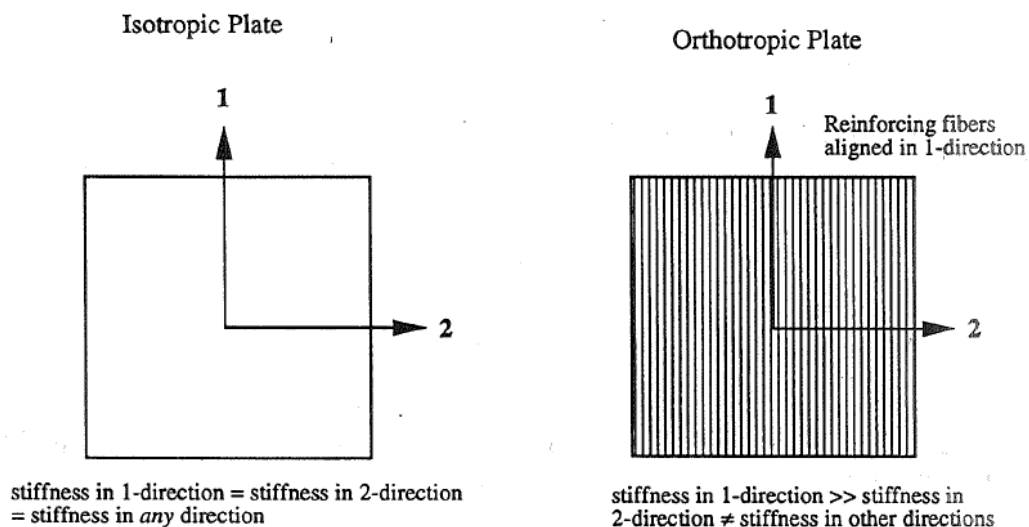
Pro další popis a definice bude použito značení 1 a 2, kdy  $E_1 = E_L$  a  $E_2 = E_T$ . Dolní indexy se pro značení používají pro napětí, přetvoření (deformace) a moduly pružnosti. Například pro izotropní materiál lze zápis zjednodušit jako

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.28)$$

Zatímco pro materiál ortotropní se musí směry/orientace specifikovat. Například:

$$\sigma_1 = E_1\varepsilon_1 \quad \text{nebo} \quad \sigma_2 = E_2\varepsilon_2 \quad (3.29)$$

Pokud vnější napětí působí kolmo nebo příčně na vlákna, pak je materiál považován za speciálně ortotropní (Nettles, 1994).



Obrázek 22 - Rozdíl mezi izotropním a ortotropním materiálem (Nettles, 1994)

### 3.3.6.1 Obecný anizotropní materiál

Jde o nejobecnější materiálový model. Hookův zákon je možné zapsat v následujícím tenzorovém tvaru

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (3.30)$$

případně v zúženém tvaru, který budeme dále používat

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \quad (3.31)$$

Z důvodů formálního zjednodušení byla použita Einsteinova sumační symbolika sčítání přes všechny indexy  $i, j, k, l$  resp.  $l, j$ .

Poslední vztah je možné vyjádřit maticově

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

V předchozím maticovém vztahu byla z důvodu jasného fyzikálního významu zavedena smyková napětí a zkos, a to v následujícím přiřazení

$$\sigma_4 = \tau_{23}; \tau_5 = \gamma_{31}; \sigma_6 = \tau_{12}; \varepsilon_4 = \gamma_{23}; \varepsilon_5 = \gamma_{31}; \varepsilon_6 = \gamma_{12} \quad (3.33)$$

V zjednodušeném maticovém tvaru vztah vyjádříme v symbolickém tvaru

$$\sigma = C\varepsilon \quad (3.34)$$

V rozepsaném maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

kde  $[\sigma]$  je tenzor napětí,  $C$  je matice tuhosti, resp. matice tuhostních materiálových konstant a  $[\varepsilon]$  je vektor přetvoření.

Matice tuhostních materiálových konstant  $C$  je tedy maticí symetrickou, která obsahuje v případě obecného anizotropního materiálu celkem 21 nezávislých materiálových konstant (Vrbka, 2008).

Některé z maticí  $C$ , lze definovat podle známých materiálových konstant:

$$C_{11} = \frac{E_{11}}{(1-\mu_{12}*\mu_{21})} \quad (3.35a)$$

$$C_{12} = C_{11}\mu_{21} \quad (3.35b)$$

$$C_{22} = \frac{E_{22}}{(1-\mu_{12}*\mu_{21})} \quad (3.35c)$$

$$C_{66} = G_{12} \quad (3.35d)$$

(Nettles, 1994).

V některých případech se používá Hookův zákon v inverzním tvaru, který vyjadřuje prvky vektoru přetvoření  $\varepsilon$  jako lineární kombinaci prvků vektoru napětí  $\sigma$ . Příslušné vztahy získáme tak, že Hookeův zákon v základním tvaru násobíme zleva interní maticí tuhosti  $[C]^{-1}$ , tedy

$$C^{-1}\sigma = C^{-1}C\varepsilon \quad (3.36)$$

Inverzní matici tuhosti  $[C]^{-1}$  se nazývá maticí materiálové poddajnosti s označením  $[S]$ , zapsáno matematicky

$$[S] = [C]^{-1} \quad (3.37)$$

Po náležitých matematických úpravách získáme vztah pro určení deformací, tedy

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

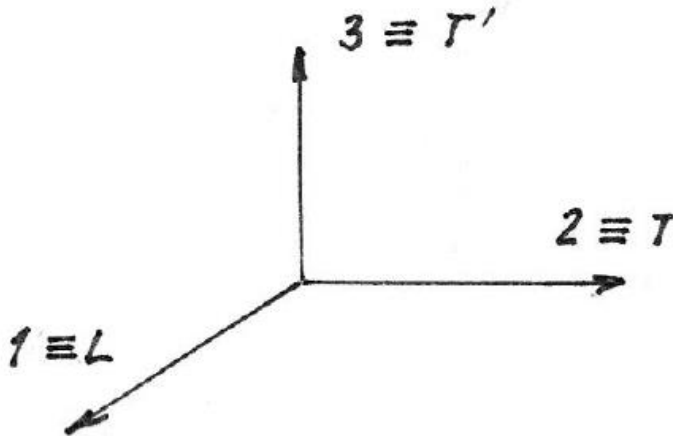
Matice materiálové poddajnosti  $[S]$  je stejně jako matice materiálové tuhosti  $C$  maticí symetrickou, kdy platí

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (3.39)$$

(Vrbka, 2008).

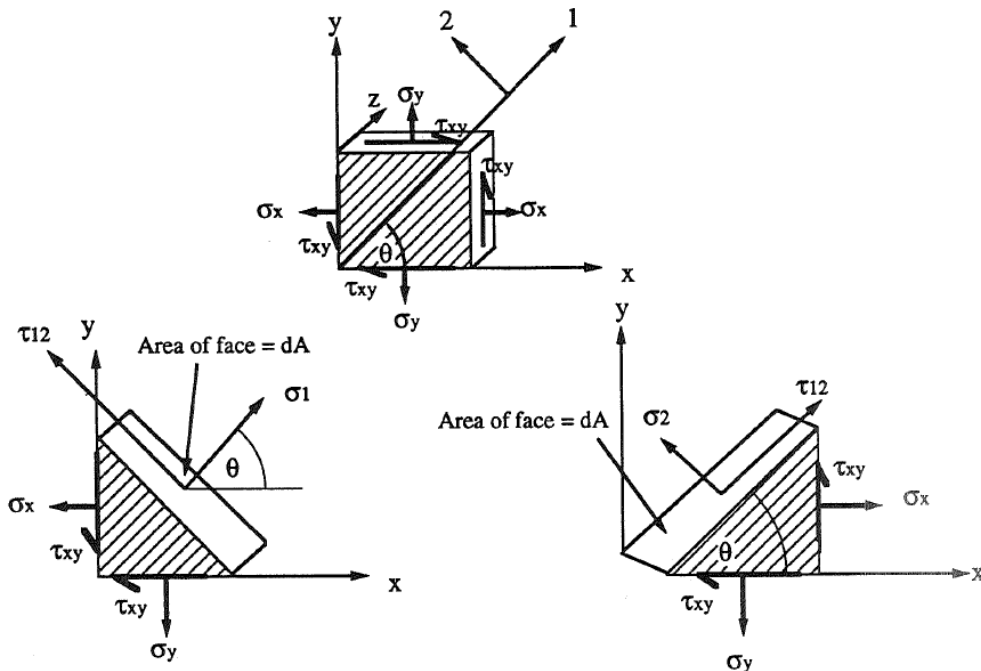
### 3.3.6.2 Obecně ortotropní materiál

Obecně ortotropní materiál musí splňovat podmínku, kdy zatížení je vůči materiálu orientováno pod úhlem jiným, než je  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Těleso je nyní považováno za obecně ortotropní, a to i proto, že zatížení není uvažováno v anatomických směrech materiálu (Nettles, 1994).



Obrázek 23 - hlavní ortotropní souřadnicový systém (Nettles, 1994)

Napětí a deformace v ortotropním materiálu musí být transformovány do souřadnic odpovídající orientaci vláken v tělese, tedy do anatomických směrů. Orientace jsou znázorněny na obrázku 23. pro případ, kdy síly působí ve 1-směru (Nettles, 1994):



Obrázek 24 - Obecně ortotropní těleso (Nettles, 1994)

Hookův zákon obecného ortotropního materiálu v hlavním ortotropním souřadnicovém systému odvodíme z Hookeova zákona obecného anizotropního materiálu s uvažováním charakteristiky ortotropních os

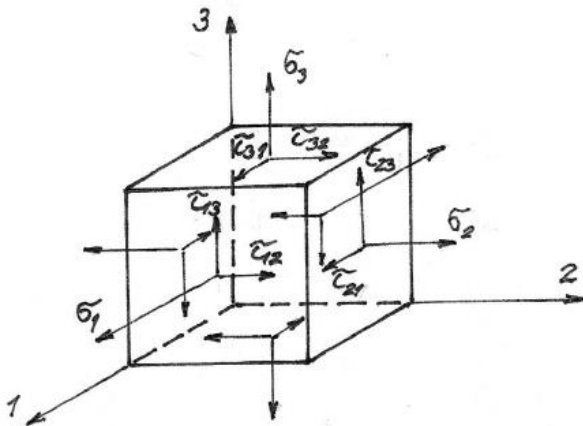
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

S uvážením symetrie obsahuje matice tuhosti [C] u obecného ortotropního materiálu celkem 9 nezávislých materiálových konstant.

Obdobnou úpravou Hookeova zákona v inverzním tvaru pro obecný anizotropní materiál obdržíme Hookův zákon obecného ortotropního materiálu

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Použitím principu superpozice pro zatěžování napětími v hlavních ortotropních směrech 1, 2 a 3 obdržíme vztahy pro poměrná přetvoření a zkos. Postupujeme přitom obdobně jako v případě pro izotropní materiál.



Obrázek 25 - Zatížení elementu obecného ortotropního materiálu v hlavních ortotropních směrech

Pro poměrná přetvoření a zkso v hlavních ortotropních směrech dostáváme

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{21} \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{31} \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (3.42)$$

$$\varepsilon_2 = -\mu_{12} \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{32} \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (3.43)$$

$$\varepsilon_3 = -\mu_{13} \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{23} \frac{\sigma_2}{E_2} + \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (3.44)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad (3.45)$$

$$\gamma_{31} = \frac{\tau_{31}}{G_{31}} \quad (3.46)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (3.47)$$

Indexy u složek napětí označují příslušné hlavní ortotropní směry, první index u Poissonových čísel představuje směr působení příslušného napětí, druhý index potom označuje směr kontrakce.

Předchozí složkové rovnice napíšeme v maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

A následně symbolicky

$$[\varepsilon] = [S][\sigma] \quad (3.49)$$

Matice poddajnosti  $S$  obsahuje celkem 12 technických materiálových parametrů.

Z podmínky symetrie pro matici materiálové poddajnosti  $S$  vyplývá velice důležitá vazba mezi technickými materiálovými parametry

$$\frac{\mu_{21}}{E_2} = \frac{\mu_{12}}{E_1} ; \frac{\mu_{31}}{E_3} = \frac{\mu_{13}}{E_1} ; \frac{\mu_{32}}{E_3} = \frac{\mu_{23}}{E_2} \quad (3.50)$$

Obecný ortotropní materiál má tedy 9 nezávislých parametrů, kterými jsou při použití technických materiálových veličin  $E_1, E_2, E_3, \mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{32}, \mu_{12}, \mu_{32}, \mu_{13}$  (Vrbka, 2008).

### 3.3.6.3 Rovinný ortotropní materiál

V případě rovinného ortotropního materiálu, pokud jsou souřadnicové osy 1, 2 hlavními ortotropními osami platí v souladu s maticovou relací pro obecný ortotropický materiál následující vztah pro Hookův zákon v základním tvaru

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Matice tuhosti [C] rovinného ortotropního materiálu tedy obsahuje čtyři nezávislé materiálové konstanty.

Inverzní tvar Hookova zákona vypadá v souladu s předešlými vztahy následovně

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Stejně tak matice poddajnosti S má ve sledovaném případě 4 nezávislé prvky.

Pokud nezávislé prvky S vyjádříme podle inženýrských materiálových konstant, potom má inverzní Hookův zákon následující tvar

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

opět se čtyřmi nezávislými inženýrskými materiálovými konstantami, jmenovitě  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_{21}$  a  $G_{12}$  (Vrbka, 2008).

### 3.3.7 Transformace napětí a deformací

Při použití dřeva a dřevěných kompozitů se často objevují situace, kdy orientace vláken v tělísku neodpovídá vyhovující souřadné soustavě. Orientaci vláken ve dřevě zobrazujeme anatomickou souřadnou soustavu. Ta může v ideálním případě odpovídat souřadné soustavě globální, v případě neideálního bude odklon vláken jiný než nulový. V takových případech nám neodpovídají směry, ve kterých vznikají deformace působením napětí a musíme využít transformaci.

Při transformaci budeme označovat dvě souřadné soustavy:

- Globální souřadná soustava (globální osy) ...  $\bar{x}_i$
- Anatomická souřadná soustava (anatomické osy) ...  $x_i$

Obecně mluvíme o vlastnostech napětí a deformace v ne-izotropních materiálech (Bodig & Jayne, 1993).

### 3.3.7.1 Transformace napětí

Pro transformaci napětí využijeme transformační matici  $T$  ve tvaru

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & +2(\sin\theta\cos\theta) \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2(\sin\theta\cos\theta) \\ -(\sin\theta\cos\theta) & +(\sin\theta\cos\theta) & (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

kde  $C$  a  $S$  vyjadřují goniometrické funkce sinus a cosinus úhlu odpovídajícímu odklonu vláken v anatomických osách od os globálních.  $\theta$  je pak úhlem odklonu vláken od globálních os.

Samotný vztah pro transformaci napětí zapisujeme ve tvaru

$$|\sigma| = |T_{\sigma}| |\bar{\sigma}| \quad (3.55)$$

kde  $|\sigma|$  je matice napětí působící v anatomických osách a  $|\bar{\sigma}|$  je matice napětí působící v geometrických osách.  $\theta$  je pak úhlem odklonu vláken od globálních os.

Alternativa tohoto zápisu může vypadat následovně:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T_{\sigma}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

kde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  a  $\sigma_{xy}$  odpovídá globálním osám a  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_{12}$  odpovídá osám anatomických.

Například, pro materiál s odklonem vláken  $60^\circ$  od geometrických souřadných os bude zápis vypadat následovně

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 60 & \sin^2 60 & +2(\sin 60 \cos 60) \\ \sin^2 60 & \cos^2 60 & -2(\sin 60 \cos 60) \\ -(\sin 60 \cos 60) & +(\sin 60 \cos 60) & (\cos^2 60 - \sin^2 60) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Předpoklady pro transformaci napětí (Bodig & Jayne, 1993):

- I. invariant
- Rovnovážná metoda
- Platí goniometrické vztahy
- Dosazením goniometrických vztahů do rovnovážné metody dostáváme obecný tvar transformace při působení všech složek napětí v obecných osách (geometrických)
- Trans. složky se pohybují po kružnici (Mohrova kružnice)
- V transformaci se objevují goniometrické funkce  $\sin(2\varphi)$  a  $\cos(2\varphi)$



### 3.3.7.2 Transformace deformací

Pro transformaci napětí využijeme transformační matici T ve tvaru

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & +(\cos\theta\sin\theta) \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -(\sin\theta\cos\theta) \\ -2(\sin\theta\cos\theta) & +2(\sin\theta\cos\theta) & (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

kde C a S vyjadřují goniometrické funkce sinus a cosinus úhlu odpovídajícímu odklonu vláken v anatomických osách od os globálních.

Samotný vztah pro transformaci deformací zapisujeme ve tvaru

$$|\varepsilon| = |T_{\varepsilon}| |\bar{\varepsilon}| \quad (3.58)$$

kde  $|\varepsilon|$  je matice deformací působící v anatomických osách a  $|\bar{\varepsilon}|$  je matice deformací působící v geometrických osách.

Alternativa tohoto zápisu může vypadat následovně

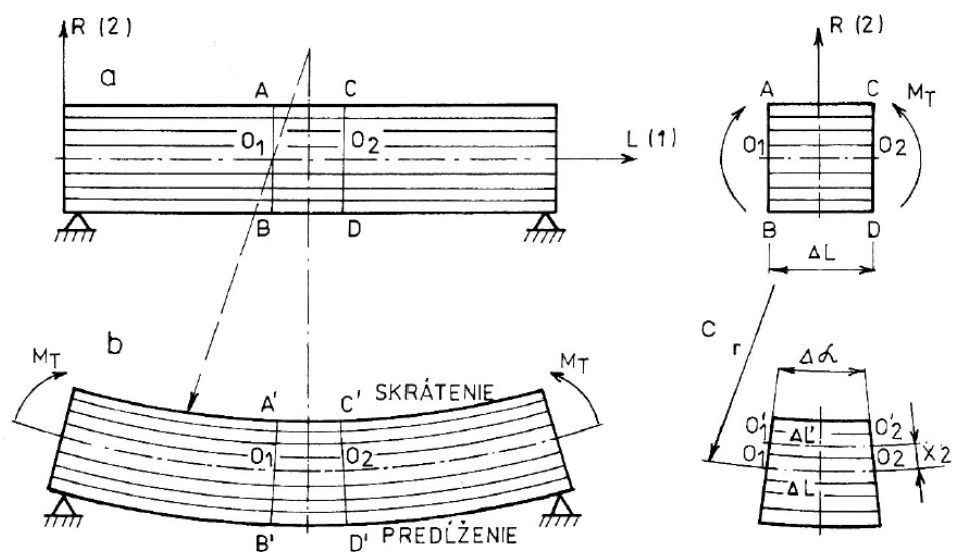
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [T_{\varepsilon}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

kde  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  a  $\varepsilon_{xy}$  odpovídá globálním osám a  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  a  $\varepsilon_{12}$  odpovídá osám anatomických (Bodig & Jayne, 1993).

### 3.3.8 Ohyb

Pokud otáčivý moment působí na těleso kolmo rovinu průřezu, vznikají v dřevě normálové a tangenciální napětí způsobující jeho natažení buď pootočením anebo ohybem. Ohybová teorie se uplatňuje pro dřevo nejen z hlediska použití na konstrukční účely, ale i při jeho tváření, především ohýbání dílců, sušení apod.

Představme si dlouhý prizmatický prut, který je složený z nekonečného počtu prutů, orientovaných ve vzdálenosti podpěr. Při zatížení jsou vlákna na konkávní straně namáhaná v tlaku a na konvexní straně v tahu. Vlákna v neutrální vrstvě jsou nezatížená. Při řešení stavu napětí a deformování takto namáhaného dřeva v ohybu přijímáme určité zjednodušení. Nosník je přímý, vnější zatížení působí v jedné rovině (rovinu zatížení) a současně je rovinou souměrnosti přířezu nosníku. V nedeformovatelném stavu je tato rovina kolmá na neutrální rovinu. Během deformování nosníku je rovina zatížení rovinou ohybové čáry.



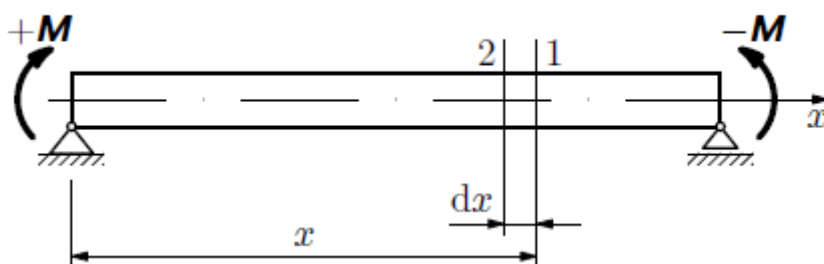
Obrázek 26 - čistý ohyb dřeva (nedeformovaný nosník a), deformovaný nosník b, c) (Požgaj et. al., 1997)

Při řešení rovnic v ohybu předpokládáme, že dřevo se chová jako dokonalé tuhé těleso (Požgaj et. al., 1997).

### 3.3.8.1 Ohyb nosníku

Nosník je důležitý konstrukční element přímého tvaru, který u stavebních konstrukcí slouží k zachycení vnějšího, převážně příčného, silového zatížení.

U nosníku namáhaného ohybovým momentem  $M = \text{konst.}$  provedeme myšlený řez 1 ve vzdálenosti  $x$  od levé podpory. Odříznutá levá část je na obrázku 27. Protože při prostém ohybu je posouvající síla  $Q$  nulová, působí v příčném řezu jen normálové napětí  $\sigma$ ; nosník je ve stavu jednoosé napjatosti. Působením ohybového momentu se určitá myšlená podélná „vlákna“ nosníku prodlužují, jiná zkracují. (Vybíral, [online])



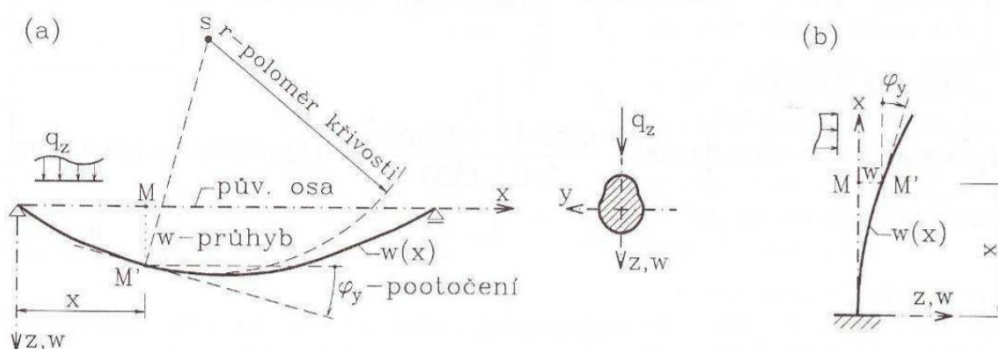
Obrázek 27 - Ohyb nosníku (Vybíral, [online])

### 3.3.8.2 Rovnice ohybové čáry

Rovnice ohybové čáry je výchozí rovnice pro staticky určité úlohy při řešení přetvoření ohýbaných nosníků (Krejsa, [online]).

Přetvoření (deformace) ohýbaných nosníků je třeba zjišťovat z důvodů, o nichž jsme se zmínili v kap. 1. Jde jednak o ověření, zda deformace – především průhyby – jsou v přijatelných mezích (posouzení podle mezního stavu použitelnosti), a dále je též stanovení deformací nezbytné k řešení staticky neurčitých prutových konstrukcí.

Je-li nosník (prut) dostatečně štíhlý, je jeho deformační stav určen tvarem ohybové čáry, tj. křivky, v níž přejde původně přímá osa nosníku vlivem zatížení. Na obrázku 28 je vyznačena ohybová čára  $w(x)$ , jejíž jednotlivé pořadnice označujeme jako průhyb nosníku v daném místě; kladný je průhyb, směřuje-li dolů. Pro průhyb svislého prutu zavedeme obdobně smysl veličin podle obrázku 28.



Obrázek 28 - ohybová čára nosníku (Šmiřák, 2000)

Pootočení, tj. úhel (v rad), který svírá tečna k ohybové čáře s osou  $x$ , budeme pokládat za kladné po smyslu chodu hodinových ručiček. V teorii malých deformací je  $\varphi < 1$ , takže platí

$$\varphi \approx \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{dw}{dx}, \quad (3.60)$$

(čárkami označujeme derivaci podle  $x$ ). U stavebních konstrukcí je ohybová čára velmi plochá  $\varphi < 0,02$ , takže zavedený vztah je velmi dobře splněn.

Z matematiky je znám výraz pro křivost rovinné čáry

$$\frac{1}{r} = -\frac{d^2w}{dx^2} \quad (3.62)$$

Zanedbáme-li vliv smyku na tvar ohybové čáry, tedy přisoudíme-li deformační účinky jen ohybovým momentům, pak dosazením rovnice do vztahu vyjde po úpravě

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M_y}{EI_y} \quad (3.63)$$

- diferenciální rovnice ohybové čáry 2. řádu. Druhý derivace ohybové čáry je tedy přímo úměrná ohybovému momentu  $M_y(x)$  v daném místě a nepřímo úměrná ohybové tuhosti  $EI_y$  ( $E$  – modul pružnosti,  $I_y$  – moment setrvačnosti k ose  $y$ ).

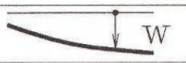

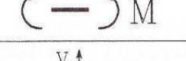
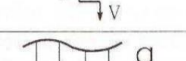
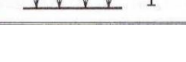
Je-li ohybová tuhost nosníku konstantní ( $EI_y = \text{konst.}$ ), pak dvojnásobným derivováním a využitím druhé a třetí rovnice, obdržíme

$$q = EI \frac{d^4 w}{dx^4}, \quad (3.64)$$

což představuje diferenciální rovnici 4. řádu: čtvrtá derivace průhybu je tedy úměrná příčnému spojitému zatížení.  $q$  je plošné zatížení.

Veškeré diferenciální vztahy jsou souhrnně uvedeny v tabulce 14. Vzhledem k tomu, že jsme se omezili na rovinný případ, jsou pro přehlednost vypuštěny indexy určující osy (Šmiřák, 2000).

Tabulka 14 - přehled diferenciálních závislostí – čárky nad  $w$  označují derivaci průhybu podle  $x$  (Šmiřák, 2000)

Označení a kladný smysl	Veličina	Diferenciální závislost	
		obecný případ	pro $EI = \text{konst.}$
	průhyb	$w$	
	pootočení	$\varphi = w'$	
	ohybový moment	$M = -EIw''$	
	posouv. síla	$V = -(EIw''')$	$V = -EIw''''$
	příčné zatížení	$q = (EIw''''')$	$q = EIw''''''$

### 3.3.8.3 Ohyb desky

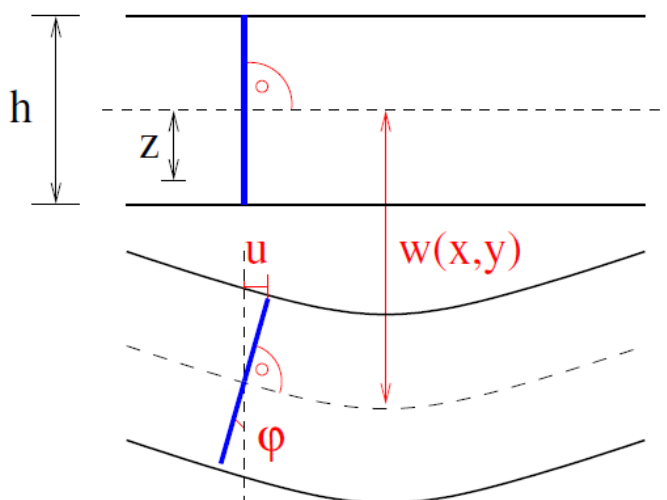
U desek je jeden rozměr (tloušťka) podstatně (5 a více krát) menší než rozměry ostatních. Je-li tloušťka 10 a více krát menší, pak desky označujeme jako tenké a můžeme k jejich analýze použít Kirchhoffovy teorie pro tenké desky, v opačném případě desky označujeme jako tlusté a měli bychom používat výstižnější Mindlinovy teorie.

Tato konvence pro použití jedné teorie pro tenké desky a druhé pro tlusté je orientační a samotnou Mindlinovu teorii můžeme využít i pro tenké desky. Řada FEM softwarů tak i funguje. Naopak použití Kirchhoffovy teorie pro tlusté desky vede k méně výstižným výsledkům, podobně jako aplikace norníkové teorie na stěny/desky (Brožovský, 2012).

#### 3.3.8.3.1 Kirchhoffova teorie tenkých desek

Předpoklady Kirchhoffovy teorie tenkých desek:

- Jednotlivé vrstvy desky na sebe netlačí  $\sigma_z = 0$
- Normálová napětí ve střednicové rovině jsou nulová
- Body ve střednicové rovině se mohou přemisťovat pouze ve směru osy  $z$ ,
- Normály střednicové roviny zůstávají i po deformaci přímé a kolmé k této rovině

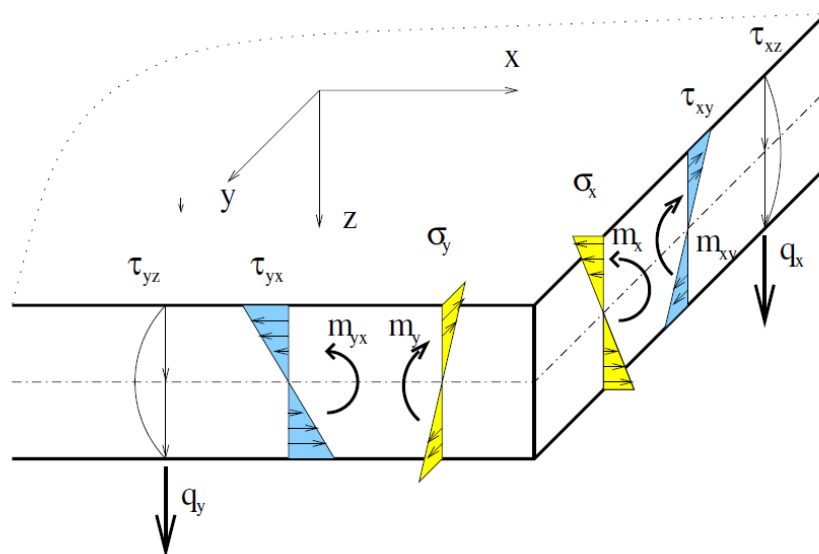


Obrázek 29 - Deska – předpoklad o normálách (Brožovský, 2012)

Vyobrazený předpoklad o normálách stejně jako u ohýbaných nosníků způsobuje lineární změnu normálových poměrných deformací  $\varepsilon$  a normálových napětí  $\sigma$  po tloušťce desky. Tedy prodloužení  $u$  (ve druhém směru pak  $v$ ) lineárně roste se zvětšující se vzdáleností  $z$  od střednicové roviny.

Z předpokladů Kirchhoffovy teorie vyplývá, že body ve střednicové rovině se mohou pohybovat jen po svislém směru  $w$  (tedy směru kolmém k nezdeformované střednicové ploše). Obdobně jako na nosnících můžeme pracovat s pootočením  $\varphi$  zdeformované střednicové plochy

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \frac{dw}{dx} \\ \varphi_y &= \frac{dw}{dy} \end{aligned} \quad (3.65)$$



Obrázek 30 - Napětí a vnitřní síly na desce (Brožovský, 2012)

Ve střednicové ploše desky je nenulové pouze posunutí  $w$  ve směru osy  $z$  systému souřadnic. Jak je ovšem vidět na obrázku 30, mimo střednicovou plochu jsou zbývající dvě (vodorovná) posunutí  $u$  a  $v$  obecně nenulová. Budeme-li předpokládat, že přibližně platí  $\tan(\varphi) = \varphi$ , pak můžeme v souladu s obrázkem psát

$$u = -z\varphi_x = -z \frac{dw}{dx}, \quad v = -z\varphi_y = -z \frac{dw}{dy} \quad (3.66)$$

K získání výrazu pro poměrné deformace se využití geometricko-deformačních vztahů pružnosti a dosadíme do nich za  $u$  a  $v$  výrazy podle předešlé rovnice (Brožovský, 2012).

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} = -z \frac{d^2w}{dx^2}$$

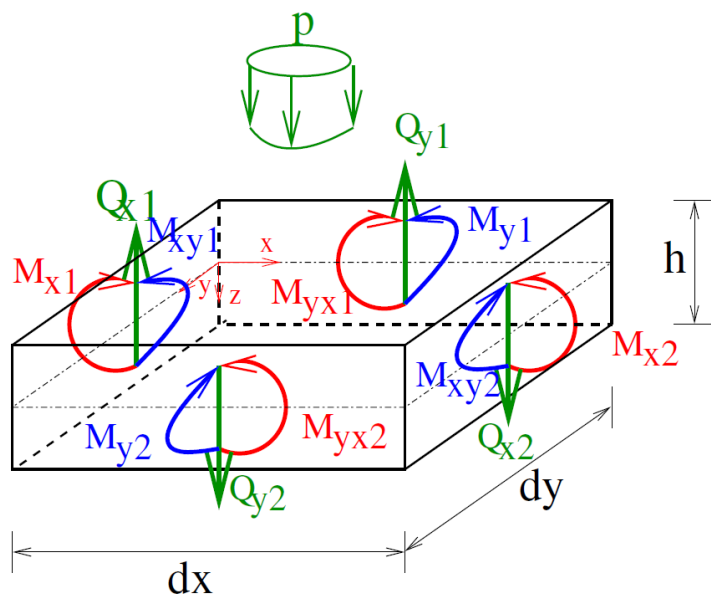
$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} = -z \frac{d^2w}{dy^2} \quad (3.67)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} = -2z \frac{d^2w}{dydx}$$

### 3.3.9 Okrajové podmínky

#### 3.3.9.1 Desková rovnice

V klasických postupech pro určování vnitřních sil a deformací desek se zpravidla vychází z řešení deskové rovnice. Je možné ji získat z podmínek rovnováhy na diferenciálním elementu desky, přičemž musíme mít stále na paměti, že dále uvedený platný jen pro desky z izotropního a lineárně pružného materiálu (Brožovský, 2012).



Obrázek 31 - vnitřní síly na elementu desky (Brožovský 2012)

Z desky vyhovující výše uvedeným předpokladům vytkneme element o rozměrech dx, dy a tloušťce h podle obrázku 31. Na element působí vnější plošné spojité zatížení p a na jeho okrajích působí měrné deskové síly.

Desková rovnice obsahuje tři neznámé měrné momenty. Ty však nejsou vzájemně nezávislé a všechny jsou funkcí průhybu w.

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + 2 \frac{d^2 M_{xy}}{dx dy} + \frac{d^2 M_y}{dy^2} = -p \quad (3.68)$$

Pokud dosadíme rovnici pro deskovou tuhost do rovnice 3.68, získáme deskovou rovnici (rovnici desky), (Brožovský, 2012).

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{p}{D} \quad (3.69)$$

Pro použití deskové rovnice v případě ortotropního materiálu, je potřeba rozepsat matici D do odpovídajících složek  $D_{ij}$  a vyjádřit „p“, níže pak označené jako „q“. Výsledná rovnice desky pak má následující tvar (Brdička, 2011):

$$q = D_{11} \frac{d^4 w}{dx^4} + 2(D_{11} + 2D_{66}) \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + 4D_{16} \frac{d^4 w}{dx^3 dy} + 4D_{26} \frac{d^4 w}{dx dy^3} + D_{22} \frac{d^4 w}{dy^4} \quad (3.70)$$

### 3.3.10 Laminární teorie

Předpoklady pro platnost laminární teorie (Shokrieh, 2014):

- Deska se skládá z ortotropní laminy s orientací vláken v libovolných směrech vzhledem k osám x-y
- Tloušťka desky t je výrazně menší než jakýkoliv charakteristický rozměr
- Posunutí u, v a w jsou ve srovnání s t malá.
- Smykové napětí je zanedbatelné,  $xz = yz = 0$  (rovinné napětí v každé vrstvě)
- Posunutí u a v se považují za lineární funkce tloušťky
- Předpoklady společně definují Kirchoffovu hypotézu
- Každá vrstva se řídí Hookovým zákonem
- Tloušťka desky je v celém laminátu konstantní
- Smykové napětí xz a yz vymizí na povrchu každé laminy,  $z = \pm t/2$

Aplikace matematické teorie pružnosti na laminátové konstrukce vyžaduje definování konstantních materiálových charakteristik ( $C_{ij}$ ) pro každou vrstvu k laminátu.

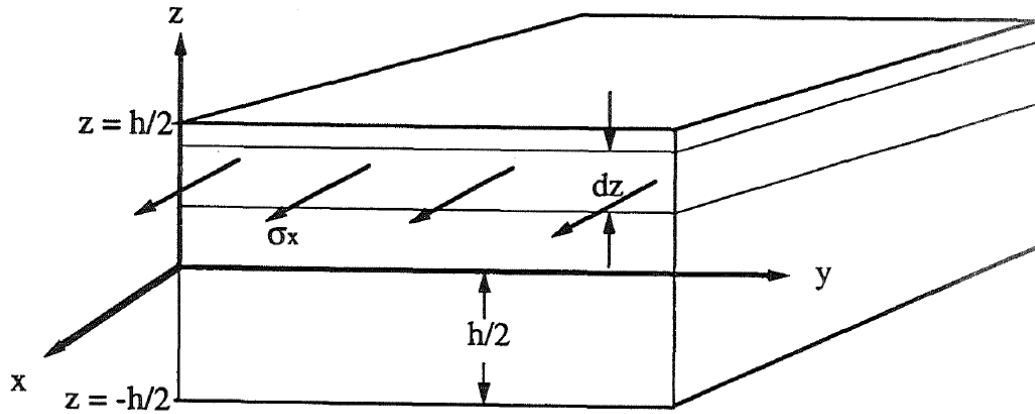
Z rovnice  $\sigma = C\varepsilon$  a rovnice 3.23, napětí v každé jednotlivé vrstvě k může být definováno jako:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

kde  $\bar{C}_{ij}$  je transformovanou maticí tuhosti (Nettles, 1994).

### 3.3.10.1 Definice napětí a momentu

Protože napětí v každé vrstvě se mění v závislosti na tloušťce laminátu, bude vhodné definovat napětí pomocí odpovídajících sil působících ve středové rovině. Na obrázku 32 je vidět, že napětí působící na hranu lze rozdělit na odpovídající složky a sečíst. Výsledný integrál je definován jako výslednice napětí a je označen  $N_i$ , kde dolní index  $i$  označuje směr. Výslednice napětí je definována jednotkou síly na plochu působící ve stejném směru, jak je zobrazeno na obrázku 32.



Obrázek 32 - Definice výslednice napětí (Nettles, 1994)

$$\text{Celková síla ve směru } x = \sum \sigma_x(dz)(y) \quad (3.72)$$

$$\text{kdy } dz \rightarrow 0, \quad \sum \sigma_x(dz) = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (3.73)$$

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (3.74)$$

Obrázek 31 může zobrazovat i napětí ve směru  $y$  a smykového napětí. Výslednice těchto napětí můžeme zapsat jako:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (3.75)$$

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (3.76)$$

$$N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \quad (3.77)$$



Jak je patrné z obrázku 32, napětí působící na hranu vytváří moment ve střední rovině. Zatížením je  $\sigma_x dz$ , jak je naznačeno na obrázku 32. Rameno momentu je ve vzdálenosti „z“ od střední roviny. Stejným postupem jako u výslednic napětí lze definovat momentové výslednice jako:

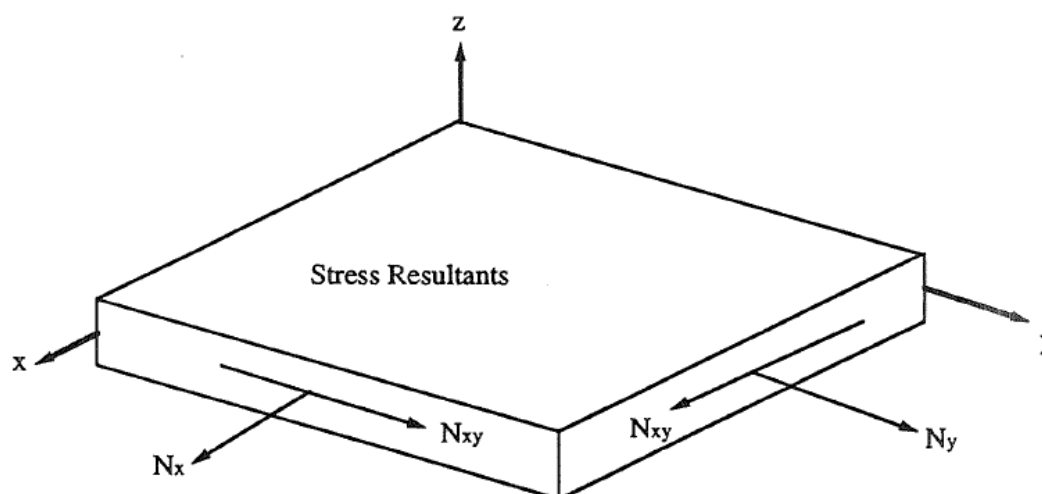
$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \quad (3.78)$$

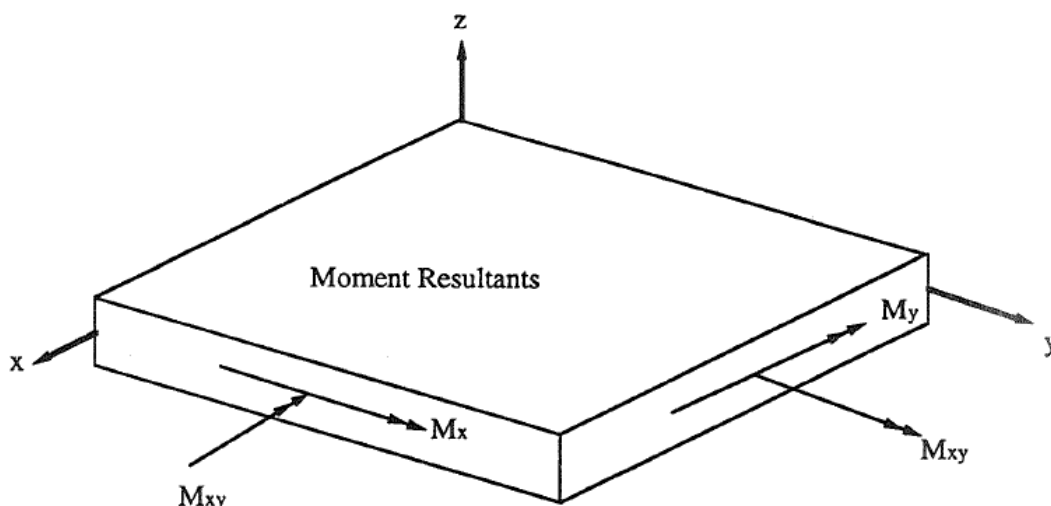
$$M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \quad (3.79)$$

$$M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz \quad (3.80)$$

Tyto momentové výslednice mají jednotku točivého momentu na jednotku délky.

Směry všech výslednic napětí a momentů jsou pro přehlednost uvedeny na obrázku 33. Šipka se dvěma hlavami označuje točivý moment ve směru určeném „pravidlem pravé ruky“. Momenty  $M_x$  a  $M_y$  způsobí ohyb desky a moment  $M_{xy}$  způsobí zhroucení desky (Nettles, 1994).





Obrázek 33 - Směr působení napětí a momentů (Nettles, 1994)

### 3.3.10.2 Konstitutivní rovnice pro laminát

Uvedení rovnic 3.75, 3.76, 3.77 do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (3.81)$$

a uvedení rovnic 3.78, 3.79, 3.80 do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (3.82)$$

Nyní lze rovnici 3.23 dosadit do rovnice  $\sigma = C * \varepsilon$ , kterou lze potom dosadit do rovnic 3.75, 3.76, 3.77 a 3.78, 3.79, 3.80 a dostat:

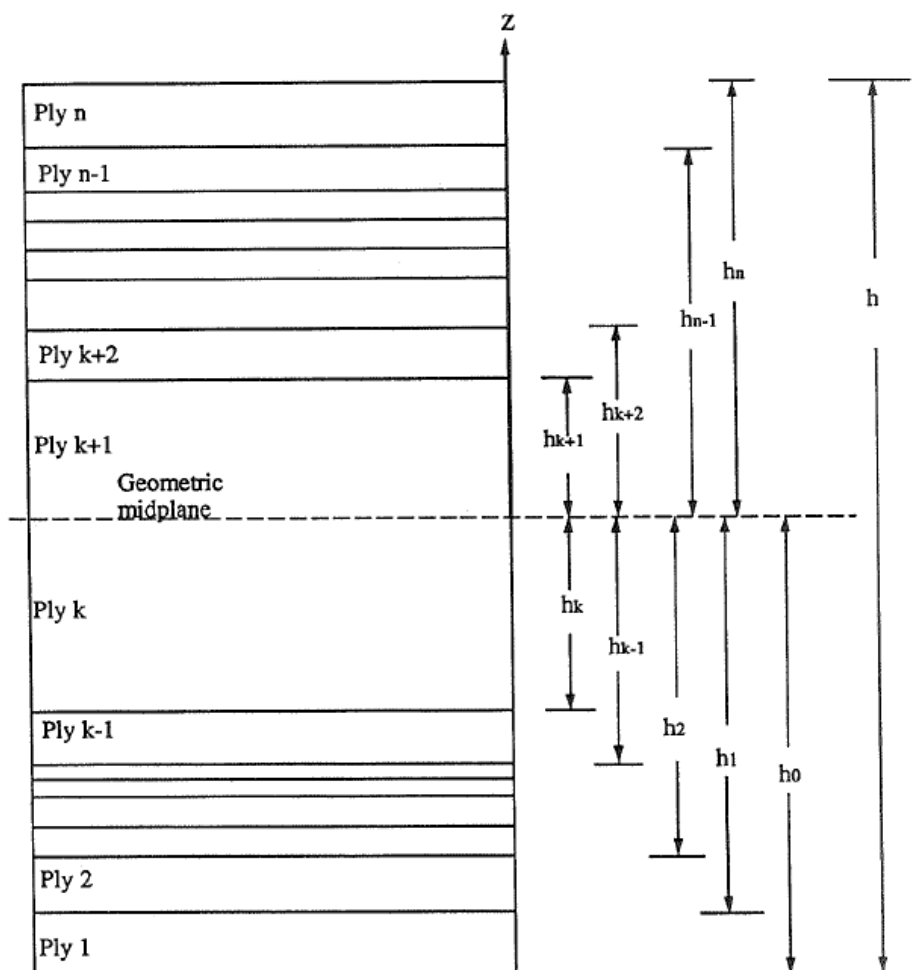
$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z dz \right\} , \quad (3.83)$$

a

$$\begin{bmatrix} M \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (3.84)$$

Na základě vztahů  $\sigma = C\varepsilon$  a 3.23 můžeme říct, že:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$



Obrázek 34 - Průřez laminátu (Nettles, 1994)

Dle obrázku 34, vrstva k a vrstva k+1 je stejná lamina, rozdělena do dvou vrstev středovou rovinou (Nettles, 1994).

### 3.3.10.3 Matice A, B, C, D

Vzhledem k tomu, že napětí a zakřivení ve středové rovině nejsou součástí součtů, lze matici tuhosti laminátu a termíny  $C_{ij}$  kombinovat a vytvořit tak nové matice A, B, D definované jako:

$$A_{ij} = \sum_{k+1}^n [C_{ij}]_k (h_k - h_{k-1}) , \quad (3.86)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k+1}^n [C_{ij}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) , \quad (3.87)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k+1}^n [C_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) , \quad (3.88)$$

kde **A** ... se nazývá extenzní maticí tuhostí, která se vztahuje na normálová napětí a deformace (podobně jako moduly pružnosti), s výjimkou složky  $A_{16}$  a výrazů vztahující smykové napětí k normálovým napětím a normálová ke smykovým. Když je pak  $A_{16}$  nenulové, a na laminát je aplikované smykové napětí, dojde k napětím normálovým a naopak.

**B** ... se nazývá matice tuhosti vazby, která vztahuje ohybové namáhání (zakřivení desky) s normálovým napětím a naopak. Složky  $B_{26}$  a se vztahují kroutící momenty k normálovým napětím a smykové namáhání k ohybovým napětím.

**D** ... se nazývá matice tuhosti v ohybu a souvisí s velikostí ohybů v rovině s ohybovými momenty.

Výsledná konstitutivní rovnice může být zapsána v maticovém tvaru jako:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ \hline M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & | & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & | & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & | & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ \hline B_{11} & B_{12} & B_{16} & | & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & | & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & | & D_{16} & D_{16} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \hline K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

A ve zjednodušeném tvaru jako:

$$\begin{bmatrix} N \\ \hline M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & | & B \\ \hline B & | & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \hline K \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

Částečně invertovaná forma rovnice 3.89:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \hline K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & | & B^* \\ \hline B^* & | & D^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ \hline K \end{bmatrix} , \quad (3.91)$$

kde:

$$[A^*] = [A]^{-1} \quad , \quad (3.92)$$

$$[B^*] = -[A]^{-1}[B] \quad , \quad (3.93)$$

$$[C^*] = [B][A]^{-1} \quad , \quad (3.94)$$

$$[D^*] = [D] - [B][A]^{-1}[B] \quad (3.95)$$

Plně invertovaná forma rovnice 3.89:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \hline K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{16} & | & B'_{11} & B'_{12} & B'_{16} \\ A'_{12} & A'_{22} & A'_{26} & | & B'_{12} & B'_{22} & B'_{26} \\ A'_{16} & A'_{26} & A'_{66} & | & B'_{16} & B'_{26} & B'_{66} \\ \hline C'_{11} & C'_{12} & C'_{16} & | & D'_{11} & D'_{12} & D'_{16} \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{26} & | & D'_{12} & D'_{22} & D'_{26} \\ C'_{16} & C'_{26} & C'_{66} & | & D'_{16} & D'_{16} & D'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ \hline M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad , \quad (3.96)$$

kde:

$$[A'] = [A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*] \quad (3.97)$$

$$[B'] = [B^*][D^*]^{-1} \quad (3.98)$$

$$[C'] = -[D^*]^{-1}[C^*] \quad (3.99)$$

$$[D'] = [D^*]^{-1} \quad (3.100)$$

Plně invertovaná forma rovnice 3.96 je nejpoužívanější formou konstitutivní laminátové rovnice (Nettles, 1994).

### 3.3.11 Pružná nestabilita

Desková rovnice (3.70) je vztahem pouze pro působení spojitěho zatížení  $q$ . Zahnutí osových sil do výpočtu lze pomocí vztahů 3.90 a 3.80, které při uvedení do rovnosti přepíšeme do vztahu

$$D \frac{d^2 w}{dx^2} = F w \quad (3.101)$$

ze vztahu 3.64, při vzetí do úvahu ohybová tuhost  $EI$  definována v Eurokódu odpovídá ohybové tuhosti definované laminární teorií maticí  $D$ , potom z mechaniky a základních matematických úprav dostáváme:

$$q = \frac{dM^2}{dx^2} = D \frac{d^4 w}{dx^4} = \left( D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \frac{d^0}{dx^2} \quad (3.102)$$

Z rovnice 3.102 a 3.101 můžeme konstatovat, že:

$$\frac{d0}{dx^2} \left( D \frac{d^2w}{dx^2} \right) = \frac{d0}{dx^2} (F * w) \quad (3.103)$$

$$\text{a tedy, že: } D \frac{d^4w}{dx^4} = F \frac{d^2w}{dx^2}$$

Na základě zákona superpozice [ (c) = (a) + (b) ] a z předešlých vztahů můžeme konstatovat, že

$$D \frac{d^4w}{dx^4} = q + F \frac{d^2w}{dx^2} \quad (3.104)$$

Při využití tohoto vztahu (3.104) ke vztahu deskové rovnice (3.70) lze rozšířená desková rovnice zapsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{d^4w}{dx^4} + 2(D_{11} + 2D_{66}) \frac{d^4w}{dx^2 dy^2} + 4D_{16} \frac{d^4w}{dx^3 dy} + 4D_{26} \frac{d^4w}{dx dy^3} + D_{22} \frac{d^4w}{dy^4} = \\ = q + (F_1 \frac{dw}{dx^2} + F_2 \frac{dw}{dy^2} + F_6 2 \frac{dw}{dxy}) \end{aligned} \quad (3.105)$$

## 4 Metodika

### 4.1 Vícevrstvá masivní deska Novatop Solid

Pro výpočet jsem zvolil CLT panel NOVATOP SOLID vyrobený z konstrukčního dřeva odpovídající pevnosti C24 dle EC5 (kapitola 2.2.9). Výpočet jsem provedl pro následující tloušťkové varianty:

- Panel o tloušťce 62 mm při tloušťce lamel 9 mm – 44 mm – 9 mm
- Panel o tloušťce 84 mm při tloušťce lamel 2x (9 mm – 24 mm – 9 mm)
- Panel o tloušťce 124 mm při tloušťce lamel 2x (9 mm – 44 mm – 9 mm)

a pro varianty závislé na orientaci vláken a to:

- Varianta s povrchovými vrstvami v podélném směru
- Varianta s povrchovými vrstvami v příčném směru

Jako referenční šířku jsem zvolil jednotkovou šířku a tedy 1,0 m, který je i udán v dokumentu pro předběžné dimenzování NOVATOP SOLID (viz. příloha 1)

V obou případech navrhování jsem použil stejné vstupní hodnoty, kterými jsou:

- Geometrie (rozměry, orientace vrstev)
- Moduly pružnosti
- Poissonova
- Zátěžové stavy
- Okrajové podmínky

### 4.2 Okrajové podmínky / Zátěžové stavy

Zátěžovým stavem je osově zatížení  $N_d$ , které odpovídá kombinačnímu součtu stálého a užitného zatížení upraveného modifikačními faktory a nahodilé zatížení větrem (tabulka 3) rovněž upravené modifikačními faktory. Ke stálému zatížení se přičítá vlastní objemová hmotnost (součin délky, tloušťky a hustoty panelu). Obě zatížení jsou definovaná v dokumentu pro předběžné dimenzování Novatop SOLID (viz. příloha 1) a pohybují se v charakteristických hodnotách pro:

- Charakteristické užitné zatížení  $q_k$  – 10 kN, 20 kN, 30 kN, 40 kN, 50 kN
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k$  – 10 kN, 20 kN, 30 kN, 40 kN, 50 kN, 60 kN
- Charakteristické nahodilé zatížení  $w_k$  – 0,5 kN/m

Kombinací těchto zatížení jsem dostal 30 zátěžových stavů, které aplikuji na každý z geometrických modelů.

Pro přepočítání charakteristických hodnot na návrhové hodnoty jsem použil modifikační faktory z kapitoly 2.2.7 a tím určil návrhové normálové osově zatížení v ose panelu  $N_d$  a nahodilé návrhové zatížení kolmo na osu panelu  $w_d$ . Výpočet počítá s třídou provozu 1, která je určena dokumentem Novatop SOLID (viz. příloha 1).

Pro přesnost a podobnost jsem zátěžové stavy vstupující do navrhování podle eurokódu, zvolil také pro navrhování podle matematické teorie pružnosti.

*Příklad výpočtu:*

*Pokud mám stálé zatížení  $g_k$  včetně vlastní hmotnosti, užité zatížení  $q_k$  v ose panelu, nahodilé zatížení  $w_k$  příčně k ose stěny a třída provozu je 1, potom podle kapitoly 2.2.6. a tabulky 7 můžu stanovit návrhová zatížení jako:*

$$N_d = 1.35(g_k + tl\rho) + 1.5q_k$$

*t – tloušťka panelu [m], l – délka panelu [m],  $\rho$  – hustota panelu*

$$w_d = 1.5w_k$$

Okrajové podmínky jsou popsány na obrázku 4.

### 4.3 Navrhování podle Eurokódu 5

Navrhování jsem prováděl podle zásad, pravidel a postupů Eurokódu 5, ze kterého vychází technický požadavek ETA-12/0079 a norma DIN EN 1995-1-1/NA/A1 (2012-02), která je platná pro Německo, a kterou Novatop používá pro předběžné dimenzování (viz. příloha 1).

Norma ETA-12/0079 vychází z Eurokódů, je adaptací všeobecné normy na lokální, a tedy charakteristické pevnostní hodnoty a modifikační faktory jsou hodnotami podobné, ne však stejné (kapitola 2.2.1). Norma udává postup pro řešení zatížení vně a příčně ke směru stěny při vertikálním směru povrchové vrstvy.

#### 4.3.1 Výpočet

Cílem analytického výpočtu je ověření požadavku uvedeném rovnicí 1.27. Výpočet je založen na EC5 a je proveden podle normy ETA-12/007. Příslušné hodnoty jsem našel v dokumentu pro předběžné dimenzování Novatop SOLID (viz. příloha 1).

##### 4.3.1.1 Charakteristické a průřezové pevnostní hodnoty materiálu

Pevnostní průřezové hodnoty pro stěnu o výšce 2400 mm jsem převzal z dokumentu pro předběžné dimenzování Novatop SOLID (viz. příloha 1), které jsou rozepsané v tabulce 2.

Charakteristické pevnostní hodnoty pro dřevo C24, které Novatop pro předběžné dimenzování používá, pocházejí z normy DIN EN 1995-1-1/NA/A1, ke které jsem se nedostal. V dokumentu pro předběžné dimenzování Novatop SOLID (viz. PŘÍLOHA 1) jsou uvedené jen některé charakteristické hodnoty, a proto jsem si pomohl charakteristickými hodnotami podle Design of Timber Structures – Volume 2, které jsou uvedené v tabulce 10.

##### 4.3.1.2 Výpočet vnitřních sil

Výpočet maximální návrhové osově síly  $N_d$  a maximálního nahodilého návrhového zatížení větrem  $w_d$  jsem provedl na základě kombinačních faktorů  $\psi_i$  z kapitoly 2.2.7. Maximální moment  $M_d$  jsem získal ze vztahu 1.37, maximální smykovou sílu  $V_d$  pak ze vztahu 1.38.

Excentricita  $e$  je daná jako 10 mm pro panel o tloušťce 62 mm, 15 mm pro panel o tloušťce 84 mm a 40 mm pro panel o tloušťce 124 mm.



### 4.3.1.3 Návrhové napětí a pevnosti

Pro výpočet návrhového napětí v tlaku  $\sigma_{c,0,d}$  jsem použil vztah 1.31 a k výpočtu návrhové napětí v ohybu  $\sigma_{m,d}$  jsem použil vztah 1.32. Efektivní plochu  $A_{eff}$  ze vzorce 1.31 jsem určil tak, že na základě tloušťkové varianty panelu, jsem sečetl tloušťky všech vrstev, které nejsou příčné k ose panelu. Průřezový model  $W$  ze vztahu 1.32 jsem určil vztahem 1.35.

Návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$  jsem určil vztahem 1.28 a návrhovou pevnost v ohybu  $f_{m,d}$  jsem určil vztahem 1.29. Modifikační faktor materiálu  $\gamma_m$  vychází z tabulky 8. Modifikační faktor pevnosti  $k_{mod}$  jsem převzal z tabulek předběžného dimenzování Novatop SOLID. Příklady tohoto faktoru  $k_{mod}$  jsou zobrazené v tabulce 6 a jsou závislé na době zatížení konstrukčního prvku, materiálu konstrukčního prvku a třídy provozu, která je třídou 1 podle NOVATOP SOLID.

Součinitel vzpěrnosti  $k_{c,y}$  jsem určil vztahem 1.30, ke kterému jsem potřeboval ještě součinitel imperfekce  $\beta_c$  z kapitoly 2.2.10.16.1, poměrnou štíhlost  $\lambda_{rel,y}$  ze vztahu 1.34, efektivní délku  $l_{eff}$  a poloměr setrvačnosti  $i$  ze vztahu 1.36.

### 4.3.1.4 Posouzení únosnosti

Posouzení únosnosti jsem provedl podle požadavku vyplývajícího ze vztahu 1.27, který dává do vztahu návrhové napětí v ohybu  $\sigma_{m,d}$ , příslušnou návrhovou pevnost v ohybu  $f_{m,d}$  s návrhovým napětím v tlaku  $\sigma_{c,0,d}$ , příslušnou návrhovou pevností v tlaku  $f_{c,0,d}$  a součinitelem vzpěrnosti  $k_{c,y}$ .

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

Vztah udává jednoduchou podmínku, která musí být splněna pro ověření únosnosti panelu. Posouzení únosnosti jsem provedl pro kombinace všech zátěžových stavů vyplývajících z tabulky 3 a tyto kombinace zase pro všechny varianty geometrie panelu o výšce 2400 mm – tedy pro tloušťky 62 mm, 84 mm a 124 mm, jak je vidět na obrázku 2 a to v kombinacích Q/L (orientace povrchových vrstev), jak je vidět na obrázku 5.

Proměnná v těchto výpočtech byla především efektivní plocha  $A_{eff}$ , která se mění s tloušťkou a orientací povrchových vrstev panelu. Dále pak efektivní ohybová tuhost  $EI_{eff}$ , která je jiná pro každou tloušťku a pak návrhová zatížení vzniklá kombinací konkrétních zatížení.

Každý daný geometrický model (typ panelu) při daném zatížení tedy musí splňovat jednu výše zmíněnou podmínku únosnosti.

### 4.3.2 Příklad výpočtu podle EC5

Pro příklad uvedu jeden konkrétní výpočet posouzení únosnosti podle EC5 (ETA-12/0079, DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02, 2012) pro panel o výšce 2700 mm, skladbě vrstev 2x(9p-24q-9q), celkovou tloušťkou 84mm a pevností C24. (viz Příloha 1)

**Charakteristické hodnoty:**

$$E_{0,mean} = 11600 \text{ N/mm}^2 \quad EI_{eff} = 2,82 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2 \quad f_{c,0,k} = 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_{def} = 0,6 \quad k_{mod} = 0,8$$

**Zatížení:**

$$\text{Stálé zatížení } g_k = 20 \text{ kN/m} \quad \text{Nahodilé zatížení (větrem) } w_k = 1,5 \text{ kN/m}$$

$$\text{Užitné zatížení } q_k = 30 \text{ kN} \quad \text{Třída provozu} = 1$$

**Výpočet vnitřních sil:**

$$N_d = 1,35 \cdot (0,084 \cdot 5,0 \cdot 2,7 + 20) + 1,5 \cdot 30 = 73,53 \text{ kN}$$

$$w_d = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 \text{ kN/m}$$

**Maximální moment ( $e = 0,015 \text{ m}$ ):**  $M_d = \frac{w_d l^2}{8} + N_d e = 1,79 \text{ kNm}$

**Maximální příčná (smyková) síla:**  $V_d = \frac{w_d l}{2} = \frac{0,75 \cdot 2,7}{2} = 1,01 \text{ kNm}$

**Posouzení únosnosti – posouzení ohybu a tlaku:**

$$W = \frac{EI_{eff}}{E_{0,mean}} = 5,77 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad z_s = \frac{h}{2} = 42 \text{ mm} \quad \beta_c = 0,1$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{l_{eff}}{\pi i} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,0,05}}} = 1,648 \quad i = \sqrt{\frac{EI_{eff}}{E_{0,mean} A_{eff}}} = 25,99 \text{ mm}$$

$$k_y = \frac{1}{2} \{1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2\} = 1,925 \quad k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0,342$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{eff}} = \frac{73,53 \cdot 1000}{9 \cdot 4 \cdot 1000} = 2,04 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{1,79 \cdot 10^6}{6,77 \cdot 10^5} = 3,1 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} = 14,77 \text{ N/mm}^2 \quad f_{m,d} = \frac{f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_m} = \frac{24 \cdot 0,8}{1,3} = 14,77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Posouzení:**

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,04}{0,342 \cdot 14,77} + \frac{3,1}{14,77} = 0,61 \leq 1,0$$

## 4.4 Navrhování podle matematické teorie pružnosti

Při navrhování byla zanedbána vlhkost, rozdíl v kvalitě povrchových vrstev od vrstev nepovrchových a vliv lepidla a lepené spáry. Výsledky se tedy budou mírně lišit od případného experimentu. Navrhování podle matematické teorie pružnosti jsem provedl metodou konečných prvků (FEM).

Pro výpočty týkající se postupu podle matematické teorie pružnosti jsem použil skriptový software FlexPDE ([www.pdesolution.com](http://www.pdesolution.com)), který umožňuje rychlé numerické výpočty parciálních diferenciálních rovnic, výpočty závislé na proměnných a následné vykreslení a vypsání výsledků na základě odpovídajícího skriptu.

Skript systému FlexPDE, který jsem musel vytvořit, má předepsanou strukturu povinně obsahující následující složky:

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| • Tittle (název)                      | Název skriptu                           |
| • Variables (proměnné)                | Závislé proměnné                        |
| • Definitions (definice)              | Vstupní neproměnné a funkce             |
| • Initial values (počáteční podmínky) | Počáteční hodnoty proměnných            |
| • Equations (rovnice)                 | Rovnice příslušné k závislým proměnným  |
| • Boudaries (okrajové podmínky)       | Okrajové podmínky                       |
| • Monitors & Plots (zobrazení)        | Požadované grafické a tabulkové výstupy |
| • Summary (zobrazení)                 | Požadované textové výstupy              |
| • End (Konec)                         | Označení konec skriptu                  |

### 4.4.1 Výpočet

Cílem výpočtu založeného na matematické teorie pružnosti bylo ověřit, zda napětí působící v jednotlivých vrstvách panelu nepřekračují návrhovou pevnost panelu vyplývající z návrhové pevnosti materiálu, kterou je materiál C24 z tabulky 10.

Zvolený materiál, geometrie, pevnostní a průřezové charakteristiky a další vyplývají z hodnot uvedených v dokumentu Novatop SOLID (viz příloha 1), s jediným rozdílem a to tím, že charakteristické hodnoty, které Novatop přebírá z normy DIN EN 1995-1-1/NA/A1, a které nejsou zmíněné v Novatop SOLID, jsem si sám doplnil o hodnoty podle Design of Timber Structures – Volume 2, ke které jsem měl na rozdíl od zmíněné normy přístup. Hustota materiálu (smrk) byla zvolena na základě Štruktura dřeva (Požgaj) a stejně tak hodnoty pro koeficienty příčné deformace.

## 4.4.2 Struktura skriptu

V následujících kapitolách rozeberu strukturu skriptu.

### 4.4.2.1 Definice (definitions)

Podle struktury skriptu FlexPDE jsou definice širokým pojmem. Jako definice jsou chápány vstupující konstantní hodnoty a zároveň funkce a rovnice použité pro další postup. Pro přehled jsem si v rámci jednoho výpočtu definice rozdělil na samotné definice výpočtu a na část laminární teorie.

Mezi definiční část patří zejména:

- Výška  $L_1$  a šířka  $L_2$  panelu
- Tloušťky jednotlivých vrstev  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$
- Orientace jednotlivých vrstev  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$
- Modul pružnosti v podélném směru  $E_{11}$ , modul pružnosti v příčném směru  $E_{22}$  a smykový modul  $G_{12}$
- Koeficienty příčné deformace  $n_{12}, n_{21}$
- Hustota  $\rho$
- Návrhové plošné zatížení  $q (w_d)$  (nahodilé návrhové zatížení větrem – kapitola 4.2)
- Návrhové osově zatížení  $N (N_d)$  (kombinace stálého zatížení a užitého zatížení – kapitola 4.2)

Mezi část laminární teorie pak:

- Matice tuhosti  $C$
- Transformované matice tuhosti  $C$  do jednotlivých vrstev panelu
- Extenzivní matice tuhosti  $A$
- Matice tuhosti vazby  $B$
- Ohybová matice tuhosti  $D$
- Ohybový moment  $M$
- Deformace  $\varepsilon$
- Deformace  $K$
- Vnitřní napětí  $\sigma$

#### 4.4.2.1.1 Definice

Výšku panelu  $L_1$  jsem zvolil 2,4 m (obrázek 3) pro všechny výpočty a šířka panelu  $L_2$  je referenční jednotkovou šířkou 1 m. Tloušťka jednotlivých vrstev  $h$  a jejich orientace  $\alpha$  závisí na typu panelu (obrázek 2 a 5). Všechny tyto vstupní hodnoty jsem nadefinoval na základě dokumentu pro předběžné dimenzování Novatop SOLID (viz. příloha 1).

Moduly pružnosti pro materiál C24 (tabulka 10) jsem našel v tabulkových hodnotách (tabulka 10) literatury Design of Timber Structures – Volume 2, tedy:

- Modul pružnosti v podélném směru  $E_{11} = 11000 \text{ MPa}$
- Modul pružnosti v příčném směru  $E_{22} = 370 \text{ MPa}$
- Smykový modul pružnosti  $G_{12} = 690 \text{ MPa}$

Koeficienty příčných deformací a hustotu materiálu jsem zvolil na základě tabulkových hodnot podle Štruktura dřeva, Požgaj, tedy:

- Hustota pro smrk  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$
- Poissonovo číslo  $n_{12} = 0.489$
- Poissonovo číslo  $n_{21}$  se pak odvodí ze vztahu 3.27

Působící zatížení  $N_d$  a  $w_d$  je již zmíněno v kapitole 4.2 a je stejné jako při navrhování podle EC5.

#### 4.4.2.1.2 Laminární teorie

Výstupem laminární teorie jsou v mém případě působící složky napětí v každé z jednotlivých vrstev panelu.

Podle vzorců 3.86, 3.87, 3.88 jsem si určil základní matice  $A, B, D$ , které vycházejí z matice  $C$  ze vzorce 3.35a, 3.35b, 3.35c, 3.35d z tloušťek vrstev panelu a jejich vzdáleností od neutrální osy „z“ k povrchu desky. Matice  $A, B, C, D$  jsou součástí základní konstitutivní laminátové rovnice 3.89.

Základní matice  $A, B, D$  a matici  $C$  jsem částečně invertoval pomocí vztahů 3.92, 3.93, 3.94 a 3.95 do podoby částečně invertovaných matic  $A^*, B^*, C^*, D^*$ , které jsou součástí částečně invertované laminátové rovnice 3.91.

Částečně invertované rovnice  $A^*, B^*, C^*, D^*$  jsem plně invertoval pomocí vztahů 3.97, 3.98, 3.99 a 3.100 do podoby plně invertovaných matic  $A', B', C', D'$ , které jsou součástí plně invertované laminátové rovnice 3.96.

Pro definici deformací  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$  jsem použil částečně invertovanou formu laminátové rovnice 3.91 a pro definici zakřivení desky  $K_x, K_y, K_{xy}$  jsem použil vztahy 3.22, 3.23 a 3.24, které vyjadřují míru zakřivení desky na základě posunutí a průhybu. Z těchto deformací a základních matic  $A, B, C, D$  jsem za použití vztahu 3.87 definoval momenty  $M_x, M_y, M_{xy}$ . Tyto momenty společně s působícími silami  $F_1, F_2, F_6 (N_1, N_2, N_6)$  jsem zpětně dosadil do vztahu 3.96 a tím dostal celkové deformace desky  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ . Zakřivení desky  $K_x, K_y, K_{xy}$  vyjádřené vztahy laminární teorie (3.96) jsem použil pro finální vyjádření složek napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6$  v jednotlivých vrstvách.

Napětí působící na horním a dolním povrchu každé vrstvy panelu jsem určil podle vztahu 3.85, přičemž matice  $\bar{C}$  je transformovanou maticí tuhosti (3.55) pro orientaci vláken v konkrétní vrstvě desky.

#### 4.4.2.2 Počáteční podmínky (initial values)

Počáteční hodnoty mi definují počáteční stav proměnných (variables). Tedy stav, ve kterém se proměnné nachází při zahájení výpočtu. V mém případě jsou to proměnné

- Průhyb -  $w$
- Průhyb po ose  $x$  -  $w_x$
- Průhyb po ose  $y$  -  $w_y$

s počátečními hodnotami 0.

#### 4.4.2.3 Rovnice (equations)

Rovnice, která mi definuje chování modelu, je desková rovnice (3.70). Samotná rovnice pracuje pouze se spojitým zatížením po největší ploše desky. Pro zahrnutí osových sil jsem použil odvozenou rozšířenou deskovou rovnicí ze vztahu 3.105.

#### 4.4.2.4 Okrajové podmínky (boundaries)

Okrajové podmínky jsem definoval tak, aby se shodovali s okrajovými podmínkami Novatop SOLID a výsledné deformace a napětí ve výsledku odpovídali působícím zatížením. Okrajové podmínky jsou popsány na obrázku 4.

#### 4.4.2.5 Zobrazení (Monitors & Plots & Summary)

Jako hlavní výstup zobrazení a shrnutí jsem si nechal vypsát maximální napětí působící na horním a dolním povrchu každé z vrstev panelu, společně s maximálním průhybem desky, který mi sloužil jako kontrola správnosti výpočtu. Napětí nebylo napětím působícím v jednom daném řezu, ale kdekoliv na povrchu každé vrstvy. Dále jsem si nechal zobrazit plošný 2D model distribuce napětí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6$  každé vrstvy, na kterém jsem si mohl znovu ověřit správnost výpočtu.

Všechny výstupy jsem si nechal uložit ve formě obrázků (grafy, modely) a ve formě textovém (maximální hodnoty).

#### 4.4.2.6 Posouzení únosnosti

Výstupy maximálního napětí působící na horním a dolním povrchu každé vrstvy laminy jsem pro přehled přepsal do tabulky. Posouzení únosnosti nebylo na rozdíl od EC5 definované rovnicí, která dává do vztahu zatížení vñ a příčně ke směru stěny při vertikálním směru povrchové vrstvy, ale podmínka byla stanovena jednoduše na základě návrhových pevností odpovídající materiálu C24. Napětí působící na horním a dolním povrchu vrstvy panelu odpovídá podmínce:

$$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$$

$$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$$

Pro splnění podmínek únosnosti musí platit všechny zmíněné podmínky najednou. Pro panel o třech vrstvách pro napětí v podélném směru dostávám:

$\sigma_1$	První vrstva panelu	TOP. povrch	Max napětí
			Min napětí
	BOT. povrch	Max napětí	
		Min napětí	
	Druhá vrstva panelu	TOP. povrch	Max napětí
			Min napětí
	BOT. povrch	Max napětí	
		Min napětí	
	Třetí vrstva panelu	TOP. povrch	Max napětí
		Min napětí	
BOT. povrch	Max napětí		
	Min napětí		

„BOT. povrch“ je zkratkou pro bottom povrch, tedy spodní povrch desky.

Stejně tak pro napětí v příčném směru a pro smykové napětí.

Každý daný geometrický model o třech vrstvách při daném zatížení, musí splňovat všech 36 (12 pro každou vrstvu) výše zmíněných podmínek únosnosti. Pro panel o šesti vrstvách je to 72 podmínek.

#### **4.5 Srovnání výsledků navrhování dle Eurokódu 5 a matematické teorie pružnosti**

Výsledky obou metod navrhování jsem pro přehlednost přenesl do tabulek, kde každá tabulka odpovídala jednomu panelu. Pro každý panel o dané geometrii jsem dostal 2 sloupce vyjadřující 2 metody navrhování a podmínku, kterou tato metoda musí splňovat. Porovnával jsem tedy, zda únosnost daného panelu se při daném zatížení liší při použití těchto dvou metod. Při srovnávání jsem pozoroval, zda se výsledky liší či neliší. V případě, že se výsledky lišily, zaměřil jsem se na konkrétní geometrii s konkrétním zátěžovým stavem a hledal důvod nesrovnalosti.

## 5 Výsledky

Pro zjednodušení výčtu výsledků jsou v následujících kapitolách použity následující zkratky a označení:

- Eurokód 5 – EC5
- Matematická teorie pružnosti – MaTeP

Hodnoty odpovídající podmínce jsem označil zelenou barvou a hodnoty neodpovídající podmínce jsem označil barvou červenou.

### 5.1 Osově zatížení $N_d$

Osově zatížení  $N_d$  odpovídá kombinačnímu součtu stálého (trvalého) zatížení  $g_k$  společně s objemovou hmotností a užitého (nahodilého) zatížení  $q_k$  upraveného modifikačními faktory (kapitola 4.2).

Tabulka 15 - Použité osově zatížení  $N_d$  [kN] odpovídající trvalému a nahodilému zatížení. (124L – panel o šířce 124 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách, 62Q – panel o šířce 62 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách)

Trvalé zatížení ( $g_k$ )	Nahodilé zatížení ( $q_k$ )	Maximální normálová osová síla $N_d$ [kN]					
		Geometrie panelu					
		124L	124Q	84L	84Q	62L	62Q
10	10	30.5088	30.5088	29.8608	29.8608	29.5044	29.5044
	20	45.5088	45.5088	44.8608	44.8608	44.5044	44.5044
	30	60.5088	60.5088	59.8608	59.8608	59.5044	59.5044
	40	75.5088	75.5088	74.8608	74.8608	74.5044	74.5044
	50	90.5088	90.5088	89.8608	89.8608	89.5044	89.5044
20	10	44.0088	44.0088	43.3608	43.3608	43.0044	43.0044
	20	59.0088	59.0088	58.3608	58.3608	58.0044	58.0044
	30	74.0088	74.0088	73.3608	73.3608	73.0044	73.0044
	40	89.0088	89.0088	88.3608	88.3608	88.0044	88.0044
	50	104.0088	104.0088	103.3608	103.3608	103.0044	103.0044
30	10	57.5088	57.5088	56.8608	56.8608	56.5044	56.5044
	20	72.5088	72.5088	71.8608	71.8608	71.5044	71.5044
	30	87.5088	87.5088	86.8608	86.8608	86.5044	86.5044
	40	102.5088	102.5088	101.8608	101.8608	101.5044	101.5044
	50	117.5088	117.5088	116.8608	116.8608	116.5044	116.5044
40	10	71.0088	71.0088	70.3608	70.3608	70.0044	70.0044
	20	86.0088	86.0088	85.3608	85.3608	85.0044	85.0044
	30	101.0088	101.0088	100.3608	100.3608	100.0044	100.0044
	40	116.0088	116.0088	115.3608	115.3608	115.0044	115.0044
	50	131.0088	131.0088	130.3608	130.3608	130.0044	130.0044
50	10	84.5088	84.5088	83.8608	83.8608	83.5044	83.5044
	20	99.5088	99.5088	98.8608	98.8608	98.5044	98.5044
	30	114.5088	114.5088	113.8608	113.8608	113.5044	113.5044
	40	129.5088	129.5088	128.8608	128.8608	128.5044	128.5044
	50	144.5088	144.5088	143.8608	143.8608	143.5044	143.5044
60	10	98.0088	98.0088	97.3608	97.3608	97.0044	97.0044
	20	113.0088	113.0088	112.3608	112.3608	112.0044	112.0044
	30	128.0088	128.0088	127.3608	127.3608	127.0044	127.0044
	40	143.0088	143.0088	142.3608	142.3608	142.0044	142.0044
	50	158.0088	158.0088	157.3608	157.3608	157.0044	157.0044



## 5.2 Únosnost panelu NOVATOP SOLID dle EC5

### 5.2.1 Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm

#### 5.2.1.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 16 - Panel o tloušťce 124 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osově zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 124L	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq$	1,0
10	10	30.5088	0.21703869	≤ 1
	20	45.5088	0.30230777	≤ 1
	30	60.5088	0.38757684	≤ 1
	40	75.5088	0.47284592	≤ 1
	50	90.5088	0.558115	≤ 1
20	10	44.0088	0.29378086	≤ 1
	20	59.0088	0.37904994	≤ 1
	30	74.0088	0.46431901	≤ 1
	40	89.0088	0.54958809	≤ 1
	50	104.0088	0.63485717	≤ 1
30	10	57.5088	0.37052303	≤ 1
	20	72.5088	0.45579211	≤ 1
	30	87.5088	0.54106118	≤ 1
	40	102.5088	0.62633026	≤ 1
	50	117.5088	0.71159934	≤ 1
40	10	71.0088	0.4472652	≤ 1
	20	86.0088	0.53253428	≤ 1
	30	101.0088	0.61780335	≤ 1
	40	116.0088	0.70307243	≤ 1
	50	131.0088	0.78834151	≤ 1
50	10	84.5088	0.52400737	≤ 1
	20	99.5088	0.60927644	≤ 1
	30	114.5088	0.69454552	≤ 1
	40	129.5088	0.7798146	≤ 1
	50	144.5088	0.86508368	≤ 1
60	10	98.0088	0.60074954	≤ 1
	20	113.0088	0.68601861	≤ 1
	30	128.0088	0.77128769	≤ 1
	40	143.0088	0.85655677	≤ 1
	50	158.0088	0.94182585	≤ 1

Na základě tabulky 16 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení ( $g_k$ )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
<0,22; 0,56>	<0,29; 0,64>	<0,37; 0,71>	<0,45; 0,79>	<0,52; 0,87>	<0,60; 0,94>
✓	✓	✓	✓	✓	✓

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  byla splněna při všech zátěžových stavech.

### 5.2.1.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 17 - Panel o tloušťce 124 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osové zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 124Q	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq$	1,0
10	10	30.5088	0.2045638	≤ 1
	20	45.5088	0.2836994	≤ 1
	30	60.5088	0.362835	≤ 1
	40	75.5088	0.4419707	≤ 1
	50	90.5088	0.5211063	≤ 1
20	10	44.0088	0.2757858	≤ 1
	20	59.0088	0.3549215	≤ 1
	30	74.0088	0.4340571	≤ 1
	40	89.0088	0.5131927	≤ 1
	50	104.0088	0.5923284	≤ 1
30	10	57.5088	0.3470079	≤ 1
	20	72.5088	0.4261435	≤ 1
	30	87.5088	0.5052792	≤ 1
	40	102.5088	0.5844148	≤ 1
	50	117.5088	0.6635504	≤ 1
40	10	71.0088	0.41823	≤ 1
	20	86.0088	0.4973656	≤ 1
	30	101.0088	0.5765012	≤ 1
	40	116.0088	0.6556369	≤ 1
	50	131.0088	0.7347725	≤ 1
50	10	84.5088	0.489452	≤ 1
	20	99.5088	0.5685877	≤ 1
	30	114.5088	0.6477233	≤ 1
	40	129.5088	0.726859	≤ 1
	50	144.5088	0.8059946	≤ 1
60	10	98.0088	0.5606741	≤ 1
	20	113.0088	0.6398098	≤ 1
	30	128.0088	0.7189454	≤ 1
	40	143.0088	0.798081	≤ 1
	50	158.0088	0.8772167	≤ 1

Na základě tabulky 17 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení ( $g_k$ )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
$\langle 0,20; 0,52 \rangle$	$\langle 0,28; 0,59 \rangle$	$\langle 0,35; 0,66 \rangle$	$\langle 0,42; 0,74 \rangle$	$\langle 0,49; 0,81 \rangle$	$\langle 0,56; 0,88 \rangle$
✓	✓	✓	✓	✓	✓

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  byla splněna při všech zátěžových stavech.

## 5.2.2 Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm

### 5.2.2.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 18 - Panel o tloušťce 84 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osově zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 84L	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}$	$\leq 1,0$
10	10	29.8608	0.2518396	$\leq 1$
	20	44.8608	0.34604263	$\leq 1$
	30	59.8608	0.44024565	$\leq 1$
	40	74.8608	0.53444867	$\leq 1$
	50	89.8608	0.6286517	$\leq 1$
20	10	43.3608	0.33662233	$\leq 1$
	20	58.3608	0.43082535	$\leq 1$
	30	73.3608	0.52502837	$\leq 1$
	40	88.3608	0.61923139	$\leq 1$
	50	103.3608	0.71343442	$\leq 1$
30	10	56.8608	0.42140505	$\leq 1$
	20	71.8608	0.51560807	$\leq 1$
	30	86.8608	0.60981109	$\leq 1$
	40	101.8608	0.70401412	$\leq 1$
	50	116.8608	0.79821714	$\leq 1$
40	10	70.3608	0.50618777	$\leq 1$
	20	85.3608	0.60039079	$\leq 1$
	30	100.3608	0.69459381	$\leq 1$
	40	115.3608	0.78879684	$\leq 1$
	50	130.3608	0.88299986	$\leq 1$
50	10	83.8608	0.59097049	$\leq 1$
	20	98.8608	0.68517351	$\leq 1$
	30	113.8608	0.77937653	$\leq 1$
	40	128.8608	0.87357956	$\leq 1$
	50	143.8608	0.96778258	$\leq 1$
60	10	97.3608	0.67575321	$\leq 1$
	20	112.3608	0.76995623	$\leq 1$
	30	127.3608	0.86415926	$\leq 1$
	40	142.3608	0.95836228	$\leq 1$
	50	157.3608	1.0525653	$\leq 1$

Na základě tabulky 18 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení ( $g_k$ )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
$\langle 0,25; 0,63 \rangle$	$\langle 0,33; 0,71 \rangle$	$\langle 0,42; 0,80 \rangle$	$\langle 0,51; 0,88 \rangle$	$\langle 0,59; 0,97 \rangle$	$\langle 0,68; 1,05 \rangle$
✓	✓	✓	✓	✓	✗

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  nebyla splněna při nejvyšším zátěžovém stavu.

### 5.2.2.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 19 - Panel o tloušťce 84 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osové zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 84Q	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$	
10	10	29.8608	0.24917649	≤ 1
	20	44.8608	0.34204175	≤ 1
	30	59.8608	0.43490702	≤ 1
	40	74.8608	0.52777228	≤ 1
	50	89.8608	0.62063754	≤ 1
20	10	43.3608	0.33275523	≤ 1
	20	58.3608	0.42562049	≤ 1
	30	73.3608	0.51848575	≤ 1
	40	88.3608	0.61135101	≤ 1
	50	103.3608	0.70421627	≤ 1
30	10	56.8608	0.41633396	≤ 1
	20	71.8608	0.50919922	≤ 1
	30	86.8608	0.60206448	≤ 1
	40	101.8608	0.69492975	≤ 1
	50	116.8608	0.78779501	≤ 1
40	10	70.3608	0.4999127	≤ 1
	20	85.3608	0.59277796	≤ 1
	30	100.3608	0.68564322	≤ 1
	40	115.3608	0.77850848	≤ 1
	50	130.3608	0.87137374	≤ 1
50	10	83.8608	0.58349143	≤ 1
	20	98.8608	0.67635669	≤ 1
	30	113.8608	0.76922195	≤ 1
	40	128.8608	0.86208722	≤ 1
	50	143.8608	0.95495248	≤ 1
60	10	97.3608	0.66707017	≤ 1
	20	112.3608	0.75993543	≤ 1
	30	127.3608	0.85280069	≤ 1
	40	142.3608	0.94566595	≤ 1
	50	157.3608	1.03853121	≤ 1

Na základě tabulky 19 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení ( $g_k$ )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
$\langle 0,25; 0,62 \rangle$	$\langle 0,33; 0,70 \rangle$	$\langle 0,42; 0,79 \rangle$	$\langle 0,50; 0,87 \rangle$	$\langle 0,60; 0,95 \rangle$	$\langle 0,67; 1,03 \rangle$
✓	✓	✓	✓	✓	✗

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  nebyla splněna při nejvyšším zátěžovém stavu.

## 5.2.3 Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm

### 5.2.3.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 20 - Panel o tloušťce 62 mm s podélnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osově zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 62L	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}}$	$\leq 1,0$
10	10	29.5044	0.41623481	$\leq 1$
	20	44.5044	0.57905709	$\leq 1$
	30	59.5044	0.74187938	$\leq 1$
	40	74.5044	0.90470166	$\leq 1$
	50	89.5044	1.06752394	$\leq 1$
20	10	43.0044	0.56277486	$\leq 1$
	20	58.0044	0.72559715	$\leq 1$
	30	73.0044	0.88841943	$\leq 1$
	40	88.0044	1.05124172	$\leq 1$
	50	103.0044	1.214064	$\leq 1$
30	10	56.5044	0.70931492	$\leq 1$
	20	71.5044	0.8721372	$\leq 1$
	30	86.5044	1.03495949	$\leq 1$
	40	101.5044	1.19778177	$\leq 1$
	50	116.5044	1.36060405	$\leq 1$
40	10	70.0044	0.85585498	$\leq 1$
	20	85.0044	1.01867726	$\leq 1$
	30	100.0044	1.18149954	$\leq 1$
	40	115.0044	1.34432183	$\leq 1$
	50	130.0044	1.50714411	$\leq 1$
50	10	83.5044	1.00239503	$\leq 1$
	20	98.5044	1.16521731	$\leq 1$
	30	113.5044	1.3280396	$\leq 1$
	40	128.5044	1.49086188	$\leq 1$
	50	143.5044	1.65368416	$\leq 1$
60	10	97.0044	1.14893509	$\leq 1$
	20	112.0044	1.31175737	$\leq 1$
	30	127.0044	1.47457965	$\leq 1$
	40	142.0044	1.63740194	$\leq 1$
	50	157.0044	1.80022422	$\leq 1$

Na základě tabulky 20 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení ( $g_k$ )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
$\langle 0,42; 1,07 \rangle$	$\langle 0,56; 1,21 \rangle$	$\langle 0,71; 1,36 \rangle$	$\langle 0,85; 1,51 \rangle$	$\langle 1,00; 1,65 \rangle$	$\langle 1,15; 1,8 \rangle$
×	×	×	×	×	×

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  nebyla splněna při všech zátěžových stavech.

### 5.2.3.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 21 - Panel o tloušťce 62 mm s příčnou orientací vláken – EC5 – Ověření únosnosti

Trvalé zatížení $g_k$ [kN]	Nahodilé zatížení $q_k$ [kN]	Odpovídající osové zatížení $N_d$ [kN]	Ověření únosnosti – 62Q	
			$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq$	1,0
10	10	29.5044	0.40491218	≤ 1
	20	44.5044	0.56197806	≤ 1
	30	59.5044	0.71904394	≤ 1
	40	74.5044	0.87610981	≤ 1
	50	89.5044	1.03317569	≤ 1
20	10	43.0044	0.54627147	≤ 1
	20	58.0044	0.70333735	≤ 1
	30	73.0044	0.86040322	≤ 1
	40	88.0044	1.0174691	≤ 1
	50	103.0044	1.17453497	≤ 1
30	10	56.5044	0.68763076	≤ 1
	20	71.5044	0.84469664	≤ 1
	30	86.5044	1.00176251	≤ 1
	40	101.5044	1.15882839	≤ 1
	50	116.5044	1.31589426	≤ 1
40	10	70.0044	0.82899005	≤ 1
	20	85.0044	0.98605592	≤ 1
	30	100.0044	1.1431218	≤ 1
	40	115.0044	1.30018768	≤ 1
	50	130.0044	1.45725355	≤ 1
50	10	83.5044	0.97034934	≤ 1
	20	98.5044	1.12741521	≤ 1
	30	113.5044	1.28448109	≤ 1
	40	128.5044	1.44154696	≤ 1
	50	143.5044	1.59861284	≤ 1
60	10	97.0044	1.11170862	≤ 1
	20	112.0044	1.2687745	≤ 1
	30	127.0044	1.42584038	≤ 1
	40	142.0044	1.58290625	≤ 1
	50	157.0044	1.73997213	≤ 1

Na základě tabulky 21 lze konstatovat, že:

levá strana podmínky únosnosti (vztah 1.27) pro panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách se při kombinacích trvalého zatížení s nahodilým zatížením pohybuje v intervalech:

Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )					
10 kN	20 kN	30 kN	40 kN	50 kN	60 kN
<0,40; 1,03>	<0,55; 1,17>	<0,69; 1,32>	<0,83; 1,46>	<0,97; 1,60>	<1,11; 1,74>
x	x	x	x	x	x

Podmínka únosnosti  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  nebyla splněna při všech zátěžových stavech.

### 5.3 Únosnost panelu NOVATO SOLID dle MaTeP

Pro velké množství výsledků jsem v následujících kapitolách podrobně vypsál pouze výsledky pro panely, které nesplňují podmínku pro navrhování podle MaTeP. U panelů, které splňují všechny podmínky únosnosti při všech zátěžových stavech, vypíšu výsledek jen pro nejvyšší zátěžový stav – tedy kombinaci  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$ .

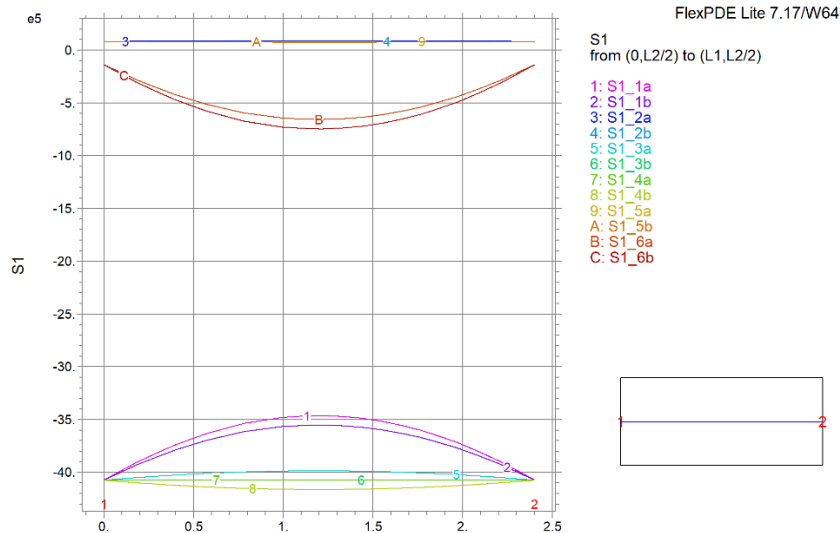
Souhrnná tabulka s přehledem splnění podmínek únosnosti je zobrazena v kapitole 5.3.

Na základně předpokladů laminární teorie jsem do výsledků do tabulek nezahrnul smykové napětí.

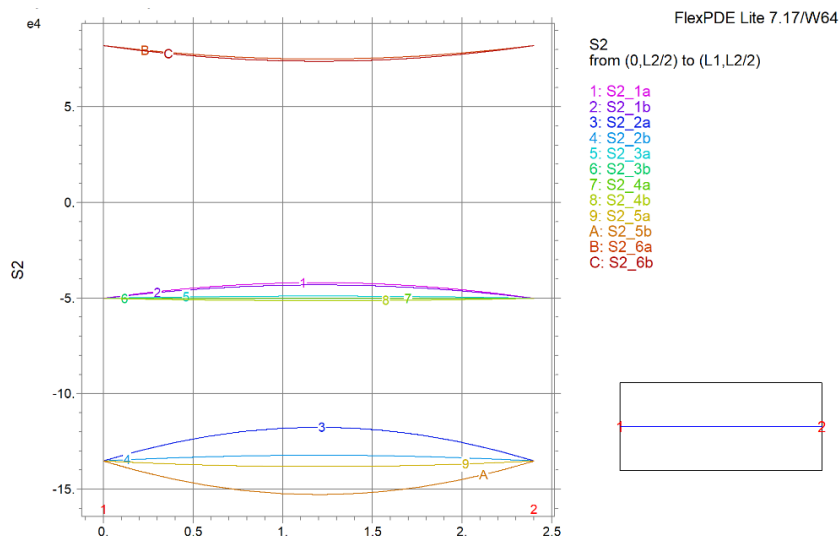
### 5.3.1 Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm

#### 5.3.1.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm při podélné orientaci vláken v povrchových lamelách **splňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při všech zátěžových stavech.



Obrázek 35 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy.



Obrázek 36 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa x – výška panelu, osa y – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 35 a 36 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 124 mm (6 vrstev) s podélně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60$  kN +  $q_k=50$  kN.



### 5.3.1.1.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.1.1.1.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle

$$N_d = 158 \text{ kN}.$$

Tabulka 22 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

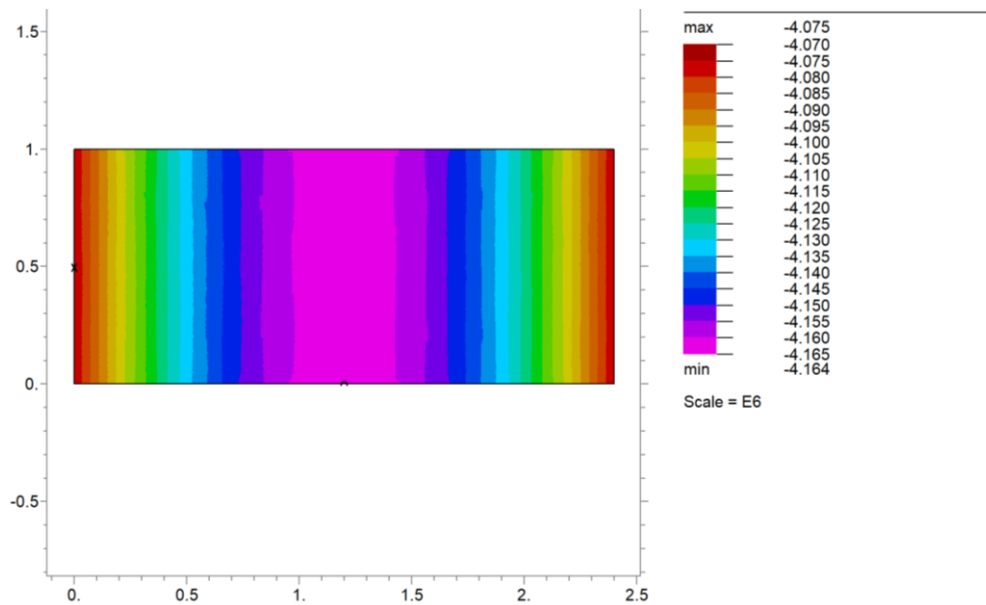
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	-3.459537	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	-4.072912	
		BOT	max	-3.548827	
			min	-4.073164	
	2. vrstva	TOP	max	<b>0.089551</b>	
			min	0.081721	
		BOT	max	0.083278	
			min	0.081949	
	3. vrstva	TOP	max	-3.985359	
			min	-4.074398	
		BOT	max	-4.07465	
			min	-4.07465	
	4. vrstva	TOP	max	-4.07465	
			min	-4.07465	
		BOT	max	-4.074902	
			min	<b>-4.163941</b>	
	5. vrstva	TOP	max	0.082042	
			min	0.080712	
		BOT	max	0.082269	
			min	0.074439	
	6. vrstva	TOP	max	-0.136763	
			min	-0.6611	
		BOT	max	-0.137015	
			min	-0.750391	

Na základě tabulky 22 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -4,16; -0,136 \rangle \text{ MPa}$ . Největší tlakové napětí **-4,16 MPa** se nachází na **spodním povrchu 4. vrstvy**.

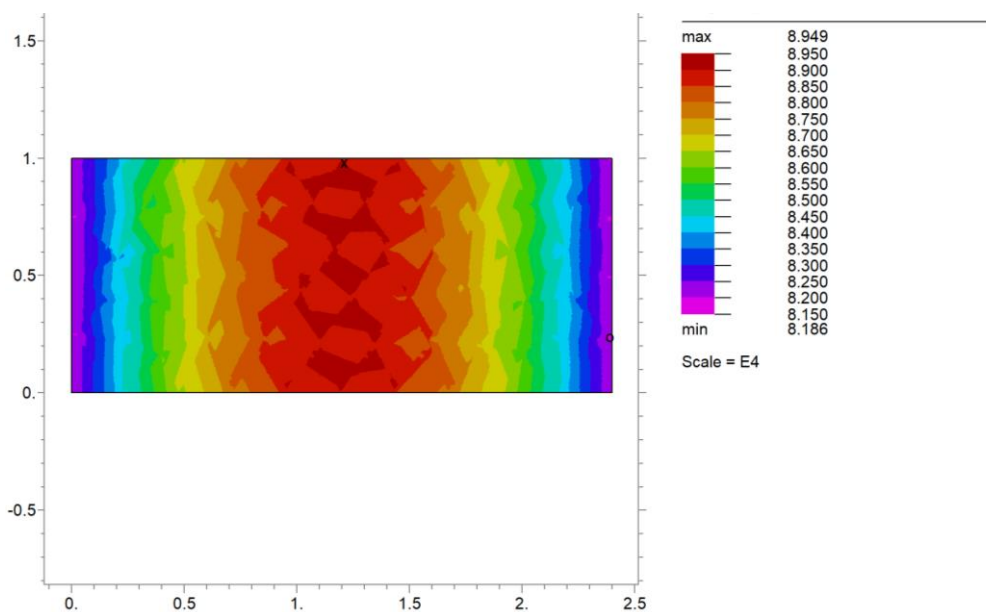
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,074; 0,089 \rangle \text{ MPa}$ . Největší tahové napětí **0,089 MPa** se nachází na **horním povrchu 2. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při nejvyšším zátěžovém stavu nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 37 - distribuce napětí po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 37 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodním povrchu 4. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -4,164; -4,075 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92$  MPa.



Obrázek 38 - distribuce napětí po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 38 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,082; 0,089 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62$  MPa.

Tabulka 23 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

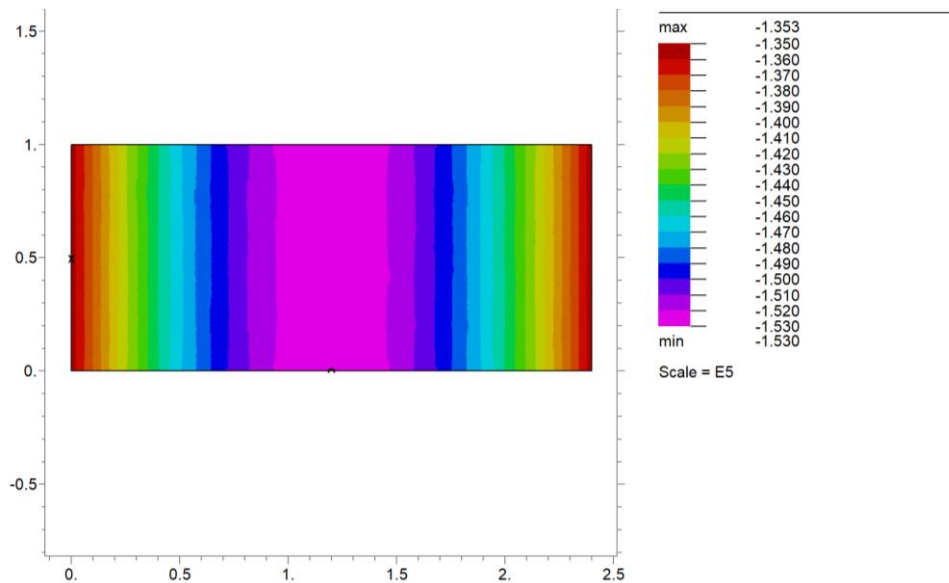
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.041975	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.050221	
		BOT	max	-0.043176	
			min	-0.050224	
	2. vrstva	TOP	max	-0.117594	
			min	-0.135227	
		BOT	max	-0.132274	
			min	-0.135269	
	3. vrstva	TOP	max	-0.049044	
			min	-0.050241	
		BOT	max	-0.050244	
			min	-0.050244	
	4. vrstva	TOP	max	-0.050244	
			min	-0.050244	
		BOT	max	-0.050248	
			min	-0.051445	
	5. vrstva	TOP	max	-0.135286	
			min	-0.13828	
		BOT	max	-0.135327	
			min	<b>-0.15296</b>	
	6. vrstva	TOP	max	<b>0.081975</b>	
			min	0.074926	
		BOT	max	0.081972	
			min	0.073726	

Na základě tabulky 23 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -0,15; -0,04 \rangle$  MPa.  
Největší tlakové napětí **-0,15 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

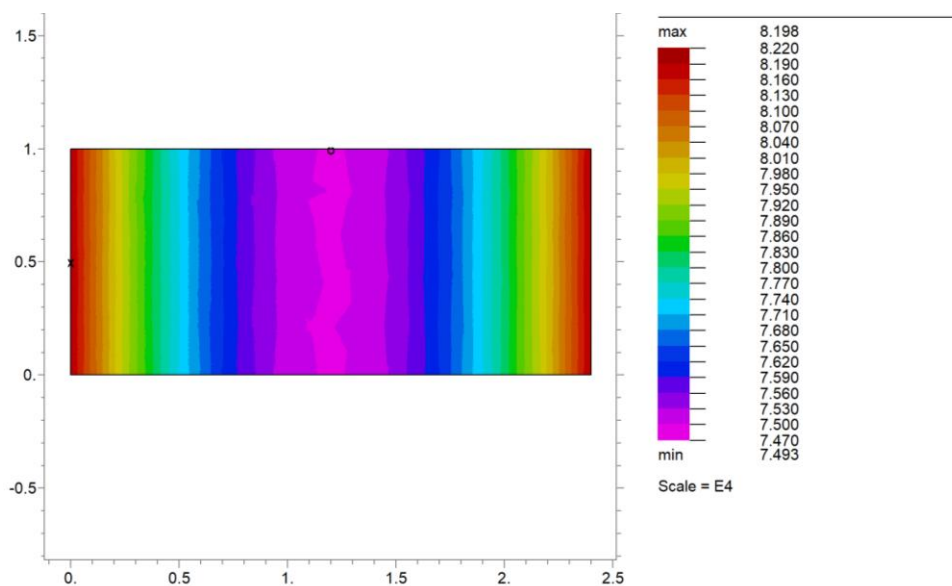
**Tahové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,07; 0,08 \rangle$  MPa.  
Největší tahové napětí **0,08 MPa** se nachází na **horním povrchu 6. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_2$  při nejvyšším zatížení ( $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN) nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 39 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 39 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,153; -0,135 \rangle MPa$ , čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -1.53 MPa$ .



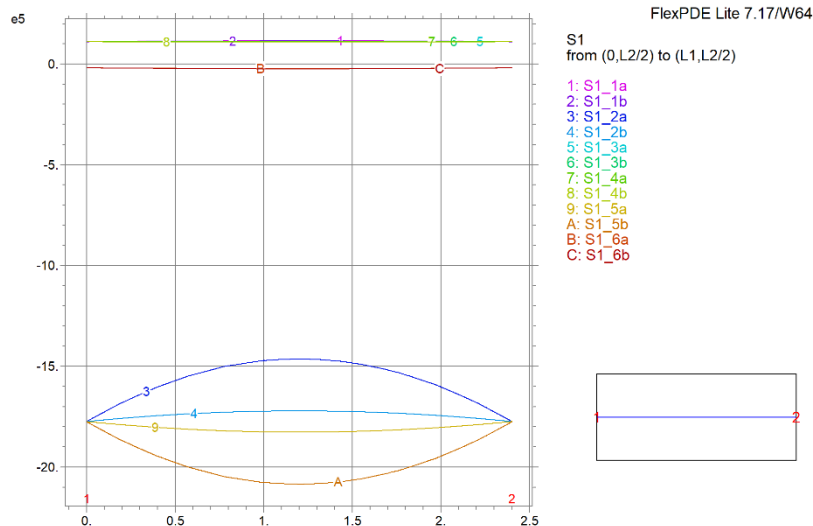
Obrázek 40 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 40 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,07; 0,08 \rangle MPa$ , čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,90,d} = 0.31 MPa$ .

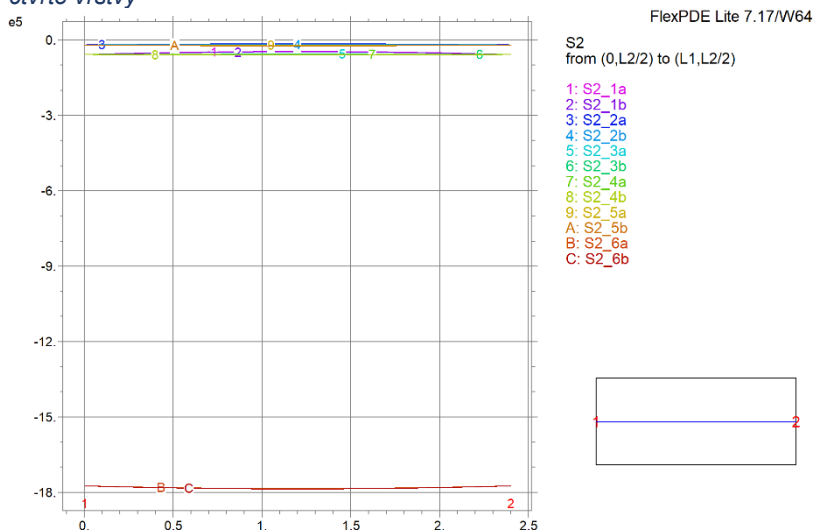
### 5.3.1.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm při příčné orientaci vláken v povrchových lamelách **nesplňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při následujících zátěžových stavech:

- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 50 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 60 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 40; 50 \text{ kN}$



Obrázek 41 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ ). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy



Obrázek 42 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ ). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 41 a 42 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 124 mm (6 vrstev) s příčně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60 \text{ kN} + q_k=50 \text{ kN}$ .

### 5.3.1.2.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 50 \text{ kN}$

#### 5.3.1.2.1.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 50 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 144,51 \text{ kN}.$$

Tabulka 24 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=50 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

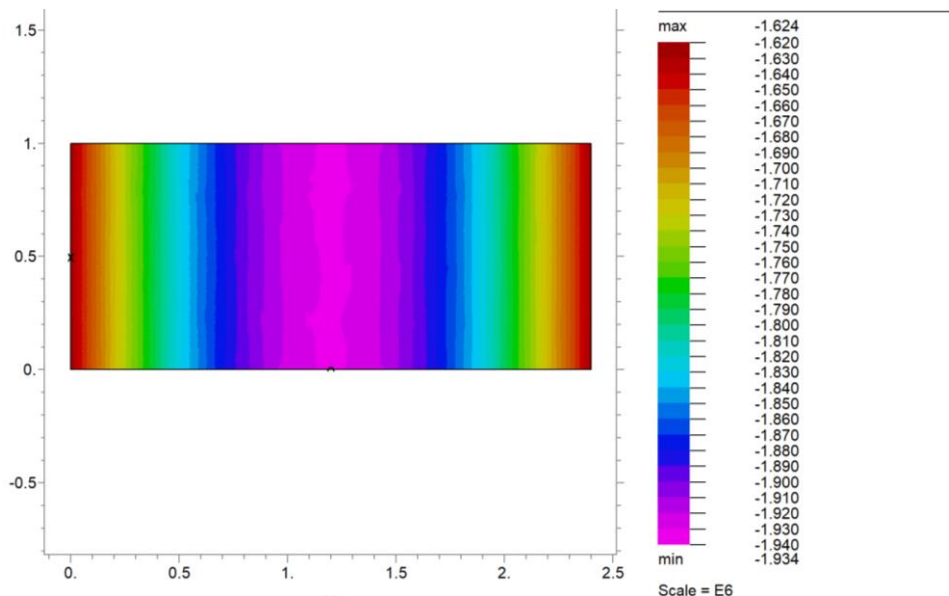
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 50 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.105789	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8,62 \geq \sigma_1 \geq -12,92$
			min	0.100388	
		BOT	max	0.10504	
			min	0.100423	
	2. vrstva	TOP	max	-1.312469	
			min	-1.622071	
		BOT	max	-1.57026	
			min	-1.622834	
	3. vrstva	TOP	max	0.101376	
			min	0.100592	
		BOT	max	0.100627	
			min	0.100627	
	4. vrstva	TOP	max	0.100627	
			min	0.100627	
		BOT	max	0.100662	
			min	0.099878	
	5. vrstva	TOP	max	-1.623146	
			min	-1.67572	
		BOT	max	-1.62391	
			min	-1.933511	
	6. vrstva	TOP	max	-0.017534	
			min	-0.022152	
		BOT	max	-0.0175	
			min	-0.022901	

Na základě tabulky 24 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,93; -0,01 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-1,93 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

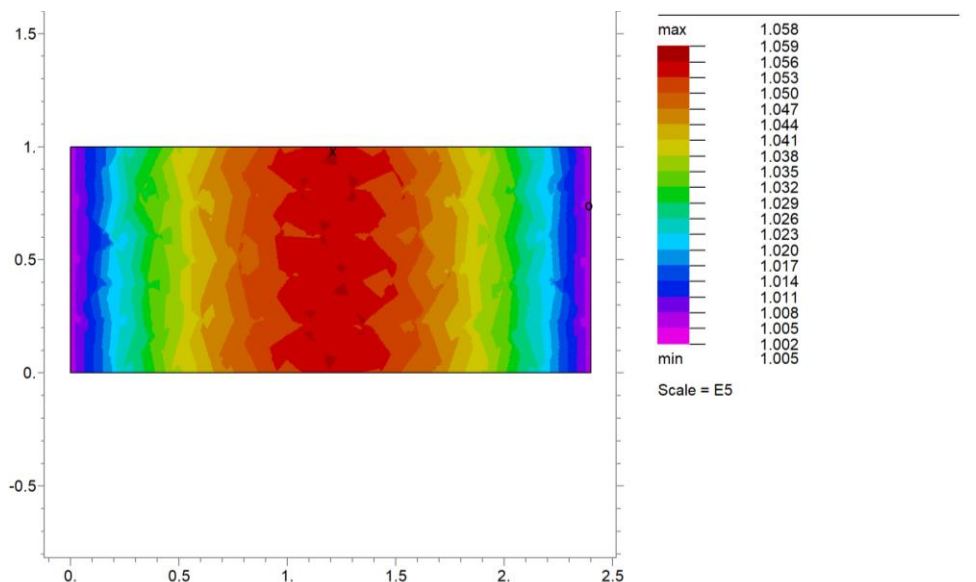
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,099; 0,105 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,105 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 50 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 43 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 43 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,934; -1,624 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92$  MPa.



Obrázek 44 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 44 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 1,01; 1,06 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62$  MPa.

Tabulka 25 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=50$  kN;  $q_k=50$  kN)

$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 50$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.040783	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.052963	
	BOT	TOP	max	-0.042556	
			min	-0.052968	
	2. vrstva	TOP	max	<b>-0.013565</b>	
			min	-0.017726	
	BOT	TOP	max	-0.01703	
			min	-0.017737	
	3. vrstva	TOP	max	-0.051226	
			min	-0.052994	
	BOT	TOP	max	-0.052999	
			min	-0.052999	
	4. vrstva	TOP	max	-0.052999	
			min	-0.052999	
	BOT	TOP	max	-0.053004	
			min	-0.054772	
	5. vrstva	TOP	max	-0.017741	
			min	-0.018448	
	BOT	TOP	max	-0.017751	
			min	-0.021913	
	6. vrstva	TOP	max	<b>-1.623021</b>	
			min	<b>-1.633433</b>	
	BOT	TOP	max	<b>-1.623026</b>	
			min	<b>-1.635206</b>	

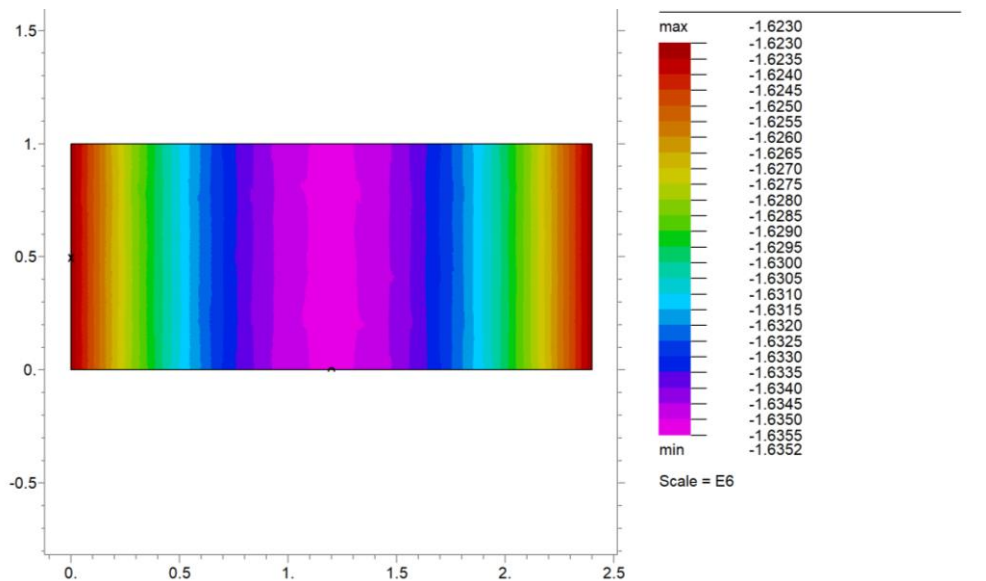
Na základě tabulky 25 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,63; -0,014 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-1,63 MPa** se nachází na **spodním povrchu 6. vrstvy**.

**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

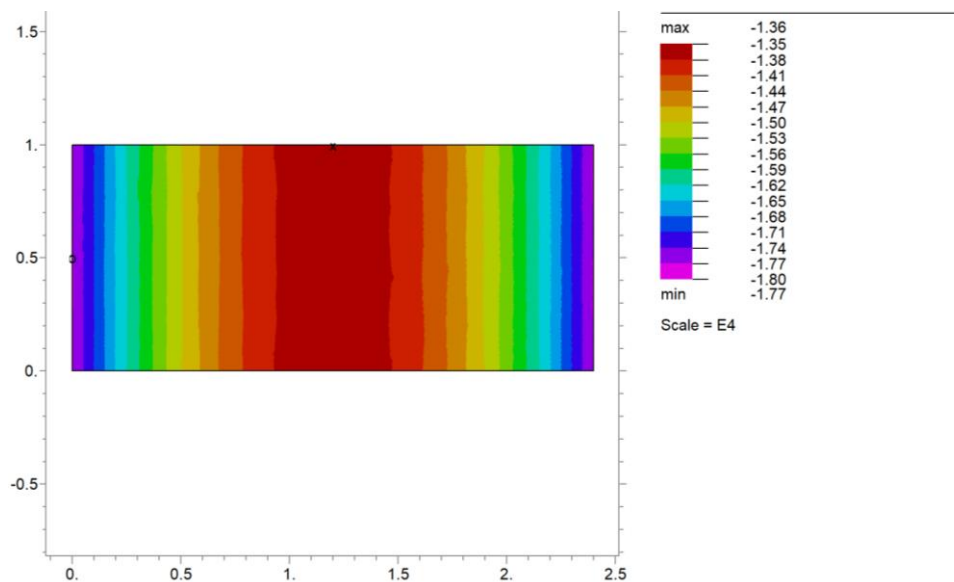
Napětí  $\sigma_2$  při zatížení  $g_k = 50$  kN +  $q_k = 50$  kN překračuje návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ . Návrhová pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  nebyla překročena.





Obrázek 45- distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 45 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,635; -1,623 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 46 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 46 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,014; -0,017 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.

### 5.3.1.2.2 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.1.2.2.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 40 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 40 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 143 \text{ kN.}$$

Tabulka 26 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=40 \text{ kN}$ )

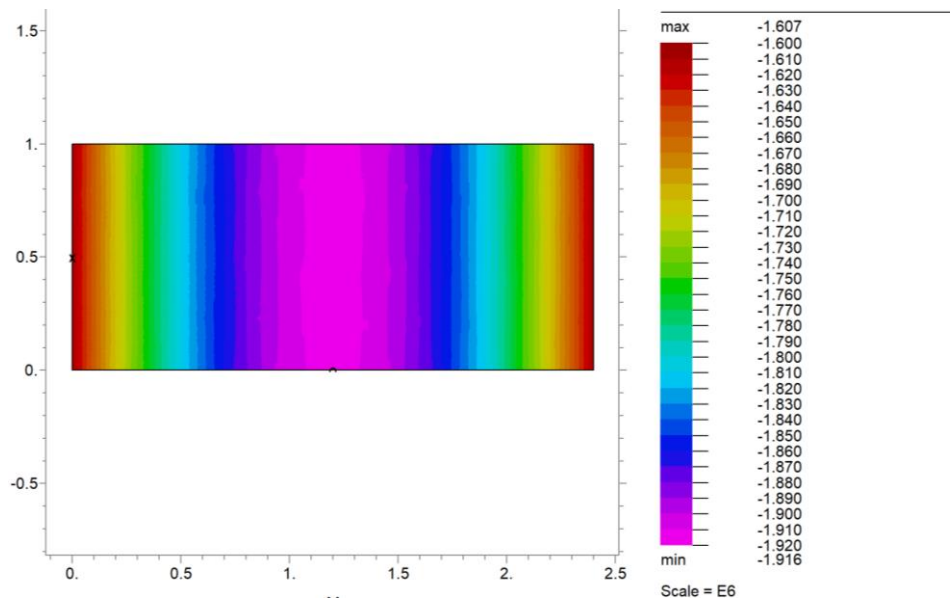
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 40 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.10474	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	0.099343	
	BOT	max	0.103991		
		min	0.099378		
	2. vrstva	TOP	max	-1.295894	
			min	-1.605224	
		BOT	max	-1.55346	
			min	-1.605987	
	3. vrstva	TOP	max	0.100331	
			min	0.099548	
		BOT	max	0.099582	
			min	0.099582	
	4. vrstva	TOP	max	0.099582	
			min	0.099582	
		BOT	max	0.099617	
			min	0.098834	
	5. vrstva	TOP	max	-1.6063	
			min	-1.658827	
		BOT	max	-1.607063	
			min	-1.916393	
	6. vrstva	TOP	max	-0.01735	
			min	-0.021964	
		BOT	max	-0.017316	
			min	-0.022712	

Na základě tabulky 26 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,92; -0,017 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-1,92 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

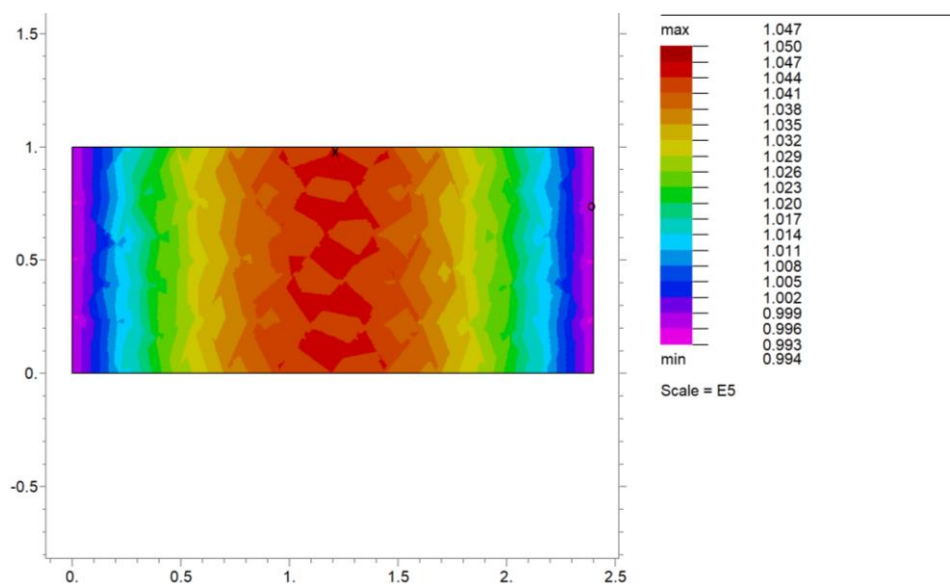
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,099; 0,105 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,105 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 40 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 47 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 47 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,916; -1,607 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92$  MPa.



Obrázek 48- distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 48 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,099; 0,105 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62$  MPa.

Tabulka 27 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=40$  kN)

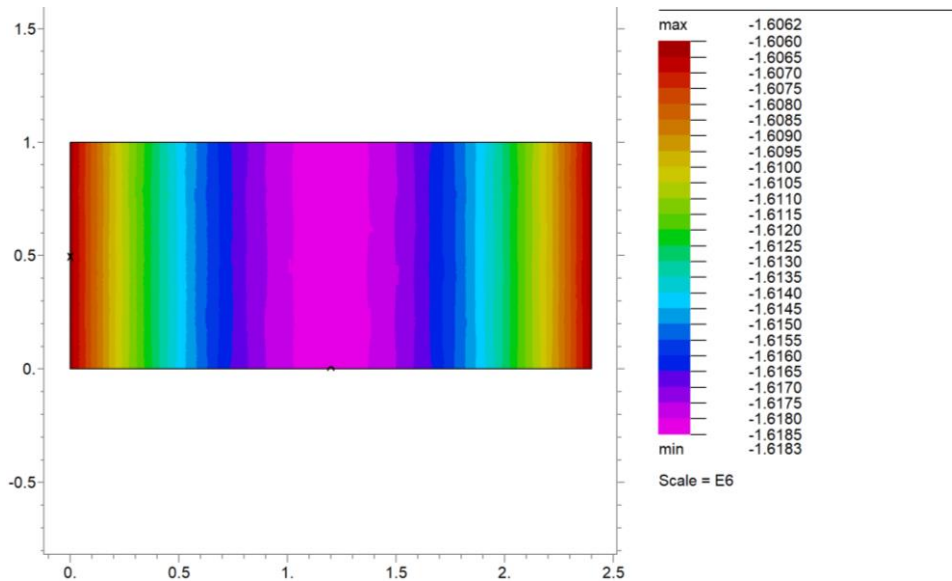
<b><math>\sigma_2</math> – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách</b>					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 40$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
<b><math>\sigma_2</math></b>	1. vrstva	TOP	max	-0.040243	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.052413	
	BOT	max	-0.042015		
		min	-0.052418		
	2. vrstva	TOP	<b>max</b>	<b>-0.013384</b>	
			min	-0.017542	
	BOT	max	-0.016846		
		min	-0.017553		
	3. vrstva	TOP	max	-0.050677	
			min	-0.052444	
	BOT	max	-0.052449		
		min	-0.052449		
	4. vrstva	TOP	max	-0.052449	
			min	-0.052449	
	BOT	max	-0.052454		
		min	-0.054221		
	5. vrstva	TOP	max	-0.017557	
			min	-0.018263	
	BOT	max	-0.017567		
		min	-0.021725		
	6. vrstva	TOP	max	<b>-1.606174</b>	
			min	<b>-1.616577</b>	
	BOT	max	<b>-1.60618</b>		
		<b>min</b>	<b>-1.618349</b>		

Na základě tabulky 27 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,62; -0,01 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-1,62 MPa** se nachází na **spodním povrchu 6. vrstvy**.

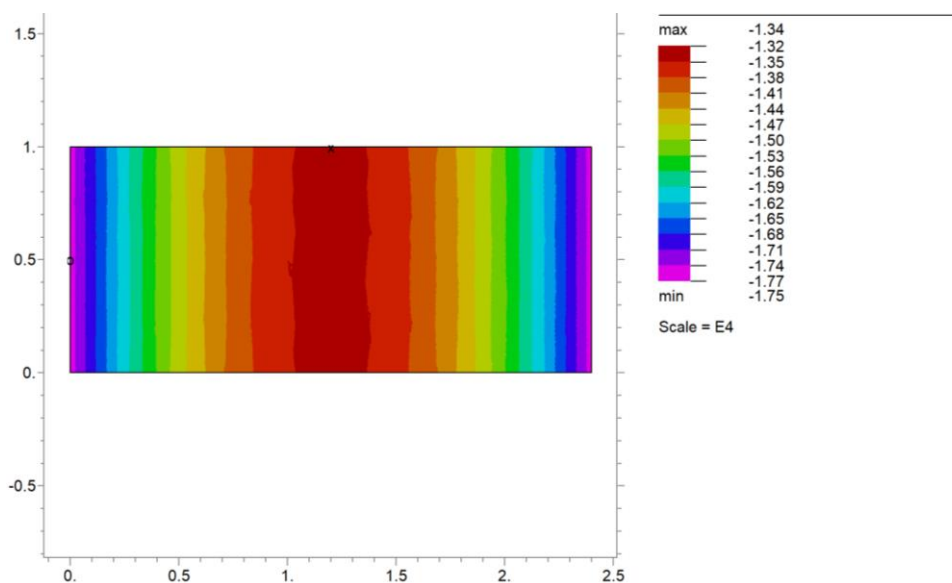
**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení  $g_k = 60$  kN +  $q_k = 40$  kN překračuje návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ . Návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  nepřekračuje.



Obrázek 49 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 49 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,62; -1,60 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1,53$  MPa.



Obrázek 50 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 50 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,02; -0,01 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1,53$  MPa.

### 5.3.1.2.2.2 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 158 \text{ kN}.$$

Tabulka 28 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

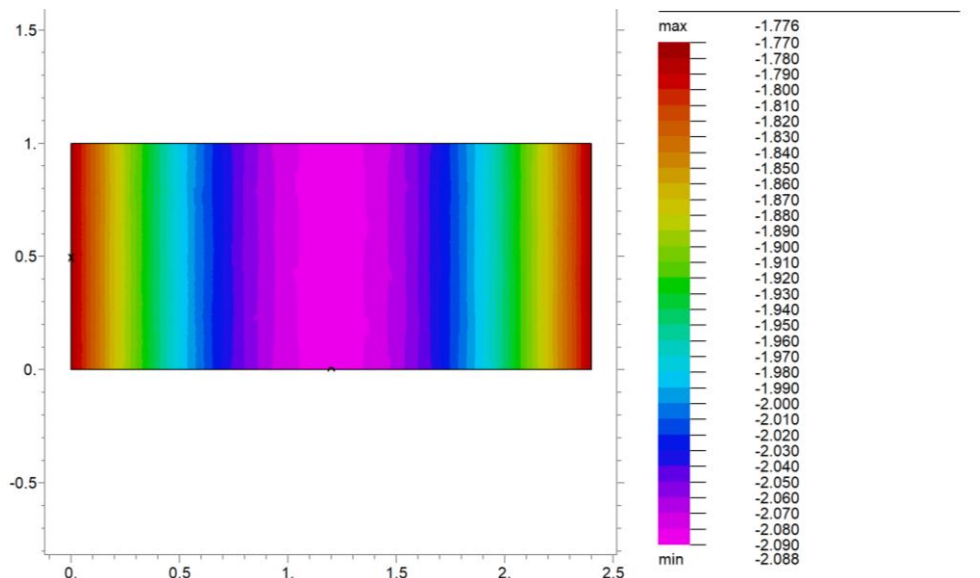
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.115231	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	0.109788	
		BOT	max	0.114476	
			min	0.109823	
	2. vrstva	TOP	max	-1.461629	
			min	-1.773689	
		BOT	max	-1.721462	
			min	-1.774453	
	3. vrstva	TOP	max	0.110783	
			min	0.109993	
		BOT	max	0.110027	
			min	0.110027	
	4. vrstva	TOP	max	0.110027	
			min	0.110027	
		BOT	max	0.110062	
			min	0.109272	
	5. vrstva	TOP	max	-1.774766	
			min	-1.827757	
		BOT	max	-1.77553	
			min	-2.08759	
	6. vrstva	TOP	max	-0.019191	
			min	-0.023844	
		BOT	max	-0.019156	
			min	-0.024599	

Na základě tabulky 28 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -2,09; -0,02 \rangle \text{ MPa}$ . Největší tlakové napětí **-2,09 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

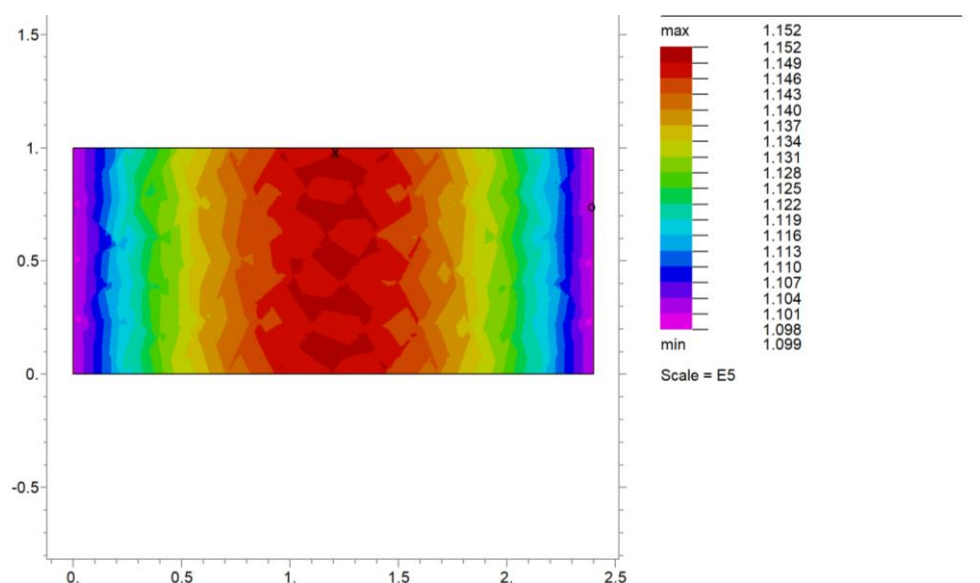
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,099; 0,104 \rangle \text{ MPa}$ . Největší tahové napětí **0,115 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 51 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 51 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -2,09; -1,78 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12,92$  MPa.



Obrázek 52 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 52 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,109; 0,115 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8,62$  MPa.

Tabulka 29 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 124 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.045637	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.057914	
		BOT	max	-0.047424	
			min	-0.057919	
	2. vrstva	TOP	max	<b>-0.015189</b>	
			min	-0.019384	
		BOT	max	-0.018682	
			min	-0.019394	
	3. vrstva	TOP	max	-0.056163	
			min	-0.057945	
		BOT	max	-0.05795	
			min	-0.05795	
	4. vrstva	TOP	max	-0.05795	
			min	-0.05795	
		BOT	max	-0.057955	
			min	-0.059737	
	5. vrstva	TOP	max	-0.019398	
			min	-0.02011	
		BOT	max	-0.019408	
			min	-0.023603	
	6. vrstva	TOP	max	<b>-1.774641</b>	
			min	<b>-1.785135</b>	
		BOT	max	<b>-1.774646</b>	
			min	<b>-1.786923</b>	

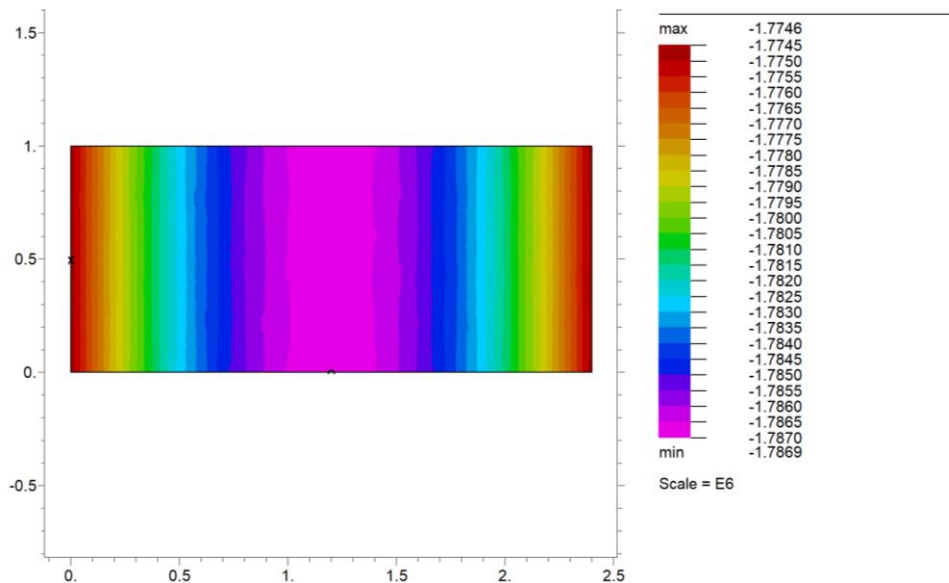
Na základě tabulky 29 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,79; -0,01 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-1,79 MPa** se nachází na **spodním povrchu 6. vrstvy**.

**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

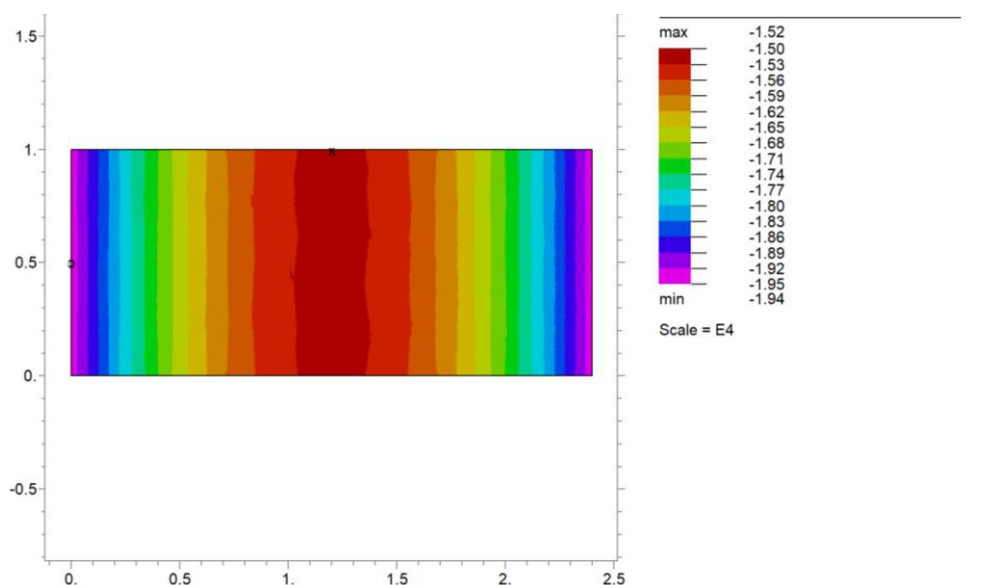
Napětí  $\sigma_2$  při zatížení  $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .





Obrázek 53 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 53 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,79; -1,78 \rangle$  MPa a tedy překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



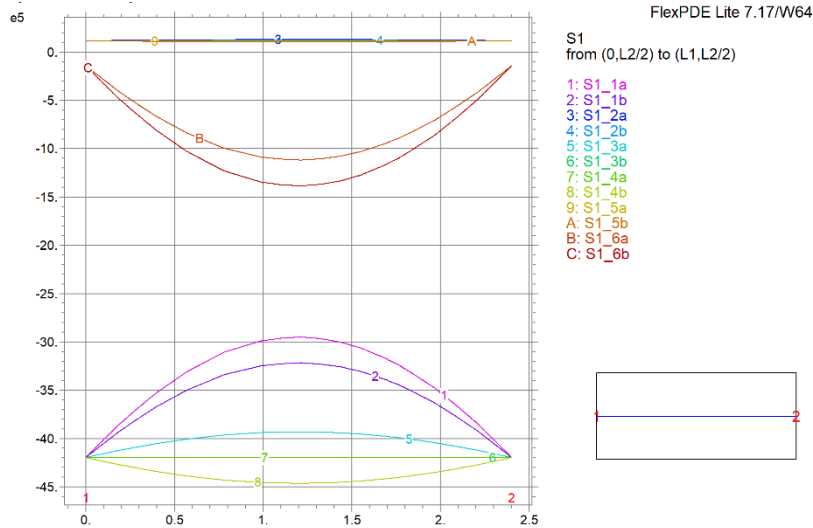
Obrázek 54 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 54 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,019; -0,002 \rangle$  MPa a tedy nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.

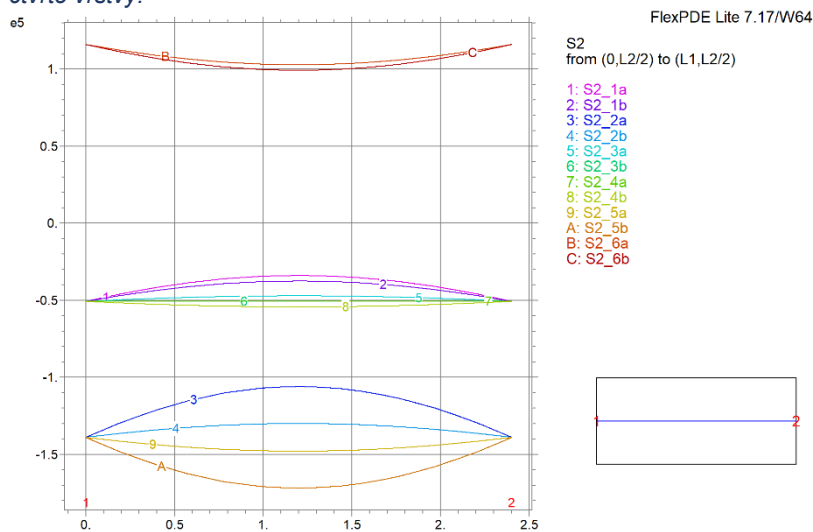
### 5.3.2 Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm

#### 5.3.2.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm při podélné orientaci vláken v povrchových lamelách **splňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při všech zátěžových stavech.



Obrázek 55 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy.



Obrázek 56 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 55 a 56 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 84 mm (6 vrstev) s podélně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60$  kN +  $q_k=50$  kN.

### 5.3.2.1.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.2.1.1.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 157,4 \text{ kN}.$$

Tabulka 30 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

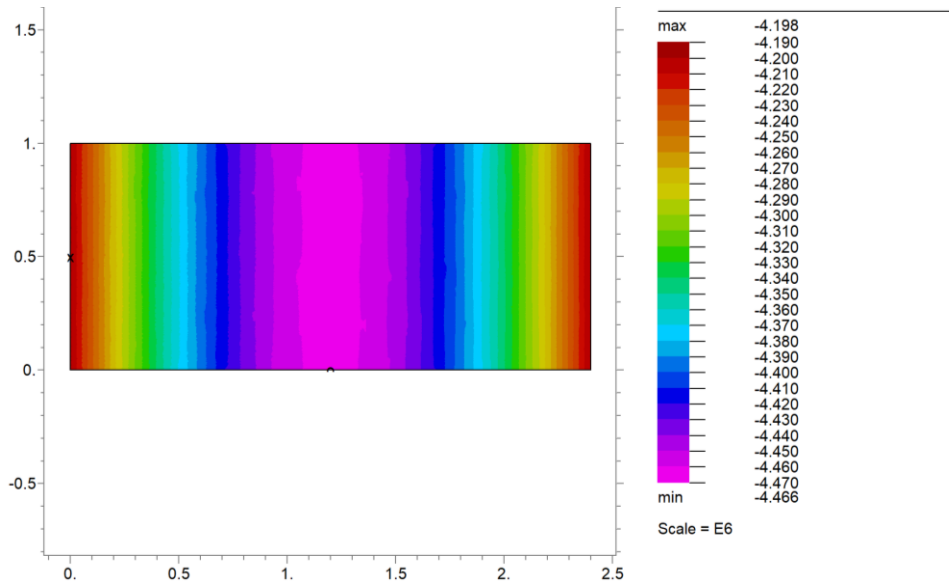
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 82 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	-2.942491	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	-4.194237	
		BOT	max	-3.211336	
			min	-4.194852	
	2. vrstva	TOP	max	<b>0.130124</b>	
			min	0.115526	
		BOT	max	0.119866	
			min	0.115885	
	3. vrstva	TOP	max	-3.928258	
			min	-4.19649	
		BOT	max	-4.197104	
			min	-4.197104	
	4. vrstva	TOP	max	-4.197104	
			min	-4.197104	
		BOT	max	-4.197718	
			min	<b>-4.465949</b>	
	5. vrstva	TOP	max	0.116153	
			min	0.112172	
		BOT	max	0.116512	
			min	0.101914	
	6. vrstva	TOP	max	-0.141184	
			min	-1.1247	
		BOT	max	-0.141798	
			min	-1.393545	

Na základě tabulky 30 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -4,47; -0,14 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-4,47 MPa** se nachází na **spodním povrchu 4. vrstvy**.

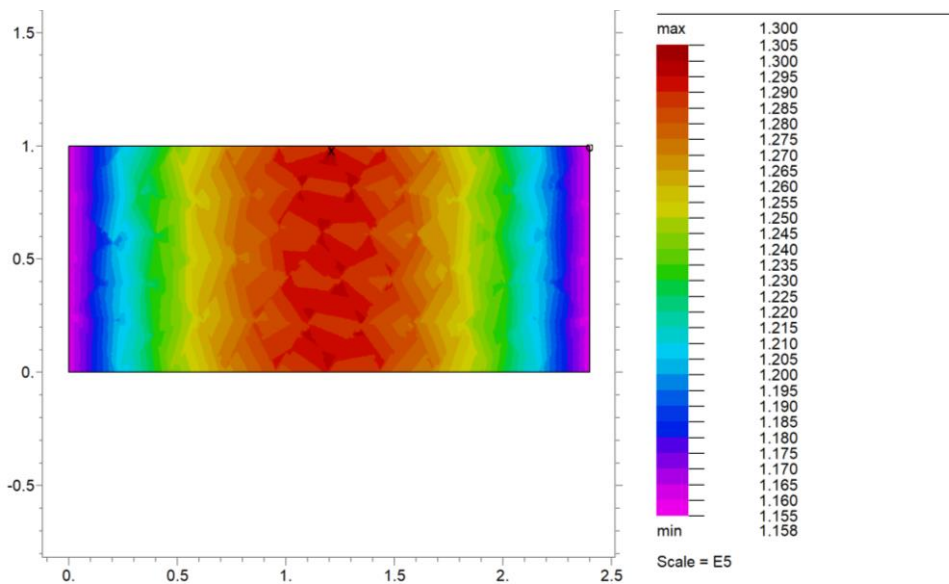
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,11; 0,13 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,13 MPa** se nachází na **horním povrchu 2. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 57 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 4. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 57 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 4. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -4,47; -4,20 \rangle MPa$ , čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92 MPa$ .



Obrázek 58 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 58 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,12; 0,13 \rangle MPa$ , čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62 MPa$ .

Tabulka 31 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

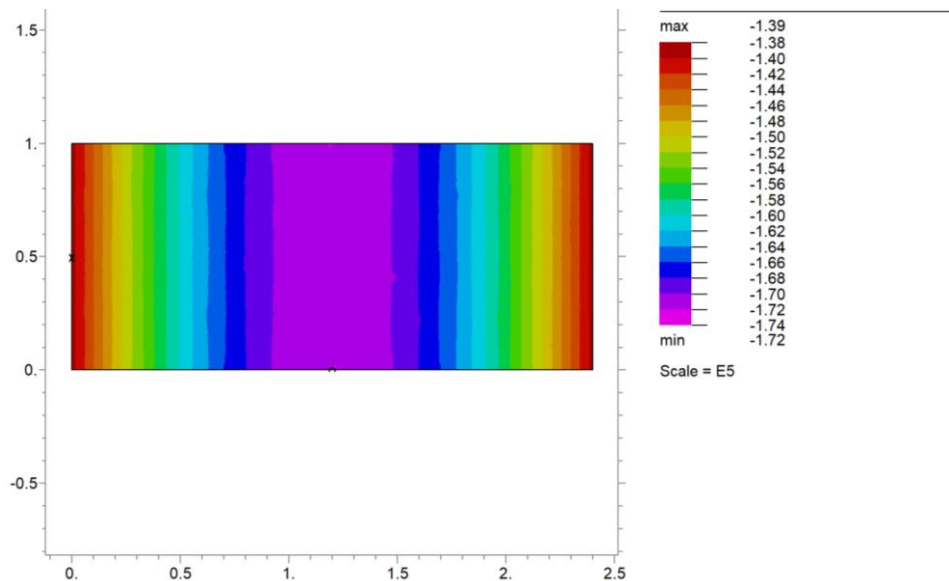
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.033834	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.050666	
	BOT	TOP	max	-0.037448	
			min	-0.050668	
	2. vrstva	TOP	max	-0.105781	
			min	-0.138856	
	BOT	TOP	max	-0.129891	
			min	-0.138912	
	3. vrstva	TOP	max	-0.047085	
			min	-0.05069	
	BOT	TOP	max	-0.050698	
			min	-0.050698	
	4. vrstva	TOP	max	-0.050698	
			min	-0.050698	
	BOT	TOP	max	-0.050707	
			min	-0.054312	
	5. vrstva	TOP	max	-0.138953	
			min	-0.147973	
	BOT	TOP	max	-0.139008	
			min	-0.172083	
	6. vrstva	TOP	max	0.115989	
			min	0.102769	
	BOT	TOP	max	0.115981	
			min	0.099155	

Na základě tabulky 31 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -0,17; -0,03 \rangle$  MPa.  
Největší tlakové napětí **-0,17 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

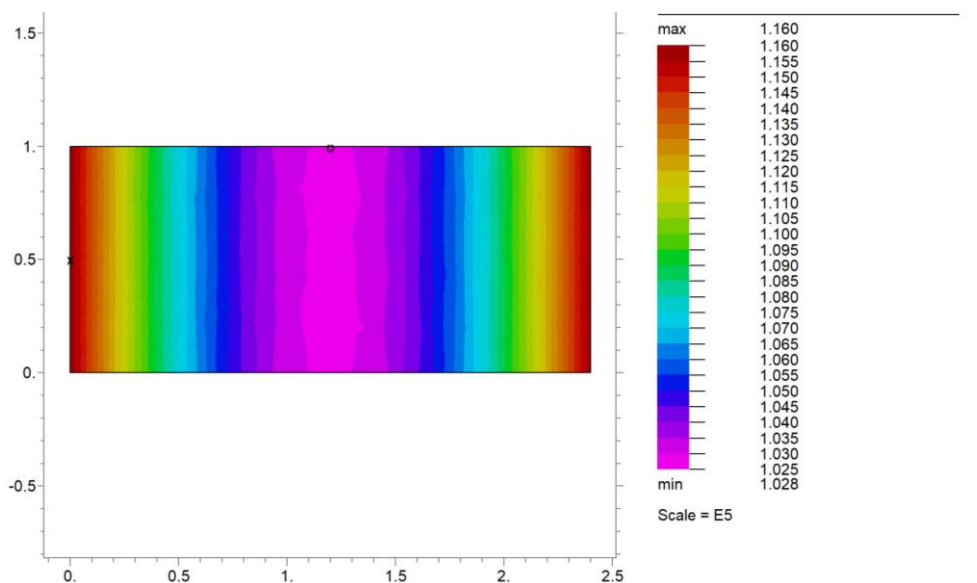
**Tahové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,09; 0,12 \rangle$  MPa.  
Největší tahové napětí **0,12 MPa** se nachází na **horním povrchu 6. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_2$  při nejvyšším zatížení ( $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN) nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 59 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 59 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,17; -0,14 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 60 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 6. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 60 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,10; 0,12 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,90,d} = 0.31$  MPa.

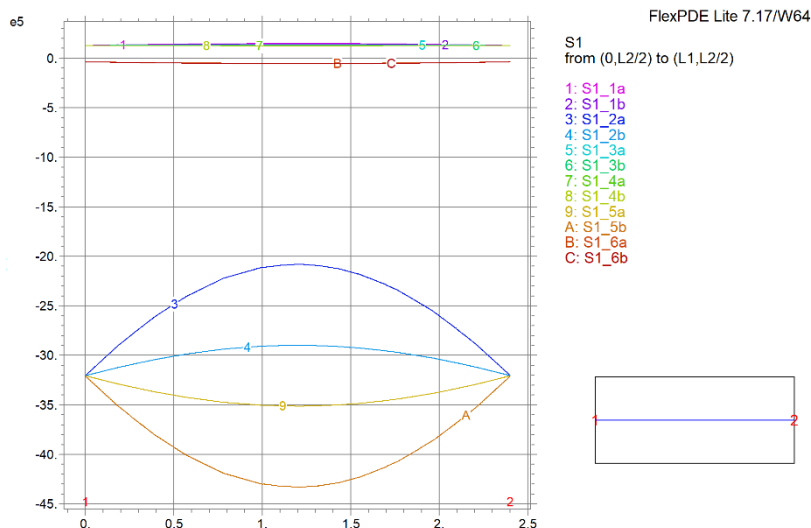
### 5.3.2.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm při příčné orientaci vláken v povrchových lamelách **nesplňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při následujících zátěžových stavech:

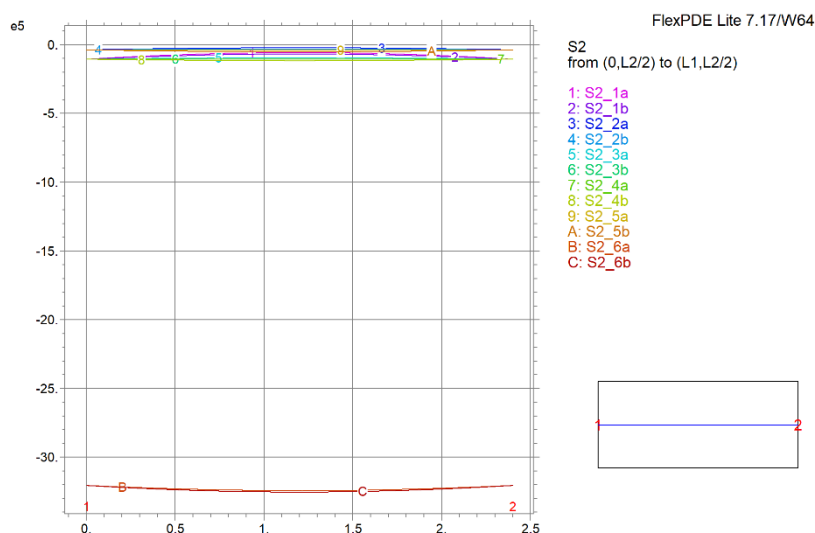
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 10 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 20 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 30 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 30; 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 40 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 20; 30; 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 50 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 10; 20; 30; 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 60 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 10; 20; 30; 40; 50 \text{ kN}$

Přičemž k nesplnění podmínek došlo v těchto stavech působením tlakového napětí kolmo k vláknům  $\sigma_2$  na horním i spodním povrchu 6. vrstvy panelu, a tím překračuje návrhovou tlakovou pevnost kolmo k vláknům  $f_{c,0,d}$ . Výsledky jsem tedy uvedl jen pro dva nevyhovující zátěžové stavy a to pro:

- nejnižší charakteristické stálé zatížení 10 kN v kombinaci s charakteristickým užitným zatížením 40 kN.
- nejvyšší charakteristické stálé zatížení 60 kN v kombinaci s charakteristickým užitným zatížením 50 kN.



Obrázek 61 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy.



Obrázek 62 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 61 a 62 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 84 mm (6 vrstev) s příčně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60$  kN +  $q_k=50$  kN.



### 5.3.2.2.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 10 \text{ kN}$

#### 5.3.2.2.1.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 40 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 10 \text{ kN} + q_k = 40 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 74,9 \text{ kN.}$$

Tabulka 32 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=10 \text{ kN}$ ;  $q_k=40 \text{ kN}$ )

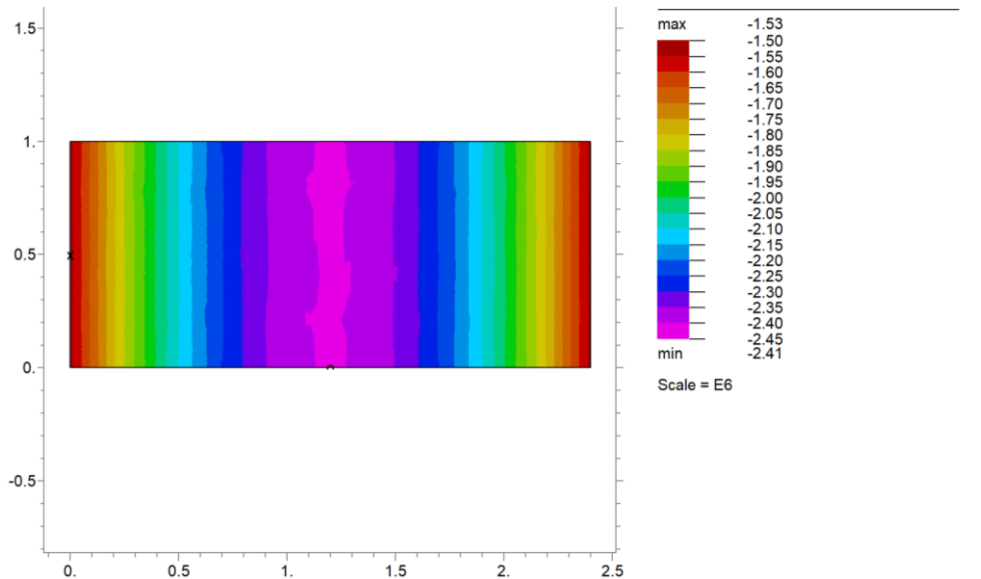
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 10 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 40 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.077156	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	0.060404	
	BOT	max	0.073698		
		min	0.060537		
	2. vrstva	TOP	max	-0.639418	
			min	-1.522531	
		BOT	max	-1.283435	
			min	-1.524284	
	3. vrstva	TOP	max	0.064479	
			min	0.06089	
		BOT	max	0.061022	
			min	0.061022	
	4. vrstva	TOP	max	0.061022	
			min	0.061022	
		BOT	max	0.061155	
			min	0.057565	
	5. vrstva	TOP	max	-1.525599	
			min	-1.766448	
		BOT	max	-1.527353	
			min	-2.410466	
	6. vrstva	TOP	max	-0.017303	
			min	-0.030465	
		BOT	max	-0.017171	
			min	-0.033922	

Na základě tabulky 32 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -2,41; -0,02 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-2,41 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

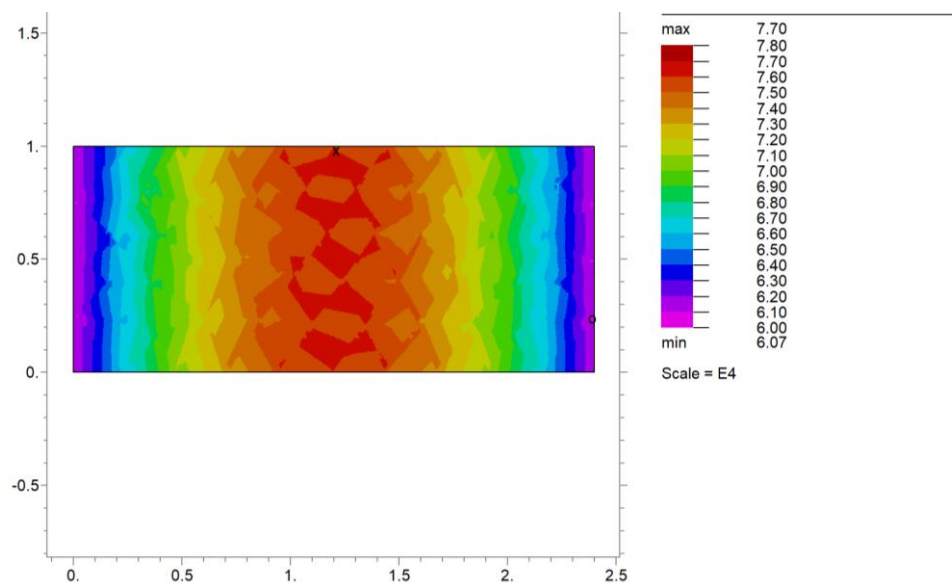
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,06; 0,077 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,077 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 10 \text{ kN} + q_k = 40 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 63 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 63 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -2,41; -1,53 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12,92$  MPa.



Obrázek 64 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 64 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,12; 0,13 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8,62$  MPa.

Tabulka 33 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=10$  kN;  $q_k=40$  kN)

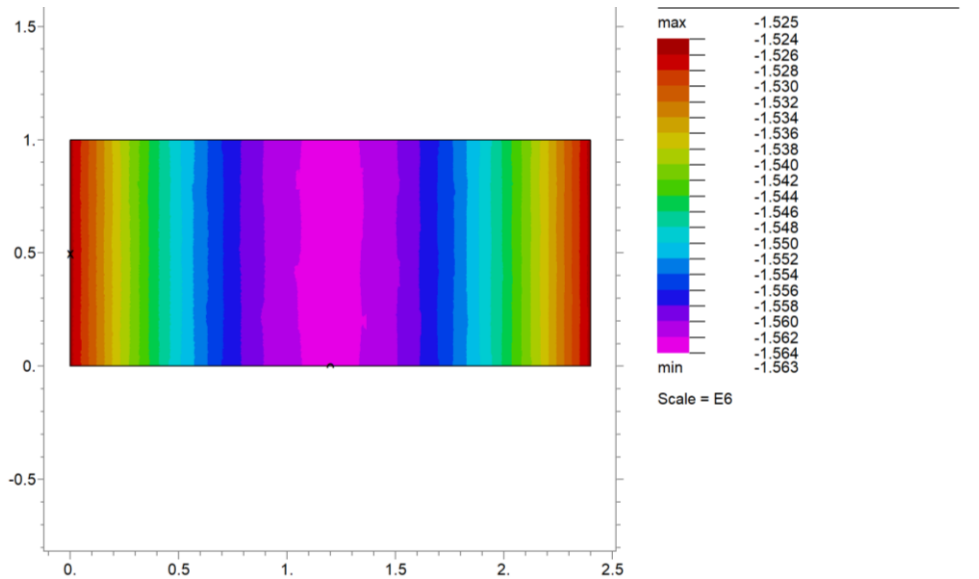
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 10$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 40$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.012332	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.05013	
		BOT	max	-0.020453	
			min	-0.050152	
	2. vrstva	TOP	max	<b>-0.005885329</b>	
			min	-0.017757	
		BOT	max	-0.014543	
			min	-0.01778	
	3. vrstva	TOP	max	-0.042111	
			min	-0.050211	
		BOT	max	-0.050233	
			min	-0.050233	
	4. vrstva	TOP	max	-0.050233	
			min	-0.050233	
		BOT	max	-0.050255	
			min	-0.058355	
	5. vrstva	TOP	max	-0.017798	
			min	-0.021035	
		BOT	max	-0.017821	
			min	-0.029693	
	6. vrstva	TOP	max	-1.525023	
			min	<b>-1.554722</b>	
		BOT	max	-1.525045	
			min	<b>-1.562843</b>	

Na základě tabulky 33 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,56; -0,006 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-1,56 MPa** se nachází na **spodním povrchu 6. vrstvy**.

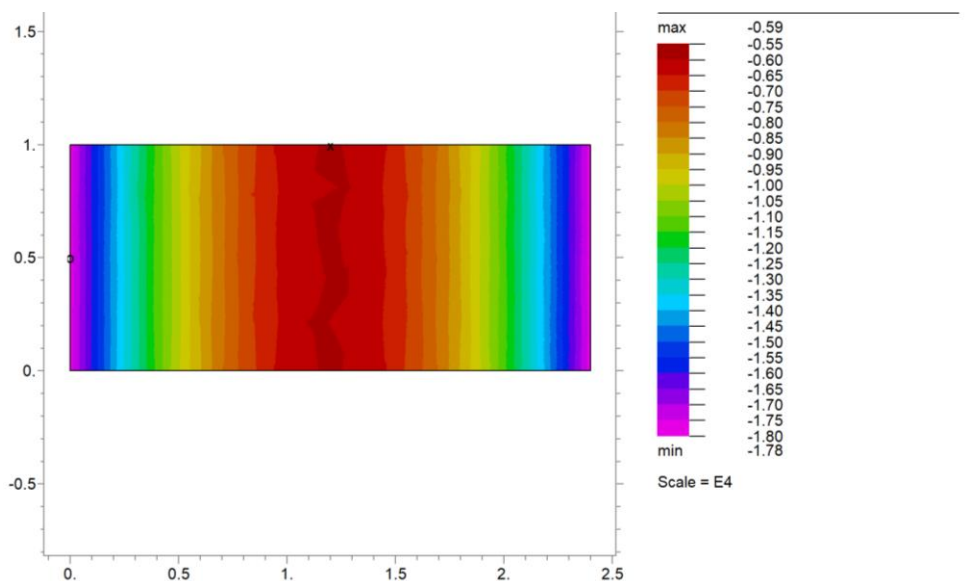
**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení ( $g_k = 10$  kN +  $q_k = 40$  kN) nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 65 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 65 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -1,56; -1,52 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1,53$  MPa.



Obrázek 66 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 66 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,078; -0,005 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1,53$  MPa.

### 5.3.2.2 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.2.2.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 157,4 \text{ kN}.$$

Tabulka 34 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

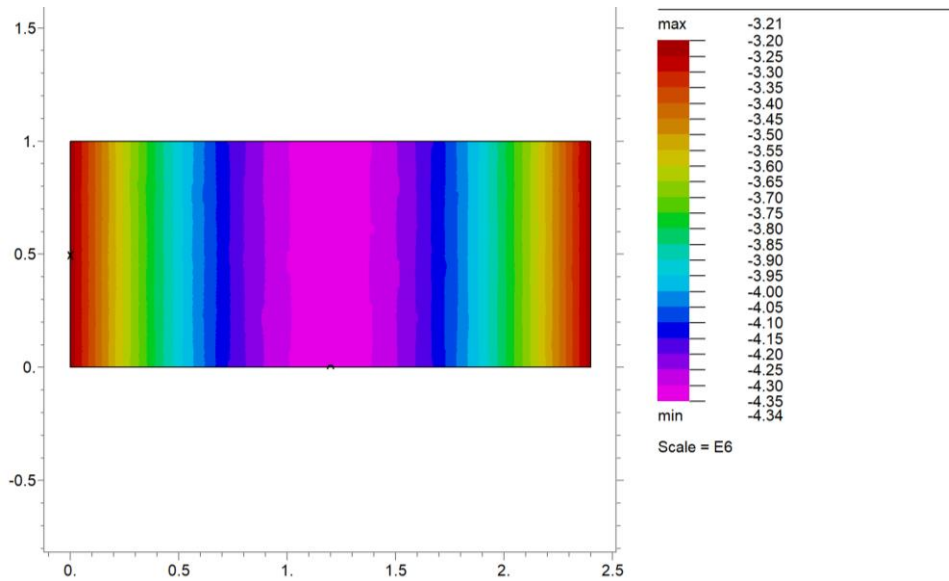
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.148943	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	0.127592	
		BOT	max	0.144513	
			min	0.127738	
	2. vrstva	TOP	max	-2.073272	
			min	-3.203006	
		BOT	max	-2.896709	
			min	-3.204818	
	3. vrstva	TOP	max	0.132701	
			min	0.128126	
		BOT	max	0.128271	
			min	0.128271	
	4. vrstva	TOP	max	0.128271	
			min	0.128271	
		BOT	max	0.128417	
			min	0.123842	
	5. vrstva	TOP	max	-3.206176	
			min	-3.514286	
		BOT	max	-3.207988	
			min	-4.337722	
	6. vrstva	TOP	max	-0.03686	
			min	-0.053635	
		BOT	max	-0.036714	
			min	-0.058065	

Na základě tabulky 34 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -4,34; -0,37 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-4,34 MPa** se nachází na **spodním povrchu 5. vrstvy**.

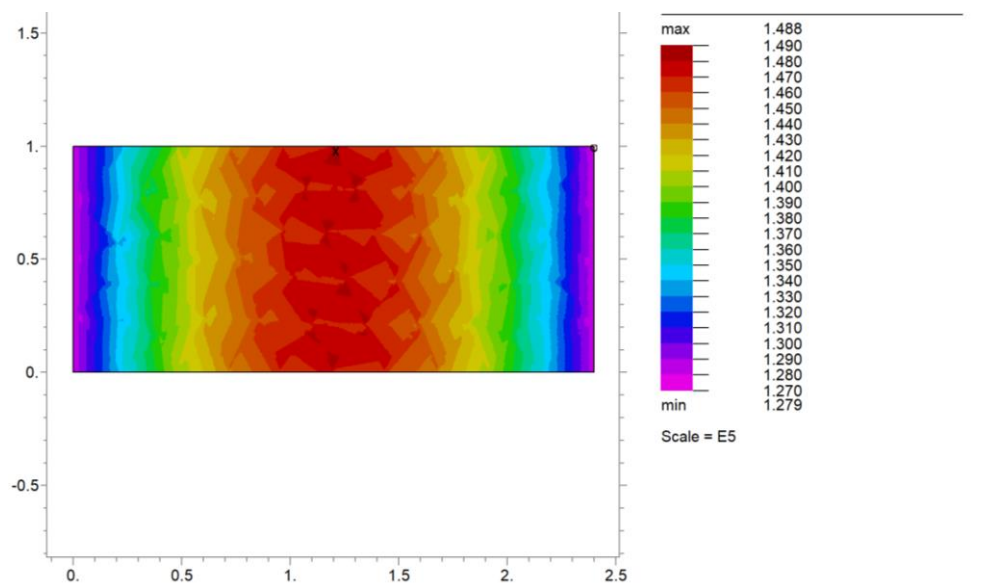
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,12; 0,15 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,15 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 67 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 5. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 67 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 5. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -4,34; -3,21 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12,92$  MPa.



Obrázek 68 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 68 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,128; 0,15 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8,62$  MPa.

Tabulka 35 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

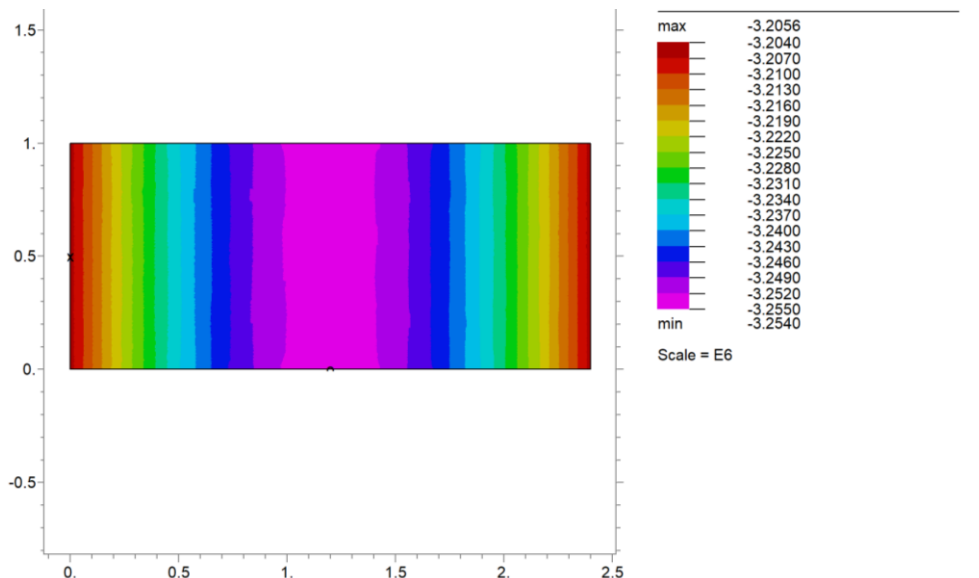
<b><math>\sigma_2</math> – Panel o tloušťce 84 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách</b>					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
<b><math>\sigma_2</math></b>	1. vrstva	TOP	max	-0.057132	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$ $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.105486	
	BOT	max	-0.067516		
		min	-0.105509		
	2. vrstva	TOP	max	<b>-0.022174</b>	
			min	-0.03736	
	BOT	max	-0.033242		
		min	-0.037384		
	3. vrstva	TOP	max	-0.095208	
			min	-0.105569	
	BOT	max	-0.105592		
		min	-0.105592		
	4. vrstva	TOP	max	-0.105592	
			min	-0.105592	
	BOT	max	-0.105615		
		min	-0.115977		
	5. vrstva	TOP	max	-0.037402	
			min	-0.041544	
	BOT	max	-0.037427		
		min	-0.052613		
	6. vrstva	TOP	max	<b>-3.205581</b>	
			min	<b>-3.243573</b>	
	BOT	max	<b>-3.205604</b>		
		min	<b>-3.253957</b>		

Na základě tabulky 35 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -3,25; -0,02 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-3,25 MPa** se nachází na **spodním povrchu 6. vrstvy**.

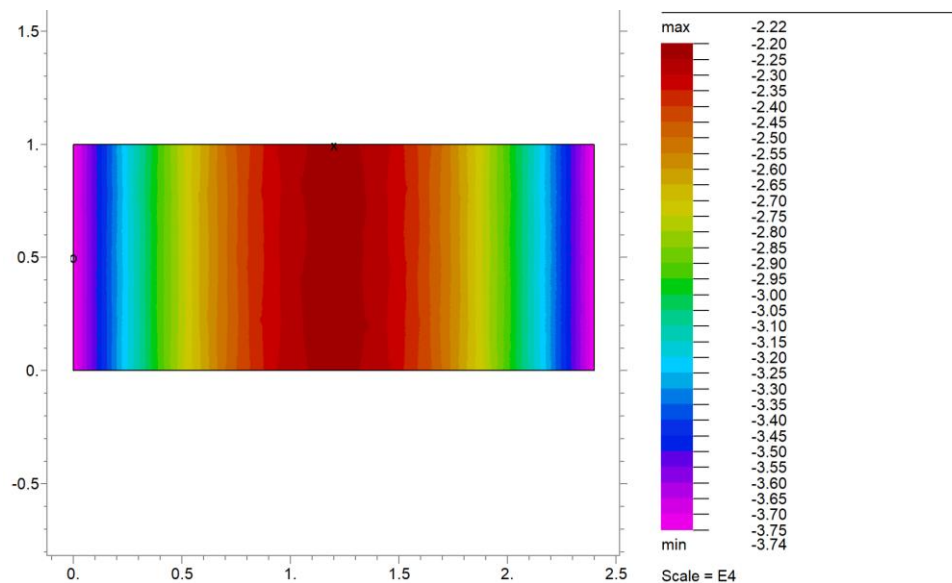
**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení ( $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN) nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 69 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 6. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 69 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 6. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -3,25; -3,2 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 70 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

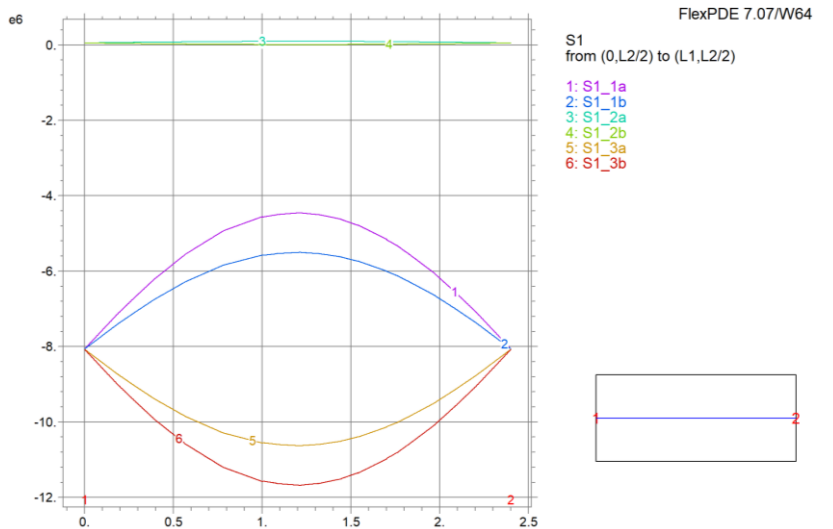
Obrázek 70 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,037; -0,022 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



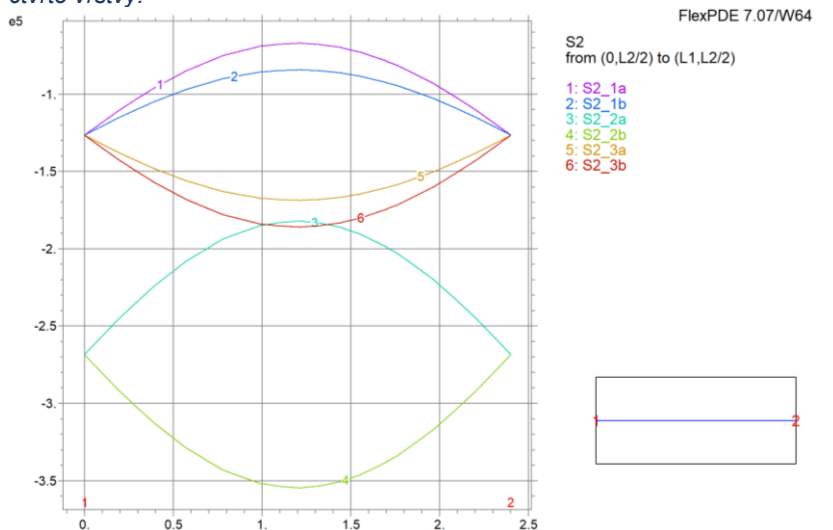
### 5.3.3 Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm

#### 5.3.3.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm při podélné orientaci vláken v povrchových lamelách **splňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při všech zátěžových stavech.



Obrázek 71 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy.



Obrázek 72 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 71 a 72 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 62 mm (3 vrstvy) s podélně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60$  kN +  $q_k=50$  kN.

### 5.3.3.1.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.3.1.1.1 Charakteristické nahodilé zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 157 \text{ kN}.$$

Tabulka 36 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

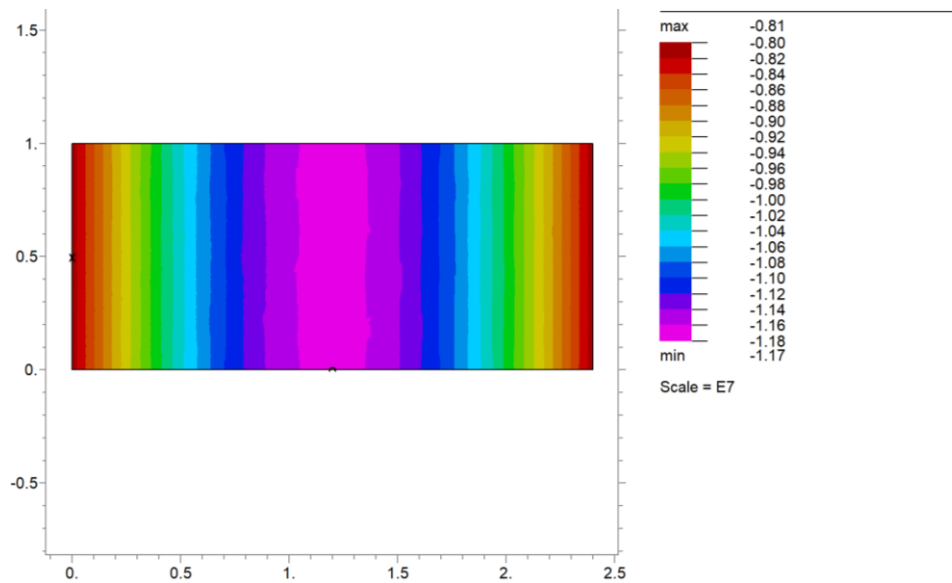
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	-4.429908	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	-8.061536	
		BOT	max	-5.485663	
			min	-8.062947	
	2. vrstva	TOP	max	0.096285	
			min	0.050823	
		BOT	max	0.052695	
			min	0.007233359	
	3. vrstva	TOP	max	-8.069848	
			min	-10.64713	
		BOT	max	-8.071259	
			min	-11.70289	

Na základě tabulky 36 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -11,70; -4,43 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-11,70 MPa** se nachází na **spodním povrchu 3. vrstvy**.

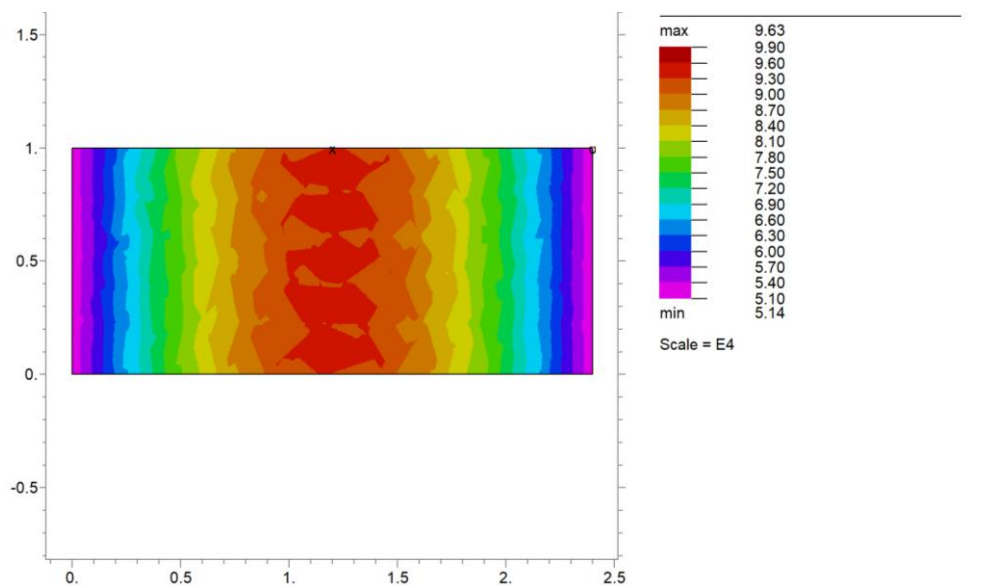
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,007; 0,10 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **0,10 MPa** se nachází na **horním povrchu 2. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 73 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 73 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 3. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -11,70; -8,10 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12,92$  MPa.



Obrázek 74 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 74 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle 0,05; 0,10 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8,62$  MPa.

Tabulka 37 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

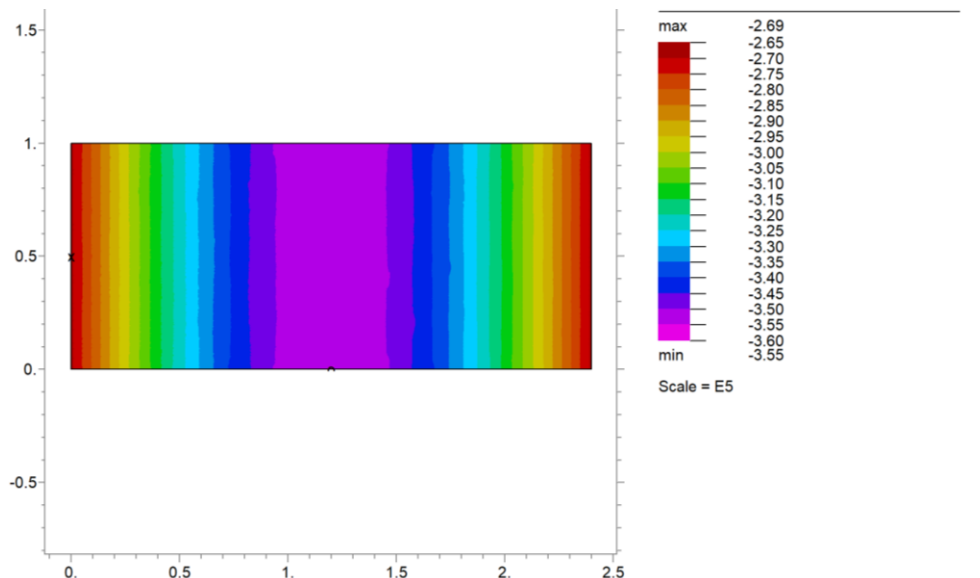
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.066765	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$  $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.126442	
		BOT	max	-0.084114	
			min	-0.126465	
	2. vrstva	TOP	max	-0.181606	
			min	-0.268276	
		BOT	max	-0.268508	
			min	-0.355178	
	3. vrstva	TOP	max	-0.126579	
			min	-0.16893	
		BOT	max	-0.126602	
			min	-0.186279	

Na základě tabulky 37 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -1,79; -0,01 \rangle$  MPa. Největší tlakové napětí **-0,36 MPa** se nachází na **spodním povrchu 2. vrstvy**.

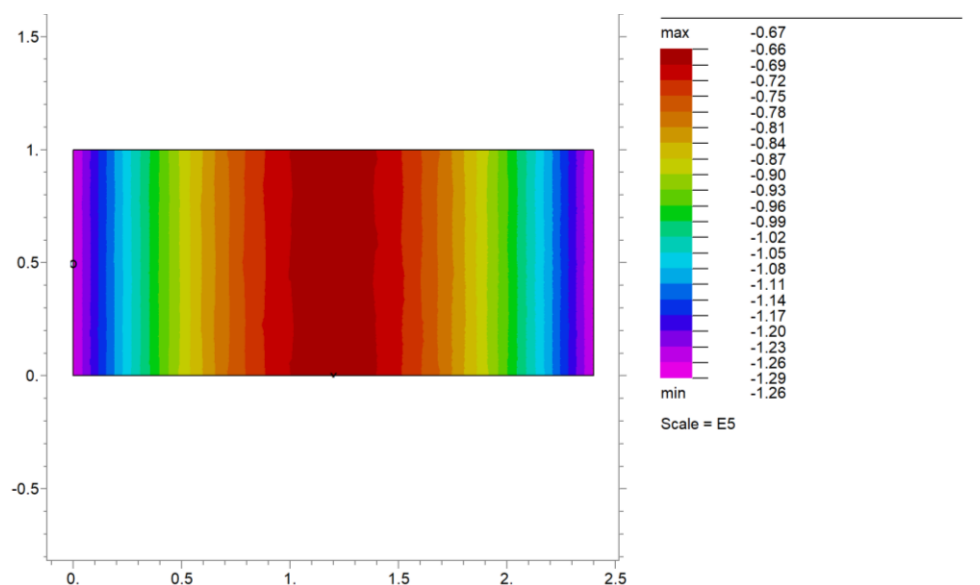
**Tahové napětí** napříč vláken se nevyskytuje v žádné vrstvě.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení  $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 75 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 75 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,36; -0,37 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 76- distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 76 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,13; -0,07 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.

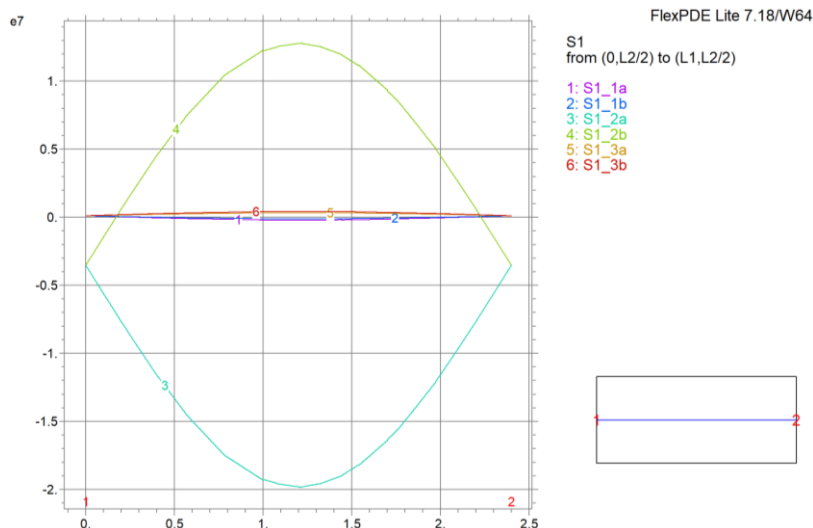
### 5.3.3.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm při příčné orientaci vláken v povrchových lamelách **nesplňuje** všechny podmínky únosnosti, a to při následujících zátěžových stavech:

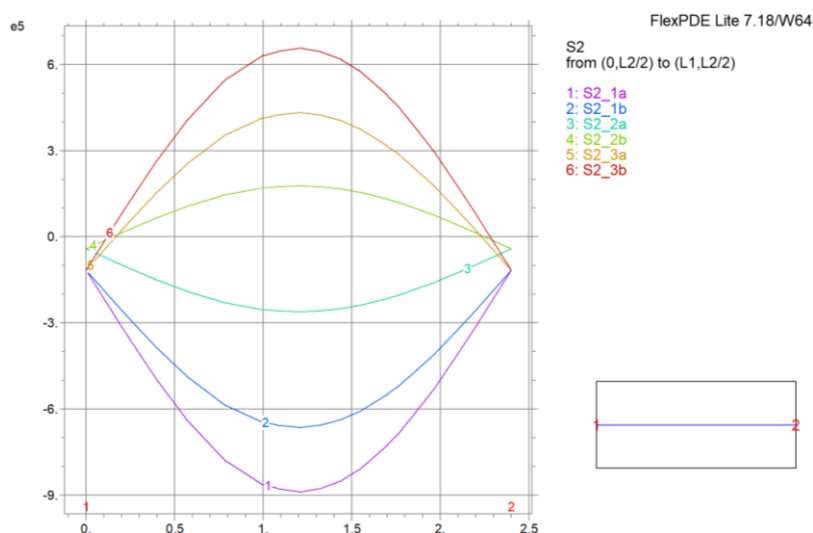
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 30 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 40 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 50 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 40; 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 60 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 30; 40; 50 \text{ kN}$

K nesplnění podmínek došlo v těchto stavech, kvůli povrchovým příčným lamelám a napětím v nich působících. Zároveň, kvůli napětí napříč vláken v druhé (prostřední) vrstvě, které překračovalo návrhové pevnosti. Z tohoto hlediska uvádím výsledky jen pro nejvyšší a nejnižší zátěžový stav, u kterého došlo k nesplnění podmínek únosnosti, tedy:

- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 30 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 50 \text{ kN}$
- Charakteristické stálé zatížení  $g_k = 60 \text{ kN}$ 
  - Charakteristické užité zatížení  $q_k = 50 \text{ kN}$



Obrázek 77- parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_1$  v základních jednotkách [Pa]; S1\_1a – napětí  $\sigma_1$  na horním povrchu (a) první vrstvy, S1\_4b – napětí  $\sigma_1$  na spodním povrchu (b) čtvrté vrstvy.



Obrázek 78 - parabolické rozložení napětí  $\sigma_2$  po výšce panelu při nejvyšším zvoleném zatížení ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN). Osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – velikost napětí  $\sigma_2$  v základních jednotkách [Pa]; S2\_3a – napětí  $\sigma_2$  na horním povrchu (a) třetí vrstvy, S2\_6b – napětí  $\sigma_2$  na spodním povrchu (b) šesté vrstvy.

Obrázek 77 a 78 zobrazuje příkladné parabolické rozložení napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  po výšce panelu o tloušťce 62 mm (6 vrstev) s příčně orientovanými povrchovými vrstvami při nejvyšším zvoleném zatížení  $g_k=60$  kN +  $q_k=50$  kN.

### 5.3.3.2.1 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 30 \text{ kN}$

#### 5.3.3.2.1.1 Charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 30 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 116,5 \text{ kN}.$$

Tabulka 38 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=30 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

<b><math>\sigma_1</math> – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách</b>					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 30 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
<b><math>\sigma_1</math></b>	1. vrstva	TOP	max	0.259113	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$ $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	0.073728	
		BOT	max	0.206174	
			min	0.07461	
	2. vrstva	TOP	<b>max</b>	<b>6.303117</b>	
			min	-2.60512	
		BOT	max	-2.619828	
			<b>min</b>	<b>-11.52806</b>	
	3. vrstva	TOP	max	0.078924	
			min	-0.05264	
		BOT	max	0.079806	
			min	-0.105579	

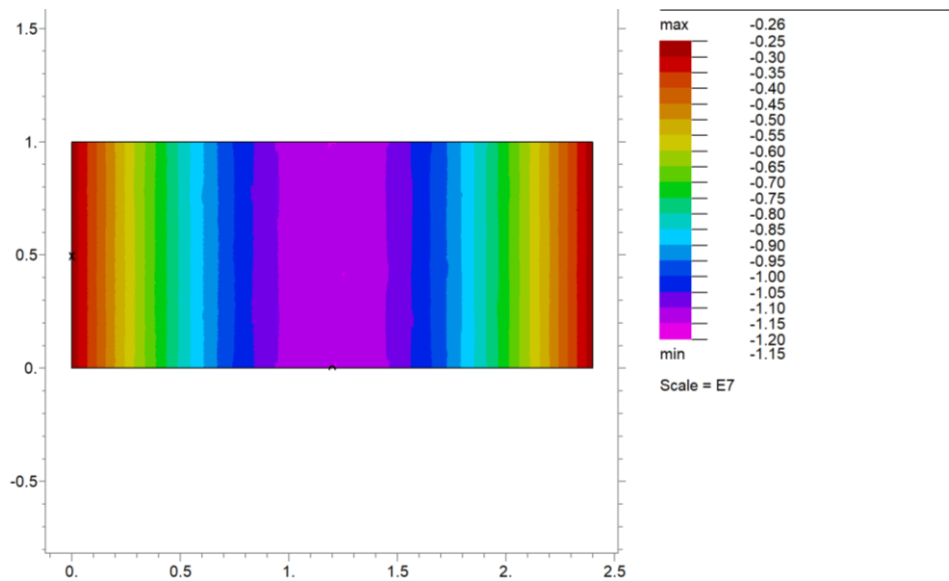
Na základě tabulky 38 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -11,53; -0,08 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-11,53 MPa** se nachází na **spodním povrchu 2. vrstvy**.

**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,07; 6,30 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **6,30 MPa** se nachází na **horním povrchu 2. vrstvy**.

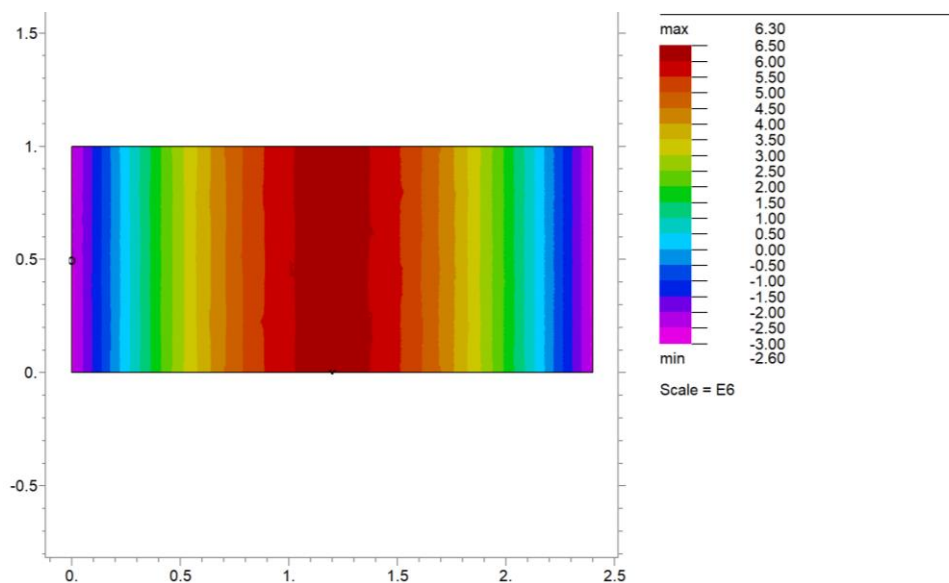
Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  nepřekračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  ani návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .





Obrázek 79- distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 79 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -11,50; -2,60 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92$  MPa.



Obrázek 80 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po horním povrchu 2. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 80 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -2,60; 6,30 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62$  MPa.

Tabulka 39 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=30$  kN;  $q_k=50$  kN)

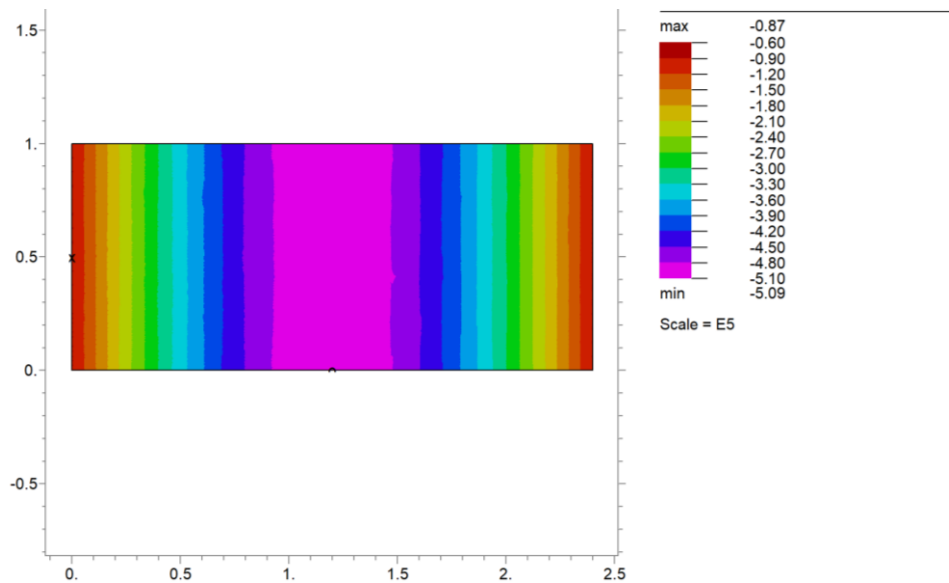
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 30$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	<b>0.336048</b>	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$  $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.08607	
		BOT	max	0.213396	
			min	-0.086171	
	2. vrstva	TOP	max	0.088437	
			min	-0.031306	
		BOT	max	-0.031504	
			min	-0.151246	
	3. vrstva	TOP	max	-0.086666	
			min	-0.386234	
		BOT	max	-0.086767	
			min	<b>-0.508885</b>	

Na základě tabulky 39 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $(-0,51; -0,09)$  MPa.  
Největší tlakové napětí **-0,51 MPa** se nachází na **spodním povrchu 3. vrstvy**.

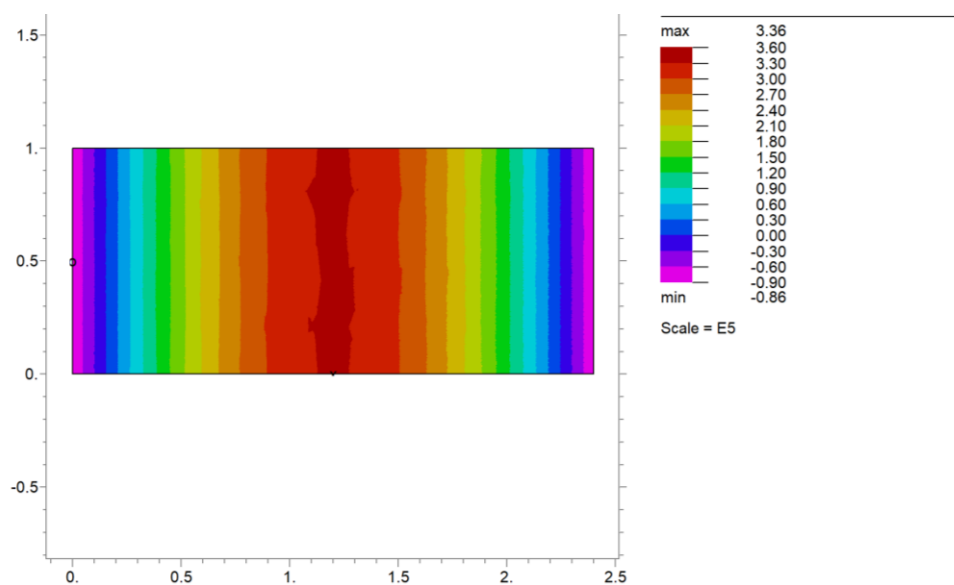
**Tahové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $(0; 0,34)$  MPa.  
Největší tahové napětí **0,34 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení ( $g_k = 10$  kN +  $q_k = 40$  kN) překračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$ . Návrhová pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$  nebyla překročena.



Obrázek 81 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 81 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 3. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,51; -0,09 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 82 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 82 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,09; 0,34 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{t,90,d} = 0.31$  MPa.

### 5.3.3.2.2 Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$

#### 5.3.3.2.2.1 Charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$

Kombinační součet  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  odpovídá normálové síle:

$$N_d = 157 \text{ kN}.$$

Tabulka 40 -  $\sigma_1$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60 \text{ kN}$ ;  $q_k=50 \text{ kN}$ )

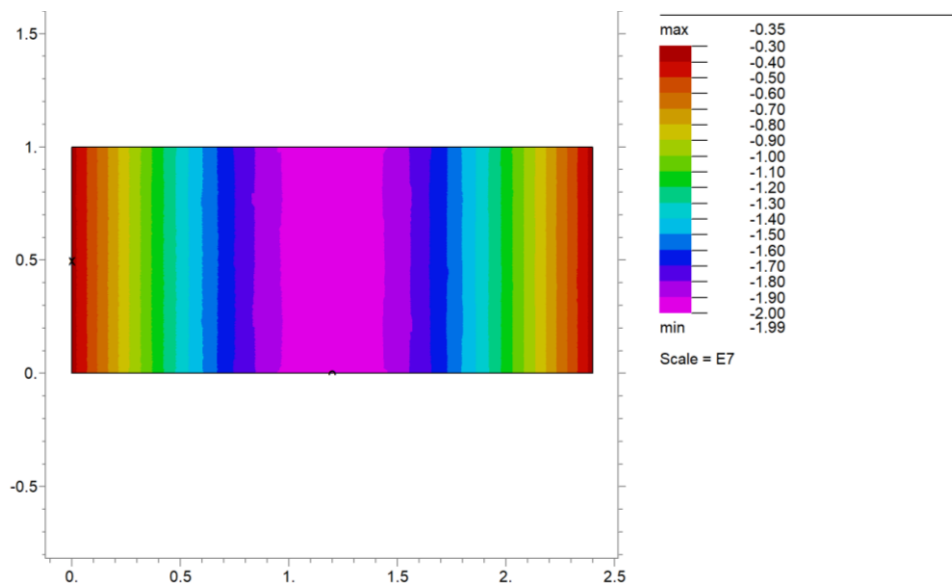
$\sigma_1$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60 \text{ kN}$ + charakteristické užité zatížení $q_k = 50 \text{ kN}$					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_1$	1. vrstva	TOP	max	0.106393	$f_{t,0,d} \geq \sigma_1 \geq f_{c,0,d}$  $8.62 \geq \sigma_1 \geq -12.92$
			min	-0.233833	
		BOT	max	0.105539	
			min	-0.135911	
	2. vrstva	TOP	max	-3.520686	
			min	<b>-19.94218</b>	
		BOT	max	<b>12.9009</b>	
			min	-3.520592	
	3. vrstva	TOP	max	0.342818	
			min	0.101368	
		BOT	max	0.44074	
			min	0.100514	

Na základě tabulky 40 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -19,94; -0,23 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tlakové napětí **-19,94 MPa** se nachází na **horním povrchu 2. vrstvy**.

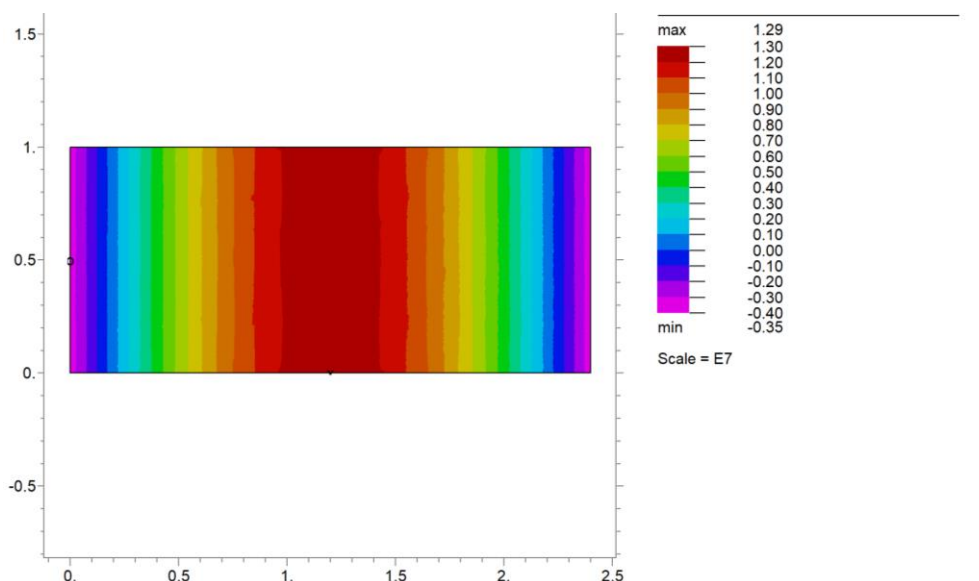
**Tahové napětí** ve směru vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,07; 6,30 \rangle \text{ MPa}$ .  
Největší tahové napětí **12,90 MPa** se nachází na **spodním povrchu 2. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_1$  při zatížení  $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$  překračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$  i návrhovou pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$ .



Obrázek 83 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním horním 2. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 83 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině horního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -19,94; -3,35 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{c,0,d} = -12.92$  MPa.



Obrázek 84 - distribuce napětí  $\sigma_1$  po spodním povrchu 2. vrstvy panelu (osa  $x$  – výška panelu, osa  $y$  – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 84 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_1$  po rovině spodního povrchu 2. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -3,50; 12,90 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{t,0,d} = 8.62$  MPa.

Tabulka 41 -  $\sigma_2$  - Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách ( $g_k=60$  kN;  $q_k=50$  kN)

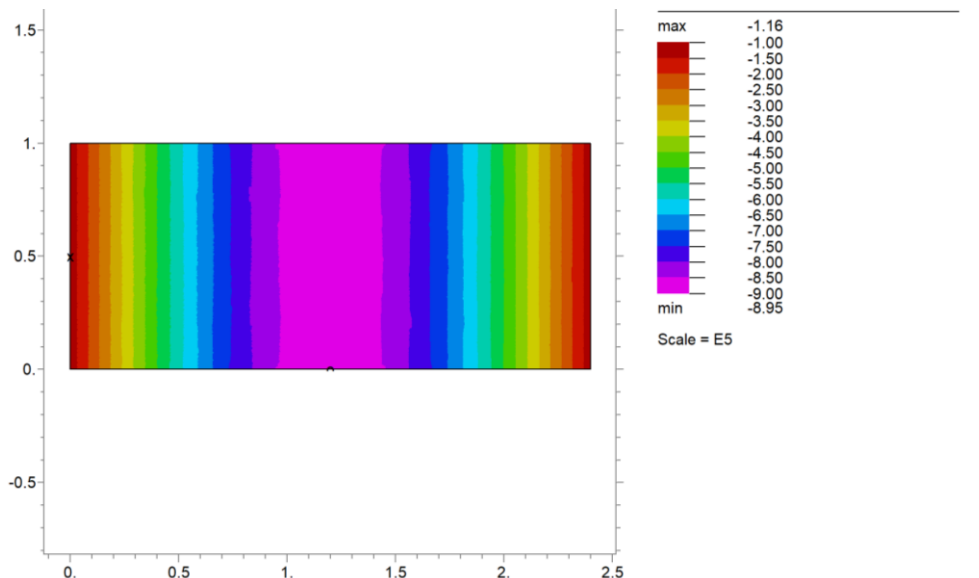
$\sigma_2$ – Panel o tloušťce 62 mm a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách					
Charakteristické stálé zatížení $g_k = 60$ kN + charakteristické užité zatížení $q_k = 50$ kN					
Typ napětí	Vrstva panelu	Povrch vrstvy	MAX/MIN hodnota	Velikost napětí [MPa]	Podmínka únosnosti [MPa]
$\sigma_2$	1. vrstva	TOP	max	-0.116462	$f_{t,90,d} \geq \sigma_2 \geq f_{c,90,d}$  $0.31 \geq \sigma_2 \geq -1.53$
			min	-0.894586	
		BOT	max	-0.116462	
			min	-0.668679	
	2. vrstva	TOP	max	-0.042309	
			min	-0.263045	
		BOT	max	0.178401	
			min	-0.042335	
	3. vrstva	TOP	max	0.435758	
			min	-0.116459	
		BOT	max	0.661666	
			min	-0.116458	

Na základě tabulky 41 lze konstatovat, že:

**Tlakové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle -0,90; -0,04 \rangle$  MPa.  
Největší tlakové napětí **-0,90 MPa** se nachází na **horním povrchu 1. vrstvy**.

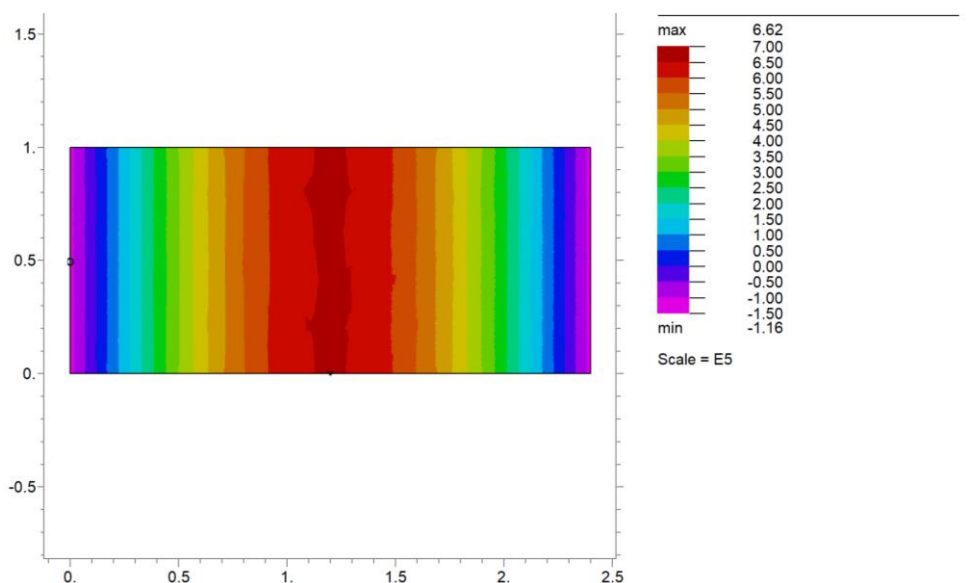
**Tahové napětí** napříč vláken se pohybuje v intervalu  $\langle 0,18; 0,66 \rangle$  MPa.  
Největší tahové napětí **0,66 MPa** se nachází na **spodním povrchu 3. vrstvy**.

Napětí  $\sigma_2$  při zatížení ( $g_k = 60$  kN +  $q_k = 50$  kN) překračuje návrhovou pevnost v tahu  $f_{t,0,d}$ . Návrhová pevnost v tlaku  $f_{c,0,d}$  nebyla překročena.



Obrázek 85 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po horním povrchu 1. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 85 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině horního povrchu 1. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,90; -0,12 \rangle$  MPa, čímž nepřekračuje návrhovou pevnost  $f_{c,90,d} = -1.53$  MPa.



Obrázek 86 - distribuce napětí  $\sigma_2$  po spodním povrchu 3. vrstvy panelu (osa x – výška panelu, osa y – šířka panelu, napětí je v základních jednotkách [Pa])

Obrázek 86 zobrazuje distribuci napětí  $\sigma_2$  po rovině spodního povrchu 3. vrstvy panelu. Toto napětí se pohybuje v intervalu  $\langle -0,12; 0,66 \rangle$  MPa, čímž překračuje návrhovou pevnost  $f_{t,90,d} = 0.31$  MPa.

## 5.4 Srovnání výsledků navrhování dle Eurokódu 5 a matematické teorie pružnosti

Srovnání výsledků jsem provedl na základě konkrétních celistvých výsledků vyplývajících z každé z použitých metod. Výstupem pro srovnání tedy je stanovisko:

- 1) ✓ - ANO, splňuje podmínky posouzení únosnosti
- 2) ✗ - NE, nesplňuje podmínky posouzení únosnosti

### 5.4.1 Tloušťka 124 mm, výška 2400 mm

#### 5.4.1.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 42 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (124L)

Panel o tloušťce 124 mm, výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken			
Trvalé zatížení ( $g_k$ )	Nahodilé zatížení ( $q_k$ )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
40	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
50	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
60	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓

Na základě tabulky 42 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 124 mm o 6 vrstvách a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách splňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle obou metod (MaTeP a EC5).



### 5.4.1.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 43 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (124Q)

<b>Panel o tloušťce 124 mm, výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken</b>			
Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )	Nahodilé zatížení (q <sub>k</sub> )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
40	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
50	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✗
60	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✗
	50	✓	✗

Na základě tabulky 43 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 124 mm o 6 vrstvách a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách splňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle obou metod (MaTeP a EC5).

## 5.4.2 Tloušťka 84 mm, výška 2400 mm

### 5.4.2.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 44 – srovnání únosností podle metod navrhování (84L)

Panel o tloušťce 84 mm, výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken			
Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )	Nahodilé zatížení (q <sub>k</sub> )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
40	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
50	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✓	✓
60	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	×	✓

Na základě tabulky 44 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 84 mm o 6 vrstvách a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách nespĺňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle EC5, a to při nejvyšším zátěžovém stavu. Při navrhování podle MaTeP byly splněny všechny podmínky únosnosti při všech zátěžových stavech.

### 5.4.2.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 45 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (84Q)

Panel o tloušťce 84 mm, výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken			
Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )	Nahodilé zatížení (q <sub>k</sub> )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✗
	50	✓	✗
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✗
	50	✓	✗
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✗
	40	✓	✗
	50	✓	✗
40	10	✓	✓
	20	✓	✗
	30	✓	✗
	40	✓	✗
	50	✓	✗
50	10	✓	✗
	20	✓	✗
	30	✓	✗
	40	✓	✗
	50	✓	✗
60	10	✓	✗
	20	✓	✗
	30	✓	✗
	40	✓	✗
	50	✗	✗

Na základě tabulky 45 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 84 mm o 6 vrstvách a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách nespĺňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle EC5, a to při nejvyšším zátěžovém stavu. Při navrhování podle MaTeP nebyly splněny podmínky únosnosti při většině zátěžových stavů.

### 5.4.3 Tloušťka 62 mm, výška 2400 mm

#### 5.4.3.1 Orientace vláken v povrchových lamelách – podélná

Tabulka 46 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (62L)

Panel o tloušťce 62 mm, výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken			
Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )	Nahodilé zatížení (q <sub>k</sub> )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✗	✓
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓
40	10	✓	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓
50	10	✗	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓
60	10	✗	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓

Na základě tabulky 46 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 62 mm o 3 vrstvách a výšce 2400 mm s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách nesplňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle EC5, a to při většině zátěžových stavů. Při navrhování podle MaTeP byly splněny všechny podmínky únosnosti při všech zátěžových stavech.

### 5.4.3.2 Orientace vláken v povrchových lamelách – příčná

Tabulka 47 – srovnání únosnosti podle metod navrhování (84Q)

Panel o tloušťce 62 mm, výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken			
Trvalé zatížení (g <sub>k</sub> )	Nahodilé zatížení (q <sub>k</sub> )	Splnění podmínky únosnosti	
		EC5	MaTeP
10	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✓	✓
	50	✗	✓
20	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✓	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✓
30	10	✓	✓
	20	✓	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✓
	50	✗	✗
40	10	✓	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✗
	50	✗	✗
50	10	✗	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✓
	40	✗	✗
	50	✗	✗
60	10	✗	✓
	20	✗	✓
	30	✗	✗
	40	✗	✗
	50	✗	✗

Na základě tabulky 47 lze konstatovat, že:

Panel o tloušťce 62 mm o 3 vrstvách a výšce 2400 mm s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách nespĺňuje podmínky únosnosti pro všechny zátěžové stavy při navrhování podle EC5, a to při většině zátěžových stavů. Při navrhování podle MaTeP byly splněny všechny podmínky únosnosti při většině zátěžových stavů.

## 6 Diskuse

### 6.1 Navrhování podle Eurokódu 5

Eurokód je normou komplexní, rozsáhlou, složitou a zároveň velmi snadnou, a to i přes to, že je používána na navrhování konstrukcí každým dnem, není normou dokonalou. Výhody a nevýhody Eurokódu popíšu z pohledu mého i z pohledu, který je všeobecně známý v odborné komunitě.

Velkou výhodou eurokódu je, jak komplexně, a přitom srozumitelně je sepsán. A právě srozumitelnost je tím, co umožňuje snadnou orientaci a tím i rychlé definování normativního výpočtu. Základ, na kterém je eurokód postaven je podložený praxí, a tedy všeobecně přijímán. Navrhování vrstvených panelů je jasně definováno v krátkém modelovém výpočtu.

Hlavní nevýhodou – z mého pohledu – je fakt, že používání normativních výpočtu, na kterých je eurokód postaven, je považováno za „uspokojivé“ a ne za „dokonalé“ nebo alespoň „téměř dokonalé“ (uspokojivé – zanedbání mnoha proměnných za účelem zjednodušení výpočtu; dokonalé – zahrnutí všech proměnných do výpočtu za účelem zvýšení přesnosti výsledku). Výškové dřevostavby, které se často skládají hlavně z vrstvených masivních panelů, považují za disruptivní technologii, která má potenciál dosáhnout statusu carbon-neutral až carbon-negative a tím razantně snížit uhlíkovou stopu stavebního sektoru. Na takovou technologii, jakou výškové dřevostavby jsou, jsou kladené vysoké bezpečnostní nároky, a právě proto nepovažují „uspokojivé“ za dostatečné (Structural Design, 2020).

Právě bezpečnost je hlavním cílem Eurokódu a je ošetřena modifikačními (bezpečnostními) faktory. Tyto faktory razantně ovlivňují návrhové pevnosti a tím i únosnost, což znovu může vést k předimenzování.

Zásadní nevýhodou při navrhování vrstvených panelů podle eurokódu považují postup, který ve svém výpočtu zanedbává příčné vrstvy panelu. V případě mého výpočtu je tlaková návrhová pevnost v podélném směru 8x vyšší než v příčném a tahová návrhová pevnost v podélném směru až 28x vyšší než v příčném a zároveň poměr mezi moduly pružnosti je 27:2,1:1 a smykový 7,5:5,4:1, a tak by se mohlo zdát, že pevnost a moduly pružnosti příčných vrstev nemůže zásadně ovlivnit únosnost. To ale přestává platit v případě, kdy příčné vrstvy tvoří většinou objem panelu.

Zanedbání příčné vrstvy může mít zásadní vliv na strukturální integritu panelu s povrchovými vrstvami v příčném směru, a to kvůli modelu, na kterém je výpočet založený, a který posuzuje únosnost panelu jako únosnost nosníku o jednotkové tloušťce, což zásadně ovlivňuje rozložení napětí po šířce panelu při tlakovém zatížení a tím do výpočtu nezahrnuje vliv smykového napětí.

Pro koncepční navrhování nových vrstvených panelů vidím nedostatek v nemožnosti výpočtu při jiné než vzájemně kolmé orientaci vláken v panelu, a tedy předpoklad speciální ortotropie.

Samotné výsledky, které prezentuji v kapitole 5.1 jsou výsledky vyplývající čistě z Eurokódu, a proto je hodnotím jako „uspokojivé“. Výsledky mi nabídlý odpověď na hledanou otázku únosnosti.

## 6.2 Navrhování podle MaTeP

Za zásadní výhodu považují fakt, že teorie zahrnuje do výpočtu všechny vrstvy panelu a tím podstatně zvyšuje potenciální únosnost. Zároveň není nutností speciální ortotropie a jednotlivé vrstvy na sebe nemusí být navzájem kolmé. Je možné zohlednit jakoukoliv skladbu vrstev.

Metoda umožňuje zahrnout materiálové a geometrické necelistvosti jako jsou například vady dřeva, otvory pro spojovací prostředky, stavební otvory a podobně. Zároveň umožňuje zohlednit takové detaily, jakými je například sukovitost dřeva.

Celý výpočet je složen s teorií matematické teorie pružnosti, které dávají dohromady komplexní analytické řešení, které sahá k úplným základům zákonům a teoriím mechaniky deformovatelného tělesa. Komplexnost a provázanost těchto teorií umožňuje rozšíření výpočtu o další teorie a tím zvýšit svůj potenciál o zpřesnění výsledků. Ve výpočtu mi nyní figurují konstanty, které mohou definovat jako proměnné a tím rozšířit řešení problému.

Kombinace laminační teorie se softwarem, jakým je FlexPDE, umožňuje rychlý výpočet mezních stavů v podobě mezních deformací a napětí. Díky řešení geometrického modelu ve 2D je možné si nechat vykreslit distribuci napětí a deformací v rovině každé, a to v každém bodě. V modelech s geometrickými necelistvostmi to umožňuje detailní analýzu působení napětí v okolí necelistvosti.

Řešení podle matematické teorie pružnosti je ale postupem, který není verifikovaný experimentem a k výsledkům je potřeba přistupovat zvláště kriticky. Verifikaci by bylo možné provést na základě vzniklého průhybu  $w$ , a to buď podle reálného experimentu anebo podle některého z konečně prvkových softwarů (Finite element method – FEM) jakými jsou například Abaqus, Ansys apod.

Zároveň, aktuální výpočet nezahrnuje vliv nerovnoměrného rozložení teploty a vlhkosti po šířce panelu a její vliv na materiálové vlastnosti. Vstupní hodnoty, se kterými nyní pracuji jsou hodnoty pro vlhkost 12 %. To mě dostává k dalšímu faktu a sice, že jako vstupní materiálové hodnoty byly použity hodnoty odpovídající pevnosti dřeva C24 z EC5. Zároveň kvůli přesnějším výsledkům jsem použil osová zatížení  $F$ , jaké je definované eurokódem. Správnost takového postupu není ověřená.

Nevýhodou této metody je nemožnost výpočtu napětí v neutrální ose desky obecně a výpočet smykového napětí. Tento výpočet buď není možný nebo jsem jej doposud nevyřešil a stojí za přezkoumání a vyřešení. Z teorie ohybu nosníku je zřejmé, že smykové napětí dosahuje svého maxima právě v neutrální ose. Právě smykové napětí je zásadní při navrhování vrstvených masivních panelů.

Postup, který definuji ve výpočetním řešení, nenabízí 3D řešení a tedy chybí informace o příčné distribuci napětí. Samotná laminární teorie, Kirchhoffova teorie i desková rovnice pracují pouze s 2D.

Navrhování podle matematické teorie je metodou, která mi při výpočtech nabízela hlubší vhled na chování konstrukčního prvku.

### 6.3 Srovnání postupů, návrh na použití výsledků v praxi

Variabilita navrhování podle MaTeP je velkou výhodou celé metody. Možnost definovat každou proměnnou, každou vadu materiálu, každou necelistvost a tím dosáhnout dokonalého výsledku, vidím jako klíčovou při navrhování konstrukčních prvků.

Tuto vlastnost MaTeP lze využít při navrhování konstrukčních spojů. Je pravda, že EC5 má velmi dobře a snadno vyřešeno navrhování konstrukčních spojů. Co ale EC5 vyřešeno nemá, je postup v případě, kdy podmínka únosnosti nevyhovuje. V takovém případě je několik možností řešení, ale ve směr jsou všechny postupem pokus-omyl. MaTeP v takovém případě odpovídá na otázku, které napětí je mezní, kde toto napětí působí, jaké deformace jsou klíčové, kde a jak působí na spojovací prvky nebo samotnou distribuci napětí ve spojovacím prvku. Dobrým příkladem může být navrhování spojů na šrouby, kdy podle EC5 kroučící moment nesmí přesáhnout determinovanou návrhovou hodnotu. Takovou podmínku je v EC5 jednoduché konstatovat, ale těžké odůvodnit konkrétními okrajovými podmínkami – deformace a napětí od deformací působící na spojovací prostředek, přenášení napětí ve spojovacím prostředku, vliv tvaru spojovacího prostředku a otvoru v konstrukčním prvku na kroučící momenty apod. MaTeP v tomto případě nabízí detailnější analýzu.

Možnost definovat každou proměnnou v MaTeP nemusí být v každém případě výhodou. S množstvím proměnných roste i časová náročnost pro definování modelu i výpočet. Z tohoto hlediska považuji MaTeP za velmi těžko použitelnou při navrhování velkých konstrukcí složených z mnoha konstrukčních prvků spojených detailními spoji, a to nejen kvůli časové náročnosti při přípravě výpočetního skriptu, ale i z hlediska výpočetní paměti, která by pro takový problém musela být enormně velká. Když opomenou fakt, že MaTeP není oproti EC5 normou, EC5 je z hlediska navrhování velkých konstrukcí bezesporu vhodnější metodou.

Při všech těchto předpokladech může MaTeP fungovat jako opora pro EC5 v případech kdy EC5 neposkytuje postup při řešení složitých či neobvyklých konstrukčních prvků nebo spojů. A přesně takto MaTeP anebo podobně, funguje v některých FEM softwarech.

Rozdíl v postupech je velmi dobře znatelný při posouzení únosnosti u panelu o tloušťce 84 mm s příčnou orientací povrchových vrstev (kapitola 5.3.2.2), kde EC5 zanedbává povrchové vrstvy (kapitola 5.1.2.2). Pro výpočet dle EC5, panel splňuje podmínku únosnosti ve všech zátěžových stavech. Rozdíl nastává u MaTeP, která bere všechny vrstvy panelu v potaz. V tomto případě napětí  $\sigma_2$  přesáhne návrhovou tlakovou pevnost v příčném směru, a to o více než je dvojnásobek návrhové pevnosti. Při překročení takových hodnot už můžeme diskutovat o tom, zda nedochází k plastické deformaci materiálu.



## 6.4 Návrh na úpravu řešení

Vstupní hodnoty (materiálové a průřezové hodnoty), které používám v obou metodách, nepocházejí z jednoho konkrétního zdroje a pro zpřesnění výsledků je potřeba tyto hodnoty sjednotit, ideálně podle jedné konkrétní normy nebo praktického laboratorního měření materiálových konstant.

Výpočetní skript FlexPDE použitý pro řešení podle MaTeP je nyní koncipován pro 2D řešení. Rozšíření na 3D řešení by poskytlo detailnější výsledky, ale zároveň vyžadovalo vyšší hardwarové nároky. 3D řešení by teoreticky mohlo sloužit k zobrazení napětí v příčných rovinách, které by ale vyžadovalo rozdělit panel na velké množství podélných rovin (čím více rovin, tím složitější výpočet a tím vyšší šance na přesnou definici příčného rozložení napětí). V praxi by to znamenalo zvětšit hustotu „meshování“, tedy množství bodů, pro které model počítá.

Řešení podle MaTeP je koncipován pro panel o výšce 2400 mm. Podle EC5 – na prvek namáhaný na vzpěr nebo kombinovaný osový tlak a příčný ohyb, má zásadní vliv výška prvku, která má vliv na příčnou stabilitu prvku. Takové chování ověřeně funguje v EC5. Porovnání řešení obou metod by tedy mělo být nejen pro jedno výšku panelu, ale pro více různých výšek.

Řešení MaTeP jsem navrhoval za předpokladu konstantních teplot a konstantních vlhkostí po šířce panelu, které odpovídají průřezovým a materiálovým hodnotám uvedených v literatuře. Řešení tedy nepočítá s nerovnoměrným rozložením vlhkosti a teploty a pro lepší a přesnější výsledky odpovídající skutečnému modelu je na místě rozšířit výpočet o multifyziku. Takový rozšíření by mohlo zahrnovat i čas jako proměnnou.

Jelikož je MaTeP neověřenou metodou, je potřeba ji ověřit a verifikovat, a to nejlépe praktickým experimentem nebo řešením v FEM softwaru (Ansys, Abaqus apod.). Pro neúplnou verifikaci je potřeba porovnat ohyb desky podle MaTeP a ohyb desky podle experimentu. Pro úplnou verifikaci je potřeba ověřit alespoň 3 veličiny (napětí, průhyb, mezí stavy atd.) podle experimentu.

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce je porovnat dvě nezávislé metody navrhování dřevěných panelů určených k nosným konstrukčním účelům (CLT) - navrhování podle Eurokódu (EC5) a podle matematické teorie pružnosti (MaTeP), vytvořit výpočetní postup odpovídající normám EC5, a vytvořit výpočetní numerický model podle MaTeP. Tyto dvě metody aplikovat při zátěžových stavech odpovídajících kombinaci charakteristického trvalého zatížení pohybující se v intervalu  $\langle 10; 60 \rangle$  kN a charakteristického nahodilého zatížení pohybující se v intervalu  $\langle 10; 50 \rangle$  kN, čímž jsem dostal 30 normálových osových sil v intervalu  $\langle 29,5; 158 \rangle$  kN. Tyto síly jsem aplikoval na křížem lepené masivní panely, vyráběné z lamel křížově skládaných do vrstev (CTL) za okrajových podmínek definovaných jedním posuvným kloubem na jedné (horní) straně sloupu (desky) a jedním pevným kloubem na druhé (spodní) straně sloupu (desky).

Hlavním cílem této práce je porovnání výše uvedených postupů na základě výpočtu mezních stavů únosnosti a napětí působící v panelu a navrhnout možnost jejich použití v praxi.

### 7.1 Sestavení výpočetního modelu

Výpočetní model pro navrhování podle EC5 byl úspěšně sestaven, a to na základě platné normy pro navrhování CLT panelů (DIN EN 1995-1-1/NA/A1) zatížených tlakovou osovou silou v ose panelu a plošným zatížením vně kolmo k ose panelu. Výpočetní model odpovídal postupu, který je v praxi používán, resp. kterým výrobce panelů své produkty navrhuje a dimenzuje.

Výpočetní model pro navrhování podle Matematické teorie pružnosti byl úspěšně sestaven na základě Laminární teorie pružnosti, rozšířeného Hookeova zákona, Kirchhoffovy teorie tenkých desek, deskové rovnice a transformace napětí. Aplikace těchto zákonů a teorie tvoří výpočetní postup, který je v souladu s principy mechaniky deformovatelného tělesa.

### 7.2 Geometrie panelu a zátěžové stavy

Pro porovnání obou metod byly výpočty uskutečněny na stejných CLT panelech ve variantách, které se lišily počtem a tloušťkou vrstev a orientací vláken v povrchových vrstvách. Tato geometrie odpovídala produktovým panelům značky NOVATOP Solid. Takovým postupem byly odhaleny silné a slabé stránky obou výpočetních postupů, protože se výsledky v řadě případů navzájem rozcházejí. Bylo to způsobeno principy metod, resp. řadou zjednodušení, která zejména do postupu dle EC5 zanášejí přílišné zjednodušení výpočtu. Rozdílné přístupy současně odhalily nedostatky obou metod z hlediska navrhování. Díky tomu jsem byl schopen lépe pochopit nejen povahu obou výpočetních metod, ale i lépe vyhodnotit výsledky.

Zátěžové stavy a okrajové podmínky byly převzaty z Technické dokumentace panelů Novatop Solid. Na základě těchto zátěžových stavů se u výpočtu únosnosti několika panelů stalo, že i při maximálním možném stavu, panel splnil podmínku únosnosti, a to zejména u panelů s podélnou orientací vláken. Z tohoto hlediska nebylo možné stanovit maximální únosnost panelu, a tedy porovnat maximální mezní únosnosti podle každé z metod.

Zásadní rozdílný přístup mezi oběma metodami spočíval v tom, zda ve výpočtu zohledňovaly všechny vrstvy CLT panelu nebo pouze ty, u nichž odpovídala orientace vláken osovému zatížení. To se ukázalo jako velká slabina u přístupu vycházejícího z EC5.

### 7.3 Panely s podélnou orientací vláken v povrchových vrstvách

Navrhování podle matematické teorie pružnosti poukázalo na důležitost příčně orientovaných vrstev v CLT panelech. I přes výrazné rozdíly v modulech pružnosti pro podélný a příčný směr, tloušťkový objem příčných vrstev dokáže razantně podpořit celkovou únosnost panelu. Podmínka únosnosti podle EC5 nebyla v mnoha případech splněna právě kvůli zanedbání příčných vrstev. Z tohoto hlediska vychází únosnost CLT panelů vyšší podle MaTeP.

Pro panel o tloušťce 124 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází ke **splnění** stanovených podmínek únosnosti u všech zátěžových stavech. Při nejvyšším zatížení, odpovídající normálové síle  $N_d = 158 \text{ kN}$ , se podmínka únosnosti při hodnotě  $0,94 \leq 1$  pohybuje na hranici únosnosti.
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází ke **splnění** stanovených podmínek únosnosti u všech zátěžových stavech. Při nejvyšším zatížení, odpovídající normálové síle  $N_d = 158 \text{ kN}$ , se napětí  $\sigma_1$  pohybuje v intervalu  $\langle -4,16; 0,089 \rangle \text{ MPa}$  a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -0,15; 0,08 \rangle$ , čímž nejsou překročeny návrhové pevnosti.

U všech variant panely návrhové hodnoty splnily a mezi výsledky podle obou metod nebyl zjištěn žádný rozdíl.

Pro panel o tloušťce 84 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti, při nejvyšším zátěžovém stavu, který odpovídá normálové síle  $N_d = 157,4 \text{ kN}$  ( $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$ ).
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází ke **splnění** stanovených podmínek únosnosti u všech zátěžových stavech. Při nejvyšším zatížení, odpovídající normálové síle  $N_d = 157,4 \text{ kN}$ , se napětí  $\sigma_1$  pohybuje v intervalu  $\langle -4,47; 0,13 \rangle \text{ MPa}$  a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -0,17; 0,12 \rangle$ , čímž nejsou překročeny návrhové pevnosti.

Rozdíl v únosnostech panelu podle jednotlivých metod je zapříčiněn geometrií konkrétního panelu, který je tvořen z 6 vrstev, přičemž druhá a pátá vrstva je vrstva příčná o tloušťce 24 mm. Takový objem dřevěného materiálu je ve výpočtu EC5 zanedbán, což zásadně ovlivňuje únosnost panelu. U navrhování podle MaTeP dochází k rozložení působícího vnější zatížení do všech vrstev včetně příčných, a tedy lepšímu rozložení napětí po celém objemu.

U všech ostatních variant panely návrhové hodnoty splnily.

Pro panel o tloušťce 62 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti při zatížení osovou silou v intervalu  $N_d = \langle 83,5; 157 \rangle$  kN. To je při 20 zátěžových stavech z celkových 30.
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází ke **splnění** stanovených podmínek únosnosti u všech zátěžových stavech. Při nejvyšším zatížení, odpovídající normálové síle  $N_d = 157$  kN, se napětí  $\sigma_1$  pohybuje v intervalu  $\langle -11,70; 0,10 \rangle$  MPa a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -0,36; -0,08 \rangle$ , čímž nejsou překročeny návrhové pevnosti.

Stejně jako u předešlého panelu je únosnost ovlivněna geometrií panelu. Panel o tloušťce 62 mm s podélnou orientací vláken se skládá ze 3 vrstev – povrchových podélných vrstev o tloušťce 9 mm a středové příčné vrstvě o tloušťce 44 mm. Zatím co při navrhování podle EC5 tedy zanedbáváme 71 % celkového objemu panelu a působící vnější zatížení se rozkládá jen do dvou vrstev o šířce 9 mm, což pochopitelně ovlivňuje únosnost panelu a projevuje se v nesplnění podmínek únosnosti u většiny zátěžových stavů

U všech ostatních variant panelu návrhové hodnoty splnily.

#### 7.4 Panely s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách

Při pohledu na výsledky pro **panely s příčnou orientací vláken v povrchových vrstvách** je zřejmé, že únosnost panelů se liší na základě použité metody a specifické geometrie panelu.

Pro panel o tloušťce 124 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází ke **splnění** stanovených podmínek únosnosti u všech zátěžových stavech. Při nejvyšším zatížení, odpovídající normálové síle  $N_d = 158$  kN, podmínka únosnosti nabývá maximální hodnoty  $0,87 \leq 1$ .
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti při zatížení normálovou silou v intervalu  $N_d = \langle 143; 158 \rangle$  kN. Napětí  $\sigma_1$  se v těchto případech pohybuje v intervalu  $\langle -2,09; 0,12 \rangle$  MPa a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -1,79; -0,02 \rangle$  MPa, čímž je překročena návrhová tlaková pevnost napříč vlákny ( $f_{c,90,d} = -1,53$  MPa).

Tlakové napětí v příčném směru při největším zátěžovém stavu dosahuje hodnoty  $\sigma_2 = -1,79$  MPa a to v šesté příčně orientované vrstvě. Tato povrchová vrstva je vrstvou, která tvoří jen 7% celkové tloušťky panelu. Překročení návrhové pevnosti v této vrstvě může vést k plastické deformaci nebo porušení materiálu, které ale nemusí mít zásadní vliv na únosnost panelu.

U všech ostatních variant panelu návrhové hodnoty splnily.

#### Pro panel o tloušťce 84 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti, při nejvyšším zátěžovém stavu, který odpovídá normálové síle  $N_d = 157,4 \text{ kN}$  ( $g_k = 60 \text{ kN} + q_k = 50 \text{ kN}$ ).
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti při zatížení normálovou silou v intervalu  $N_d = \langle 74,9; 157,4 \rangle \text{ kN}$ . Napětí  $\sigma_1$  se v těchto případech pohybuje v intervalu  $\langle -4,34; 0,15 \rangle \text{ MPa}$  a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -3,25; -0,02 \rangle \text{ MPa}$ , čímž je překročena návrhová tlaková pevnost napříč vláken ( $f_{c,90,d} = -1,53 \text{ MPa}$ ).

K překročení návrhových tlakových pevností v příčném směru dochází v 6. vrstvě panelu, a tedy stejně jako u předešlého panelu o šířce 124 mm. Při největším zátěžovém stavu je nejvyšším působícím napětím tlakové napětí napříč vláken  $\sigma_2 = -3,25 \text{ MPa}$ .

U všech ostatních variant panelu návrhové hodnoty splnily.

#### Pro panel o tloušťce 62 mm:

- **Při navrhování podle EC5** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti při zatížení normálovou silou v intervalu  $N_d = \langle 86,5; 157 \rangle \text{ kN}$ . To je při 18 zátěžových stavech z celkových 30.
- **Při navrhování podle MaTeP** dochází k **nesplnění** stanovených podmínek únosnosti při zatížení normálovou silou v intervalu  $N_d = \langle 115; 157 \rangle \text{ kN}$ . Napětí  $\sigma_1$  se v těchto případech pohybuje v intervalu  $\langle -19,94; 12,90 \rangle \text{ MPa}$  a napětí  $\sigma_2$  v intervalu  $\langle -0,90; 0,66 \rangle \text{ MPa}$ , čímž je překročena návrhová tahová pevnost napříč vláken ( $f_{t,90,d} = 0,31 \text{ MPa}$ ) a návrhová tahová a tlaková pevnost ve směru vláken ( $f_{t,0,d} = 8,62 \text{ MPa}$ ;  $f_{c,0,d} = -12,92 \text{ MPa}$ ).

U nejvyšších zátěžových stavů dochází podle MaTeP k překročení návrhové tlakové a tahové pevnosti ve směru vláken ve středových podélných vrstvách, a tedy nesplnění podmínky únosnosti, čímž se jen potvrzuje výsledek výpočtu dle EC5. Zároveň dochází k překročení návrhové tlakové a tahové pevnosti napříč vláken v povrchových vrstvách, které EC5 v postupu zanedbává.

U všech ostatních variant panelu návrhové hodnoty splnily.

## 7.5 Návrh na úpravu a použití výsledků v praxi

Na základě sestavených výpočetních postupů a následného porovnání výsledků lze konstatovat:

- Příčné vrstvy, které EC5 zanedbává, zásadně ovlivňují únosnost panelů. Zanedbání zároveň přispívá k předdimenzování panelu.
- MaTeP je z hlediska náročnosti sestavení výpočtu výrazně komplikovanější, než je EC5 a to zejména, kvůli požadavkům na sestavení soustavy diferenciálních rovnic, na jejichž řešení je výpočet MaTeP založen. Navrhování podle matematické teorie pružnosti je z tohoto hlediska nevhodnou metodou pro navrhování komplexnějších konstrukcí.
- MaTeP byla aplikována na geometrický a materiálový model CLT panelu, u kterého nebyl zahrnut vliv lepené spáry. Přesto jsou ve většině případů výsledky dimenzování u obou metod stejné; zjednodušení modelu jen na vrstvy dřeva tak bylo zjištěno jako možné a použitelné.
- Všechny dosažené výsledky vycházejí z modelových výpočtů a v rámci práce tyto nebyly experimentálně ověřeny.
- Použití MaTeP v praxi (například na řešení konstrukčních detailů a/nebo zahrnutí materiálových a geometrických nehomogenit – různé materiálové vlastnosti, vliv nerovnoměrně rozložené vlhkosti a teploty po průřezu panelu apod.) vyžaduje validaci modelu cílenými experimenty zaměřenými na analýzu obou mezních stavů.

Výsledek této bakalářské práce může sloužit jako podnět pro přehodnocení stávajících postupů používaných v praxi. EC5 je svým normativním výpočtem, komplexností a jednoduchostí uspokojujícím postupem při navrhování konstrukčních materiálů z hlediska únosnosti, avšak nedostatečný z hlediska posuzování mezního stavu použitelnosti. Současně neumožňuje postihnout nerovnoměrně rozloženou vlhkost a teplotu a současně také nepostihuje údaje o oblastech s výskytem největších napětí v panelu.

Z tohoto pohledu je vhodnější metodou MaTeP, která nabízí detailnější informaci o distribuci napětí v každém bodě v každé vrstvě panelu, deformacích a průhybu, a to nehledě na fakt, že použitý výpočetní model nezohledňoval lepenou spáru mezi vrstvami a vliv nerovnoměrného rozložení teploty a vlhkosti.

Z tohoto hlediska je MaTeP vhodnou metodou pro navrhování a předdimenzování nejen CLT panelů, ale i nových konstrukčních prvků, se kterými EC5 nepočítá.

## 8 Použitá Literatura

- BODIG J., JAYNE B. A. (1993): Mechanics of Wood and Wood composites; Malabar, Fla. Krieger; pp. 712; ISBN 0894647776
- BRDIČKA M., SAMEK L., SOPKO B. (2011): Mechanika kontinua; Gerstner; pp. 880; ISBN 978-80-200-2039-0
- BROŽOVSKÝ J., MATERNA A. (2012): Základy matematické teorie pružnosti; VŠB-TU Ostrava; pp 123;
- ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD (2018): Staví se stále více úsporných domů [online]; [cit. 6. 1. 2012] Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/stavi-se-stale-vice-uspornych-domu>
- DIN EN 1995-1-1/NA/A1:2012-02 (2012): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Änderung A1; Deutsches Institut für Normung
- DOLEŽAL M. (2016): Dřevostavby mohou zásadním způsobem zefektivnit stavebnictví. Jsou i ekologičtější; In: [drevoastavby.cz](http://drevoastavby.cz) [online]; [cit. 14. 1. 2021] Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/vse-o-drevostavbach/stavba-drevostavby/ostatni/3646-drevostavby-mohou-zasadnim-zpusobem-zefektivnit-stavebnictvi-jsou-i-ekologictejsi>
- ETA-12/0079. NOVATOP SOLID. Praha. Technický a zkušební ústav stavební Praha. [online]. 2012. [cit. 6. 1. 2021] Dostupné z: [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=cp.nb\\_hs&hs\\_id=143927](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=cp.nb_hs&hs_id=143927)
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1994): Eurocode 5: design of timber structure, Brussels, BSI; pp 123; ISBN: 9780470675007
- HORÁČEK P. (2010): Mechanické vlastnosti dřeva [online]; pp 44; [cit 19. 11. 2019] Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=7038;studium=17869;zp=14344;download\\_prace=1;lang=sk](https://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=7038;studium=17869;zp=14344;download_prace=1;lang=sk)
- JOHANSSON M. (2017): Extracts for Timber Engineering, Eurocode 0 and 1, elementary cases; Linnaeus University; pp 44
- KARACABEYLI E., GAGNON S. (2019): Canadian CLT Handbook; FPIInnovations; pp 463; ISBN: 0864885911
- KOLB J. (2011): Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště; Praha: Grada; pp 320; ISBN 978-80-247-4071-3.
- KOŽELOUH B. (1998): Dřevěné Konstrukce podle Eurokódu 5: Step 1 – Navrhování a konstrukční materiály; KODR Zlín; pp 460; ISBN: 80-238-2620-4
- KREJSA M., LAUSOVÁ L., MICHALCOVÁ V. (2011): Pružnost a plasticita [online]; VŠB-TU Ostrava; pp 296; [cit. 19. 11. 2019] dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost\\_tisk.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_tisk.pdf)
- KUKLÍK P., VELEBIL L. (2018): Novinky v oblasti navrhování vícepodlažních dřevostaveb z křížem vrstveného dřeva; In: [Stavba.tzb-info.cz](http://stavba.tzb-info.cz) [online]; ČVUT Praha; [cit. 14. 1. 2021] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/17914-novinky-v-oblasti-navrhovani-vicepodlaznich-drevostaveb-z-krizem-vrstveneho-dreva>
- NETTLES A. T. (1994): Basic Mechanics of Laminated Composite Plates; NASA Alabama; pp 102; ISBN 1730984487
- NOVATOP (2020): Novatop Solid Technická Dokumentace [online]; [cit. 7. 10. 2020] Dostupné z: [https://novatop-system.cz/wp-content/uploads/2018/09/CZ\\_NOVATOP\\_SOLID-1.pdf](https://novatop-system.cz/wp-content/uploads/2018/09/CZ_NOVATOP_SOLID-1.pdf)

- POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M. (1997): Štruktúra a vlasnosti dreva; Bratislava: Príroda; pp 485; ISBN 80-07-00960-4
- SHAOBO L., GU H., BERGMAN R., KELLEY S. (2020): Comparative life-cycle assesment of a mass timber building and concrete alternative. Wood and Fiber Science [online]; Society of Wood and Technology; [cit. 14. 1. 2021] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/340960305\\_Comparative\\_life-cycle\\_assessment\\_of\\_a\\_mass\\_timber\\_building\\_and\\_concrete\\_alternative](https://www.researchgate.net/publication/340960305_Comparative_life-cycle_assessment_of_a_mass_timber_building_and_concrete_alternative)
- SHOKRIEN M. M. (2014): Modeling residual stresses in composite materials. Woodhead Publishing; Woodhead Publishing; pp 404; ISBN: 9780857092700
- Structural Design (2020): Reaction to the Eurocode [online]; [cit. 2. 1. 2020] Dostupné z: <https://www.eurocode.us/structural-design-eurocode-7/reaction-to-the-eurocodes.html>
- SWEDISH WOOD (2016): Design of Timber Structures: Rules and formulas according to Eurocode 5; Swedish Forest Industries Federation; pp 64; ISBN: 978-91-980304-3-3
- SWEDISH WOOD (2016): Design of Timber Structures: Structural aspects of timber construction; Swedish Forest Industries Federation; pp 316; ISBN: 978-91-980304-8-8
- ŠMIŘÁK S., TEPLÝ B. (1993): Pružnost a plasticita II; VUT Brno; pp 199; ISBN: 80-214-0498-1
- VRBKA J. (2008): Mechanika kompozitů [online]; VUT Brno; pp 94; [cit. 7. 10. 2020] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- VYBÍRAL B.; Mechanika Pružného Tělesa [online]; pp 64; [cit. 7. 10. 2020] Dostupné z: <https://docplayer.cz/1813508-Mechanika-pruzneho-telesa-studijni-text-pro-resitele-fo-a-ostatni-zajemce-o-fyziku-bohumil-vybiral-predmluva-3.html>



## 9 Přílohy

### 9.1 Příloha 1 – Technické dokumentace Novatop SOLID (vybrané kapitoly)

# NOVATOP SOLID – PRO STĚNY PŘEDBĚŽNÉ DIMENZOVÁNÍ

Příklad výpočtu podle ETA-12/0079

## 1 Všeobecné informace

V následujícím dokumentu je na stěnovém panelu z vrstveného dřeva NOVATOP SOLID společnosti AGROP NOVA a.s. ukázán podrobný výpočet a provedení posouzení podle norem DIN EN 1995-1-1/NA/A1 (2012-02) platných pro Německo (zatížení vně a příčně ke směru stěny, vertikální směr vláken povrchové vrstvy). Je provedeno posouzení mezních stavů únosnosti a použitelnosti. Referenční šířka pro výpočet je 1,0 m.

## 2 Systém a zatížení

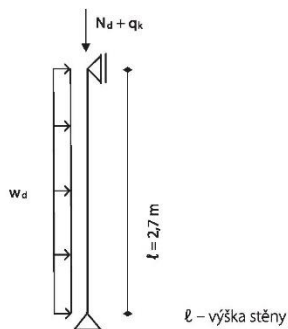
### 2.1 Materiál:

Panel z vrstveného dřeva NOVATOP SOLID  $t = 84$  mm  
(skladba: 9p – 24q – 2 x 9p – 24q – 9p; Povrchové vrstvy C24)  
Charakteristické hodnoty:  
Modul pružnosti rovnoběžně s vlákny  $E_{0,mean} = 11.600$  N/mm<sup>2</sup>  
Pevnost v ohybu  $f_{m,k} = 24,0$  N/mm<sup>2</sup>  
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny  $f_{c0,k} = 24,0$  N/mm<sup>2</sup>  
Efektivní ohybová tuhost  $EI_{eff} = 2,82 \cdot 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>  
Součinitel dotvarování  $k_{def} = 0,60$

### 2.2 Zatížení:

Třída provozu 1  
Stálé zatížení:  $g_k = 2,00$  kN/m  
včetně vlastní hmotnosti  
Nahodilé zatížení (větrem):  $w_k = 1,50$  kN/m; příčně k ose stěny  
Užitné zatížení:  $q_k = 30$  kN; v ose stěny  
Modifikační koeficient  $\rightarrow k_{mod} = 0,80$

### 2.3 Výpočet vnitřních sil:



$$N_d = 1,35 \cdot (0,084 \cdot 5,0 \cdot 2,7 + 20) + 1,5 \cdot 30 = 73,53 \text{ kN}$$
$$w_d = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 \text{ kN/m}$$

# NOVATOP SOLID – PRO STĚNY PŘEDBĚŽNÉ DIMENZOVÁNÍ

Maximální normálová síla:  
 $N_d = 73,53 \text{ kN}$

Maximální moment (excentricita  $N_d$ :  $e = 0,015 \text{ m}$ ):

$$M_d = \frac{w_d \cdot \ell^2}{8} + N_d \cdot e = \frac{0,75 \cdot 2,7^2}{8} = 73,53 \cdot 0,015 = 1,79 \text{ kNm}$$

Maximální příčná (smyková) síla:

$$V_d = \frac{w_d \cdot \ell}{2} = \frac{0,75 \cdot 2,7}{2} = 1,01 \text{ kNm}$$

### 3 Posouzení únosnosti – posouzení ohybu a tlaku

$$z_s = \frac{h}{2} = 42 \text{ mm}$$

$$W = \frac{EI_{\text{eff}}}{E_{0,\text{mean}} \cdot z_s} = \frac{2,82 \cdot 10^{11}}{11600 \cdot 42} = 5,77 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$i = \sqrt{\frac{EI_{\text{eff}}}{E_{0,\text{mean}} \cdot A_{\text{eff}}}} = \sqrt{\frac{2,82 \cdot 10^{11}}{11600 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 1000}} = 25,99 \text{ mm}$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{l_{\text{eff}}}{\pi \cdot i} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,0,05}}} = \frac{2700}{\pi \cdot 25,99} \cdot \sqrt{\frac{24}{5 \cdot 11600}} = 1,648$$

$\beta_c = 0,1$  pro CLT

$$k_y = \frac{1}{2} \cdot \{1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2\} = \frac{1}{2} \cdot \{1 + 0,1 \cdot (1,648 - 0,3) + 1,648^2\} = 1,925$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}} = \frac{1}{1,925 + \sqrt{1,925^2 - 1,648^2}} = 0,342$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{\text{eff}}} = \frac{73,53 \cdot 1000}{9 \cdot 4 \cdot 1000} = 2,04 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{1,79 \cdot 10^6}{5,77 \cdot 10^5} = 3,1 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_m} = \frac{24 \cdot 0,8}{1,3} = 14,77 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_m} = \frac{24 \cdot 0,8}{1,3} = 14,77 \text{ N/mm}^2$$

Posouzení:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{cy} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,04}{0,342 \cdot 14,77} + \frac{3,1}{14,77} = 0,61 \leq 1,0$$

## 9.2 Příloha 2 – Výpočetní skript FlexPDE (2400 mm – 84Q)

```

(Osově nárvhové zatížení - N)
F2=0
F6=0
{-----}
C11 = E11/(1-n12*n21)      (Matice tuhosti)
C12 = C11*n21
C22 = E22/(1-n12*n21)
{-----}
(Transformované matice tuhosti)
CC11_1=C11*(cos(alfa1 degrees))^4+C22*(sin(alfa1 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa1 degrees))^2*(cos(alfa1
degrees))^2
CC12_1=(C11+C22-4*C66)*(sin(alfa1 degrees))^2*(cos(alfa1 degrees))^2+C12*(sin(alfa1 degrees))^4+(cos(alfa1
degrees))^4
CC16_1=C11*(C12-2*C66)*(cos(alfa1 degrees))^3*(sin(alfa1 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa1
degrees))^3*(cos(alfa1 degrees))
CC22_1=C11*(sin(alfa1 degrees))^4+C22*(cos(alfa1 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa1 degrees))^2*(cos(alfa1
degrees))^2
CC26_1=(C11-C12-2*C66)*(sin(alfa1 degrees))^3*(cos(alfa1 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa1
degrees))*(cos(alfa1 degrees))^3
CC66_1=(C11+C22-2*(C12+C66))*(sin(alfa1 degrees))^2*(cos(alfa1 degrees))^2+C66*(sin(alfa1
degrees))^4+(cos(alfa1 degrees))^4)
CC11_2=C11*(cos(alfa2 degrees))^4+C22*(sin(alfa2 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa2 degrees))^2*(cos(alfa2
degrees))^2
CC12_2=(C11+C22-4*C66)*(sin(alfa2 degrees))^2*(cos(alfa2 degrees))^2+C12*(sin(alfa2 degrees))^4+(cos(alfa2
degrees))^4
CC16_2=C11*(C12-2*C66)*(sin(alfa2 degrees))^3*(cos(alfa2 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa2
degrees))^3*(cos(alfa2 degrees))
CC22_2=C11*(sin(alfa2 degrees))^4+C22*(cos(alfa2 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa2 degrees))^2*(cos(alfa2
degrees))^2
CC26_2=(C11-C12-2*C66)*(sin(alfa2 degrees))^3*(cos(alfa2 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa2
degrees))*(cos(alfa2 degrees))^3
CC66_2=(C11+C22-2*(C12+C66))*(sin(alfa2 degrees))^2*(cos(alfa2 degrees))^2+C66*(sin(alfa2
degrees))^4+(cos(alfa2 degrees))^4)
CC11_3=C11*(cos(alfa3 degrees))^4+C22*(sin(alfa3 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa3 degrees))^2*(cos(alfa3
degrees))^2
CC12_3=(C11+C22-4*C66)*(sin(alfa3 degrees))^2*(cos(alfa3 degrees))^2+C12*(sin(alfa3 degrees))^4+(cos(alfa3
degrees))^4
CC16_3=C11*(C12-2*C66)*(sin(alfa3 degrees))^3*(cos(alfa3 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa3
degrees))^3*(cos(alfa3 degrees))
CC22_3=C11*(sin(alfa3 degrees))^4+C22*(cos(alfa3 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa3 degrees))^2*(cos(alfa3
degrees))^2
CC26_3=(C11-C12-2*C66)*(sin(alfa3 degrees))^3*(cos(alfa3 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa3
degrees))*(cos(alfa3 degrees))^3
CC66_3=(C11+C22-2*(C12+C66))*(sin(alfa3 degrees))^2*(cos(alfa3 degrees))^2+C66*(sin(alfa3
degrees))^4+(cos(alfa3 degrees))^4)
CC11_4=C11*(cos(alfa4 degrees))^4+C22*(sin(alfa4 degrees))^4+2*(C12+2*C66)*(sin(alfa4 degrees))^2*(cos(alfa4
degrees))^2
CC12_4=(C11+C22-4*C66)*(sin(alfa4 degrees))^2*(cos(alfa4 degrees))^2+C12*(sin(alfa4 degrees))^4+(cos(alfa4
degrees))^4
CC16_4=C11*(C12-2*C66)*(sin(alfa4 degrees))^3*(cos(alfa4 degrees))+C12*(C22+2*C66)*(sin(alfa4
degrees))^3*(cos(alfa4 degrees))

```

```

title 2400 mm - 124 mm - L - C24 - ECS
select
  erlim = 1e-3      { Nastavení výpočtu }
  painted
  cubic
  NGRID = 10
  STAGES=30      { cyklus skriptu }
  autostage=on    { automatické cyklení skriptu }
variables
  w (0,1)
  wx (0,1)
  wy (0,1)
  wx (0,1)
  wy (0,1)
definitions
  L1=24.11      (Výška panelu - m)
  L2=1.11      (Šířka panelu - m)
  h1=0.0090    (tloušťka jednotlivých vrstev - m) [h1=TOP]
  h2=0.044
  h3=0.0090
  h4=0.0090
  h5=0.044
  h6=0.0090
  alfa1=0      (Orientace vláken v jednotlivých vrstvách - °)
  alfa2=90
  alfa3=0
  alfa4=0
  alfa5=90
  alfa6=0
  E11 = 11000*10^6      (Moduly pružnosti Fe)
  E22 = 370*10^6
  G12 = 690*10^6
  n12 = 0.4
  n21 = (E22/E11)*n12
  rho=400      (Hustota - kg.m-3)
  q=-750      (Spojitě zatížení větrem - N.m-2)
  F1=STAGED(      (Osově nárvhové zatížení - N)
    -90.5088 *10^3, -44.0088 *10^3, -45.5088 *10^3, -60.5088 *10^3, -75.5088 *10^3,
    -72.5088 *10^3, -87.5088 *10^3, -85.0088 *10^3, -59.0088 *10^3, -104.0088 *10^3,
    -116.0088 *10^3, -131.0088 *10^3, -71.0088 *10^3, -102.5088 *10^3, -86.0088 *10^3,
    -96.0088 *10^3, -113.0088 *10^3, -114.5088 *10^3, -84.5088 *10^3,
    -143.0088 *10^3, -128.0088 *10^3, -129.5088 *10^3, -144.5088 *10^3,
    -143.0088 *10^3, -158.0088 *10^3 )

```