

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Kloknerův ústav
Oddělení mechaniky**



**NUMERICKÁ ANALÝZA METODY SPŘAŽENÍ SMYKOVÝMI OZUBY PRO
DŘEVO-UHPC KOMPOZITNÍ MOSTNÍ KONSTRUKCE**

**NUMERICAL ANALYSIS OF SHEAR NOTCH COUPLING METHOD FOR
TIMBER-UHPC COMPOSITE BRIDGE STRUCTURES**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Petr Kněž

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Teorie konstrukcí
Školitel: Ing. Arch. MgA. Petr Tej, Ph.D. et Ph.D.

Praha, 02/2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně a obsah práce nebyl předložen k jiným akademickým nebo profesním řízením. Prohlašuji, že tato disertační práce byla vytvořena v souladu se všemi závaznými pravidly a předpisy a že jsem řádně uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Prohlašuji, že práce vznikla jako součást doktorského studia, do kterého jsem řádně zapsán.

Ing. Petr Kněž

Abstrakt

V rámci disertační práce jsem se soustředil na numerickou analýzu metody spřažení smykovými ozuby pro kombinaci dřeva a ultra-vysokohodnotného betonu (UHPC či UHPFRC) pro kompozitní mostní konstrukce. Tento typ spřažení umožňuje přenést velká zatížení, která lze u mostních konstrukcí očekávat, přesto se jedná o poměrně jednoduše realizovatelný způsob spojení.

Výhodou využití UHPC namísto betonu běžných pevností je zejména možnost návrhu subtilnějších konstrukcí, které díky úspoře vlastní hmotnosti při zachování dostatečné únosnosti mohou nabídnout efektivní konstrukční systém.

Využití obnovitelného materiálu ve formě dřeva v kombinaci s moderním cementovým kompozitem UHPC může vést k návrhům a realizacím konstrukcí v souladu s konceptem udržitelné výstavby. Vzhledem k tomu, že UHPC je poměrně novým materiálem, tak pro navrhování konstrukcí s jeho využitím prozatím chybí potřebné normové předpisy, které by podpořily jeho širší využití. Jeho kombinace se dřevem je tématem, kterému se zatím věnovalo pouze malé množství prací. Spřahování běžného betonu se dřevem se sice již realizuje několik desetiletí a existuje široké spektrum možností, jak spojení dosáhnout, tak i přesto v normách existuje v některých oblastech jejich návrhu řada nedostatků.

Má práce bude spočívat ve využití moderních výpočetních programů pro nelineární numerické výpočty Atena 3D a Ansys. Pro vstupní údaje výpočtů budu využívat experimentálně získaná data v rámci řešení grantu TAČR TH02020730. V rámci tohoto grantového projektu zaměřeného na vývoj spřahovacího systému pro dřevo-UHPC kompozitní mostní konstrukce s důrazem na využití prefabrikace byla provedena řada nezbytných experimentálních zkoušek pro validaci výpočetních modelů, na kterých jsem v rámci grantového projektu pracoval.

Na základě získaných validovaných modelů jsem mohl již v rámci své práce provést detailní rozbor fungování systému spřažení a provést jeho optimalizaci. Optimalizace spoje spočívala ve využití UHPC materiálu přímo pro samotný ozub a využila tedy jeho výborné vlastnosti při namáhání smykem.

V dalších krocích jsem na optimalizovaném spoji provedl dvě parametrické studie. První byla zaměřena na získání závislosti hloubky smykového ozubu na jeho délce. Tato studie mi pomohla odvodit analytické vztahy, které mohou být použity pro výpočet únosnosti a tuhosti spoje. Druhou parametrickou studií byl vliv teploty na napjatost v konstrukci. Díky této studii jsem byl schopen stanovit alespoň přibližné vztahy pro určení vlivu tohoto nesilového zatěžovacího stavu.

Výsledky své práce hodnotím jako náhled do možností využití numerického nelineárního modelování v oblasti navrhování spřažených konstrukcí ze dřeva a UHPC. Věřím, že poznatky plynoucí z mé práce, budou znamenat posun v oblasti navrhování spřažených dřevo-betonových konstrukcí. Další přínos mé práce vidím v možnosti doplnění normových předpisů v případě důkladného ověření získaných výsledků.

Klíčová slova

Dřevo, UHPC, UHPFRC, spřažení, smykový ozub, nelineární analýza, materiálové modely, validace výpočetního modelu, Atena, Ansys, parametrická studie

Abstrakt

In my dissertation I focused on the numerical analysis of the shear notch coupling method for the combination of timber and ultra-high performance concrete (UHPC or UHPFRC) for composite bridge structures. This type of coupling allows to transfer the large loads that can be expected in bridge structures, yet it is a relatively simple method of connection to implement.

In particular, the advantage of using UHPC instead of conventional strength concrete is the possibility of designing more subtle structures that can offer an efficient structural system due to the saving of dead weight while maintaining sufficient load carrying capacity.

The use of a renewable material in the form of timber in combination with the modern cement composite UHPC can lead to the design and implementation of structures in line with the concept of sustainable construction. As UHPC is a relatively new material, the design of structures using it lacks the necessary standard regulations to encourage its wider use. Its combination with timber is a topic that has received little attention so far. Although the combination of conventional concrete with timber has been implemented for several decades and there is a wide range of possibilities to achieve the combination, there are still a number of shortcomings in the standards in some areas of their design.

My work will involve the use of Atena 3D and Ansys nonlinear numerical computation programs. For the input data of the calculations I will use data obtained experimentally during the TAČR grant TH02020730. This grant project focused on the development of a coupling system for timber-UHPC composite bridge structures with emphasis on the prefabrication used, a number of necessary experimental tests were performed to validate the computational models I worked on in the grant project.

On the basis of the validated models obtained, I was able to perform a detailed analysis of the functioning of the coupling system and to perform its optimization already in the framework of my work. The optimization of the coupling consisted in the use of UHPC material directly for the notch itself and thus took advantage of its excellent shear strength properties.

In the next steps, I performed two parametric studies on the optimized coupling. The first one was aimed at obtaining the dependence of the shear notch depth on its length. This study helped me to derive analytical relationships that can be used to calculate the load capacity and stiffness of the joint. The second parametric study was the effect of temperature on the stresses in the structure. Through this study, I was able to establish at least approximate relationships to determine the effect of this loading condition.

I evaluate the results of my work as an insight into the possibilities of using numerical nonlinear modeling in the design of coupled timber-UHPC structures. I believe that the findings from my work will make a difference in the design of this composite structures. Another contribution of my work I see in the possibility of supplementing the standard regulations in case of thorough verification of the obtained results.

Keywords

Timber, UHPC, UHPFRC, coupling, shear notch, nonlinear analysis, material models, validation of computational model, Atena, Ansys, parametric study

Poděkování

Rád bych své poděkování věnoval všem, kteří mi pomocí svých rad a sdílením cenných zkušeností umožnili napsání disertační práce v prezentované podobě. Velký dík patří všem kolegům z Kloknerova ústavu, zejména Ing. Milanu Holému, Ph.D, který organizoval přípravu a realizaci experimentů, jenž jsem využil jako vstupní data pro mou nelineární výpočetní analýzu. Díky bych rád věnoval též mému školiteli Ing. Petru Tejovi, Ph.D, za podporu, kterou mi při vypracování mé práce poskytl. Grantové projekty Kloknerova ústavu, na kterých jsem se pod vedením svého školitele a doc. ing. Jiřím Kolískem, Ph.D pracoval, a které se zabývaly tematikou UHPC betonu, mi poskytli cenné zkušenosti o jeho vlastnostech. Poděkovat chci též kolegům z experimentálního oddělení, kteří mi pomáhali s přípravou a realizací mnou navržených experimentů. Velké poděkování patří též mé rodině za stálou podporu po celou dobu mého studia. Experimentální data, která ve své práci využívám, byla získána díky podpoře grantů TAČR TH02020730 a TAČR DOPRAVA 2020+ CK02000329.

1	ÚVOD.....	11
1.1	Motivace	11
1.2	Cíle disertační práce.....	12
1.3	Úvod.....	12
2	AKTUÁLNÍ STAV VÝVOJE A VÝZKUMU.....	14
2.1	Materiály.....	14
2.1.1	Dřevo a jeho vlastnosti.....	14
2.1.2	Mechanické vlastnosti dřeva	19
2.1.3	Lepené materiály na bázi dřeva.....	22
2.2	Beton.....	28
2.2.1	Složky betonu.....	28
2.2.2	UHPC a UHPFRC.....	30
2.2.3	Zkoušky mechanických vlastností UHPC	33
2.3	Spřažení dřeva a betonu (UHPC).....	34
2.3.1	Princip působení spřaženého průřezu.....	34
2.3.2	Historie spřahování dřeva a betonu	36
2.3.3	Možnosti spřahování	36
2.4	Dostupné výpočetní metody	40
2.4.1	Analytický postup dle norem	40
2.4.2	Nelineární výpočty metodou konečných prvků.....	41
2.5	Příklady spřažených dřevo-betonových mostní konstrukcí	54
3	NELINEÁRNÍ NUMERICKÁ ANALÝZA.....	59
3.1	Vstupní data analýzy.....	59
3.1.1	Popis použitého způsobu spřažení.....	59
3.1.2	Materiálové testy UHPC	61
3.1.3	Zkoušky spřahovacího systému.....	63
3.2	Validace materiálových modelů	66
3.2.1	Validace UHPC.....	66
3.2.2	Validace spřahovacího systému	73
3.3	Výsledky numerické analýzy spřahovacího systému.....	80
3.3.1	Rozbor chování spřahovacího systému	83
3.4	Doplňující experimentální zkoušky	85
3.5	Optimalizace spoje.....	90

3.5.1	Návrh geometrie optimalizovaného spoje.....	91
3.5.2	Numerická analýza optimalizovaného spoje – popis modelů	92
3.5.3	Výsledky numerické analýzy optimalizovaného spoje	95
3.5.4	Závěrečné zhodnocení fungování optimalizovaného spoje.....	100
4	PARAMETRICKÁ STUDIE.....	102
4.1	Vliv hloubky a délky smykového ozubu na únosnost	102
4.1.1	Výsledky studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu	103
4.1.2	Vyhodnocení výsledků.....	106
4.1.3	Odvození charakteristických hodnot.....	109
4.2	Parametrická studie vlivu teploty	111
4.2.1	Výsledky vlivu teplotních zatížení.....	112
5	ZHDNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	119
5.1	Validace materiálových modelů a spřahovacího systému	119
5.1.1	Výsledky a diskuse	119
5.2	Optimalizace způsobu spřažení	121
5.2.1	Výsledky a diskuse	121
5.3	Parametrická studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu na únosnost.....	122
5.3.1	Výsledky a diskuse	123
5.4	Parametrická studie účinků teploty.....	123
5.4.1	Výsledky a diskuse	123
6	ZÁVĚR.....	125
7	LITERATURA.....	127

Seznam symbolů

A_v	Plocha smykové roviny
b	Šířka prvku
C	Parametr nelokální interakce
c	Koheze
D	Průměr
D	Konstanta zpevnění materiálu
e	Symbol exponenciály
E_c	Modul pružnosti v tlaku
E_m	Modul pružnosti v ohybu
E_p	Modul zpevnění plastické větve pracovního diagramu
E_t	Modul pružnosti v tahu
E_T	Modul zpevnění plastické větve pracovního diagramu
F	Síla
f_{bc}	Dvouosá pevnost v tlaku
f_c	Pevnost v tlaku
F_{cal}	Analyticky určená velikost síly
F_{el}	Maximální síla pro elastické působení materiálu
f_m	Pevnost v ohybu
F_{max}	Maximální dosažená síla
$F_{max,exp}$	Maximální dosažená síla experimentem
$F_{max,fea}$	Maximální dosažená síla nelineárním výpočtem
f_t	Pevnost v tahu
f_{tc}	Pevnost v tahu při vzniku trhliny
f_{tu}	Mez pevnosti v tahu
f_u	Mez pevnosti
f_{uc}	Jednoosá pevnost v tlaku
f_{ut}	Jednoosá pevnost v tahu
f_v	Pevnost ve smyku
F_v	Únosnost ve smyku
f_y	Mez kluzu
G	Modul pružnosti ve smyku
G_{fc}	Specifická lomová energie v tlaku
G_{ft}	Specifická lomová energie v tahu
G_p	Modul zpevnění plastické větve pracovního diagramu ve smyku
H	Výška
$h_{1,2}$	Rozměry prvku při vlhkosti 1,2
h_z	Hloubka smykového ozubu
I_y	Moment setrvačnosti průřezu k ose y
k	Ohybová tuhost
$k_{0,1,2}$	Parametr charakteristiky tvaru funkce poškození
k_1	Součinitel pro určení charakteristické hodnoty
k_2	Součinitel využití smykového ozubu
K_{cal}	Analyticky určený modul pokluzu (tuhosti) spoje

k_{mod}	Součinitel třídy provozu a délky trvání zatížení
K_{nn}	Normálová tuhost
$K_{nn, min}$	Minimální normálová tuhost
$K_{s, exp}$	Modul pokluzu (tuhosti) spoje určený experimentem
$K_{s, fea}$	Modul pokluzu (tuhosti) spoje určený nelineárním výpočtem
K_{ser}	Modul pokluzu (tuhosti) spoje
K_{tt}	Tečná tuhost (smyková)
$K_{tt, min}$	Minimální tečná (smyková) pevnost
L	Směr podélný; rovnoběžný s vlákny dřeva
L	Délka prvku
$L_{t, c}$	Charakteristická délka elementu v tahu či tlaku
L_z	Délka smykového ozubu
m	Hmotnost
m	Proměřovací parametr
$m_{(x)}$	Průměrná hodnota veličiny
m_0	Hmotnost v absolutně suchém stavu
m_w	Hmotnost vody
m_ω	Hmotnost při specifické vlhkosti omega
n	Počet vzorků
P	Příčný (transversální) řez
R	Směr radiální, kolmý na vlákna i letokruhy
R	Radiální řez
R	Poměr mezi hlavní a vedlejší osou funkce v tlaku
R	Hodnota spolehlivosti
R_t	Zpevnění v tahu
T	Směr tangenciální, kolmý na vlákna a tečný k letokruhům
T	Tangenciální řez
T_n^{max}	Maximální normálové napětí
T_t^{max}	Maximální tečné napětí
u_{exp}	Experimentálně určený posun
u_{fea}	Posun určený nelineárním výpočtem
u_{Fmax}	Posun při dosažení maximální síly
V	Objem
$v_{(x)}$	Variační koeficient
x	Pořadnice grafu na vodorovné ose
x	Násobek hloubky smykového ozubu
X_k	Charakteristická hodnota veličiny
y	Pořadnice grafu na svislé ose
α^{mic}	Součinitel maximální degradace materiálu
α_T	Součinitel délkové teplotní roztažnosti
β	Součinitel bobtnání a sesychání
β_0	Součinitel bobtnání a sesychání v podélném směru
β_{90}	Součinitel bobtnání a sesychání v příčném směru
β_c	Konstanta vývoje poškození v tlaku

β^{mic}	Součinitel rychlosti poškození materiálu
β_t	Konstanta vývoje poškození v tahu
β_V	Součinitel objemového bobtnání a sesychání
γ	Součinitel redukce Steinerova doplňku
γ_{c0}	Práh poškození v tlaku
γ_M	Součinitel spolehlivosti materiálu
γ^{mic}	Práh poškození
γ_{t0}	Práh poškození v tahu
δ_n^c	Maximální délka pro porušení spoje při namáhání tlakem
ΔT	Teplotní rozdíl
$\delta_{t,i}$	Bod dilatace materiálu v tahu
δ_t^c	Maximální délka pro porušení spoje při namáhání smykem
$\Delta \varepsilon$	Přírůstek přetvoření
ε	Přetvoření
ε_e	Elastické přetvoření
ε_f	Přetvoření představující trhlinu
ε_p	Plastické přetvoření
ε_{tc}	Přetvoření při vzniku trhliny
ε_{tu}	Přetvoření při dosažení meze pevnosti
κ_{cm}	Plastické přetvoření betonu v tlaku při maximální hodnotě zpevnění
κ_{cr}	Maximální přetvoření materiálu v tlaku
κ_{cu}	Plastické přetvoření na přechodu do exponenciálního změkčení materiálu v tlaku
$\kappa_{t,i}$	Bod plastického přetvoření v tahu
κ_{tr}	Maximální přetvoření materiálu v tahu
μ	Poissonův součinitel
ρ	Hustota
ρ_0	Hustota v absolutně suchém stavu
ρ_{12}	Hustota při vlhkosti 12%
σ	Napětí
σ_V^C	Průsečík os mezi limitní pevností v tlaku a Drucker-Pragerovou funkcí kluzu
τ_{av}	Průměrné napětí ve smyku
φ	Součinitel tření
ω	Vlhkost
Ω_{ci}	Relativní napětí na počátku nelineárního zpevnění materiálu
Ω_{cr}	Zbytkové napětí v tlaku
Ω_{cu}	Relativní napětí na přechodu do exponenciálního změkčení materiálu v tlaku
ω_f	Vlhkost meze nasycení vláken
$\Omega_{t,i}$	Bod relativního zbytkového napětí v tahu
Ω_{tr}	Zbytkové napětí v tahu

1 Úvod

1.1 Motivace

Ke dřevu jako konstrukčnímu materiálu jsem měl vždy velmi blízký vztah. Již v průběhu bakalářského studia jsem se při tvorbě své bakalářské práce věnoval zesilování dřevěné stropní konstrukce spřažením se železobetonovou deskou. Díky tomu jsem zjistil, že evropské normy se tomuto tématu věnují jen velmi okrajově. V diplomové práci jsem se seznámil s možnostmi, které poskytuje využití lepeného lamelového dřeva. To mě vedlo k myšlence se těmito tématům dále věnovat ve své disertační práci a přispět k rozvoji ve využívání spřažených dřevo-betonových konstrukcí.

Po nástupu na Kloknerův ústav jsem se záhy seznámil s existencí moderního cementového kompozitu nazývajícím se ultra-vysokohodnotný beton – což je český překlad anglického názvu Ultra-High Performance (Fibre Reinforced) Concrete (UHPC či přesněji UHPFRC). Jedná se o jemnozrnný materiál vyztužený rozptýlenou výztuží s výrazným dávkováním, které mu dodávají výjimečné vlastnosti. Jedná se o materiál, který se stále vyvíjí a do normových podkladů se ještě v rámci českých či evropských norem nedostal. Existují národní dodatky v některých zemích, kde je historie využívání UHPC delší (například Francie či Švýcarsko), ty však nemají oporu v našem právním systému. V ČR existuje pouze soubor metodik vydaných Kloknerovým ústavem jako směrnice Ministerstva dopravy ČR. Normové podklady jsou stále ve vývoji.

Dospěl jsem tedy k rozhodnutí spojit svou práci s výzkumem v oblasti využití spřažených dřevo-UHPC konstrukcí. Díky vlastnostem UHPC je možné docílit návrhu subtilních, staticky efektivních a esteticky hodnotných konstrukcí. Využití obnovitelného materiálu v podobě dřevěných prvků pak přispívá k současnému trendu udržitelné a maximálně ekologické výstavby. Samotné spřažení dřeva a UHPC je téma, které se začíná v rámci výzkumu objevovat až posledních několik let a jeho využití pro mostní konstrukce je velmi ojedinělé. V ČR se spřažené dřevo-betonové konstrukce využívají téměř výhradně pro pozemní stavby, pro mostní konstrukce se, na rozdíl od zbytku světa, kde je historie využívání těchto konstrukcí pestřejší, začínají objevovat až nyní.

Impulz zaměřit svou práci na numerické nelineární simulace jsem získal při řešení grantového projektu TAČR. Realizace experimentů nutných k ověřování návrhů při použití UHPC je nákladná, chtěl jsem se tedy zaměřit na vytvoření numerických nelineárních modelů, které by umožnily ověřit dílčí návrhy numerickou simulací, kde by se experimentálně ověřil až finální návrh.

Jelikož klíčovým prvkem návrhu spřažené konstrukce je způsob spojení jednotlivých částí, které tvoří výsledný kompozitní systém, rozhodl jsem se detailně zaměřit na analýzu fungování a optimalizaci vybraného spřahovacího systému, který byl představen při řešení grantu TAČR. Vzhledem k nedostatečným normovým předpisům v této oblasti je zde velký prostor pro bádání a přípravu na potencionální doplnění normových postupů pro tento typ konstrukcí. Jsem rád, že jsem se mohl podílet na položení základů pro tuto nezbytnou činnost, která pomůže rozvoji ve využití těchto konstrukcí.

1.2 Cíle disertační práce

Jako cíle jsem si ve své disertační práci stanovil tyto body:

- Vypracovat rešerši zaměřenou na vlastnosti dřeva a UHPC, možnosti provedení jejich spřažení a na dostupné možnosti provedení nelineárních výpočtů a dostupných materiálových modelů vhodných pro analýzu spřažení.
- Provést validaci materiálových modelů pro dřevo a UHPC za využití programů Atena 3D a Ansys s cílem získat validovaný model spřažení, které bylo navrženo při řešení grantového projektu TAČR, který bude možné detailně analyzovat a provést jeho optimalizaci.
- Realizace parametrických studií.
 - První studie bude zaměřená na určení vlivu hloubky smykového ozubu dřevěného nosníku na únosnost a tuhost spoje v závislosti na jeho délce. Při výpočtu únosnosti smykového ozubu se normové předpisy rozcházejí – některé umožňují využít libovolně dlouhý smykový ozub, jiné ho limitují. Chtěl bych tedy prověřit chování pro různé hloubky a délky smykových ozubů dřevěného nosníku a nalézt mezi nimi závislost, kterou by bylo možné využít při statickém návrhu spoje pomocí běžných analytických metod.
 - Druhá studie bude zaměřena na vliv teplotních zatížení na napjatost spřažené konstrukce dřevo-UHPC. Evropská norma pro určení teplotních zatížení na mostní konstrukce pro spřažení dřeva a betonu neudává vůbec žádné doporučení postupu. Vzhledem k rozdílnému součiniteli teplotní roztažnosti obou materiálů jde přitom o důležitý aspekt návrhu těchto konstrukcí, zejména pro konstrukce o delším rozpětí. Chtěl bych tedy provést analýzu vlivu teplotních účinků na napjatost v konstrukci a pokusit se opět nalézt závislost, pomocí které by bylo možné zahrnout tento typ zatížení adekvátně při návrhu konstrukce.

1.3 Úvod

Má disertační práce je založena na experimentálních výsledcích získaných v rámci řešení grantového projektu TAČR TH02020730 „Využití UHPC pro moderní návrh progresivních spřažených dřevo-betonových mostních konstrukcí“. V rámci tohoto grantu byl vyvinut speciální způsob spřažení a já jsem v rámci grantové projektu prováděl jeho numerickou analýzu. Doplnkové experimenty provedené v průběhu řešení mé disertační práce vznikly za podpory grantového projektu TAČR DOPRAVA 2020+CK02000329 „UHPC jako hlavní nosný systém mostů středních rozpětí“. Téma numerické simulace jsem podrobněji rozšířil v rámci své disertační práce o optimalizaci spoje a parametrické studie.

Druhá kapitola mé práce je zaměřena na prezentaci výsledků provedené rešerše. Ta se zabývá shrnutím poznatků o používaných materiálech (dřevo a UHPC) a jejich vlastnostech, dále řeším obecně problematiku spřažených dřevo-betonových konstrukcí, od jejich historie až po současně využívané metody spřahování. Velká část rešerše se věnuje shrnutí dostupných metod pro provedení numerické simulace. Ve své práci jsem

podrobněji rozepsal možnosti modelování dřeva a betonu pro software Atena a Ansys. Závěr kapitoly pak uvádí příklady spřažených dřevo-betonových mostní konstrukcí ze světa a České Republiky.

Třetí kapitola je zaměřena na nelineární numerickou analýzu. Na úvod kapitoly jsem provedl shrnutí vstupních dat získaných experimentálním programem grantu TAČR TH02020730. Poté již následuje popis a způsob provedení validace materiálových modelů, zhodnocení vhodností použitých materiálových modelů a uvedení výsledných materiálových vlastností. Následně jsem se mohl věnovat validaci chování samotného způsobu spřažení navrženého během řešení grantového projektu. Díky informacím získaných při validaci materiálových modelů jsem mohl provést důkladnou analýzu chování spoje a navrhnout jeho optimalizaci. Pro doplnění dat jsem nechal provést doplňující experimenty na únosnost dřevěného smykového ozubu. Závěr kapitoly hodnotí navržený optimalizovaný spoj a rozbor jeho působení.

Ve čtvrté kapitole jsou prezentovány výsledky provedených parametrických studií. Studie vlivu hloubky dřevěného smykového ozubu na únosnost a tuhost spoje v závislosti na jeho délce a studie vlivu teplotních zatížení na napjatost konstrukce. První studii jsem provedl podrobně pro spoj s hloubkou ozubu 20 mm, který jsem počítal pro délky ozubu od 60 do 300 mm v krocích po 10 mm. Výsledky jsem následně porovnal pro vybrané délky ozubů hloubek 30 a 40 mm. Na základě výsledků jsem následně odvodil analytické vztahy pro určení únosnosti a tuhosti spoje a výpočet jejich charakteristických hodnot. Studii vlivu teploty jsem následně zaměřil na nosníky délek od 4 do 10 m v krocích po 1 m pro nosníky výšky 200, 252 a 317,5 mm, které byly voleny s ohledem na jejich tuhost, která byla v poměru 1:2:4. Cílem bylo získat závislost napětí na konstrukci v závislosti na tuhosti dřevěného nosníku.

Pátá kapitola prezentuje shrnutí provedených výpočetních analýz, diskusi nad získanými výsledky a možným dalším pokračováním vývoje a výzkumu v oblasti spojů se smykovými ozuby pro kompozitní dřevo-UHPC konstrukce.

2 Aktuální stav vývoje a výzkumu

V této kapitole uvádím výsledky rešerše na téma aktuálního vývoje a výzkumu v oblasti spřažení dřeva a betonu. Budu zde tedy prezentovat vlastnosti jednotlivých materiálů, jejich klady, zápory, mechanické a fyzikální vlastnosti, způsoby zkoušení a možnosti výroby. Dále zde budou prezentovány možnosti spojení dřeva a betonu pro pozemní i dopravní konstrukce, včetně historického vývoje spřažených dřevo-betonových konstrukcí. Velká část rešerše je též věnována možnostem výpočetních analýz pro tyto konstrukce při využití moderních numerických metod pomocí nelineárních výpočtů metodou konečných prvků. Závěr kapitoly uvádí příklady realizovaných kompozitních dřevo-betonových mostních konstrukcí v ČR a ve světě.

2.1 Materiály

V této kapitole jsem se zaměřil na vlastnosti a popis použitých materiálů, jejich výhody i nevýhody. Jedná se o dřevo a výrobky z něho, jeho vlastnosti a co mohou ovlivnit. Druhá polovina kapitoly je zaměřena na beton a UHPC – vlastnosti, způsob výroby, složky a možnosti testování vlastností.

2.1.1 Dřevo a jeho vlastnosti

Dřevo je přírodní stavební materiál. Jde o jeden z nejstarších a nejdéle používaných stavebních materiálů. Jde o obnovitelný zdroj. Dřevo se používá ve formě přírodního řeziva (hranoly, fošny, prkna, latě atd.), či materiálů na bázi dřeva (třískové desky, vláknité desky, překližky atd.). Mezi materiály na bázi dřeva patří i lepené nosníky (lamelové, fošnové), křížem vrstvené dřevo či dřevo lepené do bloku.

Informace o vlastnostech dřeva jsem čerpal z publikací [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7]. Dřevo je charakteristické velkým rozptylem vlastností. Ten je ovlivněn druhem dřeviny – zda jde o dřevo jehličnaté, listnaté či exotické. Budu se zde zabývat zejména dřevinami běžnými v našich podmínkách – jehličnatými (zejména smrkovým dřevem) a listnatými, částečně dřevem modifikovaným. Vliv na vlastnosti dřeva mají také podmínky, za kterých strom vyrostl – směr převládajícího větru, poloha v rámci lesa, posuny půdy, střídání ročních období, intenzita deště. Vlastnosti ovlivňují také velkou měrou vady dřeva – suky, smolníky a jiné vady způsobené v průběhu růstu stromu. Rozdíl pevnostních charakteristik pro bezvadé dřevo a dřevo s vadami může být až 10-ti násobný.

Dřevo je přírodní organický buněčný materiál. Je kompozitem vytvořeným z chemického komplexu celulózy, hemicelulózy, ligninu a extraktivních látek. Dřevo je vysoce anizotropní zejména vzhledem k podlouhlému tvaru buněk dřeva a orientované stavbě stěn buněk. Anizotropie kromě toho vyplývá z rozdílných velikostí buněk v průběhu růstového období a částečně z převládajícího směru určitých typů buněk.

Velký vliv na vlastnosti dřeva, pro jeho využití jako stavební materiál, má struktura stěn buněk, jejich uspořádání ve dřevu bez vad a růstové nepravidelnosti, které představují tři strukturální úrovně. Vliv na rozdíl v sesychání a bobtnání kolmo k vláknům (10-20x větší než ve směru vláken) má submikroskopická struktura stěn. Rozdíl v tuhosti mezi podélným a příčným směrem (20-40x vyšší pro podélný směr) je zapříčiněn mikroskopickou stavbou dřeva (bezvadého). Vady na makroskopické úrovni dřeva (suky, odklon vláken atd.) způsobují například velký rozdíl v pevnosti v tahu

rovnoběžně s vlákny, kdy dřevo bez vad může mít pevnost více než 100 MPa, zatímco dřevo s velkou četností výskytu vad méně než 10 MPa.

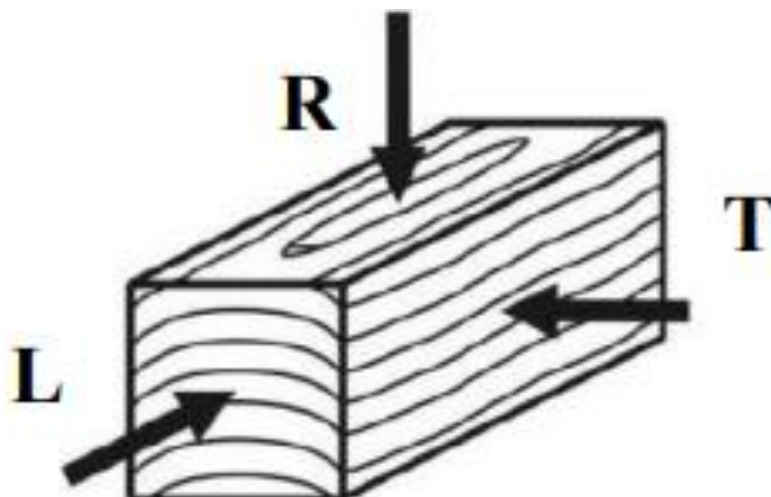
Vlastnosti jako jsou rozdíly ve struktuře mezi jehličnatými a listnatými dřevinami, ale i v rámci jednoho typu dřeva, jako jsou rozdíly mezi bělovým a jádrovým či jarním a letním dřevem, výskyt pórů a reakčního dřeva, jsou dány růstem a vývojem dřevní hmoty a jsou patrné i bez optických pomůcek. Toho se využívá při optickém třídění dřeva.

Stavba dřeva je vláknitá, jeho buňky jsou dlouhé a štíhlé a jejich uspořádání je ve směru růstu (podélné osy kmene). Vlákna vytváří základní strukturu dřeva a jsou příčinou pro jeho anizotropní chování (vyšší tuhost a pevnost ve směru vláken). Vlákna pojí dohromady lignin, což je poměrně slabé lepidlo (důvod pro nižší tuhost a pevnost kolmo na růst vláken). Výsledkem toho je fakt, že v případě namáhání dřeva ve směru růstu, dosahuje dobré pevnosti v tahu, pevnost v tlaku je limitována namáháním vláken ve vzpěru. Při namáhání kolmo k vláknům mají vlákna snahu se od sebe oddělit u namáhání tahem a stlačit u tlakového namáhání.

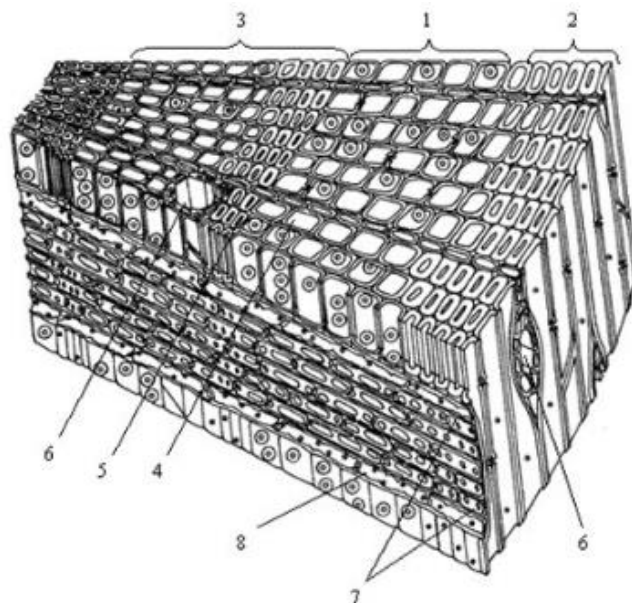
Mikrostrukturou dřeva (jednotlivými buňkami) jsou přímo ovlivněny vlastnosti jako: hustota, pevnost, tuhost, sesychání, barva, požární odolnost, elektrický odpor a mechanický útlum.

2.1.1.1 Dřevo jehličnatých dřevin

Dřevo jehličnatých dřevin má relativně jednoduchou stavbu. Ta je z 90-95% tvořena tracheidami, které se skládají z dlouhých (2-5 mm) a tenkých (10-50 μ m) buněk se zploštělými nebo zužujícími se uzavřenými konci. Tracheidy tvoří radiální řady a jsou orientovány ve směru růstu kmene. Při přechodu z jarního do letního dřeva stěny buněk zesilují, zatímco se zmenšuje jejich průměr. Ke konci období růstu stromu se vytvářejí tracheidy s malou buněčnou dutinou i malým radiálním průměrem. Začátkem toho dalšího se tracheidy vytvářejí se širokou buněčnou dutinou a průměrem. Následkem ve změně růstu může být poměr mezi hustotou jarního a letního dřeva 1:3.



Obr. 1: Ortotropie dřeva: L je směr podélný: rovnoběžně s vlákny, R pro směr radiální (kolmo na vlákna a kolmo na letokruhy), T pro směr tangenciální (kolmo na vlákna a tečně k letokruhům).



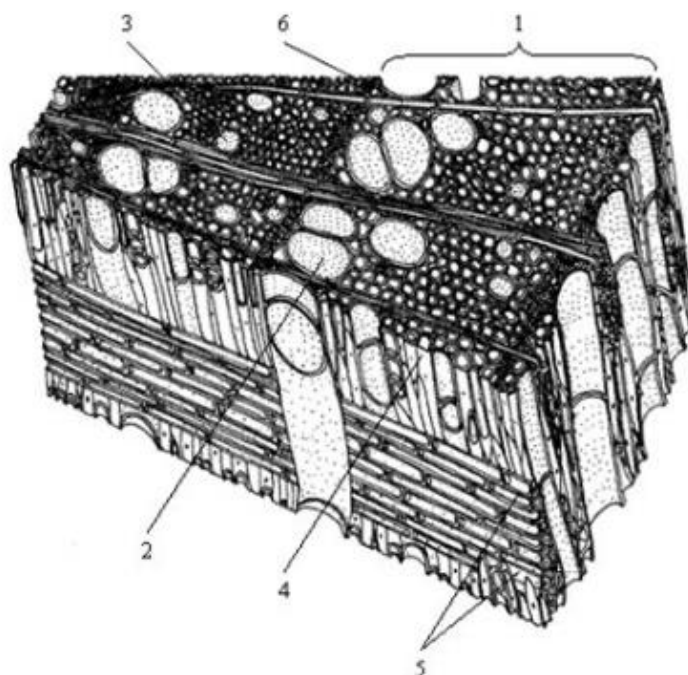
Obr. 2: Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva. 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevový paprsek, 8 – příčná tracheina. [1]

Tab. 1: Průměrné hodnoty mechanických vlastností smrkového dřeva [1]

Smrkové dřevo – průměrné hodnoty ze zkoušek bezvadého dřeva	Poměr mezi směry					
	Směr vzhledem k vláknům			L	R	T
Veličina	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]
Pevnost v tlaku f_c	34,1	3,4	4,0	10,03	1,00	1,18
Modul pružnosti v tlaku E_c	13650	789	289	47,23	2,73	1,00
Pevnost v tahu f_t	74,4	2,2	1,7	43,76	1,29	1,00
Modul pružnosti v tahu E_t	14956	3088	55	26,95	5,56	1,00
Pevnost ve smyku f_v	6,7	2,1	2,4	3,19	1,00	1,14
Modul pružnosti ve smyku G	573	474	53	10,81	8,94	1,00
Pevnost v ohybu (MOR) f_m	-	70,4	72,59	-	1,00	1,03
Modul pružnosti v ohybu E_m	-	8210	8210	-	1,00	-

2.1.1.2 Dřevo listnatých dřevin

Stavba listnatého dřeva je složitější. Důležité strukturální znaky jsou nicméně porovnatelné s jehličnatými dřevinami. Základní nosné tkanivo dřeva obsahuje libroformní (dřevní) vlákna a vláknité tracheidy. Toto zpevňující tkanivo je místem, kde jsou vedeny vodivé cévy, které mají často velké dutiny. Vodivé cévy jsou dlouhé trubice s délkou, která se pohybuje od několika centimetrů až po několik metrů. Skládají se z jednotlivých částí s otevřenými nebo perforovanými konci. Druhy listnatých dřevin je možné rozlišovat dle uspořádání průměrů cév na rozptýleně pórovité a kruhovitě pórovité listnaté dřeviny. Buněčné stěny vláken listnatých dřevin jsou tlustší a mají menší dutiny, než tracheidy jehličnatých dřevin. Rozdíly mezi jarním a letním dřevem nejsou tak velké.



Obr. 3: Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva. 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libroformní vlákno, 5 – dřeňový paprsek, 6 – podélný parenchym. [1]

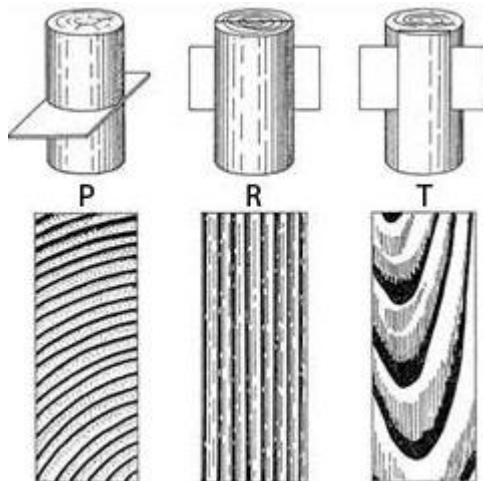
2.1.1.3 Letokruhy

Většina jehličnatých dřevin a kruhovitě pórovitých listnatých dřevin vykazuje možnost korelace mezi šířkou letokruhů a jejich hustotou. U jehličnatých dřevin je tendence tvořit letní dřevo letokruhů s vysokou hustotou a poměrně stálou tloušťkou. Výraznější změny v šířce letokruhů jsou zapříčiněny jarním dřevem letokruhu s nízkou hustotou. Z toho důvodu u většiny jehličnatých dřevin hustota s rostoucí šířkou letokruhů klesá. Dříve se na základě tohoto faktu provádělo vizuální třídění, vede však pouze k zisku nepřesného odhadu hustoty. Ta totiž závisí na podmínkách, ve kterých strom roste (kvalitě půdy, klimatických podmínkách apod.).



Obr. 4: Letokruhy, zdroj obrázku: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Letokruh>

Kruhovitě pórovité listnaté dřeviny (například dub či jasan) charakterizuje koncentrace otevřených cév. K jejich tvorbě dochází v jarním období růstu. Tyto prstence mají poměrně stálou šířku a její změna je zapříčiněna změnou tloušťky prstenců dřeva letního. Prstence letního dřeva mají vysokou hustotu, proto u většiny kruhovitě pórovitých listnatých dřevin s rostoucí šířkou letokruhů hustota roste. U roztroušeně pórovitých dřevin (topol, buk) tato závislost neexistuje.



Obr. 5: Schématické znázornění základních řezů kmenem, P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez. [2]

2.1.1.4 Bělové a jádrové dřevo

Vnější část kmene stromu, která je nejmladší částí, vede z kořenů mizu vzhůru až do koruny stromu. Označuje se jako bělové dřevo. K přerušení jejich fyziologické funkce dochází stárnutím buněk a vzniká jádrové dřevo, což je vnitřní část kmene.

Jádrové dřevo bývá u většiny druhů dřeva tmavěji zbarveno (důvodem je ukládání jádrových látek). Vlivem ukládaných látek je jádrové dřevo odolnější proti hnilobě a působení dřevokazného hmyzu. Při jeho vytváření se zpravidla výrazně redukuje vlhkost dřeva a u mnoha listnatých dřevin se též uzavírají cévy. Následkem toho se výrazně zmenší propustnost. U některých druhů dřeva se jádrové dřevo nezbarvuje (např. smrk, buk), přesto je zde oproti bělovému dřevu rozdíl vlivem ukládání jádrových látek a fyzikálním změnám. Z tohoto důvodu pro impregnaci dřeva není jádrové dřevo vhodné. Např. u borovice je jádrové dřevo prakticky nepropustné.

2.1.1.5 Juvenilní a reakční dřevo

Juvenilní dřevo je tvořeno prvními 5-ti až 20-ti letokruhy v libovolném průřezu kmene stromu. Jeho vlastnosti jsou odlišné od vlastností dřeva ve vnějších vrstvách kmene. Významné je to zejména u dřeva jehličnatých dřevin. Juvenilní dřevo jehličnatých dřevin má relativně krátké a tenkostěnné tracheidy. Tento druh dřeva proto vykazuje nižší hustotu, pevnost i tuhost a výrazně více sesychá v podélném směru. Juvenilní dřevo může tvořit jádrové dřevo až ze 100%. Důsledkem je vnik dřeva, které má nízkou jakost s ohledem na mechanické vlastnosti. Toto je problém zejména u dřeva rychle rostoucích stromů, které mají vysoký podíl juvenilního dřeva. Jádrové dřevo pak může mít horší jakost než dřevo bělové.

Reakční dřevo vzniká jako reakce stromu na vnější síly, které namáhají jeho kmen. U jehličnatých dřevin dochází k tvorbě tlakového dřeva v částech kmene, kde dochází ke

vzniku vysokých tlakových namáhání. U listnatých dřevin vzniká naopak dřevo tahové v částech kmene, kde je namáhán tahem. Vliv tahového dřeva pro dřevěné nosné konstrukce má malý význam. Zato tlakové dřevo často způsobuje problémy. To je způsobeno tím, že má širší letokruhy a vyšší podíl letního dřeva, což vede ke vzniku nadměrných změn tvaru během vysychání. Často má vyšší hustotu, nedochází tedy k redukci mechanických vlastností, avšak má sklony ke křehkému porušení v suchých podmínkách. Z tohoto důvodu se omezuje jeho použití pro vyšší jakostní třídy konstrukčního dřeva.

2.1.1.6 Odklon vláken a suky

Některé stromy vytvářejí spirálové buňky okolo kmene. Tato točitost je u některých druhů rozšířená, u jiných k ní dochází zřídka. Vyskytuje se zejména u mladých stromů. Řezivo, které je vyrobené z těchto stromů a vykazuje tak často odklon vláken, je nepřijatelné pro použití jako konstrukční dřevo.

Části větví, které jsou zarostlé v hlavním kmenu stromu, se nazývají suky. Boční větev je spojena s dřevem hlavního kmene. Když strom roste, objem kmene se zvětšuje. Další letokruhy obalují kmen i větve a vzniká kuželovitá oblast dřeva větve – suk. Tyto suky nazýváme srostlými sukami, protože jsou pevně srostlé s okolním dřevem. Větve na některých místech stromu však odumírají nebo se odlomí. Další letokruhy potom obklopují pouze mrtvý pahýl větve a tato mrtvá část větve se nazývá nesrostlý suk. Není pevně srostlý, vypadává a často obsahuje i kůru.

Jehličnaté dřeviny jsou charakterizovány dominantním kmenem, ze kterého vycházejí v pravidelných vzdálenostech boční větve (přesleny větví). Jehličnaté řezivo proto vykazuje skupinové suky, které jsou odděleny dřevem bez suků. S ohledem na mechanické vlastnosti jsou suky nejvýznamnější vadou.

2.1.2 Mechanické vlastnosti dřeva

2.1.2.1 Hustota

Hustota je nejdůležitější fyzikální charakteristikou dřeva. Na hustotě dřeva závisí většina ostatních mechanických vlastností dřeva (i únosnost spojů), čím vyšší je hustota, tím lepší bývají i další mechanické vlastnosti.

Hustota závisí na vlhkosti (se zvyšující se vlhkostí roste hmotnost a objem dřeva), hustota je definována rovnicí (1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Kde m je hmotnost [kg] a V je objem [m^3].

Často se uvádí hustota v závislosti na vlhkosti dřeva. V dřevařské vědě se používá hlavně hustota v absolutně suchém stavu ρ_0 a hustota ρ_{12} (při vlhkosti 12%). Hodnoty hustoty podle norem pro navrhování se vztahují k hmotnosti a objemu při vlhkosti, která se ustálí při teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu 65%.

Buněčná stěna má hustotu asi 1500 kg/m^3 . Z toho plyne, že hustota dřeva se tedy výrazně odvíjí od jeho pórovitosti, která je definována jako objemový podíl buněčných dutin. Konstrukční dřevo vykazuje zpravidla hustotu v absolutně suchém stavu mezi 300-550 kg/m^3 , což odpovídá podílu dutin 0,8 až 0,63. Hustota dřeva má velký rozptyl, dokonce i pro náhodný výběr odebraný z jedné lokality.

2.1.2.2 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva je definována jako poměr hmotnosti odvedené vody m_w a hmotnosti suchého dřeva m_0 (ta se získá vysoušením v sušárně při $103 \pm 2^\circ\text{C}$) viz následující rovnice (2).

$$\omega = \frac{m_w}{m_0} 100 = \frac{m_\omega - m_0}{m_0} 100 \quad (2)$$

m_w – hmotnost vody, m_0 – hmotnost v absolutně suchém stavu, m_ω – hmotnost při vlhkosti ω .

Vlhkost dřeva mezi 6 a 28% lze měřit s poměrně dobrou přesností ($\pm 2\%$) pomocí elektrických vlhkoměrů.

Při sušení čerstvě pokáceného dřeva se vlhkost nejprve odpařuje z buněčných dutin. Tato voda je tzv. volná voda - není na dřevo molekulárně vázána. Voda uvnitř buněčných stěn se nazývá vázaná voda, protože je na stěnu vázána vodíkovými spoji a van der Waalsovými silami, proto její odvedení vyžaduje větší množství energie, než u vody volné.

Vlhkost ω_f , při které jsou buněčné stěny nasyceny vodou, ale v buněčných dutinách ještě není volná voda, se nazývá mez nasycení vláken. Ta je u většiny druhů dřeva mezi 25-35%. Tato mez je z inženýrského hlediska velmi důležitá, protože při klesající vlhkosti dochází k významným změnám fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Nad touto mezí je většina vlastností přibližně konstantní.

2.1.2.3 Bobtnání a sesychání

Vlhkost vykazuje takovou afinitu k substanci buněčné stěny dřeva, že si může vynutit přístup do tohoto vlastně neporézního materiálu. Přitom jsou mikrofibrily tlačeny od sebe. Z toho vyplývající bobtnání buněčné stěny se může pro praktické aplikace předpokládat jako ekvivalentní objemu přijaté vody. Objem buněčných dutin zůstává při bobtnání stálý. Z toho vyplývá, že objemové bobtnání dřeva je úměrné objemu přijaté vody. Vystupuje-li vlhkost z buněčné stěny, dřevo sesychá. Sesychání a bobtnání v mezích běžných změn vlhkosti u dřevěných konstrukcí se označují jako vlhkoštní přetvoření.

V rozmezí vlhkosti dřev mezi 5 a 20% se rozměry dřeva mění lineárně s vlhkostí. V této oblasti se může vlhkoštní přetvoření vypočítat ze vztahu (3):

$$h_2 = h_1 \left[1 + \frac{\beta}{100} (|\omega_2 - \omega_1|) \right] \quad (3)$$

Kde h_1 a h_2 jsou rozměry při příslušných vlhkostech ω_1 a ω_2 , β je součinitel bobtnání (kladný) či sesychání (záporný) v %/‰.

Nejsou-li k dispozici hodnoty součinitele bobtnání a sesychání pro určitý druh dřeva, může se použít přibližná hodnota. Součinitel objemového bobtnání a sesychání β_v se může uvažovat roven hodnotě hustoty dělené 1000. To znamená, že objem dřeva s hustotou 400 kg/m^3 nabobtná o 0,4‰ při každém přírůstku vlhkosti o 1‰. To je založeno na základní úvaze, že součinitel objemového bobtnání odpovídá objemu přijaté vody. Součinitel bobtnání a sesychání v podélném směru β_0 je zpravidla zanedbatelný a součinitel v příčném směru β_{90} odpovídá poloviční hodnotě součinitele objemového bobtnání.

Pro většinu druhů dřeva (smrk, jedle, borovice, modřín, topol, dub) mohou být pro technické použití uvažovány hodnoty $\beta_0=0,01$ a $\beta_{90}=0,2$. Pro druhy dřeva s vysokou hustotou (buk, bongossi) se má uvažovat $\beta_{90}=0,3$.

Aby se problémy vlhkostních přetvoření minimalizovaly, má se dřevo vždy zabudovat s vlhkostí co nejvíce odpovídající později očekávané rovnovážné vlhkosti. Dřevo s vlhkostí přesahující 20-22% se má zabudovat pouze tehdy, když je možné přiměřeně rychlé vysychání konstrukce bez rizika biologické degradace nebo trvalých přetvoření účinkem mechanicko-sorpčního dotvarování.

2.1.2.4 Tvarové změny

Anizotropie bobtnání a sesychání kolmo k vláknům může způsobit zdeformování průřezu při vysoušení. Skutečnost, že sesychání v tangenciálním směru je přibližně 2x větší než ve směru radiálním, lze vysvětlit tendencí letokruhů se napřímit.

Vnitřní napětí, které tím vzniká, se může odbourat v první řadě vznikem radiálních trhlin. Tendence k tvorbě trhlin je tím větší, čím větší je průřez a čím rychlejší je vysychání.

Přítomnost tlakového dřeva, juvenilního dřeva nebo suků pouze v jedné části průřezu, může způsobit tvarové změny v podélném směru známé jako zakřivení ve směru tloušťky nebo šířky a šroubové zakřivení. K šroubovému zakřivení může dojít také, když bylo řezivo vyrobeno ze stromu s točivým růstem. Příčné zakřivení je důsledkem rozdílných vlhkostních přetvoření v tangenciálním a radiálním směru.

2.1.2.5 Vlhkost a mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva závisí na vlhkosti. Zvyšování vlhkosti vede ke snižování hodnot pevnosti a tuhosti. Tento účinek z části vysvětluje bobtnání buněčné stěny, následkem čeho je k dispozici méně materiálu buněčné stěny na plošnou jednotku. Mnohem důležitější je fakt, že voda vnikající do buněčné stěny zeslabuje vodíkové spoje, které drží pohromadě buněčnou stěnu. Změny vlhkosti nad mezí nasycení vláken nemají vliv na mechanické vlastnosti, protože v tomto případě se voda jen ukládá do buněčných dutin ve formě volné vody.

Účinek změn vlhkosti na různé mechanické vlastnosti je rozdílný. V případě porušení tlakem rovnoběžně s vlákny, které je způsobeno vybočením vláken, hrají důležitou roli vodíkové spoje citlivé na vlhkost. Při porušení tahem rovnoběžně s vlákny dojde k porušení kovalentních vazeb, kdy se od sebe odtrhnou mikrofibrily buněčné stěny. Pevnost v tlaku je tak více citlivá na vlhkost než pevnost v tahu.

Mechanické vlastnosti dřeva by se měly porovnávat při standardní srovnávací vlhkosti dřeva odpovídající 20°C a 65% relativní vzdušné vlhkosti.

2.1.2.6 Trvání zatížení

Dřevo vykazuje při zatížení v průběhu času výrazný pokles pevnosti. Hodnoty pevnosti, které se používají při navrhování dřevěných prvků pro stálá zatížení, jsou pouze asi 60% hodnot pevnosti, které byly zjištěny krátkodobými laboratorními zkouškami.

Je známo, že změny vlhkosti výrazně zvětšují dotvarování dřeva. Tento účinek lze chápat jako mechanicko-sorpční, protože se projevuje pouze při současném mechanickém namáhání a střídavé vlhkostní sorpci. Zjistilo se rovněž, že mechanicko-sorpční účinek zkracuje dobu do porušení dřeva.

Povrchově ošetřené dřevo nebo prvky z lepeného lamelového dřeva s velkým objemem vykazují menší změny vlhkosti, než neošetřené dřevo nebo dřevo malého objemu. Vystává proto otázka, zda pro povrchově ošetřené dřevo nebo pro

velkoobjemové lepené lamelové prvky nemá být dovolena mírnější redukce mechanických vlastností modifikačním součinitelem.

Chování deskových materiálů s ohledem na trvání zatížení kolísá v širokých mezích. Pro konstrukční překližku se předpokládá podobné chování jako u rostlého dřeva. Chování třískových desek je úzce spojeno s velikostí a orientací třísek. U třískových i vláknitých desek má na dlouhodobé vlastnosti velmi významný vliv jakost lepidla. Zatímco pro nejlepší třískové desky se může pro stálé zatížení předpokládat modifikační součinitel 0,4, pro vláknité desky může klesnout až na 0,2.

Při navrhování dřevěných konstrukcí se uvažuje vliv vlhkosti dřeva a trvání zatížení zařazením konstrukce do tříd provozu a tříd trvání zatížení a následně úpravou jeho návrhové pevnosti.

2.1.2.7 Vlastnosti dřeva

Vlastnosti dřeva se určují pomocí průkazných zkoušek. Na jejich základě se určují charakteristické hodnoty pevnosti, hustoty a modulů pružnosti.

2.1.3 Lepené materiály na bázi dřeva

Materiály na bázi dřeva jsou vyráběny různým průmyslovým zpracováním dřeva. Většinou jde o lisování připravených dřevních komponentů získaných mechanickým dělením dřeva (štěpky, dýhy atd.). Jako pojivo se používá lepidlo (tekuté či práškové).

Materiálů na bázi dřeva existuje celá řada, jde např. o překližované desky, vláknité desky, třískové desky, OSB desky, vrstvené dřevo, křížem vrstvé dřevo a lepené lamelové dřevo. Na dřevěné konstrukce lze použít pouze ty, které jsou vyrobeny tak, aby si udržely své vlastnosti po celou dobu životnosti v třídě provozu, pro kterou jsou navrženy.

2.1.3.1 Lepené lamelové dřevo

Lepené lamelové dřevo (LLD) se v ČR vyrábí přibližně od počátku 50 let 20. století. Rozměry vyráběných prvků jsou limitovány zejména rozměrovou kapacitou výrobní linky (typicky délka do 32 m, výška do 2m a šířky do 0,24m). Prvky z LLD vykazují vynikající požární odolnost. Rychlost odhořívání je 0,5 až 0,7 mm/ minutu což je vzhledem k celkovým rozměrům zanedbatelná hodnota, kterou lze ještě vylepšit pomocí vhodných povrchových úprav.

Z tohoto důvodu se z LLD hojně budují konstrukce, kde dochází ke shromažďování osob (sportovní a kulturní stavby apod.). Díky jeho pevnosti při nízké hmotnosti se také používá na stavby, jejichž části se musí přepravovat na velkou vzdálenost.

Lepené lamelové dřevo je vysokohodnotný stavební materiál, který v řadě případů nahrazuje použití tradičního rostlého dřeva. Hlavním důvodem je, že výrobní proces přináší řadu výhod. Prvky z LLD jsou vyráběny slepením lamel z prken spojovaných na koncích do požadované délky. Problémem však je, jak u těchto prvků stanovit pevnost a tuhost a kontrolovat jejich jakost. Jejich výšky lze snížit vyztužením obdobně jako u prvků z betonu.

Všeobecně se předpokládá, že lamelace vede ke zvýšení pevnosti lepeného lamelového dřeva – existuje zde lamelační efekt, který je popisován takto:

- V nosníku z LLD jsou vady odstraněny, výsledkem čehož je podstatně homogennější materiál než rostlé dřevo. Pravděpodobnost poruchy mající významný vliv na pevnost nosníku je menší, než pro samostatnou lamelu. Tento jev se nazývá „rozptylový efekt“.
- Lamely obsahující suky nebo jiné oblasti nízké tuhosti jsou vyztuženy přilehlými lamelami. V případě nosníku z LLD, tuhé a pevné lamely přebírají větší část tahových napětí. Je to často označováno jako efekt vyztužující, přemostňující či efekt roznesení napětí. Na základě zkušeností se modely pevnosti LLD odkazují na jednotlivé lamely. Znamená to, že předem zanedbávají vliv rozptylového efektu. Obvyklá tloušťka lamel se pohybuje mezi 20 – 45 mm a vady snižující pevnost (např. suky) jsou stejného řádu důležitosti. LLD je možné vyrobit mnohem efektivněji s využitím vyztužení v podobě lamel z vláken vysoké pevnosti (skleněných, uhlíkových). Vyztužením se dosáhne zvýšení tuhosti a únosnosti prvků.

Pro modelování nosníků z LLD existuje řada modelů rozdělení pevnosti. Jedním z nich je tzv. Karlsruhe model. Ten používá členění nosníku na části. Každá část odpovídá části lamely o délce 150 mm. Předpokládá, že se lamela skládá ze dvou materiálů – dřeva a zubovitých spojů. Model je založen na dvou počítačových programech. První simuluje skladbu nosníku z LLD a druhý umožňuje výpočet pomocí konečných prvků. Nedostatkem jsou kritéria porušení modelu. Tento model je považován za příliš komplikovaný a některé jeho implikace (zesilující výškový efekt nezávislý na délce) nebyly jednoznačně doloženy zkouškami.

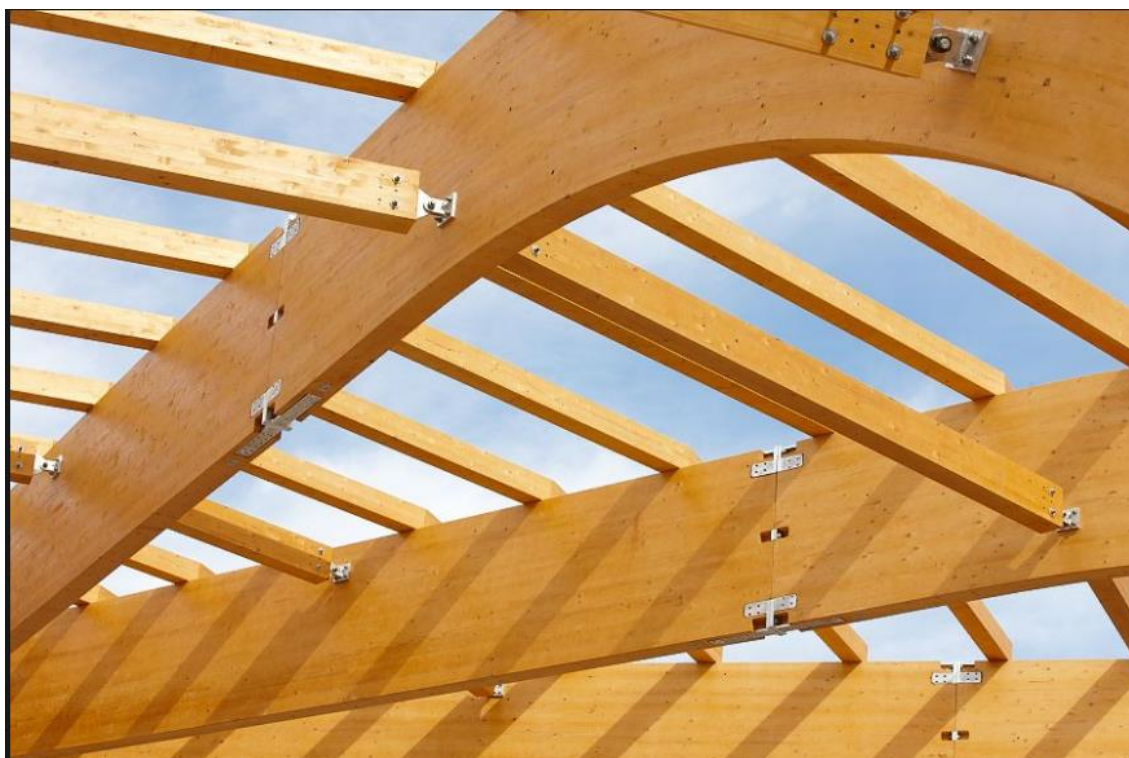
Z tohoto důvodu se používají jednodušší modely, kde je pevnost závislá pouze na pevnosti v tahu vnější lamely na tažené straně průřezu.



Obr. 6: Zakřivený nosník z lepeného lamelového dřeva [8]



Obr. 7: Přímý nosník z lepeného lamelového dřeva [8]



Obr. 8: Konstrukce s nosníky z LLD [9]

2.1.3.2 Vrstvené dřevo

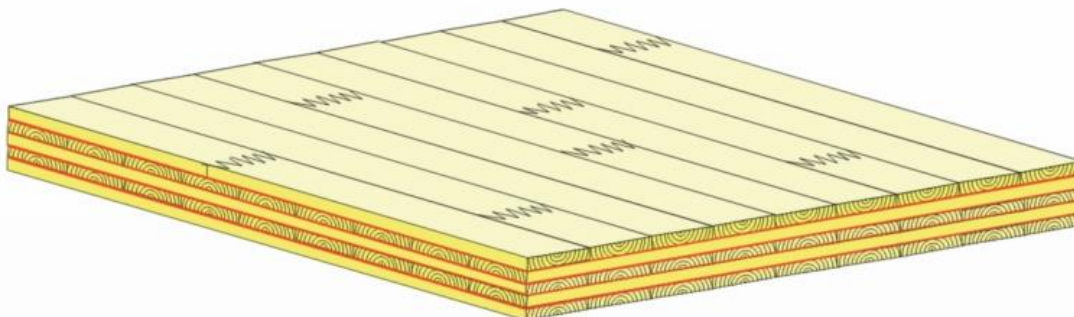
Jde o materiál podobný překližce, u kterého je většina, nebo všechny dýhy lepeny s totožnou orientací vláken. Vyrábí se tímto postupem deskové či prutové prvky. Vyrábí se z dýh tl. 3,2 mm, které se kladou s malými přesahy a následně lisují. Prvky vrstveného dřeva mají velmi dobré parametry tuhosti a pevnosti. Charakteristická pevnost v ohybu dosahuje 51 MPa a průměrná hodnota modulu pružnosti je 14 GPa. Rozměry deskových prvků jsou typicky do délky 26 m, šířky 1,8 m a tl. 21 – 75 mm. Pro prutové prvky pak délka do 20 m, výška 0,5 m a šířka 0,3 m.



Obr. 9: Vrstvené dřevo LVL, obrázek dostupný online na <https://www.steico.com/cz/>

2.1.3.3 Křížem vrstvené dřevo

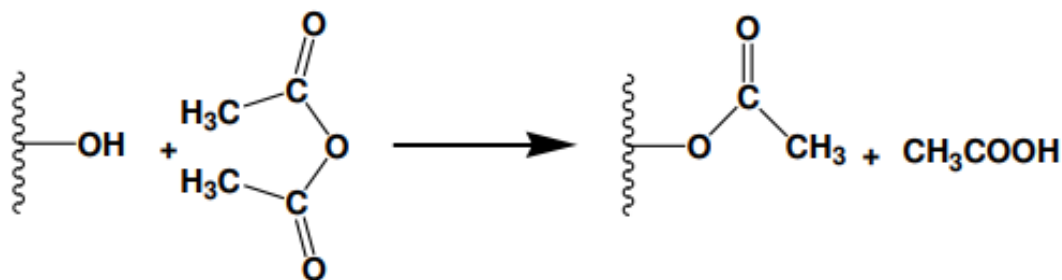
Jde o deskové prvky. Vyrábí se z neopracovaných prken či fošen z okrajových částí kmene stromu. Tento materiál má nízkou cenu, ale zároveň dobré mechanické vlastnosti (tuhost a pevnost). Na vnější vrstvy je používáno prken a fošen předepsané třídy, které jsou spojovány zubovitými spoji (je doporučeno takto spojovat všechny vrstvy). Vrstvení probíhá většinou ortogonálně, ale je možné vrstvy ukládat i pod jinými úhly (např. 45°). Jednotlivé vrstvy jsou k sobě plošně lepeny. Typické maximální rozměry jsou – délka 16,5 m (v případě spojení zubovitými spoji 30 m), šířka 3 m, tloušťka 0,5 m.



Obr. 10: Křížem vrstvené dřevo [7]

2.1.3.4 Chemicky modifikované dřevo

Informace o chemicky modifikovaném dřevu jsem čerpal z následujících zdrojů [10; 11; 12; 13]. Jednou z možností, jak potlačit, či zcela odstranit vliv vlhkosti na konstrukční dřevo je jeho chemická modifikace. Ta může být prováděna formou acetylace (produkuje spol. Accsys Technologies – Accoya wood – výroba z borovice *Radiata Pine*). Chemickou modifikací dochází k tvorbě kovalentních acetylových vazeb na hydroxilové skupiny, které jsou součástí buněčných stěn.



Obr. 11: Schéma reakce při acetaci dřeva za pomoci acetanhydridu [11]

Touto reakcí dochází k nabobtnání dřeva – nově vytvořené skupiny zabírají místo v buněčné stěně (obdobně jako vázaná voda). To má za následek zvýšení stability dřeva vůči vlhkosti. Místa, na která by se vázala dodatečná vlhkost (formou vázané vody), jsou již obsazena acetylovými skupinami. Takto ošetřené dřevo tedy není náchylné k sesychání a bobtnání. Dochází k redukci objemových změn cca na $\frac{1}{4}$ v případě měření na zcela vysušených vzorcích oproti neošetřenému dřevu. Pro chování dřeva v běžných podmínkách použití jsou objemové změny chemicky modifikovaného dřeva oproti neošetřenému řádově nižší.

Chemicky ošetřené dřevo vykazuje velmi dobrou odolnost vůči hnilobě a dalším škůdcům. Odolnost dřeva bez dalších úprav je pro běžné prostředí zaručena na 50 let, pro prvky trvale v kontaktu s vodou pak 25 let.

Chemicky modifikované dřevo je možné lepit a vyrábět z něho tedy lepené lamelové či křížem vrstvené dřevo. Je pouze nutné volit vhodný typ lepidel. Vlivem chemických změn se mění chování a adhesivita povrchových vrstev. Dobrých výsledků se dosahuje například s lepidly na bázi polyuretanů.

Mechanické vlastnosti chemicky modifikovaného dřeva jsou, jak prokázala řada testů, totožné jako pro neošetřené dřevo (dřevo Accoya má dle metodik EN 408 pevnost v ohybu 40 MPa a ohybovou tuhost 8,8 GPa).



Obr. 12: Příklad využití chemicky modifikovaného dřeva Accoya [14]



Obr. 13: Příklad využití chemicky modifikovaného dřeva Accoya [14]

2.2 Beton

Informace o betonu a UHPC jsem čerpal z následujících publikací [15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23]. Beton je kompozitní stavební hmota. Tvoří ji v její nejprostší podobně směs plniva a pojiva. Plnivo je tvořeno přírodním či umělým kamenivem, pojivo je hydraulické – nejčastěji cement. Současně používané betony při výrobě, krom již zmíněných základních složek, používají i řadu příměsí a přísad (rozdíl mezi příměsí a přísadou je v dávkovaném množství vztaženém k použitému množství cementu – přísady jsou do 5% hmotnosti). Beton je možné vyztužovat – pruty, prvky či vlákny z různých materiálů (nejčastěji se jedná o ocel).

Beton je možno rozdělit do různých specifických poddruhů, např.:

- Beton běžných pevností;
- Vysokopevnostní beton;
- Samozhutnitelný;
- Vylehčený;
- Vysokohodnotný.

Historie materiálu, který je možné považovat za beton, sahá až do období starověku, kdy byla používána směs přírodních hydraulických pojiv a sopečných tufů k tvorbě litých výplní zděných stěn (Řekové nazývali toto zdivo „emplekton“). Tuto technologii využívali Féničané, Řekové či Římané.

2.2.1 Složky betonu

Beton se skládá minimálně ze základních složek:

- Cement;
- Voda;
- Kamenivo.

Směs může být doplněna o následující složky:

- Přísady;
- Příměsi.

2.2.1.1 Cement

Jde o hydraulické pojivo, které je uměle vyráběné míšením a mletím vhodných složek. Hydraulicita cementu mu umožňuje, aby proběhlo jeho tuhnutí a tvrdnutí též ve vodě a po vytvrnutí si zachová své vlastnosti. Cementy se rozdělují podle pevnosti po 28 dnech, rychlosti tuhnutí a svého složení.

Základní složkou je Portlandský slínek. Ten se vyrábí pálením surovin, které mají ve své struktuře obsaženy oxidy CaO , SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Po vypálení vznikají především křemičitany vápenaté (alit C_3S a belit C_2S) a dále sloučeniny obsahující hliník (C_3A) a železo (C_4AF). Portlandský slínek se dále doplňuje o další složky cementu pro snížení cenové náročnosti a k úpravě různých konečných vlastností ztvrdlého cementu, případně vlastností v době tuhnutí.

K portlandskému slínku je dále možno přidávat např.:

- vysokopecní strusku – vzniká například při tavení železné rudy, při vhodné aktivaci by měla vykazovat hydraulické vlastnosti;

- pucolány – jde o přírodní látky vhodného složení (často vulkanického původu), po jemném namletí by měli reagovat za přítomnosti vody s ostatními prvky cementu (jmenovitě hydroxidem vápenatým) a přispívat k nárůstu pevnosti;
- popílek – jde o vedlejší produkt při pálení uhlí, získává se elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů. Jedná se o velmi jemný prášek, který má vlastnosti podobné pucolánům;
- vápenec – hornina s vhodnými vlastnostmi se přidává v podobě jemně mletého prášku;
- křemičitý úlet – vzniká v elektrické obloukové peci při výrobě křemičitých slitin. Skládá se z velmi jemných částic, které obsahují minimálně 85% amorfního oxidu křemičitého.

2.2.1.2 Kamenivo

Kamenivo je možné rozdělovat podle různých kritérií. Podle objemové hmotnosti rozdělujeme kamenivo na lehké (do 2000 kg/m³), hutné (2000-3000 kg/m³) a těžké (nad 3000 kg/m³). Podle původu na těžené, drcené, přírodní, umělé či recyklované. Podle velikosti zrna na zrna pod 0,063 mm, jemné (do 0,25 mm), drobné (0-4 mm), hrubé (4-63 mm).

Kamenivo pro betonovou směs je nutné volit s ohledem na požadované výsledné vlastnosti ztvrdlé směsi. Důležité je vhodné granulometrické složení, pevnost, nasákavost, objemová hmotnost.

2.2.1.3 Voda

Množství vody se vyjadřuje pomocí vodního součinitele – ten je dán jako poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu. Není vhodné používat vody s obsahem solí nebo splaškové.

2.2.1.4 Přísady

Přidávají se během míchání betonové směsi v množství do 5% hmotnosti cementu. Jsou to většinou chemické sloučeniny přidávané za účelem úpravy vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu. Přísady mohou mít následující funkce:

- plastifikátory a superplastifikátory – redukují potřebné množství vody pro dosažení potřebné zpracovatelnosti směsi;
- stabilizační – redukují odmísení vody nastávající sedimentací tuhých částic;
- provzdušňující – při míchání betonu vytvářejí uzavřené póry, rovnoměrně rozdělené v objemu.;
- urychlující/zpomalující tuhnutí a tvrdnutí - retardéry tuhnutí prodlužují dobu k manipulaci s čerstvým betonem a mohou přispět k redukci trhlin vzniklých při tvrdnutí. Urychlovače mají urychlit proces tuhnutí a tvrdnutí pro dřívější dosažení určitých pevností (například pro dřívější odbednění prvku, možnost vnést dříve zatížení);
- těsnící – zvyšují hutnost betonu, případně zaplňují kapiláry a tím zamezují vztlínání vody a průsakům přes ztvrdlý beton;
- různé další přísady (pěnotvorné, adhezni, injektážní, biocidní, inhibitory koroze).

2.2.1.5 Příměsi

Příměsi se mohou přidávat ve vyšších množstvích, obvykle mívající práškový charakter. Mohou mít latentně hydraulické vlastnosti, měnit barevnost (pigmenty) nebo se může jednat o výztužná vlákna.

Latentně hydraulické příměsi (příměsi II. typu) jsou schopné tvrdnout za přítomnosti vody reakcí s hydroxidem vápenatým, který vzniká při hydrataci cementu. Jde o pucolány, křemičitý úlet a jemně mletou strusku. Mohou se vzít v úvahu při výpočtu vodního součinitele.

Barevné pigmenty (příměsi I. typu) jsou inertní látky sloužící k zabarvení betonu. Měly by mít minimální vliv na pevnosti betonu a jeho další mechanické vlastnosti. Výsledná barevnost závisí na dávkování pigmentu a také na barevnosti základních složek betonu (cementu, kameniva).

Rozptýlená výztuž se používá na zlepšení vlastností betonu. Nejčastěji se používají ocelová vlákna, ale lze se setkat i s vlákny polymerními, skelnými či uhlíkovými. Velmi záleží na dávkování vláken, jejich rozmíšení v betonu a duktilitě. Vlákna mohou mít například následující efekty:

- omezení vzniku smršťovacích trhlin a s tím i související zvýšení tuhosti;
- zvýšení houževnatosti, omezení křehkosti;
- zvýšení pevnostních charakteristik (omezení vlivu příčného tahu na výslednou pevnost v tlaku);
- zvýšení požární odolnosti (polymerová vlákna).

Ocelová vlákna bývají používána v délkách od 12 do 60 mm, průměru od 0,25 do 1 mm a se štíhlostním poměrem (délka ku průměru) 50 až 100. Vlákna bývají hladká či tvarovaná.

2.2.2 UHPC a UHPFRC

Moderní jemnozrný kompozitní materiál na bázi cementu, označovaný jako UHPC (z anglického názvu „Ultra-high performance concrete“) a jeho poddruh, silně vyztužený rozptýlenou drátkovou výztuží UHPFRC („ultra-high performance fibre reinforced concrete“) se významně liší od běžného betonu. Vývoj tohoto cementového kompozitu probíhá v řadě zemí po celém světě a postupem času nachází stále širšího využití. Nicméně pro navrhování konstrukcí z tohoto materiálu neexistují ustálené předpisy, ale pouze metodické pokyny zohledňující lokální zkušenosti s tímto materiálem.

Od běžných betonů, kde nosnou kostru tvoří kamenivo hrubé frakce a lze očekávat imperfekce, je považována limitní pevnost v tlaku přibližně 120 MPa (vysokopevnostní „HSC“ beton) se od UHPC, respektive UHPFRC významně liší. Při výrobě UHPC se běžně používá poměrně vysokých dávek cementu (600-1000 kg/m³). Dále se používá výhradně jemnozrného kameniva (velikost zrn běžně do 1 mm), různé příměsi (většinou jde o mikroplniva, například křemičitý úlet). Vzhledem k vysokému množství cementu se používá také výrazně větších dávek přísad (zejména superplastifikátory), kterými se dosahuje nízké hodnoty vodního součinitele (běžně maximálně 0,25). Velmi běžné je použití rozptýlené výztuže v podobě mikrovláken (dávka 1-3% objemu směsi), vlákna mívají průměr do 0,3 mm a délku do 20 mm, většinou se jedná o vlákna kovová, ale mohou být i jiná, dle receptury směsi.

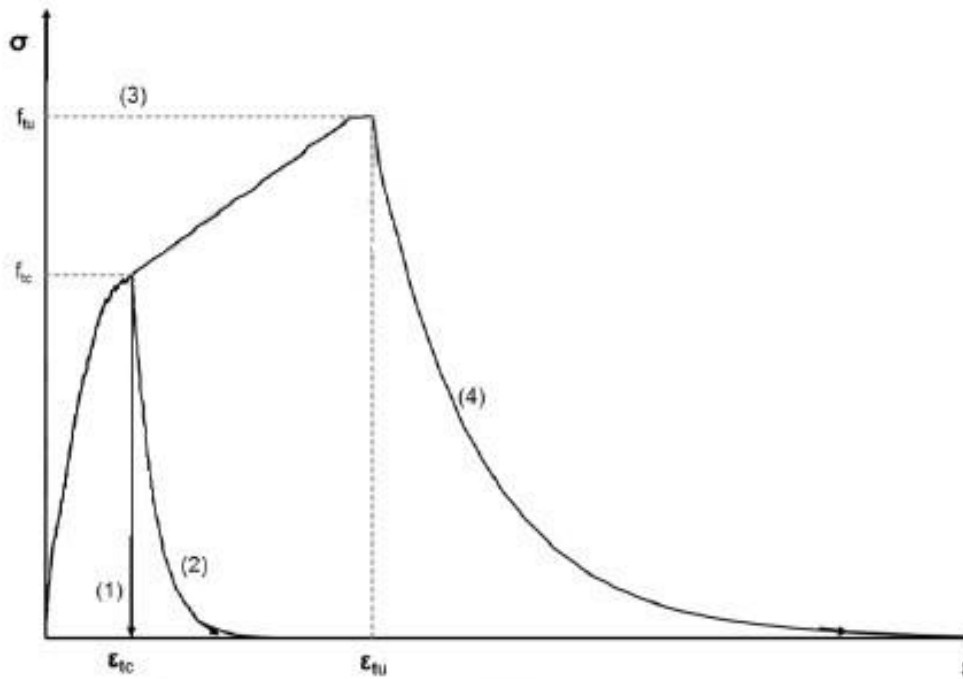
Díky své jemnozrnné struktuře a vysokému obsahu rozptýlené výztuže dosahují tyto kompozity vysokých pevností, obvykle je udávána spodní hranice pevnosti v tlaku 150 MPa. Pevnost v tahu a reziduální pevnost v tahu za ohybu jsou též v porovnání s běžným betonem poměrně vysoké, zároveň se vyznačující vysokou duktilitou a lomovou energií.

Složení směsi UHPC bývá voleno tak, aby bylo dosaženo takové granulometrie, která zajistí maximální hustotu prvku a zároveň co nejlepší zpracovatelnost. Příklad složení UHPC může být následující – cement (hydraulické silikátové pojivo), drobné kamenivo, mikroplniva (mletý křemen či vápenec), latentně hydraulická příměs (popílek, křemičitý úlet, struska), přísady (superplastifikátory, zpomalovače tuhnutí, protismršťovací přísady) a voda. Tímto získáme velmi pevnou, ale křehkou matici, pro její vyztužení se přidávají již zmíněná vlákna. Při dostatečném dávkování (běžně se uvádějí 2% objemu) lze zajistit tahové zpevnění materiálu a tedy přenos tahových namáhání i po vzniku trhlin.

Tab. 2: Příklad složení UHPC [16]

Složka	Množství [kg/m ³]	Hmotnostní podíl [%]
Portlandský cement	712	28,5
Drobné kamenivo (≤1 mm)	1020	40,8
Křemičitý úlet	231	9,3
Křemenná moučka	211	8,4
Přísada redukující vodu	30,7	1,2
Urychlovač	30	1,2
Ocelová vlákna	156	6,2
Voda	109	4,4

Z mechanických vlastností se UHPC vyznačuje pevností v tlaku > 150 MPa, pevností v prostém tahu > 8 MPa, v tahu za ohybu > 15 MPa, vysokým modulem pružnosti (40-55 GPa) a také vysokou odolností proti působení vnějšího prostředí díky vysoké hutnosti a nepropustnosti.



Obr. 14: Pracovní diagram UHPC [16]. Kde f_{tu} je mez pevnosti v tahu; f_{tc} je pevnost v tahu při vzniku trhliny; ϵ_{tc} je přetvoření při vzniku trhliny; ϵ_{tu} je přetvoření při dosažení meze pevnosti; 1, 2 a 4 zobrazují možný průběh tahového změkčení a 3 představuje tahové zpevnění.

Specifika vstupních surovin pro výrobu UHPC:

Cement: nejčastěji se používá portlandský cement CEM I 52,5 a 42,5 (CEM I je tvořen téměř výhradně namletým portlandským slínkem), nicméně použití směsných cementů je také možné.

Kamenivo: Jako u běžného betonu tvoří nosnou kostru matrice UHPC. Vzhledem k požadovaným vyšším pevnostem je zde požadavek na vysokou kvalitu a pevnost použitého kameniva. Doporučuje se použití tříděných písků, které se dále kombinují pro dosažení stanovené křivky zrnitosti.

Příměsi: v UHPC se používají primárně jako mikrofilery v podobě prášků s velikostí zrn do 0,25 mm. Jejich použití se zaměřuje na úpravu reologických vlastností čerstvé směsi a doplnění granulometrické skladby pro získání co nejvyšší hutnosti. Za tímto účelem se používají příměsi I. i II. typu. Příměsi I. typu (inertní) bývají zastoupeny mletým křemenem, kamennou moučkou či vápencem. Příměsi II. typu (latentně hydraulické) bývají tvořeny křemičitým úletem, popílkem či vysokopecní struskou. Na rozdíl od běžného betonu zde není jasné, jakou měrou se mohou latentně hydraulické příměsi podílet při výpočtu vodního součinitele. Křemičitý úlet (mikrosilika) má velký měrný povrch a zvyšuje požadavky na množství použité záměsové vody a superplastifikátoru.

Vlákna: používají se pro zajištění houževnatosti a duktility, kterou se UHPC vyznačuje. Matrice se vyztužuje všesměrně orientovanou výztuží v podobě vláken (drátků). Zásadní je množství, ve kterém jsou vlákna dávkována. Nejčastěji se používá rozptýlená výztuž v podobě ocelových drátů vysoké pevnosti (pevnost v tahu 2 GPa), jedná se o vlákna s vysokým štíhlostním poměrem (> 60), délky do 20 mm a průměru do 0,3 mm. Využívat je možné i rozptýlenou výztuž z jiných materiálů (polymerní PVA

vlákna, skleněná, uhlíková), důležité je vždy jejich vhodnost vyzkoušet na reálných prvcích. Vlákna by měla mít dostatečnou tuhost (vyšší než samotná matrice), důležitá je také jejich soudržnost s matricí, dlouhodobé působení a chemická odolnost vůči alkalickému prostředí.

2.2.3 Zkoušky mechanických vlastností UHPC

2.2.3.1 Pevnost v tlaku

Vzhledem k vysoké pevnosti v tlaku (jako minimální se uvádí pevnost 150 MPa na válci s poměrem stran 1:2) není mezinárodně ustálena velikost zkušebních těles – tělesa běžně používaná pro zkoušku pevnosti v tlaku kladou při vysokých pevnostech testovaného materiálu značné nároky na zkušební zařízení. Např. dle doporučení AFGC [20] je udáváno jako referenční těleso válec o průměru 110 a výšce 220 mm, eventuálně válec s průměrem 70 a výškou 140 mm. V našich podmínkách je doporučeno použití válců s poměrem průměru k výšce 1:2 a minimálním průměrem 100 mm. Je tedy možné používat válce o průměru 100 případně 150 mm a výškou 200, resp. 300 mm. V případě zkoušení na jiných tělesech (např. krychle o hraně 100 mm) je nutné určit převodní vztah pomocí zkoušky.

2.2.3.2 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu se pro prvky z betonu určuje poměrně obtížně. Provádí se zkoušky v prostém tahu, v tahu za ohybu a v příčném tahu.

Pevnost v tahu za ohybu:

Zkoušku je možné provést na následujících tělesech:

- čtyřbodovým ohybem na trámci 75x125 mm délky minimálně 500 mm s rozponem podpor 450 mm. Test se řídí posunem břemene a je měřen průhyb trámce;
- třibodovým ohybem na trámci 150x150 mm délky 700 mm a s rozponem podpor 500 mm s vrubem do 1/6 výšky uprostřed rozpětí. Test je řízen rozevřením trhliny, měří se rozevření trhliny a průhyb trámce;
- čtyřbodovým ohybem na trámci 150x150 mm délky 700 mm s rozponem podpor 600 mm. Test je řízen posunem břemene, měří se rozevření trhliny a průhyb trámce;
- Zkouška na trámci 150x150x700, rozpětí podpor 500 mm a s vrubem dle MC 2010 [19].

S ohledem na strukturu materiálu je možné připustit i testy na menších vzorcích, které se používají pro testy cementu – konkrétně trámečky 40x40x160 mm. Je nicméně nutné uvažovat s tím, že výsledky na menších vzorcích dávají vyšší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu než větší tělesa – rozdíl může být až dvojnásobný.

Pro testy je možné uvažovat i jiné postupy a tvary těles. Vzhledem k subtilnosti prvků z UHPC je vhodné při volbě testovaných těles zohlednit finální tvar a způsob výroby konstrukčních prvků.

2.2.3.3 Zkouška pevnosti v prostém tahu

Jde o technicky velmi složitý test. Problematické je zejména kotvení zkušebních prvků tak, aby byly zatížené skutečně prostým tahem. Podstatné je také, aby použité materiály pro přilepení UHPC vzorků měli vyšší pevnost než samotný vzorek. Zkoušku

je možné provádět např. na hranolech o průřezu 100x100 mm nebo na válcích o průměru 100 mm a délky min. 300 mm.

Případně je navrhován postup zkoušky na vzorcích, které se podobají tvarům těles pro zkoušky oceli – prvky ve tvaru kosti.

2.2.3.4 Modul pružnosti

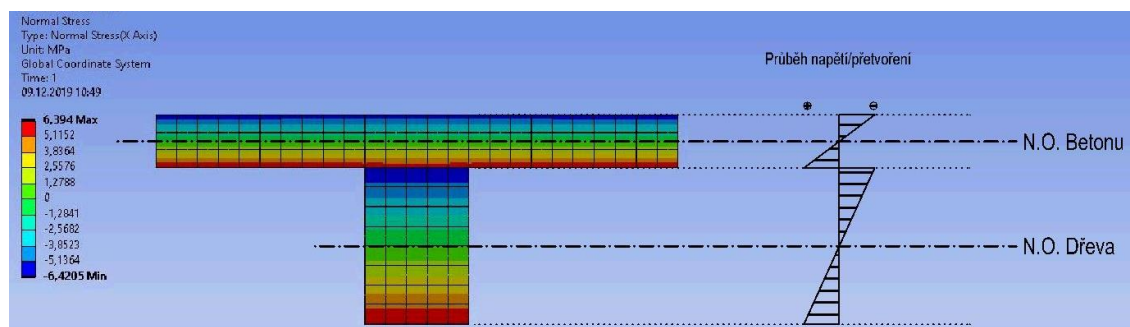
Statický modul pružnosti se zkouší na tělesech ve tvaru válce či hranolu. Nejčastěji se v ČR zkouší na válcích 150x300 mm (DxH). Dynamický modul pružnosti je možné zkoušet například pomocí ultrazvuku nebo elektromagnetické rezonance.

2.3 Spřažení dřeva a betonu (UHPC)

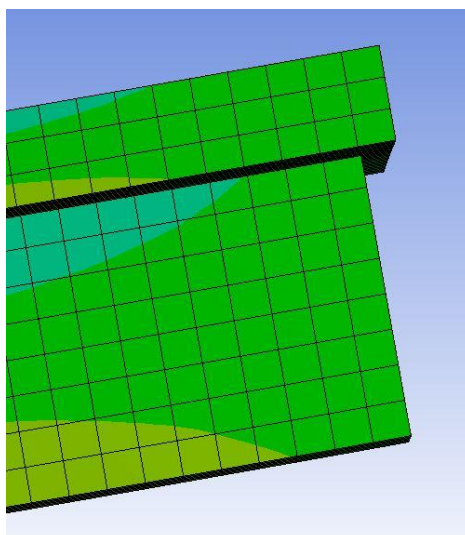
Informace ke spřažení dřeva a betonu jsem čerpal z těchto publikací [24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31], pro spřažení dřeva a UHPC pak z těchto [32; 33; 34; 35]. Princip fungování spřažené dřevo-betonové konstrukce je takový, kdy tlaková namáhání přenáší betonová deska, tahová napětí dřevěný prvek a smykovou sílu, která vzniká na rozhraní materiálů, spřahovací prostředek. Tloušťka betonové desky závisí zejména na vzdálenosti dřevěných prvků – kdy deska přenáší ohybový moment v příčném směru, na rozpětí dřevěných prvků – tlačaná oblast by měla zůstat v betonové části průřezu a pohybuje se nejčastěji od 60 do 200 mm. V případě použití vysokohodnotného betonu UHPC dochází k výrazným úsporám materiálu a tloušťky se snižují, materiál je možno používat od tl. přibližně 20 mm – silně záleží na složení směsi. Snižováním tl. betonové vrstvy se výrazně snižuje zatížení konstrukce vlastní tíhou a získáváme rezervu pro užitná zatížení. Dřevěné prvky tvoří nejčastěji nosníky různých tvarů z rostlého dřeva či materiálů na bázi dřeva – nejčastěji lepené průřezy, ale může jít i o dřevěné desky (křížem vrstvené dřevo, překližky apod.). Spřahovací prostředek bývá nejčastěji vyroben z oceli. Spřažení lze dosáhnout i lepením (pouze v případě prefabrikace) či použitím smykových zářezek.

2.3.1 Princip působení spřaženého průřezu

Problematiku posouzení dřevo-betonové konstrukce lze rozdělit do dvou extrémních výpočetních situací, přičemž skutečné chování spřažené konstrukce bývá mezi nimi. Jedním z extrémů je nekompozitní chování (obrázek 15) – dřevěný nosník i deska se ohýbají téměř nezávisle, deska je pouze položena na dřevěný nosník a může mezi nimi probíhat volný prokluz. Nedochozí zde k přenosu smykových sil na kontaktu, pro každou část se tedy uvažuje s vlastní neutrální osou. Spolupůsobení je zde pouze formou roznosu zatížení v závislosti na tuhosti desky a nosníku.

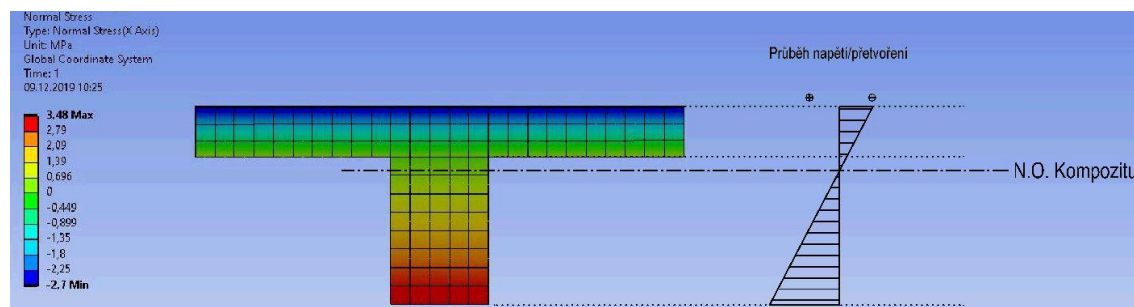


Obr. 15: Model nosníku a desky v režimu nekompozitního chování v programu Ansys. V pravé části je průběh napětí a přetvoření.



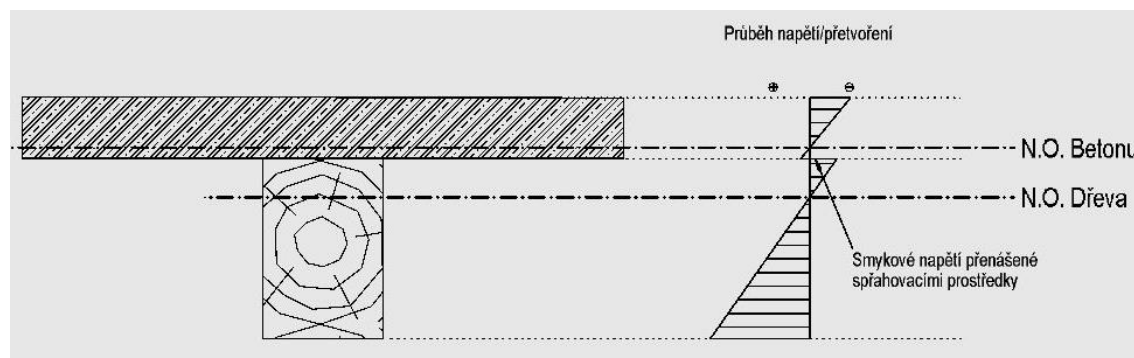
Obr. 16: Detail konce modelu, zřetelně viditelný pokluz obou částí modelu

Druhým extrémem je úplné kompozitní chování (obrázek 17). V tomto případě je na kontaktu desky a nosníku nekonečně tuhé spojení a dochází k dokonalému přenesení smykových sil. Spřažená konstrukce funguje jako celistvý průřez, má jednu neutrální osu a průběh napětí je spojitý.



Obr. 17: Model nosníku a desky v režimu úplného kompozitního chování v programu Ansys.
V pravé části je průběh napětí a přetvoření.

Skutečná konstrukce bývá mezi těmito extrémů (obrázek 18). K úplnému kompozitnímu chování má nejbližší konstrukce, kde jsou k sobě deska a nosník slepeny. V případě použití mechanického spojení dojde většinou k nějakému většímu či menšímu otlacení a dotvarování, které určitý prokluz ve styčné spáře umožní.

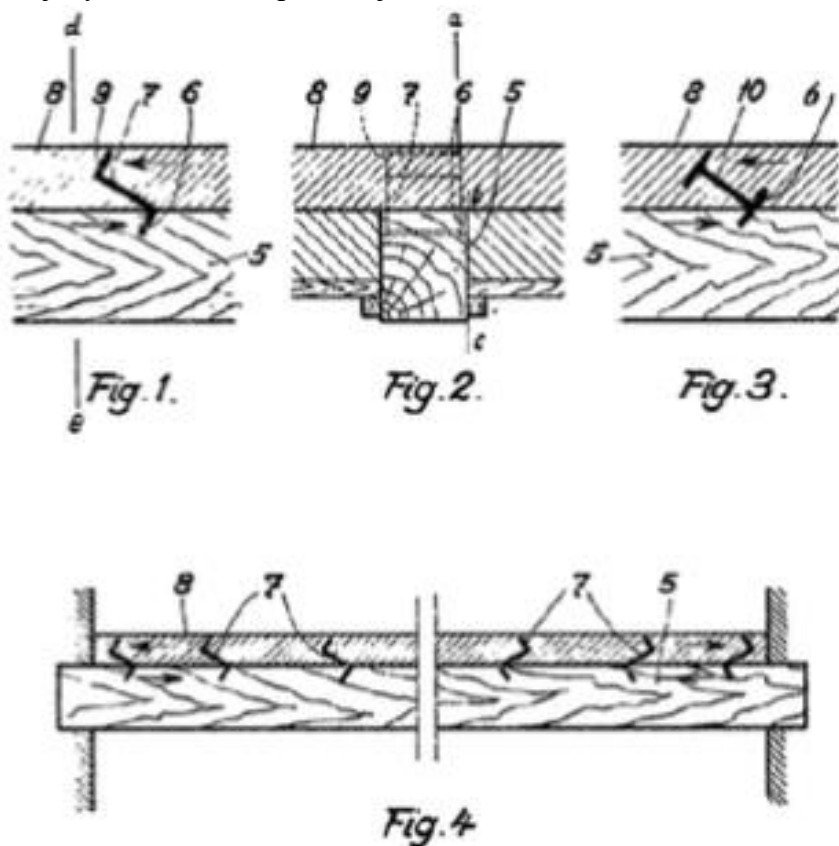


Obr. 18: Průběh napětí a přetvoření pro reálnou spřaženou konstrukci

2.3.2 Historie spřahování dřeva a betonu

První patent na spřažení dřeva a betonu byl podán v roce 1921 německým inženýrem Paulem Müllerem. Patent spočíval v konstrukci z dřevěných trámů či fošen s prkenným záklopem. Ke spřahování byla použita ohýbaná betonářská výztuž, ta byla kotvena pomocí hřebíků.

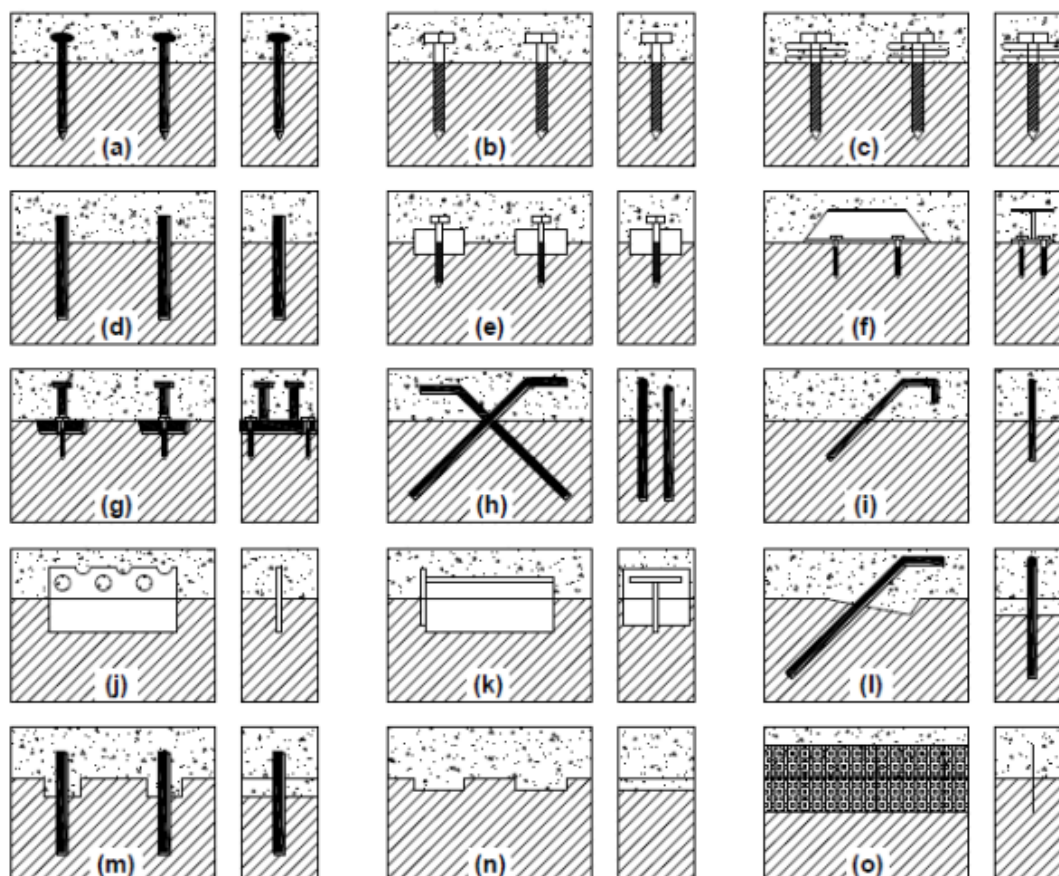
Průkopníkem v této oblasti je spíše švýcarský inženýr Otto Schaub. Vymyslel a nechal si patentovat řadu různých konstrukčních řešení založených na použití smykových zarážek (v rámci zářezů do nosníku či vyčnívajících z něho), spojování za pomoci vrutů či výztuže (ta byla použita i jako kontinuální prvek). Patentováno má také použití tesařských skob, Z a I profilů (obrázek 19). Způsoby spřahování, které si nechal patentovat, se v jistých obměnách používají i v současnosti.



Obr. 19: Způsoby spřažení, které si patentoval v roce 1938 švýcarský inženýr Otto Schaub, převzato z [36]

2.3.3 Možnosti spřahování

V následujících kapitolách bude podrobněji popsáno několik vybraných možností pro spřažení dřeva a betonu. Souhrn běžně používaných způsobů spřažení pro konstrukce mostů ve své práci prezentuje například Rodriguez [27] (obrázek 20). Jedná se především o spoje využívající ocelové spřahovací prostředky kolíkového typu či vlepované ocelové prvky. Na obrázku je pro každý typ spřažení zobrazen podélný řez a následně řez příčný.



Obr. 20: Používané způsoby spřažení, převzato z Rodrigues [27]. Na obrázku je pro každou variantu zobrazen podélný (vlevo) a příčný (vpravo) řez. Zobrazené varianty spřažení jsou: (a) hřebíky, (b) šrouby, (c) šrouby, (d) vlepované trny, (e) „CHS“ ocelové ozuby + šrouby, (f) „UCS“ – šroubované I profily, (g) smykové lišty s navařenými smykovými trny, (h) vlepovaná betonářská výztuž do X, (i) vlepovaná betonářská výztuž v jednom směru, (j) „PSP“ - vlepované děrované plechy, (k) „TSP“ - vlepované svařence, (l) betonový ozub + vlepovaná betonářská výztuž, (m) betonový ozub + vlepované trny, (n) betonové ozuby, (o) „HBV“ lišty.

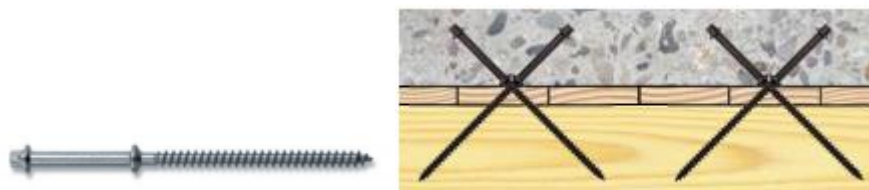
2.3.3.1 Lepení

Spřahování za pomoci lepených spojů přináší velmi tuhé spojení, které se blíží dokonale spřažené konstrukci. Nevýhodou je technologická náročnost provádění, nemožnost využití monolitického betonu a zejména pak nejistoty týkající se dlouhodobého působení spoje. Lepení tedy bývá spíše využíváno v rámci vlepování ocelových spřahovacích prostředků do dřeva či k lepení dřeva samotného. Spřažení dřeva s UHPC deskou lepením se ve své práci zabýval například Schäfers [37] a Eisenhut [38].

2.3.3.2 Ocelové spřahovací prostředky kolíkového typu

Spřahování pomocí ocelových spřahovacích prostředků kolíkového typu je nejčastějším způsobem spřahování dřeva a betonu. Využívají se při něm hřebíky, vruty, kolíky a závitové tyče. Ty mohou být rozmístěny po délce trámu rovnoměrně či v různých rastroch – přičemž největší hustota bývá v oblasti podpor. Menší prvky jako hřebíky či vruty mohou být v několika řadách v rámci příčného řezu v závislosti na šířce trámů.

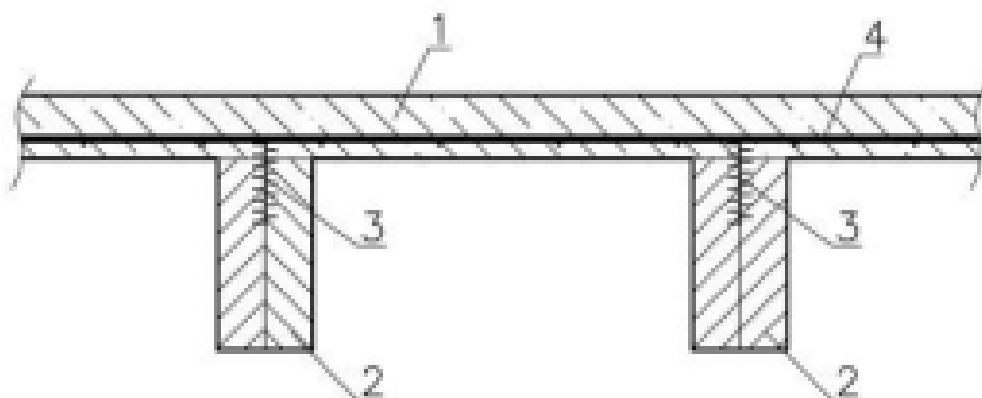
V současnosti se pro běžné aplikace nejčastěji využívají speciálně navržené vruty pro spřahování dřeva a betonu, které mají dvě hlavy – například vruty SFS Intec systému VB, které se zavrtávají do dřeva pod úhlem 45° ve dvojici proti sobě pro zlepšení přenosu smykové síly.



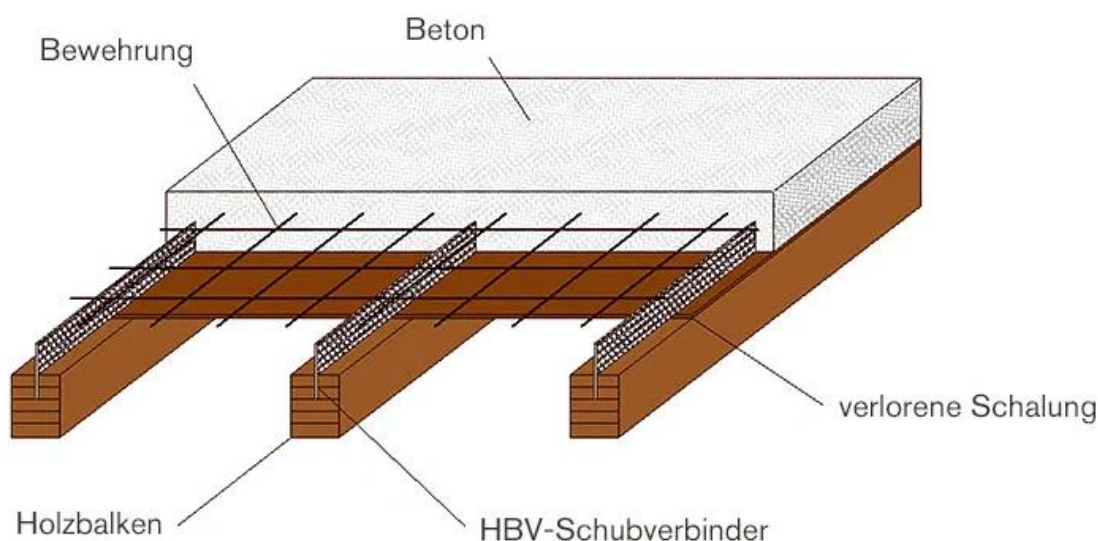
Obr. 21: Vruty spřahovacího systému SFS Intec VB [39]

2.3.3.3 Ocelové spřahovací prostředky ostatních typů

Jedná se zejména o různé spřahovací lišty a plechy či desky s prolisovanými trny. Tyto prvky se zpravidla do dřeva vlepují. Jeden ze způsobů využívající desky s prolisovanými trny zabetonovanými do desky, na které se nalisují poloviny dřevěného nosníku, byl vyvinut na stavební fakultě ČVUT týmem doc. Kuklíka [40]. Jde o způsoby, které umožňují využít částečnou prefabrikaci, pokud jsou předem zabetonovány do desky. Tento způsob je však velmi náročný na přesnost výroby a montáže.



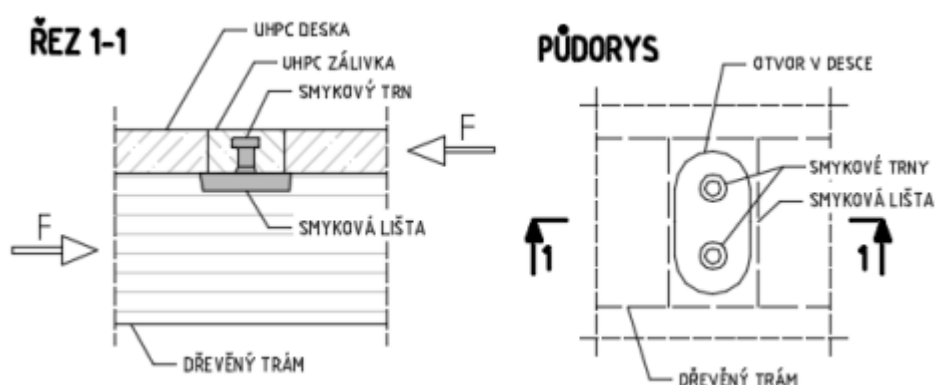
Obr. 22: Příklad dřevo-betonové konstrukce spřažené pomocí desek s prolisovanými trny zabetonovanými do desky, na které jsou následně nalisovány poloviny dřevěného nosníku. Kde 1 je betonová deska, 2 je dřevěný nosník, 3 jsou desky s prolisovanými trny a 4 je betonářská výztuž desky. Převzato z [40].



Obr. 23: Spřahovací systém HBV [41]

2.3.3.4 Smykové zarážky

Jde většinou o různé zářezy či výčnělky vytvořené ve styčné ploše na dřevěném trámu. Ty svou geometrií brání v pokluzu spřahovaných materiálů ve styčné spáře. Jde o poměrně účinný způsob přenosu vznikající smykové síly ve styčné spáře, používá se zejména u více namáhaných konstrukcí (lávky, mosty). Kombinuje se s ocelovými spřahovacími prvky pro zabránění delaminace způsobené silami kolnými na styčnou spáru. Při použití klasického betonu je vzniklé ozuby nutné buďto vyztužit, nebo je nutné provádět je poměrně hustě po délce konstrukce pro zabránění porušení betonu smykem. Tento způsob byl využit při návrhu spřažení pro grantový projekt TAČT TH02020730 a ve své práci ho popisuje ing. Holý [42]. Systém sloužil pro mou práci jako vstupní systém a podrobněji ho popíši později.



Obr. 24: Způsob spřažení využívající ocelové lišty s navařenými trny, převzato z [42]

2.4 Dostupné výpočetní metody

Výpočetní metody můžeme rozdělit na analytický výpočet dle normových předpisů a lineární či nelineární modelování metodou konečných prvků na 2D či 3D modelech. V této kapitole se budu věnovat pouze analytickému výpočtu dle Eurokódu a nelineárním výpočetním metodám pro 3D modely. Lineární modely neplánuji pro svou práci využít, jejich možnosti jsou uvedeny například v [42].

2.4.1 Analytický postup dle norem

Pro posouzení spřažené konstrukce dle současných norem můžeme postupovat dle ČSN EN 1995 [43], kde je definován postup posouzení s využitím γ metody. Jedná se o zjednodušenou metodu výpočetní analýzy, kterou představil Möhler. Metoda vychází z redukce Steinerova doplňku součinitelem γ při výpočtu momentu setrvačnosti průřezu na základě předpokladu nepoddajného spřažení.

Součinitel tedy upravuje chování nepoddajného spřažení na aproximaci poddajného spřažení. Hodnota součinitele se určuje z průřezových vlastností, délky rozpětí, tuhosti spřahujících prostředků a jejich vzdáleností mezi sebou.

Metoda je původně navržena na použití výhradně pro nosníky prostě podepřené, na kterých je spojitě zatížení, vyvolávající sinusový průběh momentů a má konstantní tuhost pokluzu spřažení. Tato konfigurace vede k diferenciální rovnici spřaženého průřezu, která má jednoduché analytické řešení.

Poměrně přesné výsledky lze dosáhnout též pro nosník s parabolickým průběhem momentů. Tuhost spřažení pak lze upravit dle průběhu posouvající síly, na úseky s například rozdílným počtem spřahovacích prostředků (typicky bývá jejich počet vyšší u podpor, než ve střední části nosníku, kde jsou posouvající síly poměrně malých hodnot).

Nevýhodou této metody je nevhodnost aplikace pro jiné než rovnoměrné spojitě zatížení. Spřažení mimo přenesení smykových napětí musí být schopné přenést též tahovou sílu ve výši 10% zatížení ve smyku.

Po návrhu globálních dimenzí spřažené konstrukce je nutné provést lokální posouzení samotného způsobu spřažení. Počet nutných lokálních ověření se může lišit dle použitého způsobu spřažení.

Pro spřažení pomocí ocelových spřahovacích prvků kolíkového typu je nutné posoudit spojovací prostředky na stříh, ohyb, otláčení dřeva, vytržení spřahovacího prostředku ze dřeva a betonu, odtržení hlavy spřahovacího prostředku a posouzení betonového prvku na otláčení.

V případě použití smykových ozubů je nutné doplnit posouzení únosnosti dřevěného ozubu na otláčení a usmyknutí. Pro betonový prvek je pak nutné ověřit únosnost ozubu ve smyku, či pro větší hloubky posoudit ohyb krátké konzoly, kde je namáhání od smyku navýšené o ohybový moment.

Problematické pro posudek může být zatížení teplotou. Vzhledem k nízkému součiniteli teplotní roztažnosti dřeva se pro mostní konstrukce teplotní účinky většinou zanedbávají a v případě použití dřeva v interiéru je většinou předpoklad relativně ustálené teploty. Beton (UHPC) má oproti dřevu součinitel teplotní roztažnosti přibližně dvojnásobný. Pro konstrukce v interiéru, které se doposud používaly téměř výhradně, to nepředstavuje problém. Pro mostní konstrukce je nicméně vliv teploty na spřažené dřevo-betonové konstrukce faktor, který by se měl posoudit. Ovšem ČSN EN 1991 [44]

rozlišuje pouze konstrukce čistě betonové, ocelové či jejich kombinaci. Pro dřevo-betonový most, je tedy na zvážení projektanta, jaký zvolí postup posudku. Úvahu o přístupu k teplotnímu zatížení těchto konstrukcí prezentuje ve své práci například Holý [42]. Dle jeho názoru je výstižnější uvažovat rozdílovou složku teploty jako rozdíl v rovnoměrné složce teploty mezi hlavními nosnými prvky podle kap. 6.1.6 z EC1-1-5 [44]. Rozdíly teplot mezi různými prvky nosné konstrukce se podle normy mají uvažovat ± 15 °C, zatímco lineární rozdílová teplota $+15$ °C a -8 °C. Dle mého názoru je tato úvaha vhodným přístupem k posudku na účinky teploty pro tento typ konstrukcí.

Tab. 3: Charakteristické vlastnosti konstrukčního dřeva třídy C24 dle [45]

Směr vzhledem k vláknům	L	R	T
Veličina	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Pevnost v tlaku $f_{c,k}$	21	2,5	2,5
Pevnost v tahu $f_{t,k}$	14	0,4	0,4
Pevnost ve smyku $f_{v,k}$	2,5	2,5	2,5
Modul pružnosti $E_{0,mean}$	11000	370	370
Modul pružnosti ve smyku G	690	690	690
Pevnost v ohybu $f_{m,k}$	-	24	24

Tab. 4: Charakteristické vlastnosti lepeného lamelového dřeva třídy Gl24h dle [46]

Směr vzhledem k vláknům	L	R	T
Veličina	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Pevnost v tlaku $f_{c,k}$	24	2,7	2,7
Pevnost v tahu $f_{t,k}$	16,5	0,4	0,4
Pevnost ve smyku $f_{v,k}$	2,7	2,7	2,7
Modul pružnosti $E_{0,mean}$	11600	390	390
Modul pružnosti ve smyku G	720	720	720
Pevnost v ohybu $f_{m,k}$	-	24	24

2.4.2 Nelineární výpočty metodou konečných prvků

Nejlepší shody s reálným působením konstrukce lze pravděpodobně dosáhnout pomocí nelineárního výpočtu metodou konečných prvků na detailním 3D modelu spřažené konstrukce. Existuje řada společností, které potřebný software vyvíjejí – nejnámější jsou pravděpodobně programy jako Ansys, Atena Engineering a Abaqus. Blíže zde specifikuji první dva jmenované programy, jelikož je mám k dispozici a budou využity v rámci mnou prováděných analýz. Informace jsem čerpal zejména z teoretických podkladů zmíněných softwarů [47; 48].

V rámci popisu jednotlivých programů budou uvedeny materiálové modely, které je v nich možné využít pro modelování betonu (a jejich použitelnost pro modelování UHPC), dřeva, oceli a jejich výhody a nevýhody.

Ansys je software vyvíjený americkou společností Ansys, inc. Následující informace se budou vztahovat k mnou využívaným verzím R19 a R21. Ansys je ve své podstatě souborem řady dílčích součástí, které umožňují provádět nejrůznější numerické analýzy pro široké spektrum oborů. Já zde budu hovořit o službě Mechanical APDL, která se využívá též k řešení úloh statické analýzy. V programu lze modelovat široké spektrum materiálů, mezi které patří též kovy, dřevo a beton. Univerzálnost programu sebou nicméně přináší jistá omezení.

Atena Engineering je software vyvíjený českou společností Cervenka consulting s.r.o. Následující informace se budou vztahovat k mnou využívané verzi programu 5.6.1. Atena umožňuje provádět geometricky i materiálově nelineární analýzy ve 2D a 3D. Program je speciálně vyvinut pro posudky betonu a podobných materiálů, jde nicméně využít i k modelování ocelových konstrukcí a jistým způsobem i pro modelování dřeva.

2.4.2.1 Možnosti modelování kovů

Nelineární materiálové modely pro kovy patří mezi ty jednodušší a nabízí je oba programy.

U obou programů jsou materiálové modely založeny na základě meze kluzu materiálu. Materiálový model se do dosažení meze kluzu chová lineárně elasticky. Po dosažení meze kluzu je pak definována funkce, která definuje tvar plastické křivky pracovního diagramu.

Základní chování materiálového modelu s plasticitou reprezentuje bilineární materiálový model, který může a nemusí mít definované zpevnění. Pro definici materiálu je nutné zadat lineárně elastické vlastnosti (modul pružnosti, poissonův součinitel), mez kluzu a modul zpevnění plastické větve pracovního diagramu.

Pokročilejší materiálové modely využívají multilineární křivku reprezentující plastickou větev pracovního diagramu. Pro tu je nutné zadat skutečné napětí a jemu příslušné plastické přetvoření. Z většiny experimentů získáváme inženýrské napětí (napětí v pracovním diagramu je vztaženo k původní ploše vzorku a nebere v úvahu změnu průřezu) a to je nutné přepočítat na napětí skutečné – to na rozdíl od inženýrského napětí stále roste – je totiž vztaženo na deformovaný průřez, který se v plasticky přetvářené oblasti při namáhání tahem zmenšuje. Tvar křivky skutečného napětí je většinou reprezentován exponenciálou.

2.4.2.2 Možnosti modelování betonu (UHPC)

Modelování betonu, respektive UHPC je složitější záležitost a jelikož k tomuto oba programy přistupují mírně odlišně, provedu popis pro každý zvlášť. Atena je na tyto posudky primárně navržena, materiálové modely, které obsahuje, jsou tedy pokročilejší a použitelné i pro betony speciálních vlastností jako má UHPC. Naproti tomu Ansys nabízí základní materiálové modely a jsou vhodné spíše k modelování běžného betonu.

2.4.2.2.1 Modelování betonu v Anysu

V tomto programu lze pro modelování betonu využít několika materiálových modelů. Jedná se o materiálové modely Drucker Prager Concrete, Menetrey William, Microplane a Coupled Damage Plastic Microplane model.

Pro Drucker Prager a Menetrey William je možné doplnit modely o závislosti pro zpevnění a změkčení materiálu v plastické oblasti, nicméně zpevnění lze definovat pouze pro tlak, pro tah jsou modely omezeny tak, že lze modelovat pouze tahové změkčení materiálu.

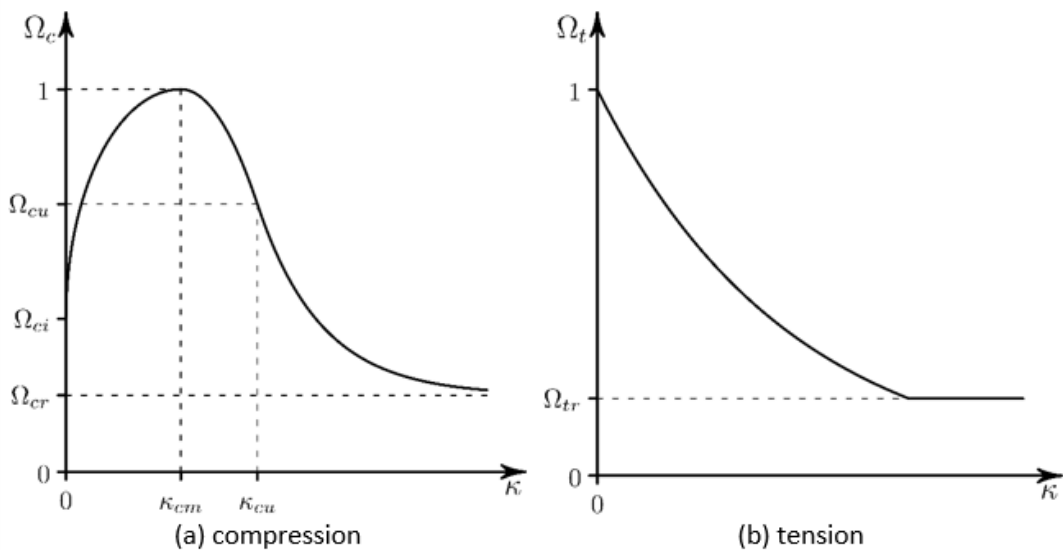
Pro microplane model, zejména jeho druhou edici implementovanou ve verzi R20 v podobě Coupled Damage Plastic Mictoplane modelu, je možné definovat pro chování materiálu i zpevnění. Nicméně nastavení materiálového modelu je provedeno tak, že je chování materiálu v tlaku i tahu závislé na jediném parametru pro zpevnění materiálu. V případě, kdy se nastavení materiálu pro speciální vlastnosti, které vykazuje UHPC, validuje pouze pro čistě tlakové či čistě tahové namáhání, lze získat velmi dobrou shodu chování materiálu. Nicméně pro dosažení adekvátního chování materiálu v tahu je nezbytné definování jiné hodnoty společného parametru zpevnění, než pro tlak a materiál se tak bude tedy chovat adekvátně pouze v jedné ze situací.

Obecně lze tedy konstatovat, že v Ansysu v současné době neexistuje materiálový model, který by dokázal popsat chování UHPC (UHPRFC) betonu a jsou vhodné spíše pro betony běžných pevností, které mohou být vyztuženy malým objemem rozptýlené výztuže, která nevede k efektu zpevnění v tahu po vzniku trhliny. Program umožňuje uživateli definovat vlastní materiálové modely, nicméně jedná se o pokročilou funkci, která vyžaduje pokročilé znalosti programování v jazyce programu (Python), způsob práce řešiče Ansysu a též zákony fungování vhodného materiálového modelu tak, aby se zajistila schopnost výpočtu dosáhnout konvergence.

Drucker Prager Concrete [48]

Model je definován zadáním elastických materiálových vlastností materiálu (modul pružnosti E a poissonův součinitel) a dále jednoosou pevností v tlaku a tahu a dvouosou pevností v tlaku. K dispozici jsou 4 různé modely upřesňující zpevnění a změkčení materiálu:

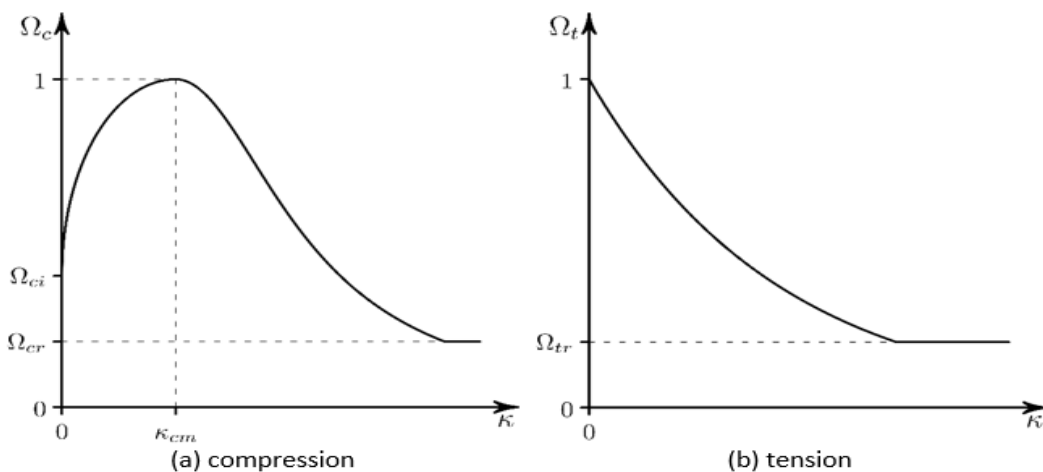
Exponencial HSD (hardening, softening, dilatanci) model



Obr. 25: Pracovní diagramy plastických větví materiálu v tlaku a tahu pro exponenciální model zpevnění a změkčení materiálu

Tento model definuje zpevnění v tlaku a změkčení v tahu zadáním 7 materiálových konstant. Ty představují plastické přetvoření betonu v tlaku při maximální hodnotě zpevnění κ_{cm} , plastické přetvoření na přechodu do exponenciálního změkčení materiálu v tlaku κ_{cu} , relativní napětí na počátku nelineárního zpevnění materiálu Ω_{ci} , relativní napětí na přechodu do exponenciálního změkčení materiálu v tlaku Ω_{cu} , zbytkové napětí v tlaku Ω_{cr} , specifickou lomovou energii (pro tahové změkčení) G_{ft} a zbytkové napětí v tahu Ω_{tr} .

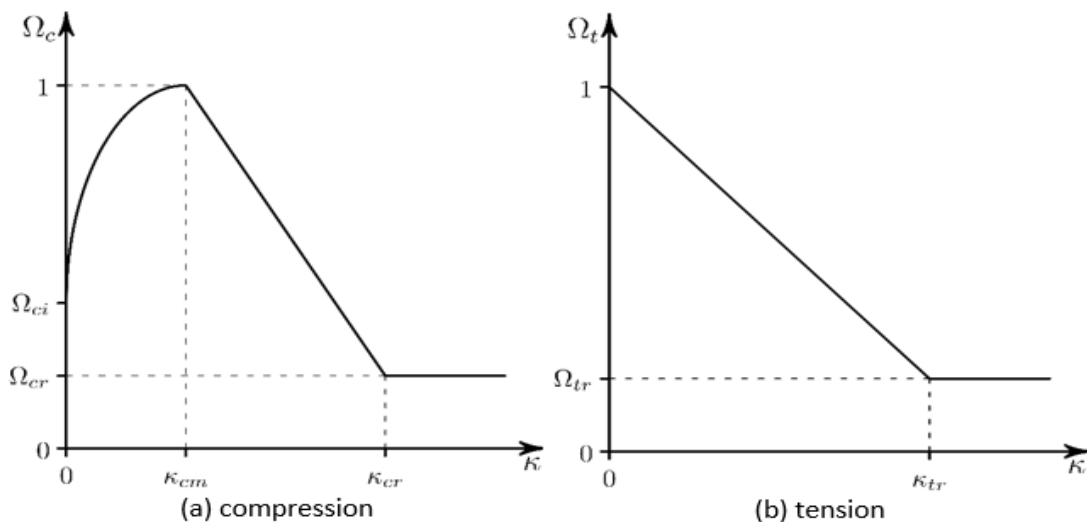
Fracture energy HSD model



Obr. 26: Pracovní diagramy plastických větví materiálu v tlaku a tahu pro exponenciální model zpevnění a změkčení materiálu

Tento model definuje zpevnění v tlaku a změkčení v tahu zadáním 6 materiálových konstant. Ty představují plastické přetvoření betonu v tlaku při maximální hodnotě zpevnění κ_{cm} , relativní napětí na počátku nelineárního zpevnění materiálu Ω_{ci} , zbytkové napětí v tlaku Ω_{cr} , specifickou lomovou energii v tlaku G_{fc} , specifickou lomovou energii v tahu G_{ft} a zbytkové napětí v tahu Ω_{tr} .

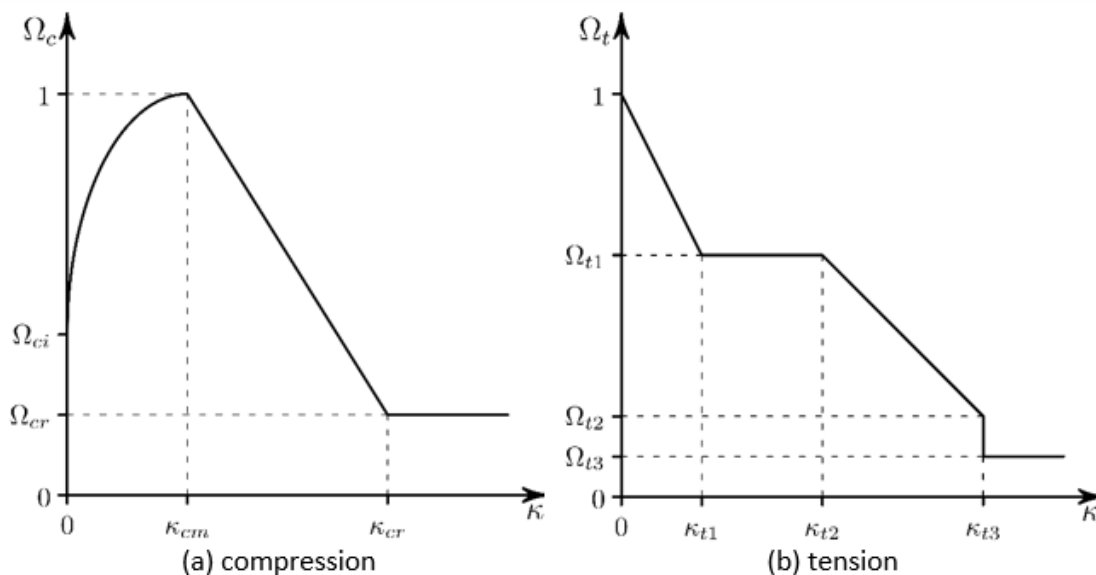
Linear HSD model



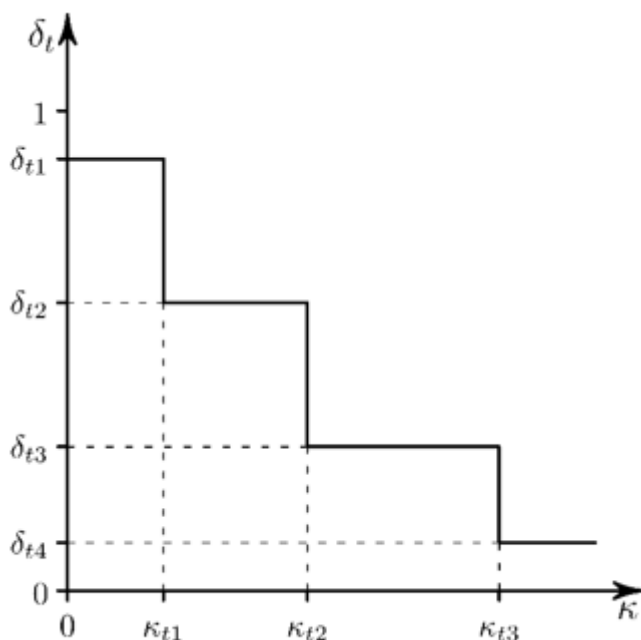
Obr. 27: Pracovní diagramy plastických větví materiálu v tlaku a tahu pro lineární model zpevnění a změkčení materiálu

Tento model definuje zpevnění v tlaku a změkčení v tahu zadáním 6 materiálových konstant. Ty představují plastické přetvoření betonu v tlaku při maximální hodnotě zpevnění κ_{cm} , maximální přetvoření materiálu v tlaku κ_{cr} , relativní napětí na počátku nelineárního zpevnění materiálu Ω_{ci} , zbytkové napětí v tlaku Ω_{cr} , maximální přetvoření materiálu v tahu κ_{t3} a zbytkové napětí v tahu Ω_{tr} .

Steel Reinforcement HSD model



Obr. 28: Pracovní diagramy plastických větví materiálu v tlaku a tahu pro exponenciální model zpevnění a změkčení materiálu



Obr. 29: Diagram pro dilataci materiálu v tahu

Tento materiálový model má chování založené na lineárním modelu představeném výše, které je ovšem doplněno o faktor dilatace materiálu vlivem vložek ocelové výztuže (pro případ modelování nevyztuženého prvku). Model definuje zpevnění v tlaku a změkčení v tahu zadáním 13 materiálových konstant. Ty představují plastické

přetvoření betonu v tlaku při maximální hodnotě zpevnění κ_{cm} , maximální přetvoření materiálu v tlaku κ_{cr} , relativní napětí na počátku nelineárního zpevnění materiálu Ω_{ci} , zbytkové napětí v tlaku Ω_{cr} , body plastického přetvoření v tahu κ_{t1-3} , body relativního zbytkového napětí v tahu Ω_{t1-3} a body dilatace materiálu v tahu δ_{t1-4} .

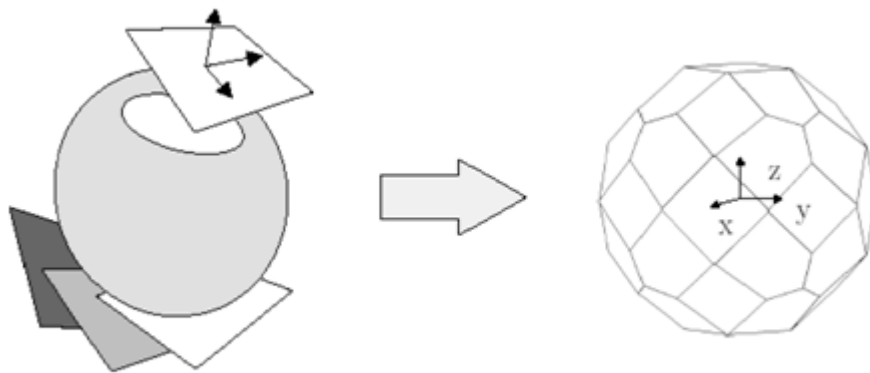
Menetrey-Williamův materiálový model

Ten je založen na Menetrey-Williamově constitutivním modelu [49], který je založen na základě William-Warnkeho rovině kluzu [50]. Využívaná rovina kluzu je podobná Mohr-Coulombově, nicméně je bez ostrých přechodů, které mohou v případě Mohr-Coulombova modelu představovat problém při výpočtu napětí. Menetrey-Williamův model má jistou podobnost též s Drucker-Prager modelem a je obecně pro modelování materiálů typu betonu vhodnější.

Model je definován zadáním elastických materiálových vlastností materiálu (modul pružnosti E a poissonův součinitel μ) a dále jednoosou pevností v tlaku a tahu a dvouosou pevností v tlaku. Pro zpevnění a změkčení materiálu jsou k dispozici funkce pro lineární a exponenciální HSD modely (viz popis výše).

Model microplane

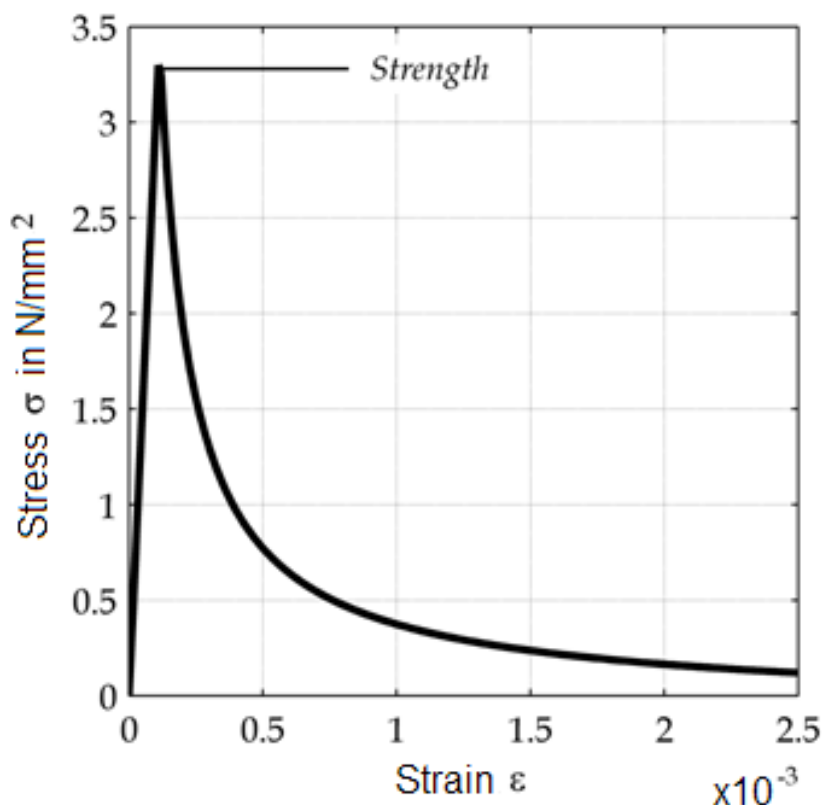
Model mikroplane vychází z výzkumu Bažanta a Gambarové [51; 52; 53], v němž je chování materiálu modelováno pomocí zákonů napětí a deformace na jednotlivých rovinách. Směrově závislá degradace tuhosti je modelována prostřednictvím zákonů poškození na jednotlivých potenciálních rovinách porušení, což vede k makroskopické anizotropní formulaci poškození.



Obr. 30: Příklad diskretizace koule na systém mikroplanů. Koule je nahrazena 42 ploškami, kdy jich do výpočtu díky uvažování symetrie vstupuje pouze 21. [54]

V Ansysu jsou k dispozici dva typy microplane modelu – Elastic Damage a Coupled plastic damage. Pro definici microplane modelu s uvažováním elastického poškození je potřeba definovat 6 materiálových konstant a parametr nelokální interakce C . 6 materiálových konstant je reprezentováno 3 materiálovými parametry, které charakterizují tvar funkce poškození k_0 , k_1 a k_2 . Dále je zde součinitel α^{mic} , který určuje maximální degradaci materiálu, β^{mic} , který určuje rychlost, s jakou k poškození dochází a γ^{mic} je práh poškození, který charakterizuje ekvivalentní deformaci, při níž začíná poškozování materiálu (počáteční hranice poškození). Z popisu hodnot, které je třeba

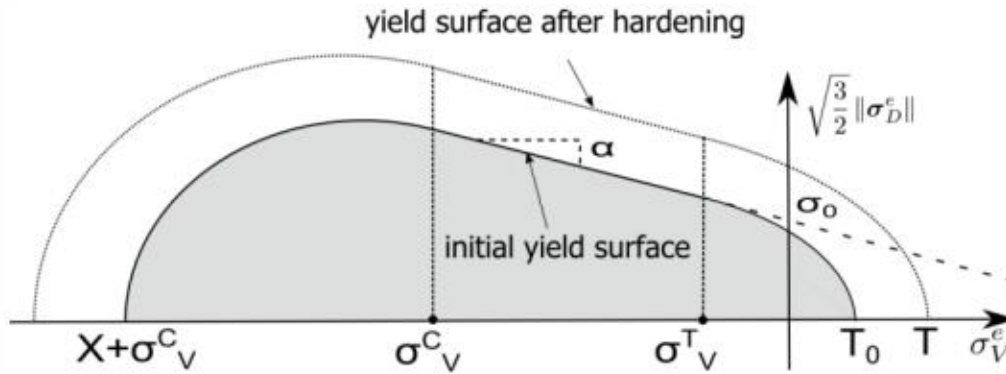
definovat, je patrné, že na rozdíl od materiálových modelů popsaných dříve, nepracuje tato edice microplane modelu přímo s daty, které lze jednoduše získat provedením materiálových zkoušek, ale je nutné pomocí doporučených vztahů z těchto hodnot odhadnout počáteční hodnoty používaných konstant a následně složitě hledat vyhovující hodnotu. Pro tento typ microplane modelu není možné definovat zpevnění materiálu v tahu (viz. obrázek 31), není proto vhodný pro modelování UHPC betonu.



Obr. 31: Chování Elastic Damage microplane modelu v tahu [48]

Coupled plastic damage microplane model, který je založen na výzkumu Zreida a Kaliskeho [55; 56; 57], umožňuje překonat numerickou nestabilitu a patologickou citlivost sítě originálního microplane modelu.

Model přidává definici nelokálního pole, které přidává dva další stupně volnosti na uzel konečného prvku. Používá plasticitu microplane modelu prostřednictvím zákonů připomínajících klasické modely plasticity, což umožňuje vytvářet materiálové modely s přímou vazbou na konvenční makroskopické modely plasticity. Plasticita v tomto modelu je definována prostřednictvím tří-povrchového Druckerova-Pragerova microplane modelu, který umožňuje pokrytí celého rozsahu možných stavů napětí a umožňuje cyklické zatěžování. Poškození zahrnuje rozdělení na tah a tlak, které zohledňuje přechod napěťového stavu během cyklického zatěžování.



Obr. 32: Zobrazení používané funkce hladké tří-povrchové podmínky plasticity. [58]

Pro definici tohoto microplane modelu je potřeba zadat 11 materiálových konstant a dvě nelokální konstanty, které slouží ke stabilizaci konvergence. Materiálové konstanty jsou jednoosá pevnost materiálu v tlaku f_{uc} , dvouosá pevnost materiálu v tlaku f_{bc} , jednoosá pevnost materiálu v tahu f_{ut} , limit zpevnění v tahu R_t , konstanta zpevnění materiálu D , průsečík os mezi limitní pevností v tlaku a Drucker-Pragerovou funkcí kluzu σ_V^C , poměr mezi hlavní a vedlejší osou funkce v tlaku R , práh poškození v tahu γ_{t0} , práh poškození v tlaku γ_{c0} , konstanta vývoje poškození v tahu β_t a konstanta vývoje poškození v tlaku β_c . Nelokální parametry pak jsou parametr nelokální interakce C a proměrovací parametr m .

Tento typ microplane modelu umožňuje definovat i zpevnění materiálu v tahu, nicméně zpevnění materiálu v tahu i tlaku je závislé na hodnotě materiálové konstanty zpevnění materiálu D , která vede k odpovídajícím výsledkům pro betony běžných vlastností. V případě modelování UHPC betonu pak získáváme podhodnocenou pevnost materiálu v tlaku v případě, kdy je hodnota D validována dle pevnosti materiálu v tahu, případně nereálně vysokou pevnost v tahu pro případ, kdy hodnotu D validujeme dle pevnosti materiálu v tlaku. Chování pracovního diagramu je též ovlivněno nelokálními parametry C a m . Jejich velikost je však limitována konvergencí výpočtu, jelikož ji mohou výrazně ovlivnit. Využití tohoto modelu pro modelování UHPC betonu je tedy možné, nicméně správné nastavení hodnot všech 13 parametrů je velmi náročné a záleží hodně též na způsobu namáhání makroprvku, nastavení sítě konečných prvků u modelu sloužícímu pro validaci materiálového modelu a výsledným modelem, kde je materiálový model použit.

Dále je nutné specifikovat manuálně typ konečných prvků CPT 215 (lineární) nebo CPT 216 (kvadratické), které umožňují zpracovat dodatečné stupně volnosti přidané tímto materiálovým modelem a též zobrazit poškození materiálu (pouze oblasti, bez možnosti znázornit trhliny).

2.4.2.2.2 Modelování betonu v Ateně

Atena využívá pro modelování betonu zejména materiálový model, který její tvůrci vyvinuli. Nabízí i další možnosti modelování betonu (Microplane 4, Drucker-Prager), které jsou popsány u Ansysu, ty však neposkytují tak dobré výsledky. Možnosti modelování betonu v Ateně pojednávají například tyto publikace [59; 60].

Materiálový model od tvůrců programu Atena zahrnuje rodinu modelů, které jsou založeny na stejném principu. Jedná se o lomově-plastický konstitutivní model. Jde o materiálové modely pod názvy CC3D Cementitious, CC3D NonLin Cementitious, CC3D NonLin Cementitious 2, CC3D NonLin Cementitious 2 User, CC3D NonLin Cementitious 2 Variable, CC3D NonLin Cementitious 2 SHCC a CC3D NonLinCementitious 3. Zde popíši pouze základní princip fungování materiálového modelu, podrobný popis je uveden v literatuře [47].

Model je tvořen kombinací konstitutivních modelů pro chování materiálu v tahu a tlaku. Pro chování v tahu je použito lomové chování, které je založeno na klasické formulaci ortotropních rozetřených trhlin a modelu pásma trhlin. Chování materiálu v tahu využívá Rankinovo kritérium selhání, umožňuje modelování exponenciálního změkčení a je použitelné jak pro fixní tak pro natočený model trhlin. Chování materiálu v tlaku je řešeno jako plastické se zpevněním či změkčením a je založeno na Menetrey-Wiliamově [49] povrchu porušení.

Tyto dva modely jsou při výpočtu kombinovány pomocí algoritmu založenému na rekurzivní substituci. Hlavní výhodou tohoto přístupu je ten, že chování materiálu v tlaku a tahu mohou být definovány odděleně, což je hlavní rozdíl oproti ostatním materiálovým modelům, které jsem popsal dříve. Tento přístup umožňuje modelovat situace, při kterých dochází jak k drcení betonu v tlaku, tak rozvoji trhlin v oblasti namáhané tahem, případně jejich kombinaci. Dovede též zohlednit situace, kdy dochází k uzavírání trhlin například vlivem změny namáhání prvku.

Pro kombinaci modelů je využita metoda rozkladu deformace představené De Borstem [61]. Oba modely jsou pro tyto účely rozvinuty v rámci návratového mapovacího algoritmu podle Wilkinse [62].

Metoda rozkladu dle De Borsta spočívá v rozložení vzniklého přetvoření na složky. Složky představuje elastická část ε_e , plastická část ε_p a část reprezentující potrhání ε_f . Kombinace těchto tří složek dává v součtu celkové přetvoření ε . Výsledný vztah (4) pak vypadá:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_f \quad (4)$$

Následně je možné pomocí rovnice (5) zjistit novou hodnotu napětí.

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} + E^*(\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_p - \Delta\varepsilon_f) \quad (5)$$

Hodnoty přírůstku plastického přetvoření a přetvoření vyvolávajícího trhlinu je nutné dopočítat dle použitého materiálového modelu.

Princip Rankinova lomového modelu pro materiál namáhaný v tahu spočívá v porovnání působícího napětí na konečném prvku s pevností v tahu materiálu pro ověřovaný směr. Nejprve je tedy počítáno napětí pro čistě elastické fungování materiálu, v případě překročení pevnosti materiálu v tahu je následně proveden výpočet přírůstku přetvoření vyvolávajícího trhlinu. Výpočet šířky trhliny zobrazované post procesorem je následně získán na základě charakteristické délky elementu L_t přenásobením hodnotou celkového přetvoření vyvolávající trhlinu. [52] V základním nastavení se v Ateně délka L_t určuje jako rozměr konečného prvku promítnutý do směru trhliny – délka L_t je nicméně pro některé z materiálových modelů z rodiny CC3DCementitious možné definovat manuálně (například pro simulaci drátkobetonu či silně vyztužených prvků s hrubou sítí

konečných prvků je vhodné nastavit L_t jako menší hodnotu, aby se dosáhlo lepší distribuce trhlin na konstrukci).

Princip plastického modelu pro beton v tlaku, který umožňuje zohlednit drcení betonu je založeno na Menetrey-Williamově povrchu porušení, využívá též výsledky práce např. Van Miera [63]. Fungování tohoto modelu je poměrně komplexní záležitostí a zahrnuje iterační procesy a nebudu ho zde tedy detailně popisovat. Plastické přetvoření ε_p se v tomto případě určuje po překročení pevnosti betonu v tlaku na základě celkového přetvoření ε odečtením elastické složky, která je definována pevností betonu v tlaku f_c s modulem pružnosti E dle rovnice (6).

$$\varepsilon_p = \varepsilon - f_c/E \quad (6)$$

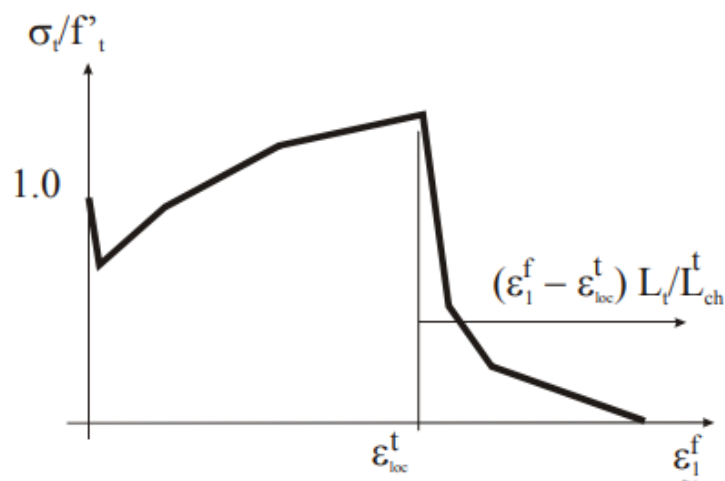
Výsledná velikost trhliny způsobené drcením betonu se následně provádí obdobně jako pro výpočet šířky trhliny v tahu. Pouze se zde využívá parametr L_c , jedná se v tomto případě o projekci délky konečného prvku do směru minimálního hlavního tlakového napětí.

Pro kombinaci těchto dvou modelů je potřeba vyřešit dvojici rovnic, kde jedna představuje řešení pro tlačnou oblast a druhá pro oblast taženou. Obě rovnice pro své řešení vyžadují výstup z té druhé, výsledné řešení je tedy výsledkem složitějšího iteračního procesu. Pro zajištění konvergence jsou využity korekční součinitele mezi jednotlivými kroky.

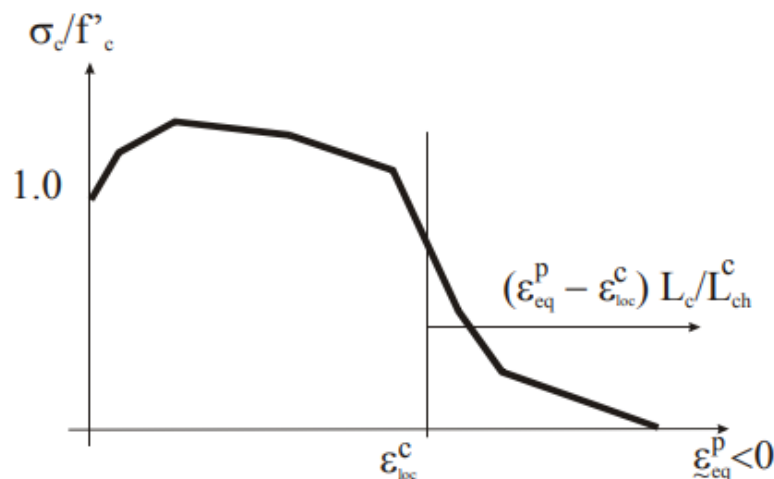
Pro definování materiálového modelu je od uživatele vyžadováno zadání minimálně těchto parametrů:

- Modul pružnosti E
- Pevnost betonu v tlaku f_c a f_{c0}
- Pevnost betonu v tahu f_t

Materiálový model `CC3DNonLinCementitious2User` navíc umožňuje uživateli definovat chování materiálu v tahu, tlaku a smyku. Tato funkce je nezbytná pro adekvátní nastavení materiálového modelu pro posudky UHPC betonu. Data je nezbytné zadávat na základě experimentálních dat a výsledné hodnoty validovat.



Obr. 33: Příklad uživatelsky definovaného chování materiálu v tahu [47]



Obr. 34: Příklad uživatelsky definovaného chování materiálu v tlaku [47]

2.4.2.3 Možnosti modelování dřeva

Modelování dřeva je opět poměrně náročné, vzhledem k jeho rozdílným vlastnostem s ohledem na směr růstu vláken. Dřevo je obecně anizotropní materiál. Ate na anizotropní ani ortotropní materiálový model mezi předpřipravenými materiálovými modely nemá a je nutné toto omezení obcházet. Ansys anizotropní materiálové modely implementovány má a lze je použít pro elastické i plastické výpočty.

V obou programech lze k modelování dřeva přistoupit zjednodušením pro ortotropní materiál, který rozdělíme na dva samostatné materiály. Základní materiál, matrici, která bude řešena pomocí materiálového modelu pro beton. Ta bude zajišťovat základní vlastnosti materiálu a je nutné je doplnit rozptýlenou výztuží, která bude simulovat vliv pevnosti vláken. Problematické může být nalezení vhodných materiálových vlastností a použitelnosti pro různé způsoby namáhání a z toho plynoucí způsob porušení.

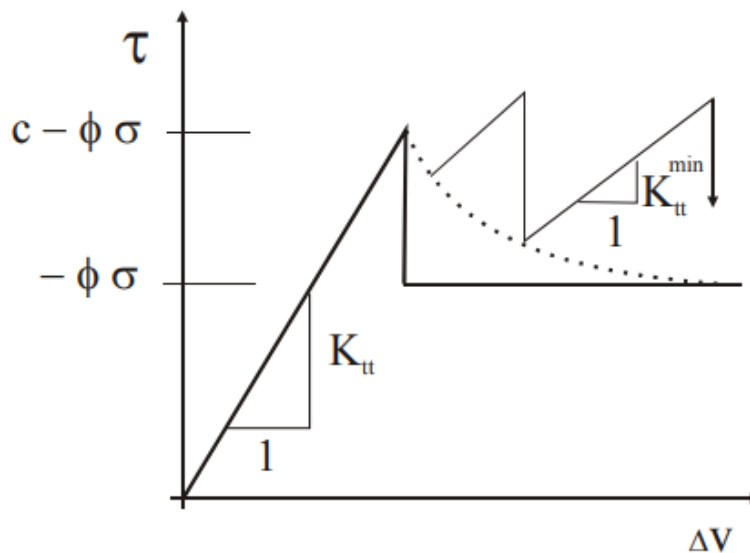
V Ansysu je k dispozici materiálový model ANISO [48], což je materiálový model pro anizotropní plasticitu. Jedná se o materiálový model, který není podporovaný pro aktuální generaci konečných prvků. Je tedy nutné manuálně definovat kvadratický typ konečných prvků Solid 95. Ten představuje element s 20-ti uzly, z nichž každý má 3 stupně volnosti. Modelování dřeva v Ansysu se věnují např. publikace [64; 65; 66].

Materiálový model ANISO je založen na zobecněné Hillově podmínce plasticity [67]. Ta vychází z von Misesovy podmínky plasticity [68] odvozené pro izotropní materiály. U zobecněné Hillovy podmínky plasticity tvoří plochu porušení válec s eliptickou základnou orientovaný rovnoběžně s hydrostatickou osou. Materiálový model je definován pomocí bilineárních materiálových diagramů pro tlak, tah a smyk ve třech navzájem kolmých směrech. Lze u něho definovat zpevnění, které umožní zvětšení plochy porušení. Jelikož vychází z bilineárních plastických diagramů, tak pro něho nelze zadat změkčení. Pro zadání elastických materiálových parametrů je potřeba definovat 9 materiálových parametrů - 3 moduly pružnosti (E_x , E_y , E_z), 3 poissonova čísla (μ_{xy} , μ_{yz} , μ_{xz}) a 3 smykové moduly (G_{xy} , G_{yz} , G_{xz}). Pro definování plastických vlastností je nutno definovat dalších 18 materiálových parametrů – 3 pevnosti v tahu ($f_{t,x}$, $f_{t,y}$, $f_{t,z}$), 3 moduly zpevnění v tahu ($E_{p,tx}$, $E_{p,ty}$, $E_{p,tz}$), 3 pevnosti v tlaku ($f_{c,x}$, $f_{c,y}$, $f_{c,z}$), 3 moduly zpevnění

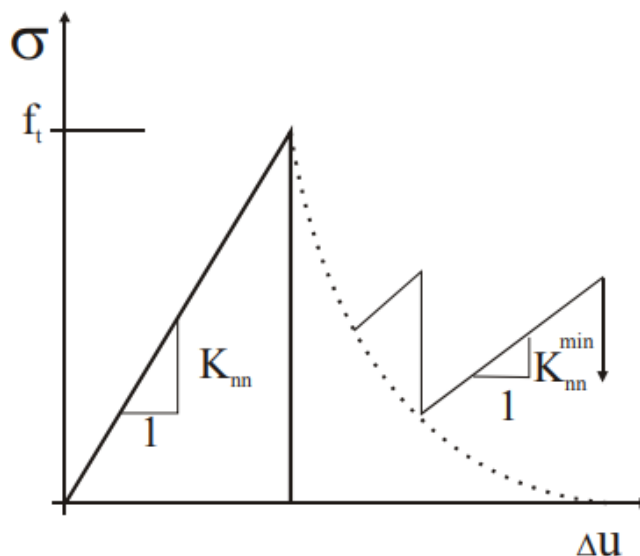
v tlaku ($E_{p,cx}, E_{p,cy}, E_{p,cz}$), 3 pevnosti ve smyku ($f_{v,xy}, f_{v,yz}, f_{v,xz}$), 3 moduly zpevnění ve smyku ($G_{p,xy}, G_{p,yz}, G_{p,xz}$). Hodnoty definující plastické chování nejsou zcela nezávislé hodnoty. Důležité pro definici uzavřené plochy porušení je splnění podmínky konzistence.

2.4.2.4 Modelování kontaktů

V programu Atena jsou kontakty řešeny pomocí materiálového modelu 3D Interface [47]. Ten je založen na Mohr-Coulombově kritériu. Konstitutivní vztah je obecně dán ve formě trakce na rovinách kontaktu a na jeho relativním posunu a rozevření. Plocha počátečního porušení odpovídá Mohr-Coulombově podmínce ve tvaru elipsoidu pro namáhání tahem. Po porušení této podmínky překročením napětí v tahu či smyku se tato plocha zhroutí na zbytkovou plochu, která odpovídá suchému tření, které je definované součinitelem tření. Materiálové vlastnosti kontaktu tvoří smyková pevnost (koheze) c , tahová pevnost f_t a součinitel tření ϕ a dále základní a minimální hodnota normálové a tečné tuhosti $K_{nn}, K_{nn,min}$ a $K_{tt}, K_{tt,min}$.



Obr. 35: Příklad chování materiálového modelu 3D interface ve smyku, převzato z [47]

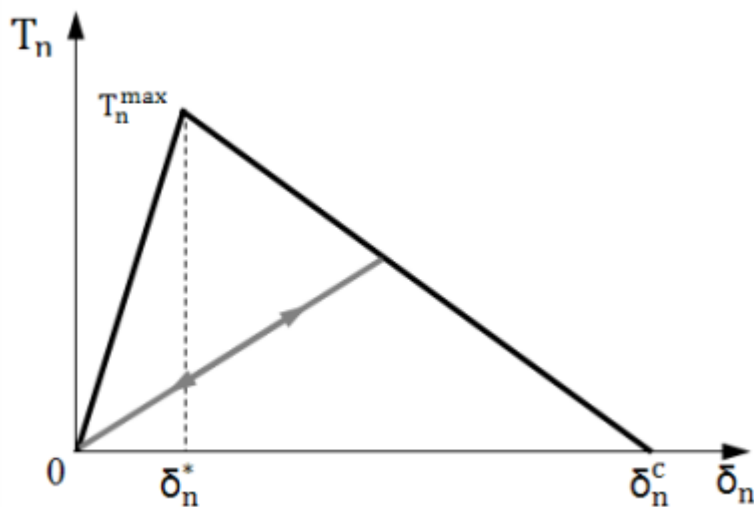


Obr. 36: Příklad chování materiálového modelu 3D interface v tahu, převzato z [47]

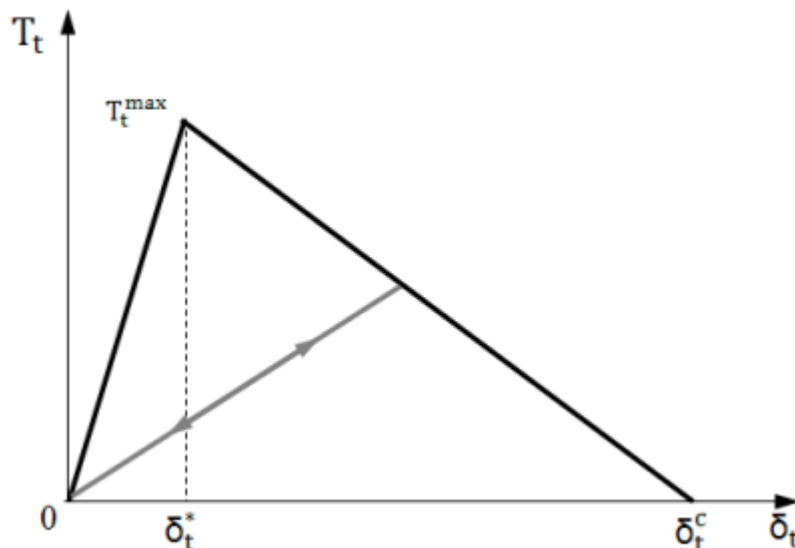
V programu Ansys se pro tyto účely využívá tzv. CZM materiálový model (Cohesive Zone Material) [48]. Model vychází z modelu navrženého Alfaniem a Crisfieldem [69]. Je možné ho definovat různými způsoby, nejsnazší je varianta využívající kontaktní elementy (conta 174). Jedná se o bilineární materiálový model umožňující delaminaci na předem definovaném rozhraní dvou těles pomocí volby příslušného kontaktu. Pro potřeby tohoto materiálového modelu je potřeba využít formulace kontaktu pomocí augmented lagrange metody.

Zadání CZM materiálu je možné dvěma způsoby. První spočívá v definování maximálního napětí pro normálové (T_n^{\max}) a smykové napětí (T_t^{\max}) a příslušnou vzdálenost, při které dojde k úplnému porušení (δ_n^c a δ_t^c). Druhá metoda kombinuje maximální normálové a smykové napětí s kritickou lomovou energií. Obě tyto metody umožňují volit tři způsoby selhání. První způsob spočívá ve využití výhradně normálového napětí, druhý způsob následně výhradně napětí ve smyku, třetí způsob spočívá v jejich kombinaci. Mimo těchto hodnot je ještě nutné definovat Artificial damping coefficient, který slouží ke stabilizaci numerického výpočtu. V případě použití kombinovaného způsobu porušení také zvolit, zda má docházet k tangenciálním posunům i od normálového napětí ve spáře.

Chování materiálu po porušení je závislé na počáteční definici kontaktu. V případě, že je využit třecí spoj, je chování po porušení založeno na klasickém třecím spoji a odvíjí se od použitého součinitele tření (ten má při výpočtu napětí vliv i pro CZM materiál při namáhání smykem, je-li styk namáhán normálovou silou). V případě jiných definic se styk po porušení chová jako styk s nulovým třením.



Obr. 37: Chování CZM materiálu v tahu [48]

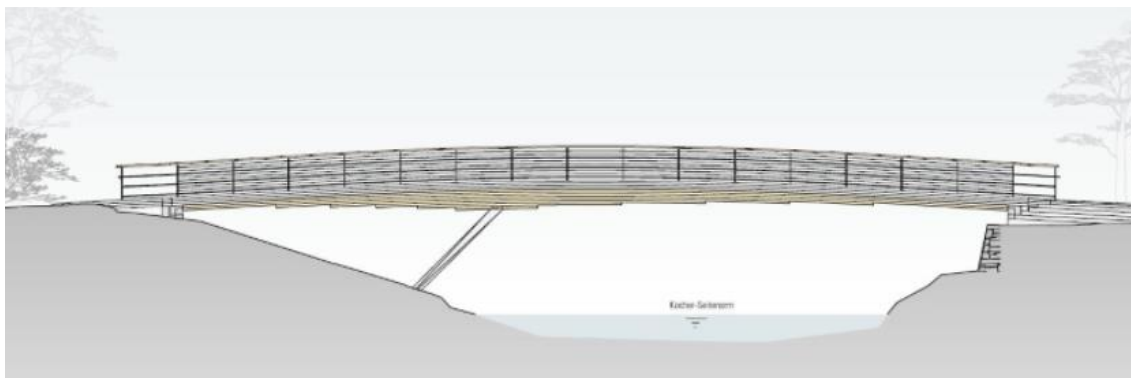


Obr. 38: Chování CZM materiálu ve smyku [48]

2.5 Příklady spřažených dřevo-betonových mostní konstrukcí

Spřažené konstrukce se poměrně hojně užívají pro spojení oceli a betonu již delší dobu. Spřažení dřeva a betonu se začalo využívat na počátku 20. století, větším rozvojem prošlo v jeho polovině [36]. Konstrukční systém se uplatňuje s úspěchy například v případě rekonstrukcí trámových či povalových stropů, kdy zvyšuje tuhost a únosnost stropní konstrukce [25; 26]. Spojení dřeva s ultra vysokohodnotným betonem (UHPC) je relativně novou variantou [35; 33; 34; 70]. Umožňuje využívat výhody spřažených konstrukcí a zároveň díky vlastnostem UHPC snížit hmotnost. Je tak možné dosáhnout na lepší využití materiálů. V našich podmínkách nyní probíhá zejména výzkum možnosti využití prefabrikace v této oblasti [35]. Výroba UHPC je výrazně technologicky náročnější než klasického betonu [16; 17], je tedy výhodné využít možnosti zvýšené kontroly kvality. Vývojem spřažených dřevo-betonových konstrukcí s využitím UHPC se zabývají v zahraničí například ve Švédsku, Německu či Švýcarsku. Existují již i první aplikace při výstavbě mostních konstrukcí.

Jako první zde zmíním příklady mostních konstrukcí využívajících spřažení dřeva a monolitické desky z běžného betonu.



Obr. 39: TCC (timber concrete composite) most přes Kocher ve Schwäbisch Hall v Německu, délka 31 m (11,5+18,5 m) šířky 3 metry. LLD v kombinaci s deskou z běžného betonu. [71]



Obr. 40: Most v provincii Gronigen v Nizozemí, délka 40 m (16+24m), šíře 4 m. Využívá ve své konstrukci Accoya wood, deska z běžného betonu. [71]



Obr. 41: Most pro dopravu s těžkým nákladem překračující řeku Agger v Lohmar Schiffarth v Německu, délka 40 m, šířka 4,75 m. Využívá ve své konstrukci Accoya wood, deska z běžného betonu. [71]



Obr. 42: Obloukový most pro pěší a cyklisty v Hochstettenu, postavený v roce 2003. Dřevěný nosník je ze dřeva lepeného do bloku spojeného s mostovkou z běžného betonu. [72]

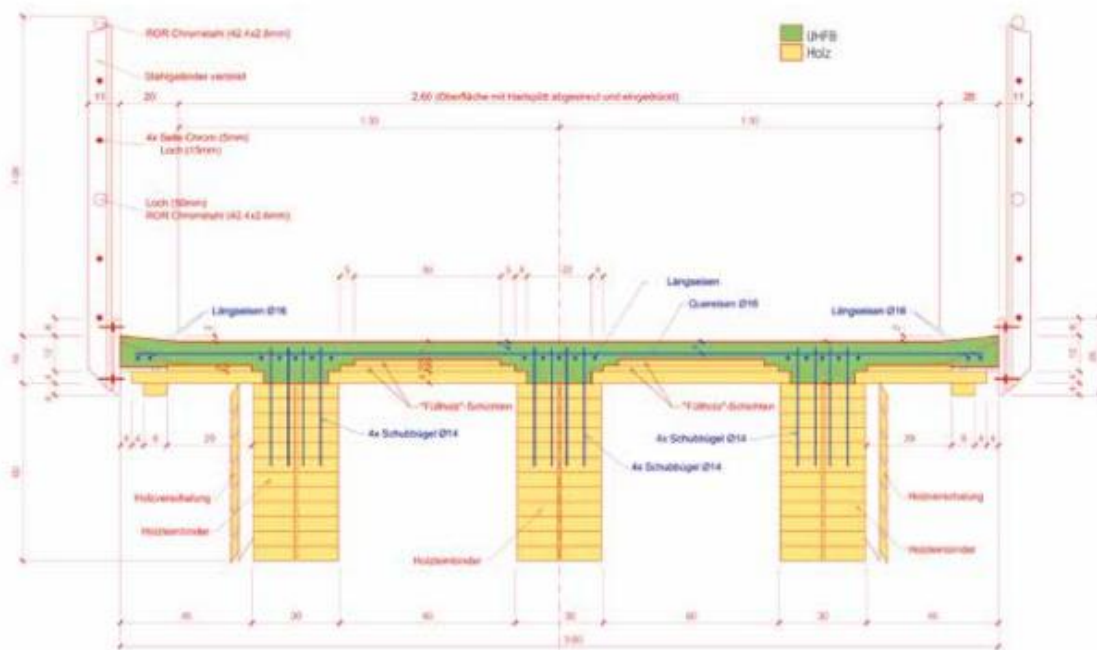


Obr. 43: Dřevobetonová lávka přes Benešovský potok rozpětí 13,6 m, první realizace v ČR, rok 2016 – konstrukci tvoří 7 obloukových nosníků z lepeného lamelového dřeva a mostovka z běžného betonu. [73]

Pravděpodobně první lávkou využívající desku z UHPC byla lávka Gletschersand ve Švýcarsku [74]. Jedná se o lávku využívající jako hlavní nosnou konstrukci 3 obloukové nosníky z LLD, které jsou spřaženy pomocí vlepané betonářské výztuže s monolitickou deskou z UHPC. Obloukové nosníky jsou řešeny jako dvojkloubé na rozpětí 25 m. Šířka lávky je 3 m a tloušťka UHPC desky se pohybuje mezi 70 a 100 mm. Obrázek 44 zobrazuje pohled na lávku, na obrázku 45 je pak vidět příčný řez.

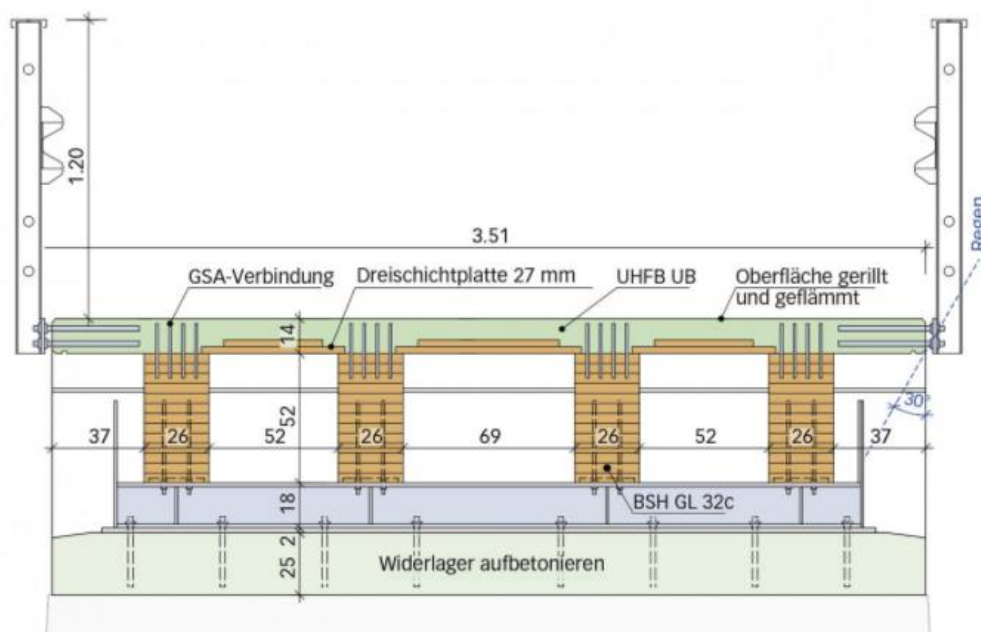


Obr. 44: Pohled na lávku Neubau der Gletschersandbrücke ve Švýcarsku [74]



Obr. 45: Příčný řez lávkou Neubau der Gletschersandbrücke [74]

Dalším příkladem spřažené konstrukce je silniční most přes Rotenfluebach na Rigi Fruttli ve Švýcarsku [75]. Jde principiálně o velmi podobnou konstrukci jako v předchozím případě. Jedná se o most tvořený 4 nosníky z LLD třídy Gl 32c, který je pomocí vlepených prutů (technologie společnosti GSA [76]) spřažen s deskou z UHPFRC betonu tl. 86 až 140 mm. Rozpětí nosné konstrukce je 10 m, šířka mostu 3,5 m a únosnost je 40 t.



Obr. 46: Příčný řez silničním mostem přes Rotenfluebach na Rigi Fruttli ve Švýcarsku [75]



Obr. 47: Pohled na silniční most přes Rotenfluebach na Rigi Fruttli ve Švýcarsku [75]

3 Nelineární numerická analýza

V této kapitole mé práce se budu věnovat nelineárním výpočtům v programu Atena a Ansys. Prováděné výpočty budou všechny analyzovány pro materiálové (plasticita/křehkost) i geometrické (tzv. účinky druhého řádu) nelinearity. Jako vstupní údaje pro mé výpočty budu používat výsledky experimentů získaných v rámci řešení grantového projektu TAČR TH02020730, které ve své závěrečné práci prezentuje ing. Holý [42]. Na základě experimentálních výsledků provedu validaci materiálových modelů UHPC betonu a lepeného lamelového dřeva. Po validaci jednotlivých složek provedu validaci chování celého systému spřažení navrženého v rámci TH02020730. Poté se budu věnovat rozboru chování spřažení a návrhu jeho optimalizace. Pro ověření chování samostatného dřevěného ozubu jsem provedl doplňkové zkoušky ve smyku. Následně provedu studii vlivu délky a hloubky smykového ozubu v dřevěném nosníku na jeho únosnost a na závěr studii účinků teploty na napětí ve spřažené konstrukci.

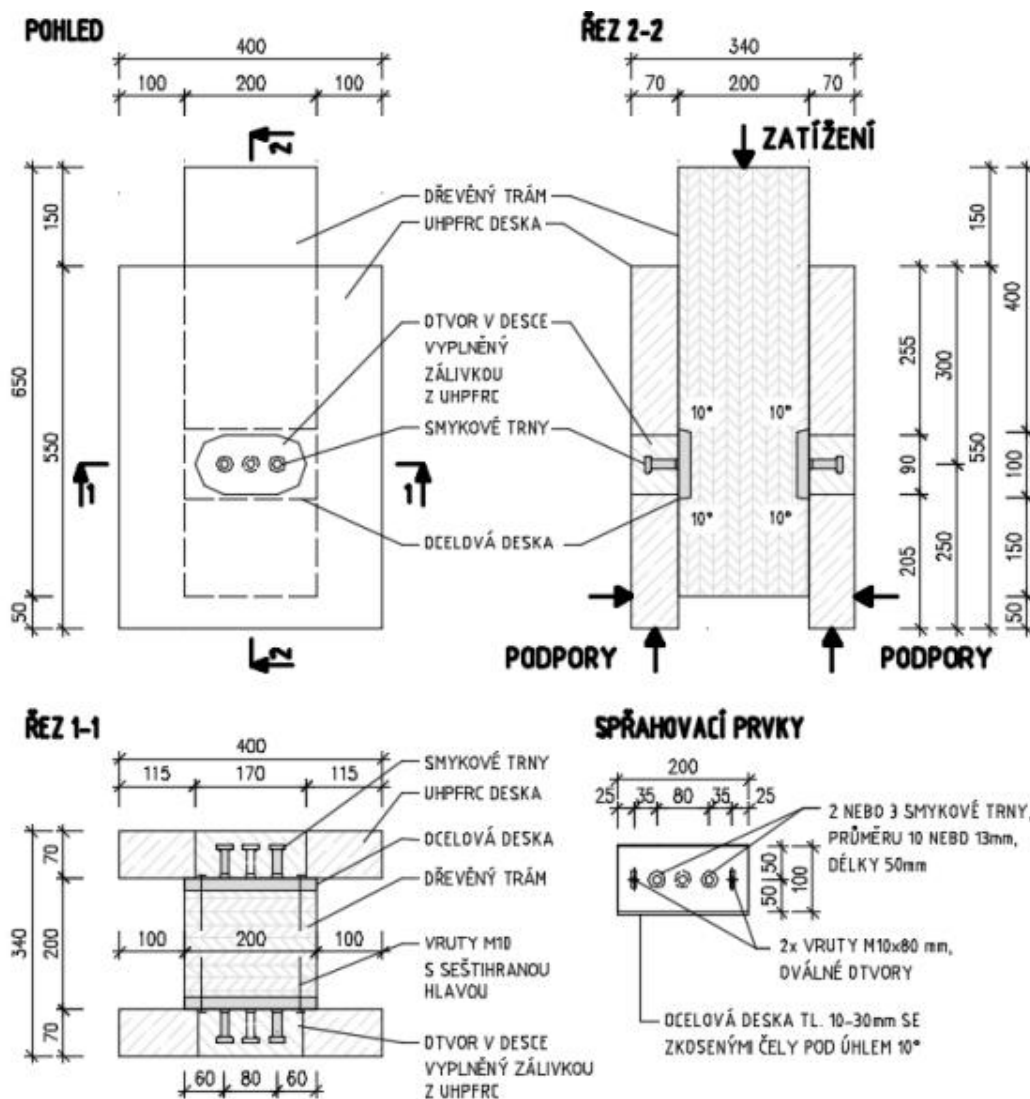
3.1 Vstupní data analýzy

Jako vstupní data slouží výsledky experimentů získaných v rámci řešení grantového projektu TAČR TH02020730, které prezentují například články [35; 77] či disertační práce [42]. V této kapitole bude nejprve popsán navržený způsob spřažení pro řešení grantu a používané materiály. Následně budou uvedeny výsledky materiálových zkoušek pro UHPC beton a výsledky zkoušek ve smyku pro systém spřažení.

3.1.1 Popis použitého způsobu spřažení.

Navržený způsob spřažení dřevěného nosníku a UHPC desky je založen na využití smykových zarážek. Ve dřevěných trámech jsou pomocí CNC stroje přesně vyfrézovány na celou šířku nosníku kapsy s čely skloněnými pod úhlem 10° . Uklonění čela ozubu má příznivý vliv na velikost hlavních napětí. Uklonění o 10° zároveň nevede k výraznější redukci tuhost spojení. [78; 79]. Do vzniklé kapsy se pro zjednodušení montáže a zvýšení úrovně prefabrikace vkládá ocelová deska s přivařenými spřahovacími trny. Ocelová deska má dva oválné otvory (ovál ve směru délky dřevěného nosníku), přes které se do dřeva zavrtají vruty, které slouží pro fixaci spřahovacích prvků do dřevěných trámů a dále pro přenos tahové síly mezi dřevěným nosníkem a panely z UHPC, která může vznikat například z důvodu působení teploty.

Samotné panely z UHPC jsou navrženy s oválnými otvory, které odpovídají rozteči smykových zarážek. Panely se položí na dřevěné trámy s připravenými spřahovacími prostředky s ocelovými trny a provede se zmonolitnění spoje zálivkou z UHPC. Geometrie spoje je zachycena na obrázku 48. Volbou hloubky smykové zarážky a počtem/průměrem smykových trnů lze předem určit, která část spoje bude slabším článkem a kde dojde k případnému porušení. Vhodně zvolenými parametry lze únosnost optimalizovat pro maximální využití jednotlivých částí spoje (k porušení může dojít v oblasti smykového dřevěného ozubu či v oblasti spřahovacích trnů v betonové části).



Obr. 48: Geometrie zkušebních těles, převzato z [42]

3.1.1.1 Materiály použité při experimentech

Dřevo

Dřevo použité pro výrobu zkušebních těles bylo běžně dostupné LLD třídy GI 24h. Zkoušky mechanických materiálových vlastností jako pevnost v tlaku/tahu, ohybu či smyku nebyly prováděny. V rámci experimentů byla vyhodnocena pouze vlhkost dřeva a jeho hustota. Hustota byla v rámci programu přepočtena na referenční vlhkost 12% na hodnotu 422 kg/m^3 , což dobře koresponduje s průměrnou normovou hodnotou hustoty třídy dřeva GI24h podle normy ČSN 14 080 [46], kde udávaná hodnota činí 420 kg/m^3 . Normové hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4, průměrné vlastnosti pro smrkové dřevo poté v tabulce 1.

UHPC

Pro výrobu desek a monolitických zálievek spojů byla použita receptura UHPC, která byla vyvinuta v rámci vývoje v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze [16; 80; 81] tak, aby pro jeho výrobu bylo možné maximálně využívat lokální suroviny. Pevnostní třída vyvinutého UHPC by se dala označit jako C110/130. V rámci experimentální části

výzkumu proběhla série testů mechanických vlastností použitého UHPC (největší počet testů proběhl v čase 28 dní na trámcih 40x40x160 a krychlích 100x100x100).

Receptura použitého UHPC měla následující složky: cement CEM II 52,5N, drobné kamenivo o velikosti do 2 mm, strusku, křemičitý úlet, vodu (vodní součinitel byl přibližně 0,24), superplastifikátor a ocelové drátky. Použité drátky byly nedeformované, válcové, potažené mosazí s pevností 2200 MPa, jejich délka byla 13 mm, průměr 0,2 mm a jejich objemový podíl ve směsi 2 %.

Ocel

Ocelové prvky, které jsou součástí spoje (ocelové desky, spřahovací trny a vruty) nebyly přímo podrobeny speciálním materiálovým zkouškám. Pro ocelové desky byla využita běžná konstrukční ocel třídy S355. Použité vruty byly pevnostní třídy 5.6. Pro spřahovací trny byla k dispozici certifikace od výrobce, kdy v rámci jeho testů byla zjištěna charakteristická hodnota meze kluzu $f_{yk} = 350$ MPa, meze pevnosti $f_{uk} = 450$ MPa a tažnosti 15%. Střední hodnoty byly následující: mez kluzu $f_y = 450$ MPa, mez pevnosti $f_u = 550$ MPa a tažnost 20%.

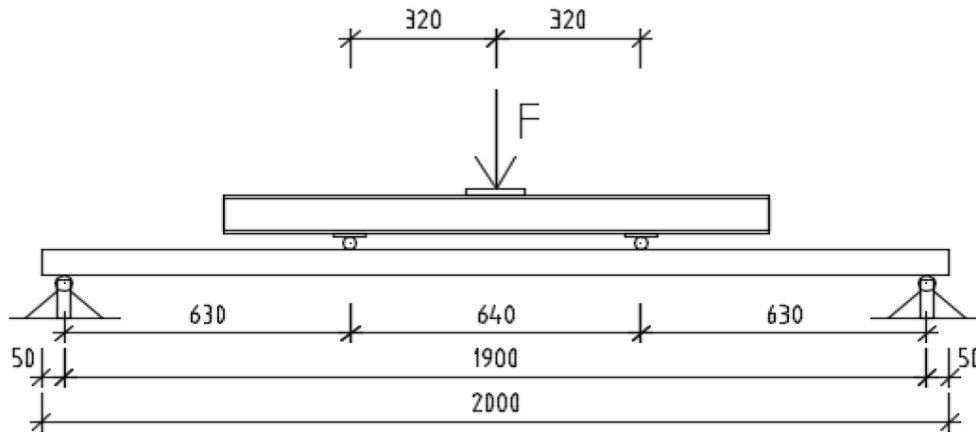
3.1.2 Materiálové testy UHPC

Materiálové testy UHPC probíhaly jak na normových tělesech typu krychlí 100x100x100 mm a trámečků 40x40x160 mm, tak i na nenormových tělesech, které představovaly výřezy desek 2000 mm dlouhé, 250 mm široké, s tloušťkou od 40 do 80 mm. Výsledky těchto experimentů jsou převzaty z [42]. Průměrné výsledky získané při testech normových zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 5.

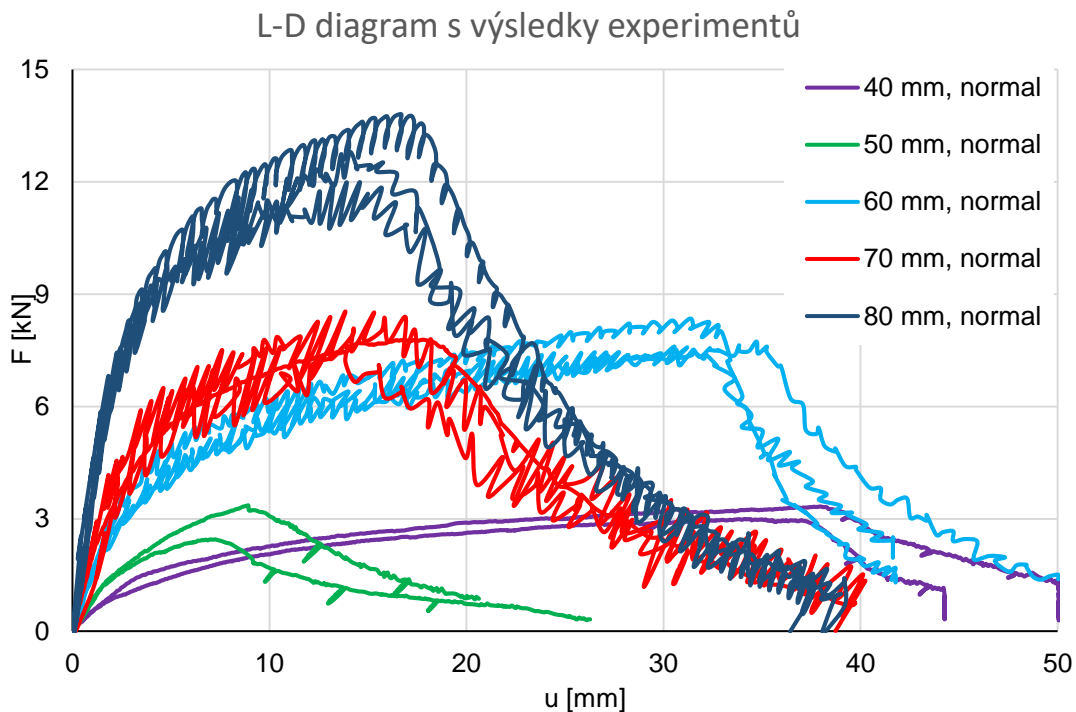
Tab. 5: Výsledky experimentálních testů UHPC na normových tělesech

Veličina	Výsledná průměrná hodnota dle stáří vzorku [MPa]			
	1	7	28	137
Pevnost v tlaku na válci $\varnothing 150 \times 300$ a $\varnothing 100 \times 200$	-	-	136,4	-
Pevnost v tlaku krychle 100x100x100	-	-	148,3	-
Pevnost v tlaku trámce 40x40x160	55,0	128,5	167,7	175,5
Pevnost v tahu za ohybu trámce 40x40x160	16,9	26,6	29,1	27,0
Statický modul pružnosti	-	-	49600	-

Desková tělesa se zkoušela ve čtyřbodovém ohybu. Schéma zkoušky je znázorněno na obrázku 49. Pro každou s testovaných tlouštěk desek byly k dispozici pouze 2-3 vzorky (po dvou tělesech bylo pro desky tl. 40 a 50 mm, zbývající byla po třech). Jelikož objem dat není tak velký jako pro normová tělesa, tak je možné výsledky zobrazit formou L-D diagramů ze záznamu zkoušek.



Obr. 49: Statické schéma pro zkoušky nenormových těles, převzato z [42]



Obr. 50: L-D diagram pro výsledky zkoušek ve 4-bodovém ohybu na deskách tl. 40-80 mm

Na výše zobrazených L-D diagramech ze záznamu zkoušky je patrné rozdílné chování desek pro různé tloušťky. Například desky tloušťky 40 a 60 mm vykazovaly poměrně vysokou duktilitu a k selhání došlo až při poměrně velké deformaci desky. Oproti tomu desky tl. 50 a 70 mm selhaly při poměrně nízké deformaci a maximální dosažená síla byla srovnatelná s deskou o 10 mm tenčí. Z tohoto důvodu se při validaci materiálových modelů zaměřím na desky tl. 60 a 80 mm. Vliv na chování po vzniku trhliny má zejména rozdělení drátků v objemu desky, u desek tl. 50 a 70 mm byly pravděpodobně drátky v určité kritické oblasti nevhodně orientovány či jich bylo menší množství. Pro přehlednost uvádím též tabulku 6 s hodnotami průměrné maximální únosnosti a odpovídající deformaci.

Tab. 6: Hodnoty průměrné maximální únosnosti a odpovídající deformace

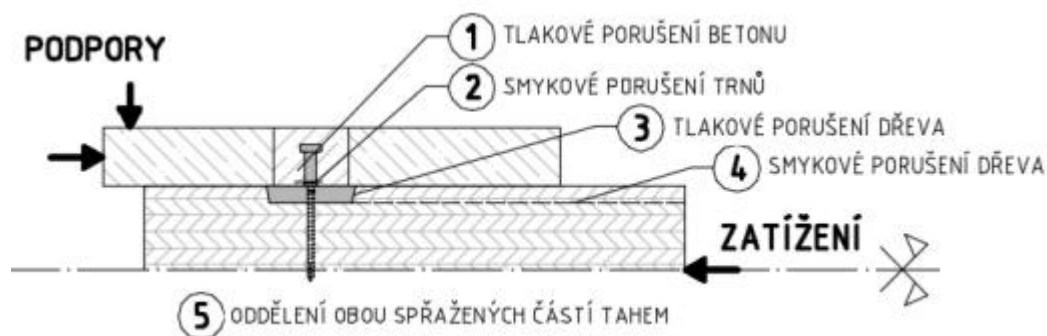
Tloušťka desky	F_{\max} [kN]	$u_{F,\max}$ [mm]
40 mm	3,05	31,78
50 mm	2,82	7,36
60 mm	7,67	31,16
70 mm	7,96	14,21
80 mm	12,86	15,08

3.1.3 Zkoušky spřahovacího systému

Pro potřeby své práce jsem vybral výsledky zkušebních těles, které byly navrženy pro různé způsoby selhání či hloubky smykových ozubů, abych následně mohl ověřit validované materiálové modely na různém spektru zkušebních těles. Tyto výsledky jsou z 15 protlačovacích zkoušek rozdělených do 5 sérií po třech tělesech. Každá série měla jiné geometrické rozvržení. Protlačovací zkoušky byly realizovány za účelem zjištění únosnosti a tuhosti navrženého systému spřažení. V rámci jejich provedení byl vytvořen pro každý test L-D diagram.

3.1.3.1 Zkušební tělesa a nastavení zkoušky

Všechna zkušební tělesa měla totožnou základní geometrii a též uspořádání protlačovací zkoušky. Geometrii a uspořádání protlačovací zkoušky je možné vidět na obrázku 48 a 52. Vytvořeny byly 4 série o 3 zkušebních tělesech. Vytvořené série nesly označení K11, K12, K20 a K30. Jejich nastavení bylo provedeno takovým způsobem, aby se ověřily různé způsoby porušení spřažení. Po jejich vyzkoušení byla vytvořena ještě doplňková série D10, pro ověření odlišného způsobu vnášení zatížení z hydraulického lisu do dřevěného nosníku.



Obr. 51: Možné způsoby selhání spřahované konstrukce [42]

Základní geometrii tvoří trám z lepeného lamelového dřeva šířky a výšky 200 mm o délce 650 mm. K tomu jsou z obou stran pomocí ocelových desek s navařenými spřahovacími trny připojeny UHPC desky tloušťky 70 mm. Ocelové desky jsou zapuštěny do vyfrézovaného smykového ozubu. Ten je na celou šířku trámu a je dlouhý 100 mm. Čela ozubu jsou zkosená pod úhlem 10° . Polohu ocelových desek a přenos případné tahové síly ve spoji zajišťuje dvojice vrutů, pro zabránění jejich namáhání smykem jsou umístěny do oválných otvorů v ocelové desce. Bohužel, k jejich namáhání smykem stejně docházelo, protože šroubové hlavy byly pevně zabetonovány.

Rozdíly mezi tělesy pak představovala hloubka smykového ozubu a počet či průměr sprahovacích trnů. Pro tělesa ze sérií K11 a K12 byla hloubka smykového ozubu 20 mm, použité sprahovací trny měly průměr 10 mm a dlouhé byly 50 mm. Pro sérii K11 byly použity 2 ks trnů, pro sérii K12 3 ks. Tento rozdíl byl proveden a cílem dosáhnout pro sérii K11 porušení smykových trnů stříhem, zatímco pro sérii K12 k porušení v oblasti dřeva.

Série K20 a K30 vycházely ze série K12 – měly tedy 3 ks sprahovacích prvků s cílem dosáhnout porušení v oblasti dřeva. Lišily se od série K12 tím, že série K20 měla hloubku ozubu pouze 10 mm, při zachování totožných rozměrů trnů – tedy průměr 10 mm a délku 50 mm. Série K30 pak měla hloubku ozubu 30 mm a vzhledem k předpokládanému nárůstu smykové únosnosti v oblasti dřeva došlo k navýšení průměru trnů z 10 mm na 13 mm. Všechna tělesa ze sérií K11, K12, K20 a K30 byla testována pro zálivku z UHPC ve stáří 7 dní.

Tělesa série D10 měla geometrii totožnou se sérií K12, rozdíl byl pouze ve stáří zálivky spoje v době testu – ta byla testována ve stáří 14 dní.

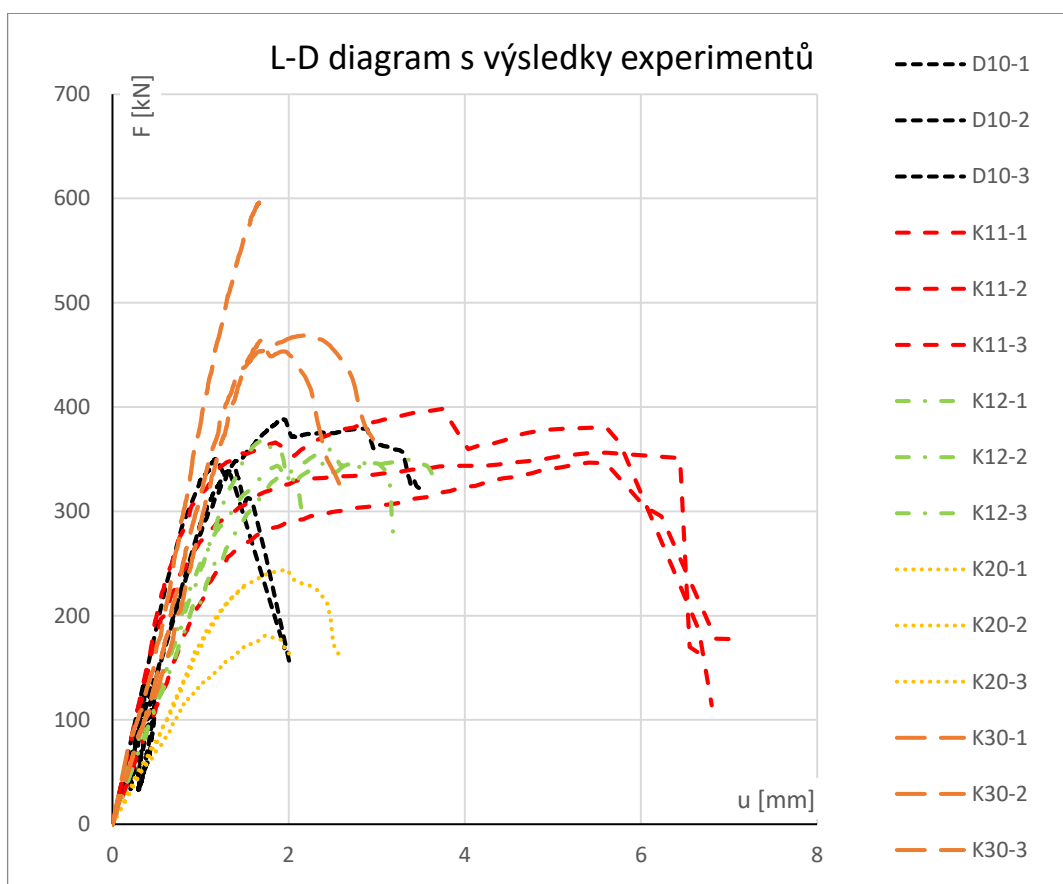
Uspořádání zkoušky vypadalo tak, že zkušební těleso bylo zkoušeno ve svislé poloze, kdy se dole opíralo o čela panelů z UHPC a zatížení bylo hydraulickým lisem přes roznášecí desku vnášeno shora na čelo dřevěného trámu. Zkušební těleso bylo symetrické, pro omezení namáhání od ohybu a maximalizaci dosažení čistě smykového namáhání. Dále bylo zabráněno rozevírání UHPC desek pomocí ocelových profilů. Měřena byla svislá deformace a působící síla. Zkouška byla řízena posunem s rychlostí zatěžování 0,05 mm/s.

3.1.3.2 Výsledky

Výsledky prokázaly předpokládaný způsob selhání zkušebních těles. U zkušebních těles, která selhala usmyknutím dřeva, však došlo ke zkreslení výsledné únosnosti po porušení – vzhledem k použití roznášecí desky přes celé čelo dřevěného nosníku, došlo ke vzpříčení usmyknuté části. To vedlo k falešnému náznaku plastické přetvárnosti po dosažení únosnosti. Pro konzistenci výsledků byl tento způsob podepření ponechán pro všechny zkoušené vzorky. Pro ověření chování byla navržena doplňková testovací série D10 s vhodnějším způsobem přenosu zatížení z hydraulického lisu do dřevěného nosníku. Výsledky zkoušky je možné vidět na obrázku 52. Z fotografie je patrný způsob porušení tělesa. Ze záznamu zkoušky byl též zpracován graf závislosti vnášené síly a deformace pro jednotlivé zkoušené série (obrázek 53). Graf reprezentuje vliv rozdílných hloubek smykového ozubu ve dřevě na výslednou tuhost a únosnost zkušebního tělesa.



Obr. 52: Vlevo příklad tělesa bez podložky po porušení dřeva smykem, usmyknuté ozuby rozepřeny o zatěžovací desku, vpravo příklad tělesa s podložkou na čele trámu umožňující volné usmyknutí ozubu.



Obr. 53: LD diagram pro série K11, K12, K20, K30 a D10 – znázornění vlivu výšky smykového ozubu na výslednou tuhost a únosnost zkušního tělesa

Z grafu je patrné, že rozdílná hloubka smykového ozubu má vliv na výslednou tuhost a únosnost spoje. Nejlépe dopadla série K30 s hloubkou smykového ozubu 30 mm a nejhůře naopak série K20, kde byla hloubka ozubu pouze 10 mm. Výsledné průměrné hodnoty maximální dosažené únosnosti $F_{\max, \exp}$ a modulu prokluzu $K_{s, \exp}$ (tuhosti spoje) jsou uvedeny v tabulce 7. $F_{\max, \exp}$ je průměr maximálních hodnot pro danou sérii, $K_{s, \exp}$ je průměrný modul prokluzu (tuhosti spoje) pro lineární oblast diagramu. V tabulce je také uveden způsob selhání zkušebních těles – porušení ocelových spřahovacích trnů stříhem či porušení v oblasti dřeva.

Tab. 7: Přehledné výsledky z měření všech testovaných sérií

Veličina	Testovaná série				
	K11	K12	K20	K30	D10
$F_{\max, \exp}$ [kN]	367	365	231	700	360
$K_{s, \exp}$ [kN/mm]	325	238	156	304	323
Způsob selhání	Stříh spřahovacích trnů	Smyk dřevěného ozubu	Smyk dřevěného ozubu	Smyk dřevěného ozubu	Smyk dřevěného ozubu

3.2 Validace materiálových modelů

V této kapitole popíši postup validace materiálových modelů, které jsem používal při svých výpočtech. Prováděl jsem zejména validaci chování UHPC a to jak v programu Atena, tak i v Ansysu. Dále jsem se věnoval nastavení kontaktu na predikované smykové ploše u dřeva v programu Ansys, to zahrnovalo i drobné úpravy základního materiálového modelu dřeva. Pro finální model jsem ověřil i nastavení vlastností spřahovacích prvků. Validace se opírala o provedené experimenty.

Validovat materiálové modely pro UHPC bylo jednodušší, jelikož byly provedeny experimenty, které lze jednoduše srovnávat. Materiálový model pro dřevo, kontakt a ocel jsem validoval porovnáním s výsledky protlačovacích zkoušek, jejichž chování je souborem dílčích namáhání jednotlivých prvků spřaženého průřezu a docílení totožného průběhu L-D diagramu bylo možné docílit změnou řady parametrů, proto jsem věnoval pozornost nejen průběhu diagramu, ale též způsobu selhání výpočtu či nadměrným plastickým deformacím.

3.2.1 Validace UHPC

Pro validaci materiálového modelu jsem využil výsledky experimentů ve 4-bodovém ohybu na nenormových tělesech délky 2000 mm, šířky 250 mm o tloušťkách 60 a 80 mm. Rozpon podpor při experimentu byl 1900 mm a síly byly vnášeny přibližně v jeho třetinách. Schéma zkoušky je na obrázku 49. Výsledky na tělesech tloušťky 50 a 70 mm jsem do validace nezahrnoval, jelikož jejich chování neodpovídalo očekávanému chování materiálu a došlo pravděpodobně k nějakému pochybení při jejich výrobě. Tělesa o tloušťce 40 mm jsem též vynechal, jelikož se jedná o hraniční tloušťku pro realizaci finálních konstrukcí a v případě potřeby bude využití materiálového modelu pro silnější desku na bezpečné straně, jelikož u tenčích prvků se projevuje výrazněji efekt usměrnění orientace drátků bedněním.

3.2.1.1 Validace materiálového modelu v Ateně

V Ateně jsem prováděl validaci materiálového modelu s názvem CC3DNonLinCementitious 2 User, který umožňuje uživateli přímo definovat chování materiálu pro jednotlivé oblasti namáhání – já jsem pro validaci modelů potřeboval upravovat zejména chování materiálu v tahu, které je nejvíce ovlivněno přítomností rozptýlené výztuže v podobě drátků.

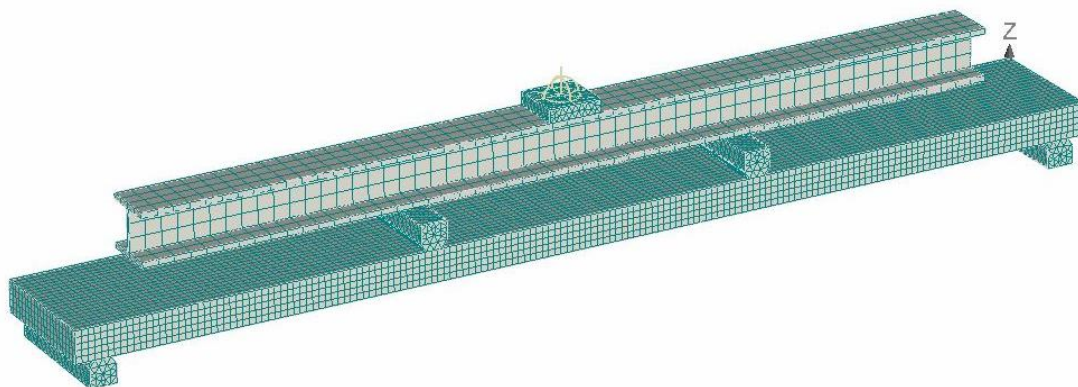
V programu Atena jsem vytvořil celkem 4 nelineární modely pro testované vzorky. Dva pro každou tloušťku desky z UHPC. Modely se ve všech případech skládaly ze zkoušeného vzorku odpovídajících rozměrů, podpůrných prvků a prvků pro roznos zatížení včetně ocelového profilu. Model je znázorněn na obrázku 54 a 55. Mezi betonem, podpůrnými prvky a prvky pro vnášení zatížení jsou vytvořeny třecí kontakty, aby se tyto části nepodílely na celkové únosnosti a bylo umožněno volné natáčení desky.

Zatížení bylo zadáno vynuceným posunem v krocích po 0,1 mm ve středu ocelového nosníku, kde působil hydraulický lis a měří se zde reakce způsobená tímto zatížením. Průhyb se měří na spodním povrchu betonového vzorku v jeho středu. Z těchto údajů jsem následně mohl vytvořit L-D diagramy. Model je podepřen přes spodní povrch podpěrných prvků.

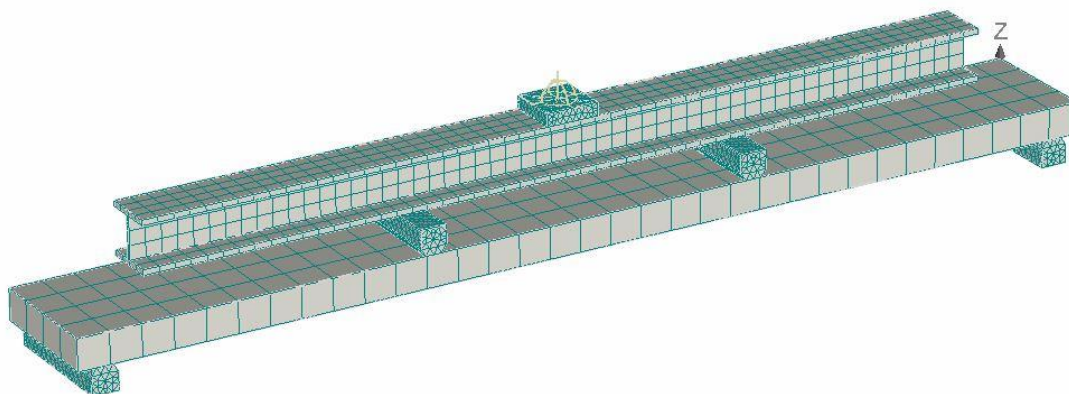
Důvodem vytvoření dvou modelů pro každou tloušťku je testování různých typů makroprvků. V jednom případě jsou použity standardní makroelementy a ve druhém případě makroelementy typu Isoshell deska s desetivrstvým rozdělením přes tloušťku prvku. Využití deskových makroprvků má výhodu v úspoře počtu výsledných konečných prvků, nicméně jejich využití pro různé situace je omezené.

Materiálový model pro UHPC byl modifikovaný CC3DNonLinCementitious 2 User. Ostatní části modelu jsou uvažované jako elastické, ocelové s modulem pružnosti 210 GPa.

Dalším rozdílem mezi modely byla síť konečných prvků. Varianta se standardním typem makroprvků má síť betonového prvku z lineárních šestihranných konečných prvků (hexagon, brick) s délkou hrany 12 mm, model (60 mm deska) se sítí je na obr. 54. Model s prvky typu Isoshell má síť tvořenou kvadratickými hexagonálními prvky s délkou hran odpovídající tloušťce desky - tj. 60 nebo 80 mm, model (60 mm deska) se sítí je na obrázku 55. Ocelový nosník má síť tvořenou hexagonálními prvky s délkou hrany 30 mm. Zbývající prvky mají síť tvořenou čtyřstěnnými (tetrahedra) konečnými prvky s délkou hrany 15 mm.



Obr. 54: Model se sítí desky tl. 60 mm tvořená standardním typem prvků



Obr. 55: Model se sítí desky tl. 60 mm tvořená Isoshell typem prvků

Výsledné hodnoty materiálového modelu jsem získal pomocí iteračního procesu. V rámci toho jsem postupně upravoval dílčí vlastnosti materiálu (zejména pevnost v prostém tahu a závislost chování materiálu v tahu) tak, abych získal shodu v co největší části výsledného L-D digramu.

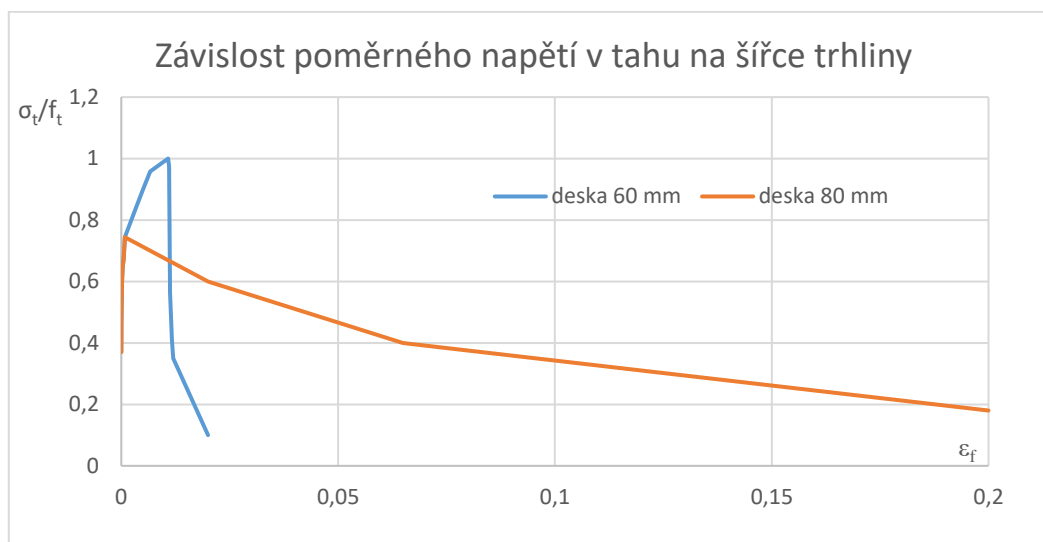
Nejprve jsem se soustředil na odvození materiálových vlastností pro model s deskou tl. 60 mm. Hodnoty materiálových vlastností jsou zobrazeny v tabulce 8 a obrázku 56 (na obrázku je zobrazena závislost relativního napětí v tahu na šířce trhliny). Získaný materiálový model jsem následně aplikoval též na desku tloušťky 80 mm.

Po provedení výpočtu s výchozími hodnotami získanými při validaci materiálových vlastností modelu s deskou tl. 60 mm na modelu s deskou o tl. 80 mm jsem zjistil, že počáteční část diagramu odpovídá naměřeným hodnotám, nicméně ve výsledku dává model o 25% vyšší únosnost a přetvárnou kapacitu, než bylo zjištěno pro testy v laboratoři. Závislost chování materiálu v tahu pro model s tlustší deskou byly tedy redukovány o cca 25% a bylo též nutné doplnit pro závislost chování materiálu v tahu část, kde již probíhá tahové změkčení, které se na těchto vzorcích projevilo výrazněji měrou, než u tenčích desek.

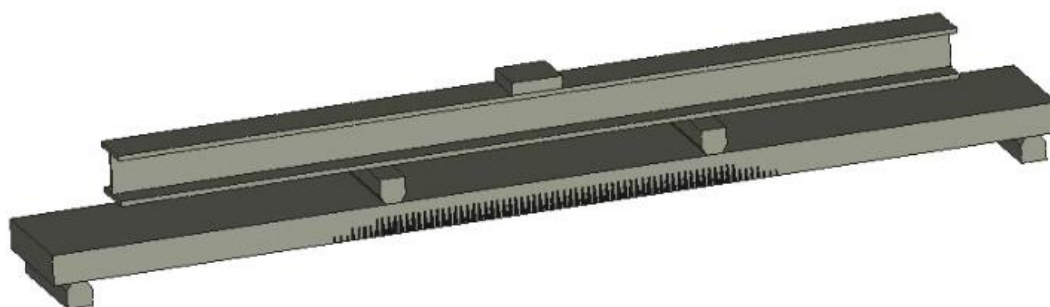
Lze tedy říci, že se na vzorcích o různých tloušťkách projevuje „scale“ efekt, kdy tenčí vzorky vykazují větší přetvárnou kapacitu a tím i poměrově vyšší únosnost, zatímco tuhost v lineární oblasti namáhání těles je téměř shodná. Výsledné hodnoty jsou opět zobrazeny v tabulce 8 a obrázku 56, kde je provedeno i jejich srovnání s druhým materiálovým modelem. Toho je využito pro následné výpočty.

Tab. 8: Použité materiálové vlastnosti UHPC v materiálovém modelu

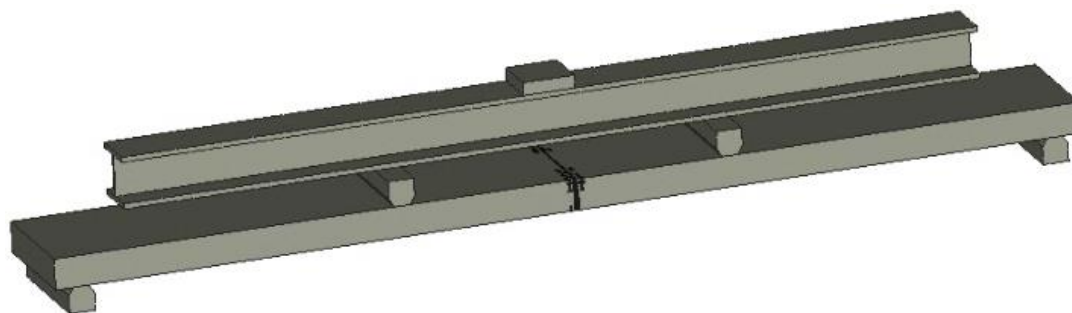
Materiálová vlastnost	Hodnota
Modul pružnosti E [MPa]	40010
Pevnost v tlaku f_c [MPa]	132,6
Pevnost v tahu F_t [MPa]	8,0
Poissonovo číslo μ [-]	0,2



Obr. 56: Závislost poměrného napětí v tahu na šířce trhliny pro validované materiálové modely



Obr. 57: Výsledný rozvoj trhlín před přechodem na oblast tahového změkčení materiálu – je zde patrný rozvoj řady menších trhlín v tažené oblasti průřezu.

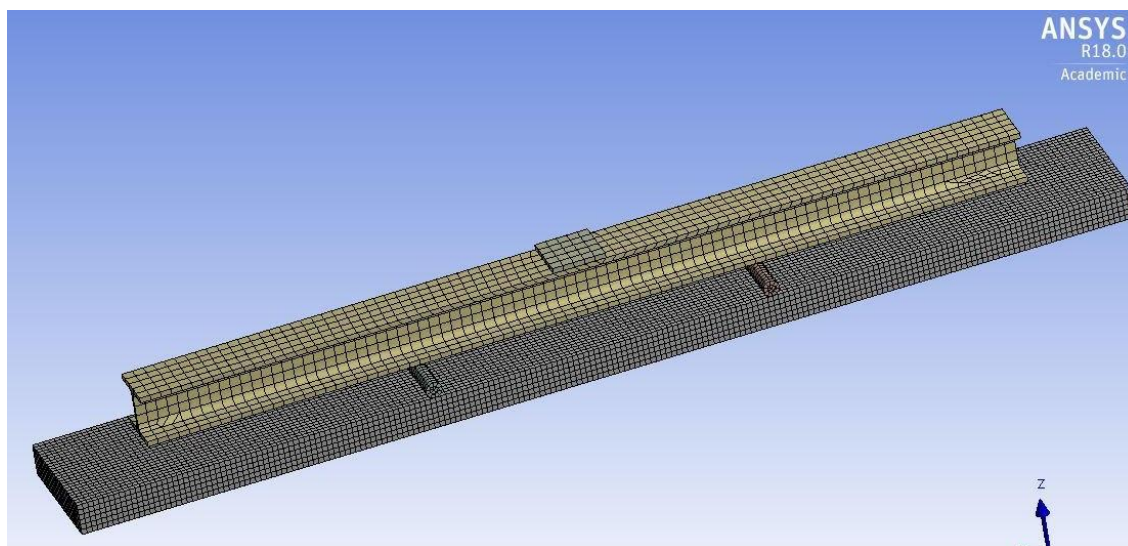


Obr. 58: Trhliny ve fázi tahového změkčení materiálu před selháním – je zde patrný rozvoj jedné široké trhliny.

3.2.1.2 Validace materiálového modelu v Ansysu

V programu Ansys byly vytvořeny dva nelineární modely pro testované vzorky. Pro každou tloušťku desky UHPC jeden. Model je téměř totožný s tím, který byl použit v Ateně, pouze jsou zde přesněji modelovány kruhové prvky přenášející zatížení. Model byl opět zatěžován vynuceným posunem o hodnotě 0,1 mm pro každý krok. Průhyby a reakce se měří pomocí nástrojů post procesoru programu. Z těchto údajů jsem opět vytvořil L-D diagramy. Model je podepřen v místě skutečné podpory pomocí okrajových podmínek, které umožňují natočení a jedna z nich také posun ve směru délky vzorku.

Sít' konečných prvků modelu je tvořena kvadratickou šestiúhelníkovou sítí s délkou hrany 10 mm, s výjimkou ocelového nosníku a zatěžovací desky s délkou hrany sítě 20 mm. Model (60 mm deska) se sítí je znázorněn na obrázku 59.



Obr. 59: Model se sítí použitý pro validaci materiálových modelů v programu Ansys

V době, kdy jsem prováděl validaci materiálových modelů UHPC betonu, nebyl v Ansysu (verze R18) k dispozici vhodný materiálový model. Zkoušel jsem sice využít materiálový model Microplane, nicméně problém byl už v samotném chování materiálového modelu, který je velmi citlivý na nastavení sítě a lokální namáhání – objevovaly se tedy problémy se samotným přenesením zatížení do desky.

Jako alternativu jsem použil klasickou formulaci plasticity s multilineárním zpevněním, které mi pro daný způsob dalo poměrně velmi dobrou shodu do doby, než u zkoušeného prvku začalo docházet k tahovému změkčení. Problém tohoto přístupu je v tom, že se toto aplikuje nejen pro pevnost v tahu, ale též tu tlakovou a není tedy možné tuto alternativu použít pro jiný způsob namáhání materiálu.

Rozhodl jsem se tedy zjednodušit pro výpočty v Ansysu materiálové modely UHPC na lineární elastické modely. Vzhledem k tomu, že v tomto materiálu nedošlo při žádném z testů k selhání a měl by výsledky ovlivňovat nejméně, považuji toto zjednodušení za přijatelné. Ostatní prvky modelu mají materiálový model odpovídající oceli pevnostní třídy S235.

V pozdější verzi byl přidán nový druh Microplane materiálového modelu s názvem Coupled Damage Plastic Microplane model. V případě tohoto modelu je možné dosáhnout přibližné shody s výsledky získanými experimenty. Nicméně, jak uvádím v kapitole popisující materiálové modely, není ani tento materiálový model vhodný pro modelování UHPC a jeho nastavení, které kopíruje výsledky získané experimenty, nebude pravděpodobně vhodné pro jiné způsoby namáhání (například namáhání smykem ozubu). Výsledné parametry odvozené pro tento materiálový model jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9: Výsledné parametry odvozené pro tento materiálový model CDPM

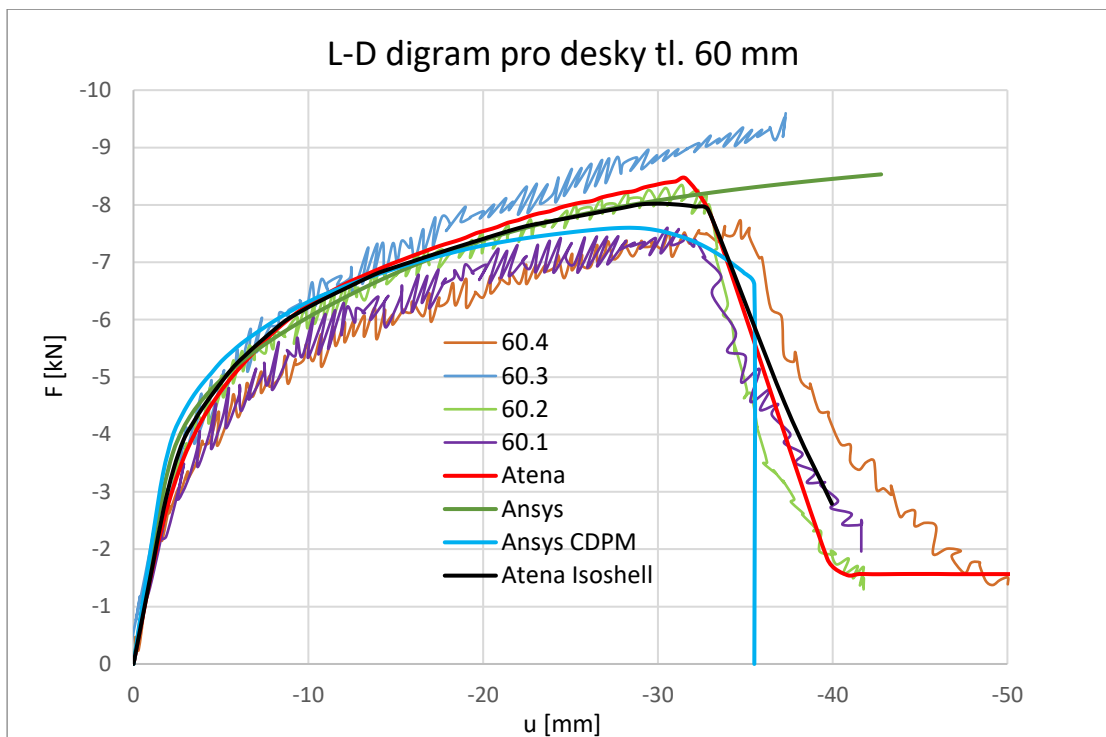
Materiálová konstanta	Hodnota	
	Deska 60 mm	Deska 80 mm
Jednoosá pevnost v tlaku f_{uc} [MPa]	132,6	132,6
Dvouosá pevnost v tlaku f_{bc} [MPa]	152,5	152,5
Jednoosá pevnost v tahu f_{ut} [MPa]	4,0	4,0
Limit zpevnění v tahu R_t [-]	1,0	1,0
Konstanta zpevnění materiálu D [MPa ²]	1000	1000
Průsečík os mezi limitní pevností v tlaku a Drucker-Pragerovou funkcí kluzu σ_v^c [MPa]	-101,0	-101,0
Poměr mezi hlavní a vedlejší osou funkce v tlaku R [-]	3,0	3,0
Práh poškození v tahu γ_{t0} [-]	0,002	0,0015
Práh poškození v tlaku γ_{c0} [-]	0,001	0,001
Konstanta vývoje poškození v tahu β_t [-]	1000	1000
Konstanta vývoje poškození v tlaku β_c [-]	50	50
Parametr nelokální interakce C [mm ²]	450	450
Proměřovací parametr m [-]	2	2

Z tabulky je patrné, že pro dosažení shody ve výsledném L-D diagramu bylo nutné definovat poměrně nízkou hodnotu pevnosti materiálu v tahu. Rozdíl mezi materiálovými modely pak představovala pouze hodnota prahu poškození v tahu, který bylo pro desku tloušťky 80 mm nutno o něco snížit. Práh poškození materiálu v tahu ovlivňoval duktilitu materiálu po překročení oblasti lineárního působení. Velikost síly byla ovlivněna zejména hodnotami tahové pevnosti materiálu. Konstanta zpevnění materiálu D udávala sklon plastické části digramu ve zpevnění. Konstanta vývoje poškození materiálu v tahu pak ovlivňovala zejména sklon křivky po dosažení maximální únosnosti – tedy změkčení materiálu. Nicméně většina zmíněných parametrů měla vliv na větší množství parametrů. Například konstanta zpevnění materiálu ovlivňuje do jisté míry i únosnost lineární části diagramu, takže bylo nutné hledat optimální poměr mezi její hodnotou a hodnotou pevnosti materiálu v tahu.

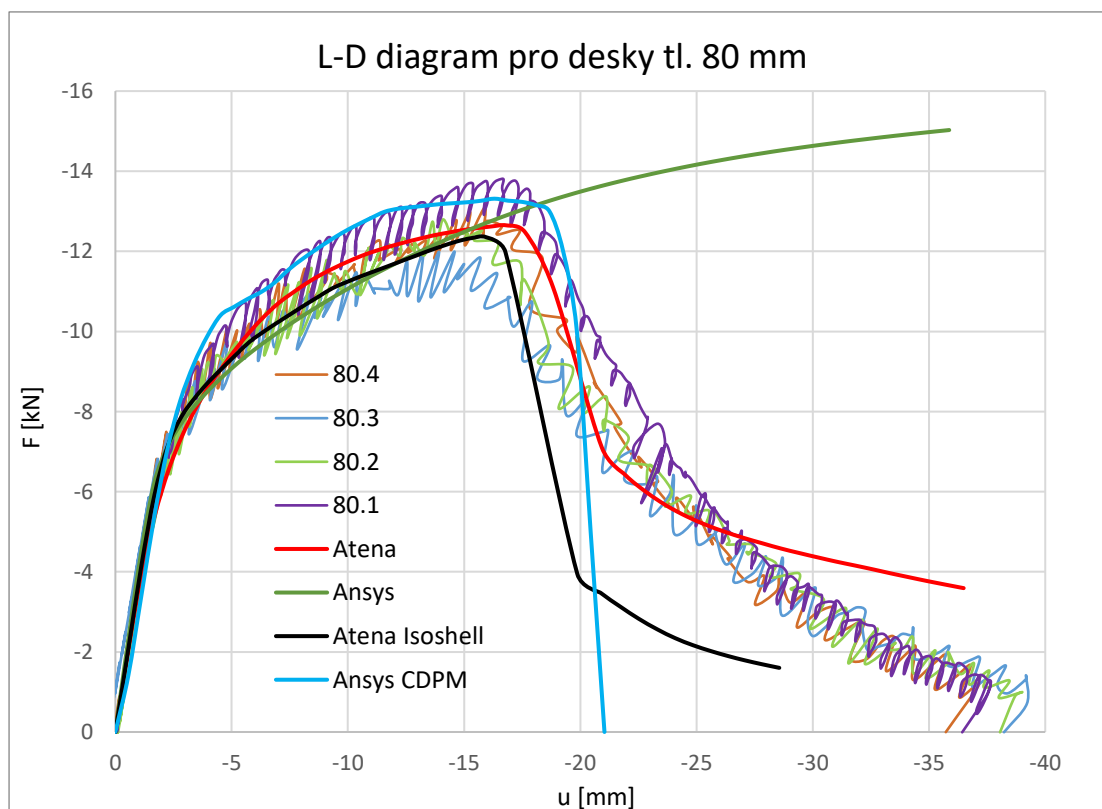
3.2.1.3 Výsledky validace UHPC materiálových modelů

Modelování UHPC je jednoznačně lepší provádět v programu Atena. Materiálové modely, které Atena poskytuje, dovedou mnohem přesněji popsat specifické chování UHPC, které získává díky rozptýlené výztuži. Jedná se zejména o chování materiálu v tahu, které je od běžného betonu výrazně odlišné a materiálové modely v Ansysu, které jsou cílené právě na běžné typy betonu, je nedovedou dostatečně přesně vystihnout. Na obrázku 60 a 61 jsou znázorněny výsledné L-D diagramy získané jak experimentálně, tak výpočty v programech Atena a Ansys. Obrázek 60 zobrazuje výsledky pro desky tl. 60 mm, obrázek 61 poté výsledky pro desky tl. 80 mm. Pro výpočty v Ateně i Ansysu jsou dvě křivky. Pro Atenu je jedna pro výsledky získané na výpočtu se standartními

konečnými prvky (křivka s názvem Atena) a ta druhá pak pro výsledky na Isoshell prvcích (Atena Isoshell). Pro Ansys jedna z křivek představuje výsledky pro alternativní model využívající multilineární plasticitu (křivka nazvaná Ansys) a druhá je pro Coupled Damage Plastic Microplane model (Ansys CDPM).



Obr. 60: Výsledky pro desky tl. 60 mm



Obr. 61: Výsledky pro desky tl. 80 mm

3.2.2 Validace spřahovacího systému

Vzhledem k tomu, že samostatné materiálové testy mechanických vlastností použitého dřeva a oceli nebyly provedeny, bylo nutné provést jejich validaci v rámci celého zkušební tělesa použitého při protlačovacích zkouškách. Jelikož se jedná o velice komplexní problém, kdy je výsledek ovlivněn řadou parametrů dílčích prvků spřažení, rozhodl jsem se nejprve provést zjednodušené výpočty pro stanovení počátečních parametrů materiálových vlastností, než začnu validovat chování celého systému. Výpočty související s validací spřahovacího systému jsem prováděl vzhledem ke složitosti problému a časové náročnosti výpočtů pouze v programu Ansys.

Jelikož jsem pro modelování kontaktu využíval materiálový model CZM, který je náchylný na problémy s konvergencí, tak je ve všech výpočtech zatížení vnášeno posunem. Aby se zajistila co nejlepší konvergence, tak bylo nutné volit velmi nízkou rychlost zatěžování – maximální rychlost zatěžování byla 0,02 mm/krok, která byla programem v případě detekce problémů s konvergencí automaticky snižována.

Pro základní materiálové vlastnosti dřeva jsem využil průměrné hodnoty mechanických vlastností smrkového dřeva prezentované v práci [1] a hodnoty využitě pro materiálový model ANISO v Ansysu, které používal ing. Holý [42], viz tabulka 10.

Tab. 10: Výchozí materiálové vlastnosti pro dřevo pro materiálový model ANISO

Vlastnost/směr	L (xy)	R (yz)	T (xz)
Modul pružnosti E_d [MPa]	14450	800	450
Poissonův součinitel μ_a	0,027	0,6	0,033
Modul pružnosti ve smyku G [MPa]	720	40	720
Mez kluzu v tahu f_t [MPa]	60	6,5	6,5
Modul zpevnění v tahu E_t [MPa]	0	0,1	0,1
Mez kluzu v tlaku f_c [MPa]	30	6,8	6,8
Modul zpevnění v tlaku E_t [MPa]	0	11,2	11,2
Mez kluzu ve smyku f_v [MPa]	6	6	6
Modul zpevnění ve smyku E_v [MPa]	0,01	0,01	0,01

3.2.2.1 Stanovení materiálových vlastností spoje na zjednodušeném modelu

Pro předběžné stanovení materiálových vlastností spoje jsem vytvořil základní zjednodušený výpočetní model v programu Ansys. Ten tvořil blok dřeva s ozubem hloubky 20 mm, jehož smyková plocha měla stejné rozměry jako ta při reálném experimentu (délka 400 mm, šířka 200 mm). Ozub byl opřen o ocelovou desku. Obrázek modelu je možné vidět na obrázku 62.

Výsledky zjištěné výpočtem jsem porovnával s L-D diagramem protlačovací zkoušky, provedené na tělesech K12 a D10. Jelikož chování experimentů těles K12 a D10 je ovlivněno větším počtem proměnných, než je čistě smyková pevnost dřeva, tak mým cílem nebylo získat přesnou shodu výsledků, ale přibližné nastavení materiálového modelu pro styk, který budu následně moci pouze upřesnit v rámci modelu celého systému.

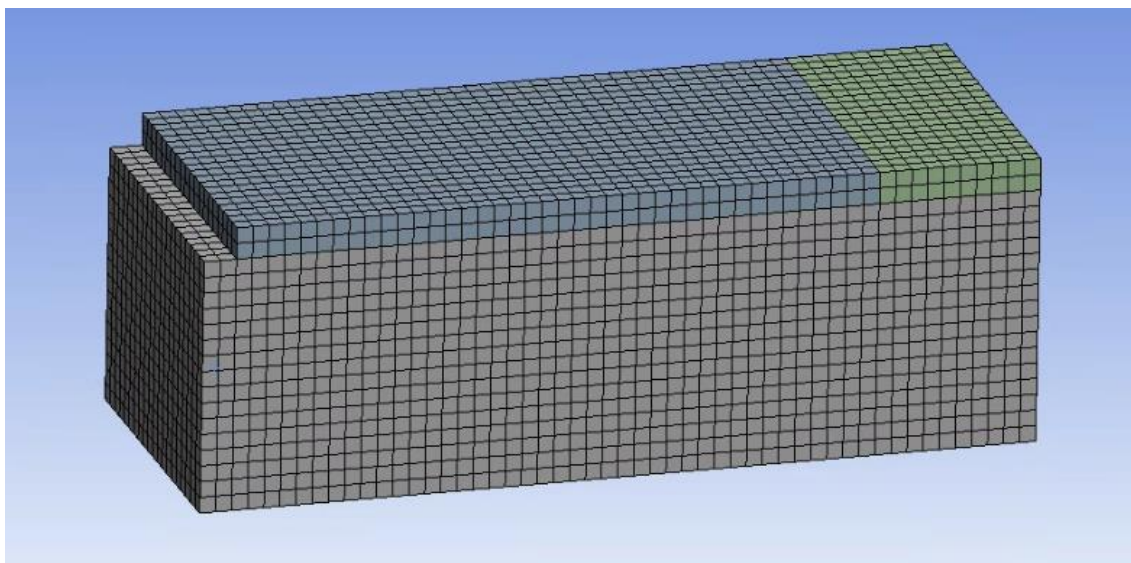
Sít' konečných prvků pro model byla jednotná – kvadratická hexagonální sít' s velikostí hrany 10 mm.

Dřevo bylo modelováno pomocí elastického ortotropního materiálového modelu (viz. tabulka 11), ocelová deska byla modelována pomocí elastického izotropního materiálového modelu.

Materiálový model pro styk jsem uvažoval jako CZM a to pro dvě varianty. První varianta uvažovala s působením materiálového modelu čistě pro smykové namáhání. Pro tuto variantu bylo nutné definovat pouze pevnost styku ve smyku a velikost posunu, při kterém dojde ke kompletnímu selhání spoje.

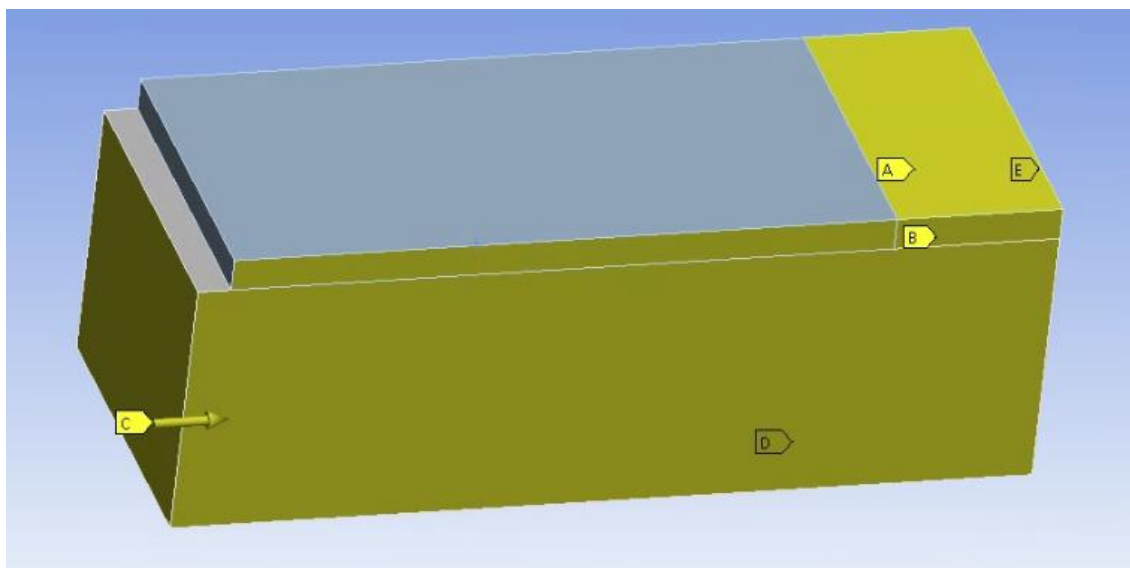
Druhá varianta uvažovala s kombinovaným způsobem chování spoje, kdy jsou v úvahu brány jak napětí ve smyku, tak ty normálové. Pro tuto variantu bylo potřeba definovat navíc ještě maximální napětí v tahu a velikost posunu, při které dojde k selhání spoje. Pro obě varianty zde ještě byl artificial damping koeficient, který stabilizuje výpočet a bývá to velmi nízká hodnota.

Jako výchozí hodnoty maximálních pevností jsem použil normovou [45] hodnotu pevnosti dřeva ve smyku (2,7 MPa) a pevnost v tahu kolmo k vláknům (0,4 MPa), oba posuny měly hodnotu 0,1 mm. Výsledné hodnoty vlastností pro obě varianty jsou uvedeny v tabulce 12.



Obr. 62: Zjednodušený model se sítí pro určení materiálových vlastností kontaktu

Okrajové podmínky modelu jsou znázorněny na obrázku 63. Okrajové podmínky označené „A“, „B“ a „D“ jsou podpory bránící posunu ve směru normály dané plochy. Okrajová podmínka „C“ představuje vynucený posun čelní plochy dřevěného nosníku. Okrajová podmínka „E“ tvoří pevnou podporu ocelové desky. Vnášená deformace tedy vyvoluje smykové napětí na smykové ploše. Pro potřeby sestavení L-D diagramu jsem sledoval velikost vnášeného posunu v místě okrajové podmínky „C“ a též reakce na podpoře „E“.



Obr. 63: Zjednodušený model pro určení materiálových vlastností kontaktu s okrajovými podmínkami

Tab. 11: Použité elastické anizotropní materiálové vlastnosti základního materiálu (dřeva)

Vlastnost/směr	L (xy)	R (yz)	T (xz)
Modul pružnosti E [MPa]	11600	390	390
Poissonův součinitel μ [-]	0,37	0,42	0,42
Modul pružnosti ve smyku G [MPa]	720	720	720

Tab. 12: Získané materiálové vlastnosti pro CZM model kontaktu na zjednodušených modelech

Vlastnost	Varianta 1 (kombinace)	Varianta 2 (pouze smyk)
Maximální normálové napětí [MPa]	0,4	-
Normálový posun při dokončení delaminace [mm]	0,08	-
Maximální smykové napětí [MPa]	2,7	5,0
Tangenciální posun při dokončení delaminace [mm]	0,06	0,6
Artificial damping koeficient [s]	0,01	0,01

3.2.2.2 Určení pevnosti ocelových prvků a elastických vlastností UHPC

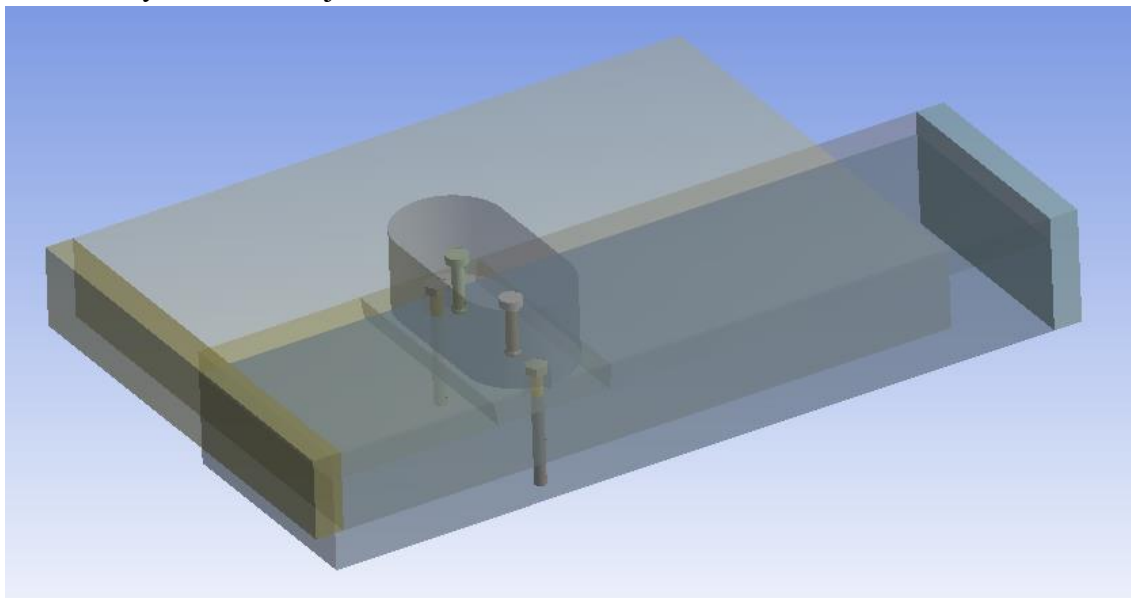
Pro účely určení materiálových vlastností jsem využil výsledky získané na experimentální sérii K11, která byla navržena s cílem selhání smykových trnů na stříh. Vliv namáhání dřevěných prvků a spoje zde tedy probíhalo především v lineární oblasti, mohl jsem zde tedy použít výchozí materiálové vlastnosti a soustředit se na získání tuhosti modelu změnou modulu pružnosti UHPC (modul pružnosti oceli jsem uvažoval jako pevnou konstantu s hodnotou 200 GPa) a únosnosti změnou pevnosti oceli spřahovacích trnů a ocelové desky.

Vytvořil jsem tedy model protlačovací zkoušky, který tvořila jedna polovina dřevěného nosníku s ocelovou deskou, ke které byly navařeny smykové trny a betonovou deskou. Součástí modelu byly i vruty, které sloužily ke kotvení ocelové desky do dřeva. Jejich přínos k únosnosti byl nicméně zanedbatelný. Model je zobrazen na obrázku 64. Základní prvky jsou doplněny o desku pro vnášení zatížení a desku, o kterou se opírá betonová deska.

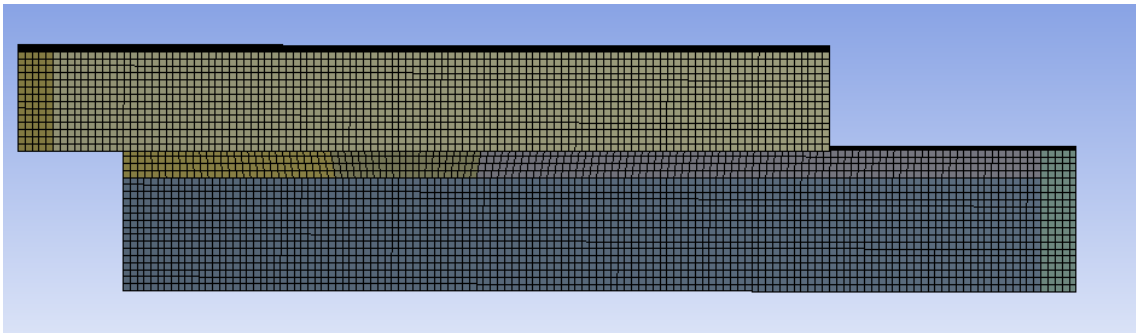
Síť konečných prvků modelu měla jednotnou základní velikost hrany 5 mm pro prvky dřevěného nosníku, UHPC desky a ocelové desky. Vruty a smykové trny měly velikost sítě 5 mm, která byla dále zjemněna na 1 mm v místě svaru. Síť konečných prvků je zobrazena pro celkový model na obrázku 65 a následně je zobrazen detail sítě spřahovacích trnů na obrázku 66.

Materiálový model dřeva byl již uvažován jako Anizotropní plasticita s výchozími parametry, které jsou uvedeny v tabulce 10. Kontakt v místě smykové plochy byl řešen pomocí CZM materiálového modelu pro kombinovaný způsob selhání (použity výchozí hodnoty z tabulky 12). Pro ocelové prvky jsem uvažoval izotropní materiálový model s bilineární plasticitou (multilineární plasticita by vedla k přesnějším výsledkům, ale nebyly provedeny v rámci experimentů potřebné zkoušky oceli v tahu). Základní hodnoty vycházely z popisu materiálů uvedených v kapitole 3.1.1.1 – ocelová deska měla vlastnosti odpovídající oceli S355 ($f_y = 355$ MPa) a smykové trny měly mez kluzu dle deklarace středních hodnot výrobcem ($f_y = 450$ MPa). UHPC desku jsem uvažoval jako elastický izotropní materiál s výchozím modulem pružnosti $E = 45$ GPa.

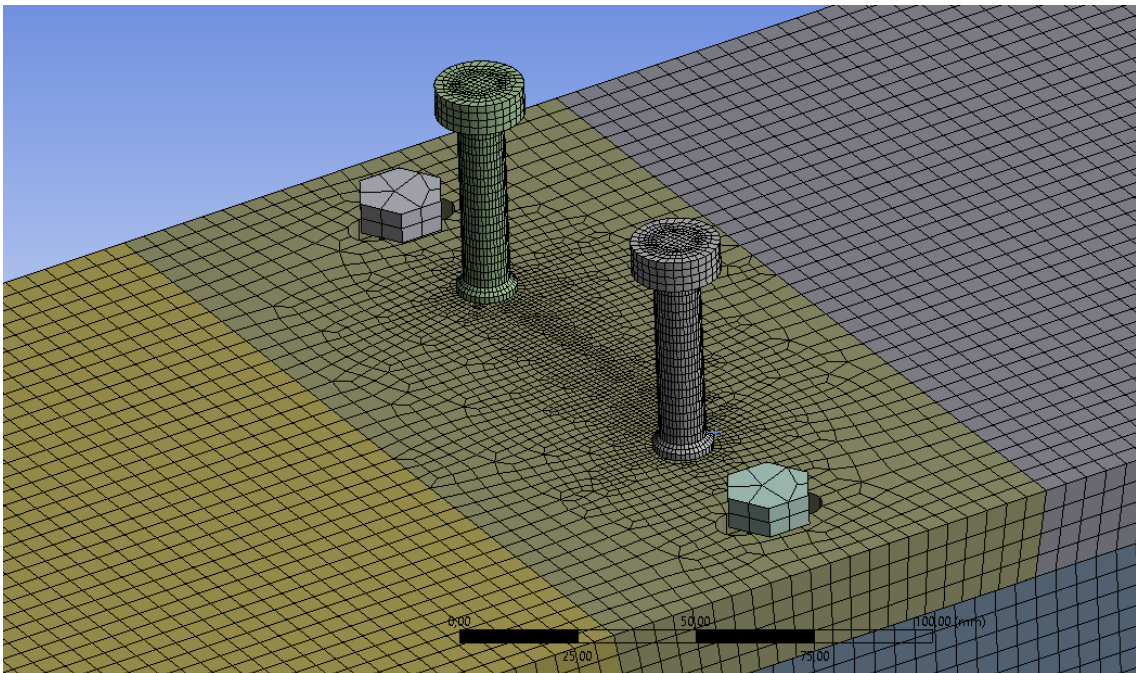
Pevnost oceli na mezi kluzu a příslušný modul zpevnění plastické části jsem společně s modulem pružnosti UHPC desky iteračně upravoval, abych získal shodu průběhu L-D diagramu s výsledky zkoušky série K11. Počáteční a konečné hodnoty materiálových vlastností jsou v tabulce 13.



Obr. 64: Model spřažení série K11 v programu Ansys v axonometrii



Obr. 65: Boční pohled na model spřažení série K11 v programu Ansys se sítí konečných prvků



Obr. 66: Detailní pohled na síť konečných prvků v místě ocelové desky s trny

Tab. 13: Materiálové vlastnosti oceli a betonu pro výpočet – výchozí a výsledné hodnoty

Veličina	Výchozí hodnota	Výsledná hodnota
Modul pružnosti oceli E_s	200 GPa	200 GPa
Poissonův součinitel pro ocel μ_s	0,3 -	0,3 -
Mez kluzu oceli pro desku $f_{y,s}$	355 MPa	500 MPa
Mez kluzu oceli pro trny $f_{y,t}$	450 MPa	700 MPa
Modul zpevnění plastické větve pro ocelovou desku $E_{T,s}$	11600 MPa	11600 MPa
Modul zpevnění plastické větve pro trny $E_{T,t}$	700 MPa	450 MPa
Modul pružnosti UHPC E_b	45 GPa	25 GPa
Poissonův součinitel pro UHPC μ_b	0,18 -	0,18 -

3.2.2.3 Finální validace spřahovacího systému

Finální validaci spřahovacího systému jsem prováděl na modelech, které odpovídaly provedeným experimentům na sériích K12 a D10. Modely se v zásadě lišily pouze způsobem, kterým byla vnášena síla do systému.

V případě modelu a série K12 byla roznášecí deska přes celou čelní plochu dřevěného nosníku, která ve výsledku bránila čistému usmyknutí dřevěného ozubu a docházelo zde ke vzpěru. U modelu a série D10 byla roznášecí deska menší a umožňovala čisté usmyknutí.

Rozhodl jsem se pro sérii a model K12 validovat materiálový CZM model kontaktu ve variantě využívající kombinovaný způsob selhání, jelikož jsem se domníval, že by mohl lépe vystihovat chování ovlivněné celoplošnou roznášecí deskou. Pro model a sérii D10 jsem naopak zvolil CZM materiálový model kontaktu využívající čisté smykové selhání, který má jednodušší formulaci a měl by vhodně vystihnout způsob selhání, který byl dosažen experimentálně.

Výpočetní modely jsou velmi podobné tomu, který byl použit při validaci materiálových vlastností oceli (obrázek 64, 65 a 66). Rozdíl byl pouze v počtu spřahovacích trnů, které byly použity 3. Pro série K20 a K30 se pak ještě měnila hloubka smykového ozubu – ten byl 10 mm u série K20 a 30 mm u série K30. Série K30 měla též spřahovací trny většího průměru – 13 mm. U modelu série D10 byla též menší roznášecí deska pro vnášení zatížení.

U modelů byly pro všechny materiály využity nelineární materiálové modely, výjimkou byla UHPC deska, která byla uvažována lineárně. Výchozí parametry výpočtových modelů vycházely z hodnot získaných na dílčích modelech nebo jsou převzaty z literatury a jsou uvedeny v tabulkách 10, 11, 12, 13. Hodnoty materiálových vlastností získané touto finální validací celého spřahovacího systému jsou uvedeny v tabulkách 14, 15, 16 a 17.

Tab. 14: Finální materiálové vlastnosti pro dřevo

Vlastnost/směr	L (xy)	R (yz)	T (xz)
Modul pružnosti E_d [MPa]	9500	800	450
Poissonův součinitel μ_d	0,027	0,6	0,033
Modul pružnosti ve smyku G [MPa]	720	40	720
Mez kluzu v tahu f_t [MPa]	60	6,5	6,5
Modul zpevnění v tahu E_t [MPa]	100	10	10
Mez kluzu v tlaku f_c [MPa]	35	6,8	6,724
Modul zpevnění v tlaku E_t [MPa]	1000	112	112
Mez kluzu ve smyku f_v [MPa]	6	6	6
Modul zpevnění ve smyku E_v [MPa]	10	10	10

Tab. 15: Finální materiálové vlastnosti UHPC

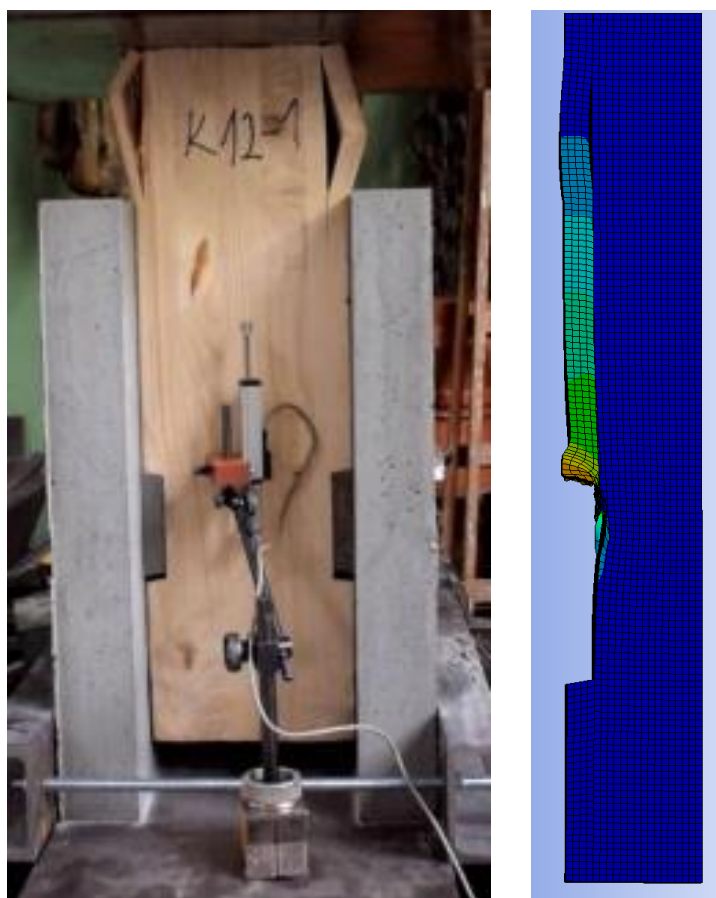
Veličina	hodnota
Modul pružnosti E_b [GPa]	25
Poissonův součinitel μ_b [-]	0,18

Tab. 16: Finální materiálové vlastnosti ocelových prvků

Veličina	Ocelová deska	Spřahovací prvky
Modul pružnosti E_s [GPa]	200	200
Poissonův součinitel μ_s [-]	0,3	0,3
Pevnost na mezi kluzu f_y [MPa]	500	700
Modul zpevnění plastické větve E_T [MPa]	11600	450

Tab. 17: Finální materiálové vlastnosti CZM kontaktu

Vlastnost	Varianta 1 (kombinace)	Varianta 2 (pouze smyk)
Maximální normálové napětí [MPa]	0,4	-
Normálový posun při dokončení delaminace [mm]	0,006	-
Maximální smykové napětí [MPa]	3,5	5,5
Tangenciální posun při dokončení delaminace [mm]	0,006	0,2
Artificial damping koeficient [s]	0,01	0,01



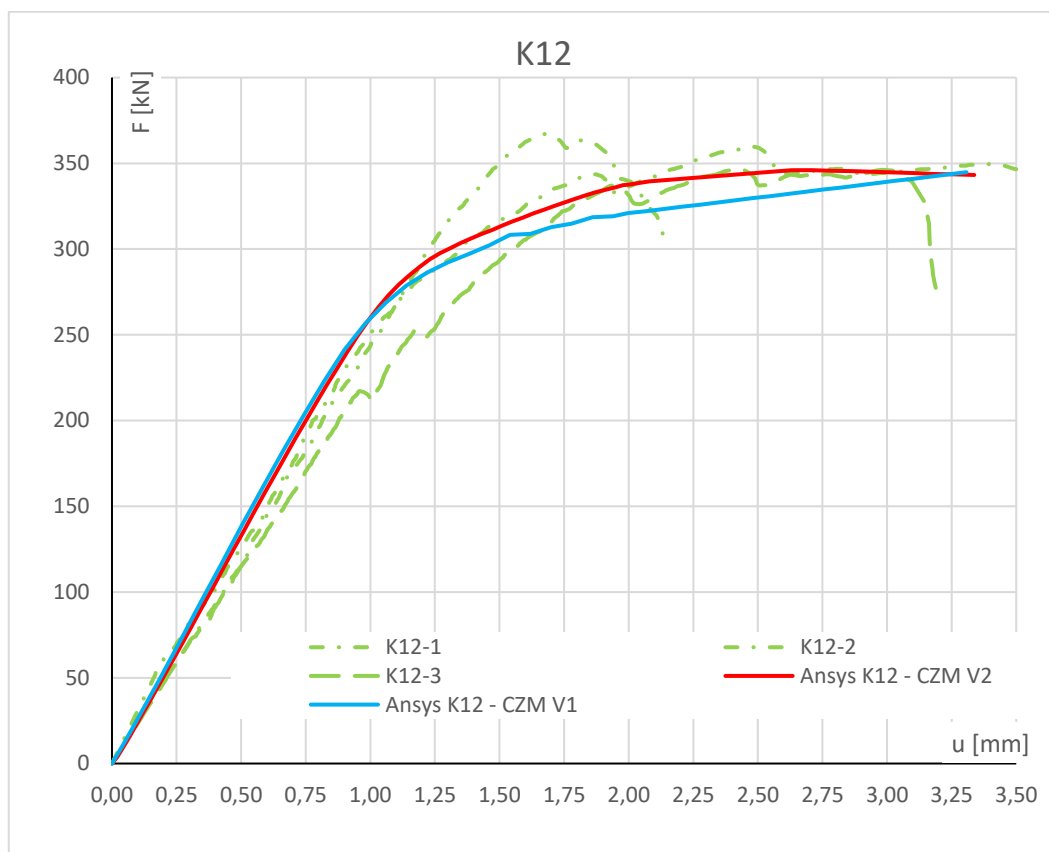
Obr. 67: Vlevo je výsledná deformace experimentálně zkoušeného tělesa. Napravo pak deformovaný tvar dřevěného nosníku série K12 – je zde patrné rozepření smykového ozubu po jeho usmyknutí a následná plastická deformace čela smykového ozubu v tlaku. Pro názornost je deformace 20x zvětšena.



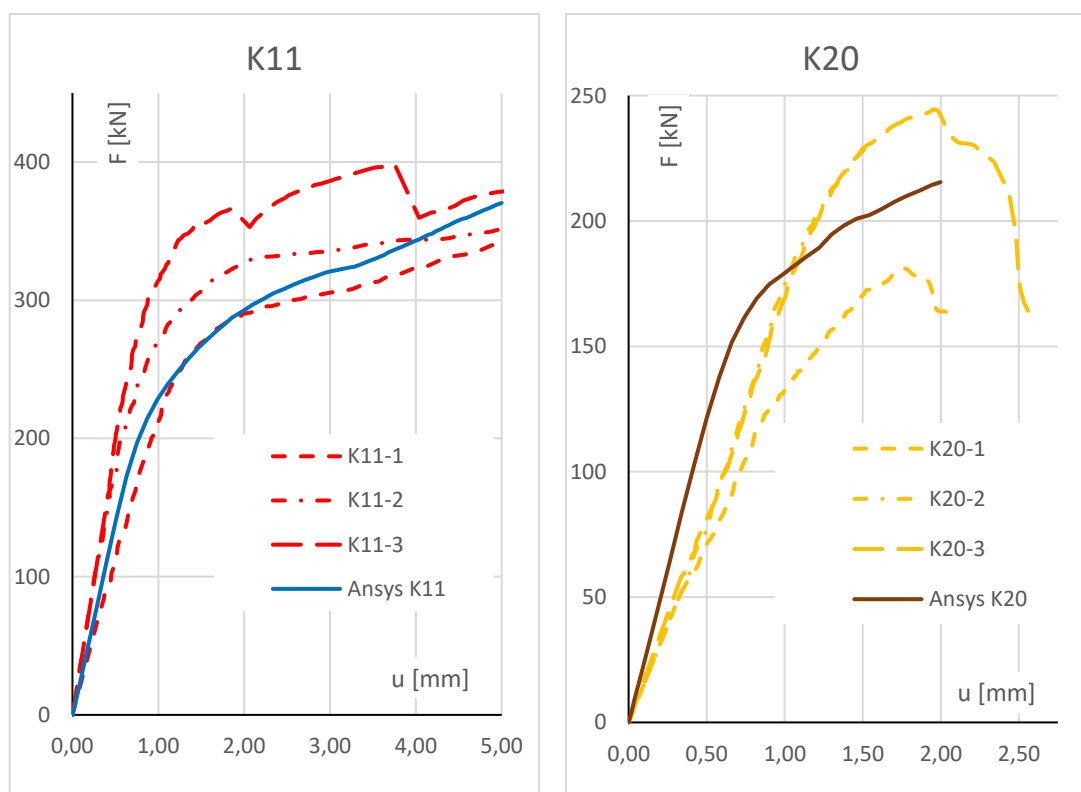
Obr. 68: Vlevo je výsledná deformace experimentálně zkoušeného tělesa. Napravo pak deformovaný tvar dřevěného nosníku série D10 – je zde patrné usmyknutí smykového ozubu. Pro názornost je deformace 3x zvětšena.

3.3 Výsledky numerické analýzy spřahovacího systému

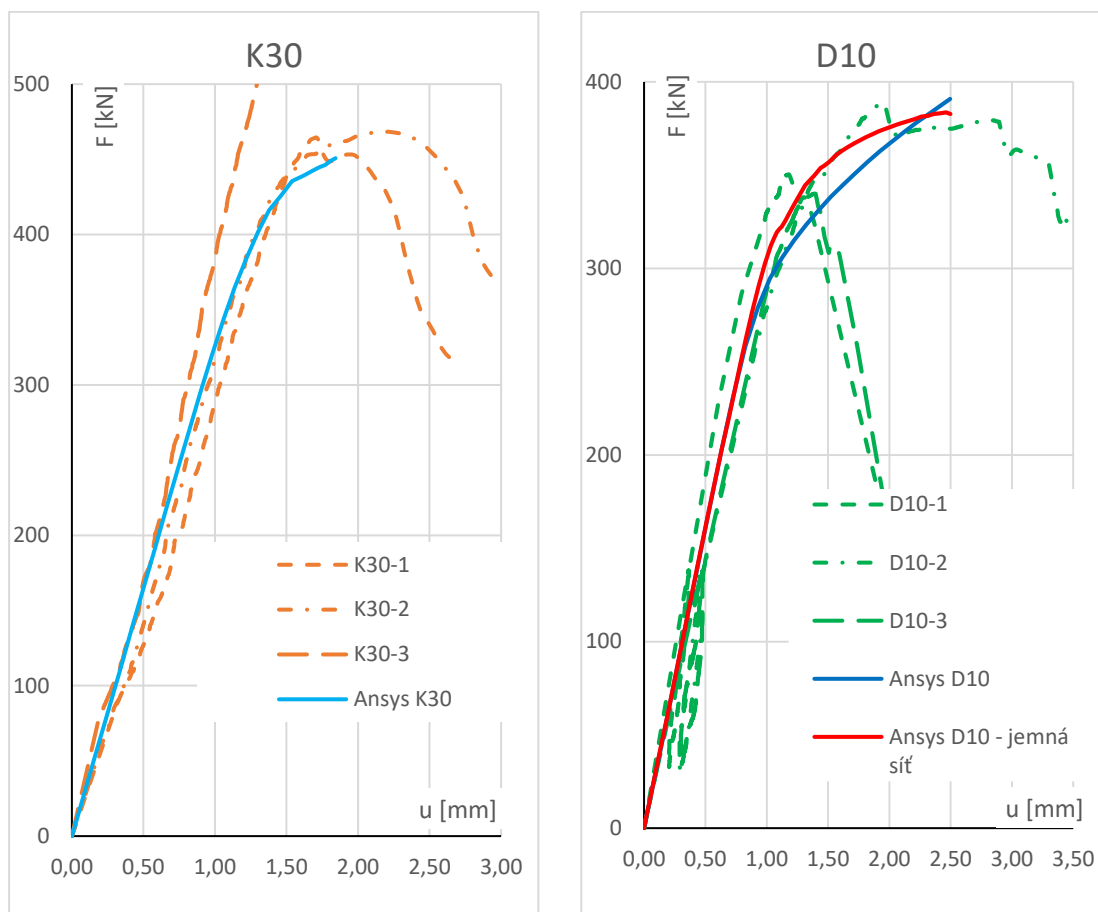
Výsledné hodnoty validovaných materiálových vlastností z modelu série K12 jsem následně aplikoval pro posouzení modelů odpovídajícím sériím K11, K20 a K30. Na závěr jsem vyzkoušel využít získané finální vlastnosti jednotlivých materiálových modelů z modelu série D10 na modelu série K12. Výsledné LD diagramy a jejich srovnání s výsledky experimentů jsou znázorněny na obrázcích 69, 70 a 71. Každá série má vlastní L-D diagram, jejich kombinace působila příliš nepřehledně.



Obr. 69: L-D diagram pro sérii K12 – porovnání výsledků experimentu s výsledky numerické analýzy. Křivky pro Ansys K12 – CZM V1 a V2 jsou dle tabulky 17.



Obr. 70: L-D diagram pro sérii K11 (levý) a sérii K20 (pravý) - porovnání výsledků experimentu s výsledky numerické analýzy



Obr. 71: L-D diagram pro sérii K30 (levý) a sérii D10 (pravý) - porovnání výsledků experimentu s výsledky numerické analýzy. Pro sérii D10 jsem zkoušel výpočet pro model se zjemněnou sítí v oblasti dřevěného ozubu na 2,5 mm (základní model využíval 5 mm).

Z grafů je patrné, že získané výsledky velice věrně vystihují skutečné chování vzorků při experimentu bez nutnosti provádět další změny vlastností použitého materiálového modelu. Výjimkou je srovnání výsledků numerické analýzy a experimentů série K20, kde je numerický model tužší v lineární části, nicméně výsledná únosnost odpovídá rozptylu experimentu. V případě série D10 je patrné, že pro věrnější chování je vhodné použít co nejjemnější síť a rychlost zatěžování. Velikost konečných prvků má malý vliv na výpočet deformací, ale pro výpočet napětí je vliv nezanedbatelný.

Pro přesnější porovnání jsem vytvořil tabulku 18, kde je porovnána tuhost modelu a experimentu v lineární oblasti. Porovnána je též maximální dosažená síla a jí odpovídající hodnota deformace.

Tab. 18: Porovnání výsledků získaných nelineárním výpočtem a experimentálně

Serie	$F_{\max,exp}/u_{exp}$ [kN;mm]	$F_{\max,fea}/u_{fea}$ [kN;mm]	$K_{s,exp}$ [kN/mm]	$K_{s,fea}$ [kN/mm]
K11	367/3,59	320/3,00	325	265
K12	365/2,45	346/2,63	238	231
K20	231/1,87	215/2,00	156	182
K30	467/1,93	451/1,84	304	335
D10	389/1,93	383/2,46	323	306

Nejllepší shodu v oblasti dosažení síly při posunu 1 mm dosahuje série K12, podle které byl validován materiálový model. Poměrně dobrá shoda panuje i pro sérii K30, kdy je numerický model tužší pouze o 9.25%. Pro sérii K20 se numerický model oproti výsledkům experimentu jevil jako tužší, čemuž odpovídá rozdíl ve výsledcích 14.28% ve prospěch tuhosti numerického modelu. Naopak série K11 byla oproti průměrným hodnotám experimentů při posunu o 1 mm méně tuhá, konkrétní rozdíl je 22,64%, což je už poměrně hodně. Důvodem pro větší rozdíl u série K11 byla závislost tuhosti na chování ocelových trnů, kdy ve výpočetním modelu vznikala poměrně brzy lokální plastická otlačení vlivem použitého elastického modelu pro beton. Ta sice neměla výrazný vliv na výslednou maximální sílu, ale snižovala tuhost modelu. Shoda pro sérii D10 s rozdílem 5.26% je též velice dobrá.

I přes drobné odchylky numerických analýz od experimentálně získaných dat lze usoudit, že získané materiálové modely lze využít pro budoucí odhad chování tohoto spřahovacího systému a jeho případné optimalizaci jako náhradu k velkému počtu nákladných experimentálních zkoušek. Nicméně výsledky numerických analýz je vždy na závěr nutné ověřit experimentálně, zejména pro materiál s tak vysokou variabilitou mechanických vlastností, jakým je dřevo.

Nejnáročnější při validaci spřahovacího systému pro mě nebylo dosažení odpovídajícího průběhu L-D diagramu, toho jsem dosáhl poměrně brzy, nejnáročnější bylo zajistit jak odpovídající způsob selhání systému, tak zároveň s tím shodu pro L-D diagram. Dlouho mi docházelo k selhání spíše tlakem na čele ozubu, případně nedošlo k usmyknutí celého ozubu. Až kombinace úprav pevnostních charakteristik dřeva a styku vedlo k úspěšnému výsledku.

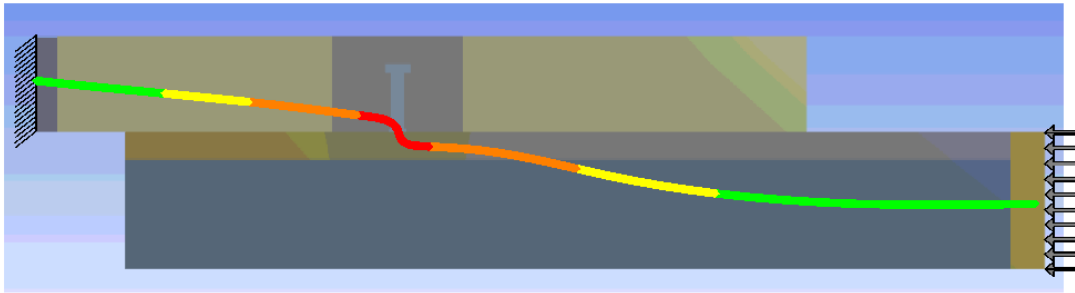
3.3.1 Rozbor chování spřahovacího systému

Pro možnost optimalizovat spřahovací systém je nejprve potřeba pochopit princip jeho fungování, jakým způsobem se přenášejí síly v rámci spřažení a vyhodnotit potencionální slabá místa spoje.

Princip fungování spoje bude vysvětlen v následujících obrázcích 72-75. Na obrázcích je postupně zobrazen tok síly od místa zatěžování do podpory. Pro zjednodušení toto znázornění provedu pro provedenou protlačovací zkoušku, kde je tento tok zřetelnější, nicméně závěry odpovídají chování spoje i na reálné konstrukci.

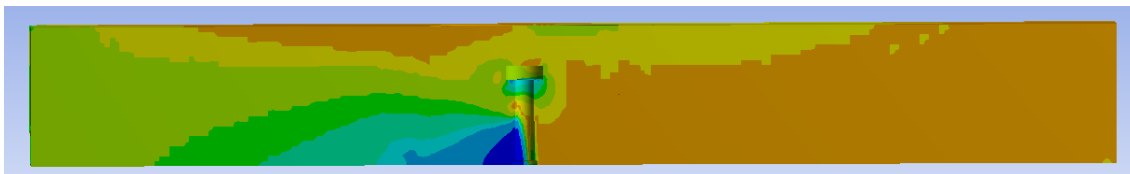
Pro obrázek 72 reprezentuje barva čáry poměr zatížení, červená představuje největší koncentrace napětí pro daný prvek, oranžová středně vysokou koncentraci, žlutá mírnou koncentraci a zelená pak běžný tok sil. Na základním obrázku je pouze naznačen směr toku sil v průřezu. Pro větší přehlednost záležitost rozdělím na 3 díly – dřevěný nosník s ozubem, ocelovou desku s trny a betonovou desku, na kterých bude znázorněn detailnější průběh. Budu uvažovat ideální a neporušenou konstrukci.

Na dílčích obrázcích 73, 74 a 75 je nejvyšší koncentrace sil znázorněna tmavě modrou barvou, která symbolizuje nejvyšší tlakové napětí, červená barva pak představuje vznikající tahová namáhání.

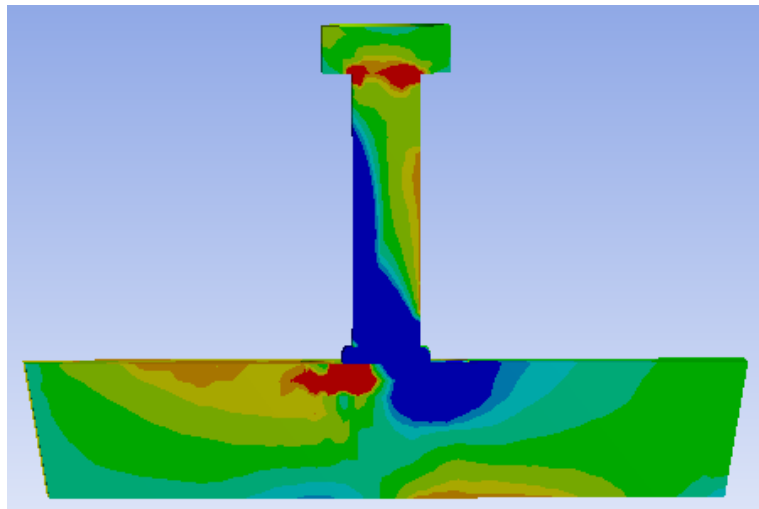


Obr. 72: Schématický tok napětí ve zkoumaném spoji. Nejvyšší koncentrace sil se odehrává v oblasti smykových trnů.

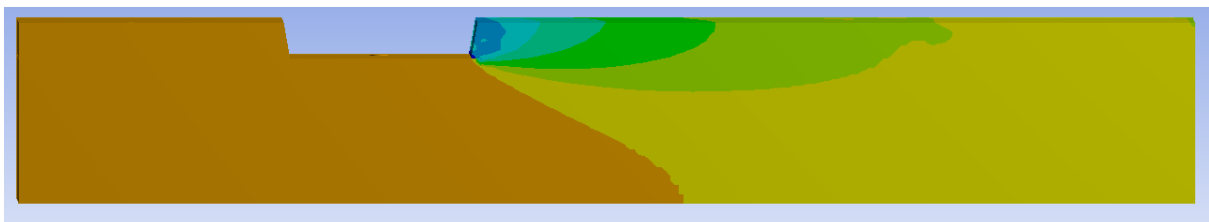
Následující obrázky zobrazují vykreslené toky hlavních tlakových napětí pro jednotlivé části spřažené konstrukce. Na obrázku 73 je zobrazena deska z UHPC v řezu její osou. Zde je patrná zejména oblast v místě paty spřahovacích trnů, kde je výrazná koncentrace tlakových napětí. Tato napětí se postupně směrem k podpoře rozdělují po výšce a šířce desky a jejich velikost se snižuje. V patě spřahovacích trnů při působení větších sil dochází k plastickému chování UHPC v tlaku.



Obr. 73: Tok hlavních napětí v tlaku pro desku z UHPC



Obr. 74: Tok hlavních napětí v tlaku pro ocelovou desku s trny



Obr. 75: Tok hlavních napětí v tlaku pro dřevěný nosník

Obrázek 74 představuje ocelová deska s navařenými trny, řez je veden osou spřahovacího trnu ve střední části desky. Na obrázku je patrná zejména koncentrace tlakových napětí v oblasti přechodu z plochy ocelové desky na výrazně menší průřez tvořený smykovým trnem. V samotném trnu se tlakové napětí šíří po dřívku, ze kterého se přesouvá do UHPC desky. V modře podbarvené oblasti je vysoká pravděpodobnost vzniku plastických deformací, které mohou podstatně snižovat výslednou tuhost spřažené konstrukce.

Na obrázku 75 je dřevěný nosník v řezu jeho osou. Zde je patrné, že tlaková napětí se postupně od místa zatěžování, kde jsou víceméně rovnoměrně rozdělena po výšce průřezu, kumulují směrem k čelu smykového ozubu, kde je pro dřevěný nosník ve výsledku nejvyšší koncentrace tlakových napětí. Zde se vlivem geometrie má tendenci vytvářet lokální špička v dolním rohu zářezu.

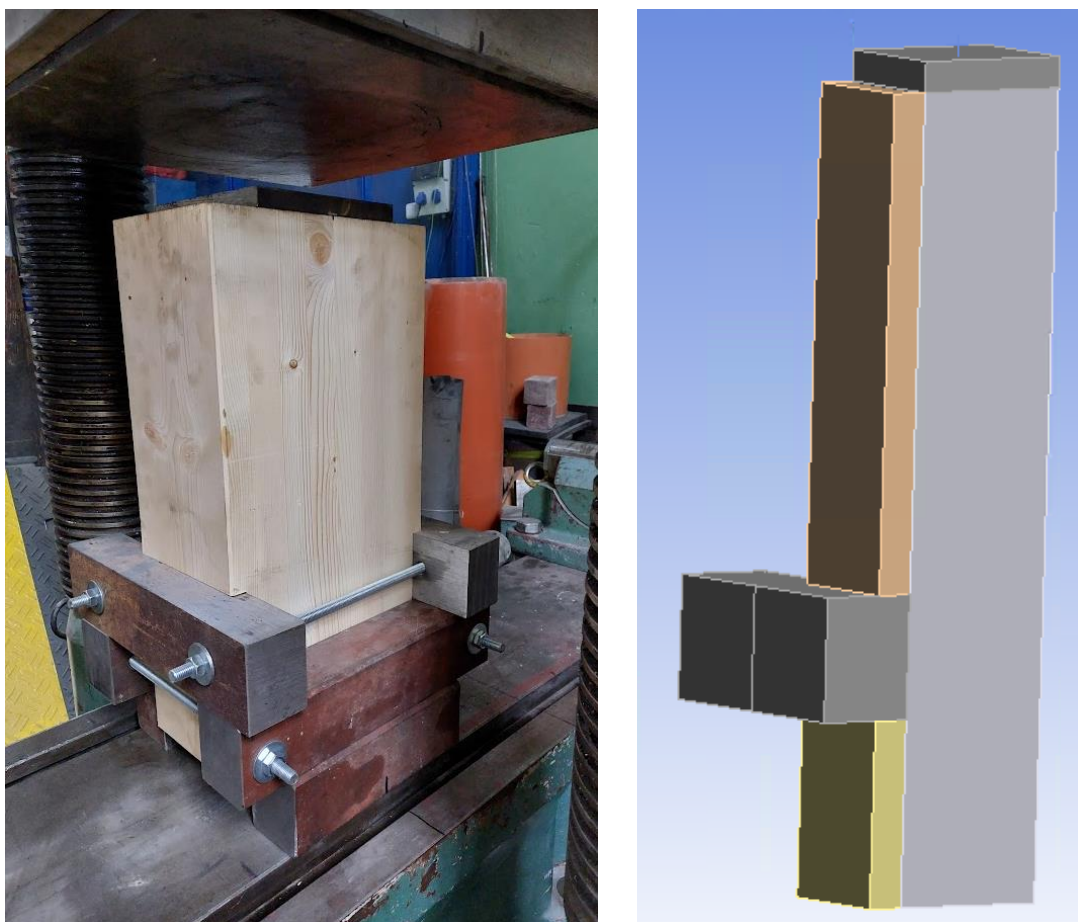
Abych shrnul poznatky plynoucí z výše popsaných obrázků. U dřevěného nosníku dochází k mírné koncentraci sil v místě čela smykového ozubu, kde se síla následně přesouvá do ocelové desky. Koncentrace napětí je u dřevěného nosníku tím vyšší, čím je hloubka ozubu menší. U části spoje tvořeného ocelovou deskou s navařenými smykovými trny dochází k nejvyšší koncentraci sil v místě přesunu zatížení z desky do jednotlivých trnů. V samotných trnech následně dochází k mírnému rozdělení síly. Ta se následně přesouvá do UHPC desky, která je nejvíce namáhána v tomto místě. Síla se následně rozptyluje do průřezu a roznáší se do podpory. Místo s nejvyšší koncentrací napětí je tedy v místě spřahovacích trnů. Což je důležitý poznatek pro případnou optimalizaci spoje.

3.4 Doplnující experimentální zkoušky

Abych rozšířil poznatky o reálném chování smykového ozubu ve dřevěném nosníku, rozhodl jsem se nechat provést doplňující experimentální zkoušky čistě pro odvození smykové únosnosti ozubu.

Aby bylo možné výsledky porovnat s dříve provedenými zkouškami, navrhl jsem obdobné uspořádání zkoušky. Zkoušeno bylo celkem 6 zkušebních těles, která tvořil dřevěný hranol délky 650 mm, šířky 200 mm a jelikož se nepodařilo sehnat skladem hranol výšky 200 mm, byla použita výška 320 mm, což by nemělo mít vliv na výsledky zkoušky. V hranolu byl oboustranně vyfrézován ozub hloubky 20 a 30 mm (pro každou hloubku ozubu byla vyrobena 3 tělesa). Délka smykového ozubu byla opět 400 mm.

Abych vyloučil vliv tuhosti dalších prvků spoje, byl jako smyková zarážka použit ocelový hranol 100x100 mm. Aby se zabránilo efektu rozepření smykového ozubu, byla na čelo nosníku umístěna ocelová deska 200x200x20 mm. Těleso připravené ke zkoušce je na obrázku 76. Zkouška byla v celém rozsahu řízena posunem s rychlostí 1 mm za minutu. Na obrázku 76 je též zobrazen vytvořený numerický model zkoušky pro možnost porovnání výsledků s validovaným materiálovým modelem..

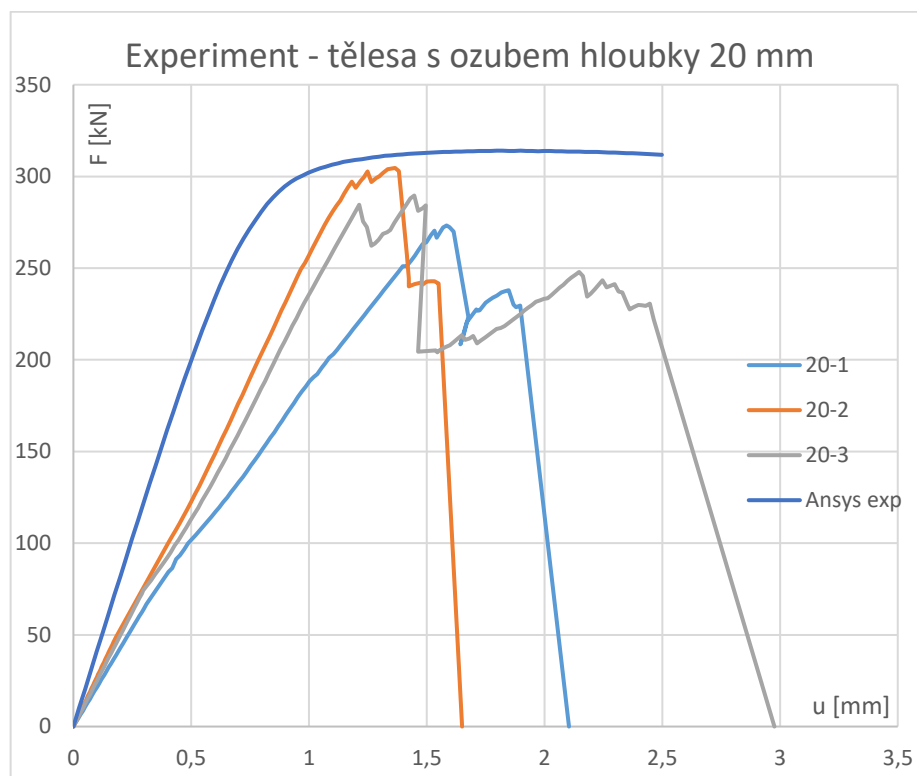


Obr. 76: Nalevo je zobrazen zkušební vzorek před započítím testu, napravo je zobrazen vytvořený výpočetní model v softwaru Ansys

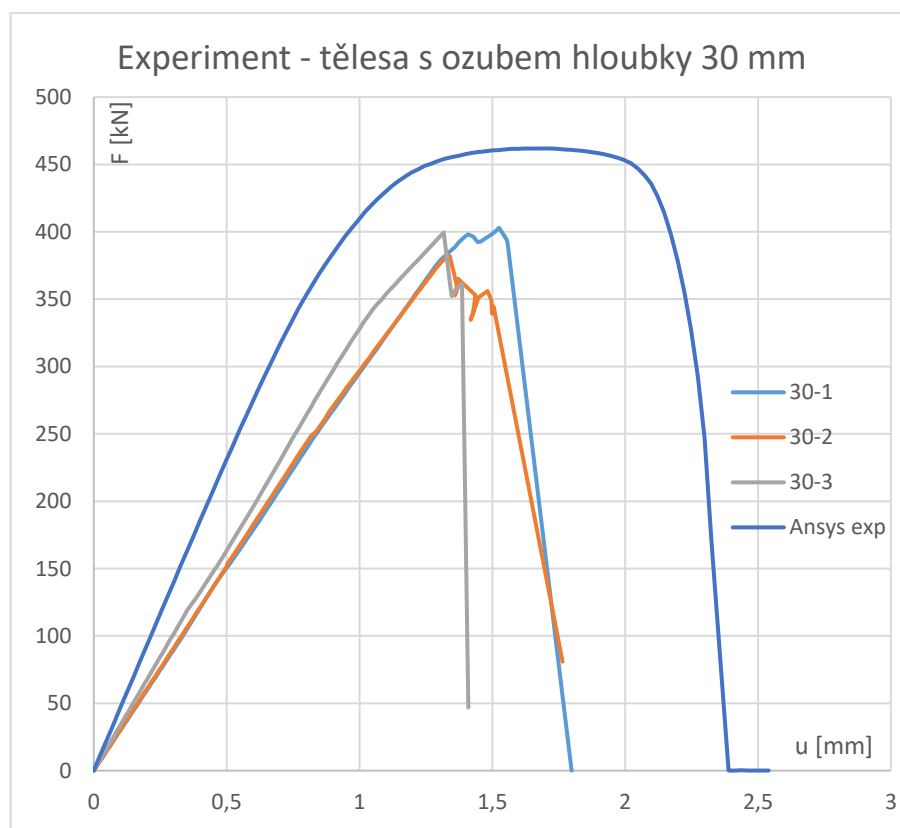
Výsledné L-D diagramy jsou uvedeny na obrázku 77 a 78. V obou případech byla experimentálně zjištěná únosnost i tuhost zkoušených těles nižší, než byl předpoklad výpočtu. Výsledky jsou přehledně zobrazeny v tabulce 19, kde je provedeno porovnání průměrné hodnoty získané experimentem a jeho porovnání s predikovanou únosností výpočtem. V tabulce je provedeno též porovnání tuhostí.

Tab. 19: Porovnání výsledků experimentu s výsledky numerické analýzy

Těleso	Ozub 20 mm			Ozub 30 mm		
	Experiment	Ansys	Rozdíl [%]	Experiment	Ansys	Rozdíl [%]
F_{max} [kN]	287,4	314,0	9,2	389,2	461,4	18,5
K_{ser} [kN/mm]	245,1	399,4	63	313,0	462	47,6



Obr. 77: L-D diagram s výslednými průběhy závislosti zatížení na deformaci pro experiment a výpočet těles s hloubkou ozubu 20 mm



Obr. 78: L-D diagram s výslednými průběhy závislosti zatížení na deformaci pro experiment a výpočet těles s hloubkou ozubu 30 mm

Horší výsledky experimentu byly zapříčiněny nevhodnou skladbou jednotlivých lamel lepeného nosníku. Jedna z krajních lamel (viz obrázek 79) měla výrazně horší makroskopickou strukturu, než ta na protější straně. To vedlo k výrazně nerovnoměrnému způsobu namáhání a selhání, kdy ve všech případech došlo k usmyknutí dřevěného ozubu pouze na straně lamely, která měla výrazně odlišnější dělení letokruhů.

Všechna zkoušená tělesa byla řezána z jednoho nosníku z LLD a jsou tímto jevem ovlivněny všechny získané výsledky. Výsledná experimentální únosnost a tuhost spoje tedy představuje částečný příspěvek pevnější lamely a maximální únosnost a tuhost druhé lamely. Zatímco numerický výpočet uvažuje se symetrickým způsobem selhání a dosažením únosnosti obou krajních lamel ve smyku.

Získaná data tedy není bohužel možné využít pro následné výpočty. Na obrázcích 80 a 81 jsou příklady způsobu selhání zkušebních těles. Z výsledků lze pouze usoudit, že by bylo vhodnější, aby spoj v modelu vykazoval menší plastickou přetvárnost a selhával spíše křehce. Jelikož cílem je navrhovat spoj působící v lineární oblasti, nepovažují tento nedostatek výpočetního modelu za důvod k jeho přepracování.



Obr. 79: Detailní pohled na čelo porušeného hranolu. Je patrné, že pravá krajní lamela má výrazně hrubší strukturu letokruhů a strom rostl tedy v jiných podmínkách než strom, ze kterého pochází lamela levé strany. U lamely na pravé straně rostl strom nejspíše výrazně rychleji a měl tedy horší mechanické vlastnosti. Na obrázku je patrné, že v části smykové plochy je kopírován průběh letokruhu. Mohlo se jednat například o tlakové dřevo.



Obr. 80: Způsob selhání těles s ozubem hloubky 20 mm – došlo k usmyknutí smykového ozubu.
U levého vzorku došlo k jeho celkovému oddělení.



Obr. 81: Způsob selhání těles s ozubem hloubky 30 mm – došlo k usmyknutí smykového ozubu.
Smyková plocha není rovnoběžná a je ovlivněna strukturou dřeva.

3.5 Optimalizace spoje

Pro možnost optimalizace spoje je nutné položit si otázku, zda ho chceme optimalizovat s cílem navýšení únosnosti, zjednodušit jeho působení, snížit cenu, zjednodušit výrobu či více těchto parametrů najednou. Některé možnosti je možné realizovat zároveň, některé se mohou navzájem vylučovat. Například navýšení únosnosti pravděpodobně nebude možné při současném snížení ceny či náročnosti výroby. Naopak zjednodušení působení spoje by mělo být se snížením ceny spoje realizovatelné.

Pro zesílení spoje existuje několik možností. Nejjednodušší je pravděpodobně pokračovat v navyšování jeho hloubky, což ovšem v případě dodržení konfigurace, kdy je hloubka ozubu totožná s tloušťkou ocelové desky, problematické s ohledem na množství použité oceli. Zároveň navyšování únosnosti smykového ozubu jeho hloubkou vede k nutnosti používat stále větší smykové trny, či jejich počet, což se může dostat do bodu, kdy to nebude možné.

Další možností navýšení únosnosti je aplikace předpětí – buďto pomocí předpínacích šroubů vnese do dřeva v místě smykového ozubu příčnou tlakovou sílu a tím zvýšíme únosnost styku ve smyku, nebo můžeme předepnout celý kompozitní systém, kdy vneseme tlak do spáry mezi UHPC desku a dřevěný nosník a tím přeneseme část zatížení třením mezi prvky. Tyto způsoby mají nevýhodu v nutnosti používat nerezové prvky, aby nehrozilo selhání z důvodů koroze.

Jako cesta ke zjednodušení působení spoje, tak jak je doteď uvažovaný, mě napadlo využít výborných vlastností UHPC ve smyku, které získává díky vysokému dávkování rozptýlené výztuže. Tím by se ze spoje mohl vypustit celý ocelový blok se smykovými trny, které jsou místem s nejvyšší koncentrací napětí a mají negativní vliv na tuhost celého spoje. UHPC sice též patří mezi cenově nákladnější materiály, nicméně stále je levnější než aktuálně používaná ocel, takže tato náhrada bude mít za následek též snížení ceny. Zároveň tím dojde ke snížení nároků na přesnost výroby smykových ozubů.

Zda dojde ke snížení náročnosti výroby, bude asi hodně záležet, zda se spoj bude využívat společně s prefabrikací, nebo zda bude mostovka realizována monoliticky. Výhoda prefabrikace je jednoznačně v rychlosti výstavby a omezení vnášení přídavných napětí od smršťování UHPC. Na druhou stranu řešení spojů tenkých desek z UHPC je poměrně náročný úkol. Jelikož dle ČSN EN 1995 [43] je požadováno, aby styk přenesl 10% smykového zatížení v tahu, bude nutné spoj doplnit o doplňkový typ spřahovacích prostředků, které umožňují přenesení tahu ve spoji – například spřahovací vruty [39].

Pro optimalizaci spoje jsem se tedy rozhodl jít cestou jeho zjednodušením díky vytvoření smykového ozubu přímo z UHPC. Dodatečné zesilování spoje mi nepřipadá nutné a dostupné možnosti jsou poměrně komplikované. Využití ozubu z UHPC by sice otevřelo další cesty pro navýšení únosnosti spoje – například vlepěním ocelové výztuže v místě spoje do dřevěného nosníku, které bylo použito např. na mostní konstrukce ve Švýcarsku [76].

3.5.1 Návrh geometrie optimalizovaného spoje

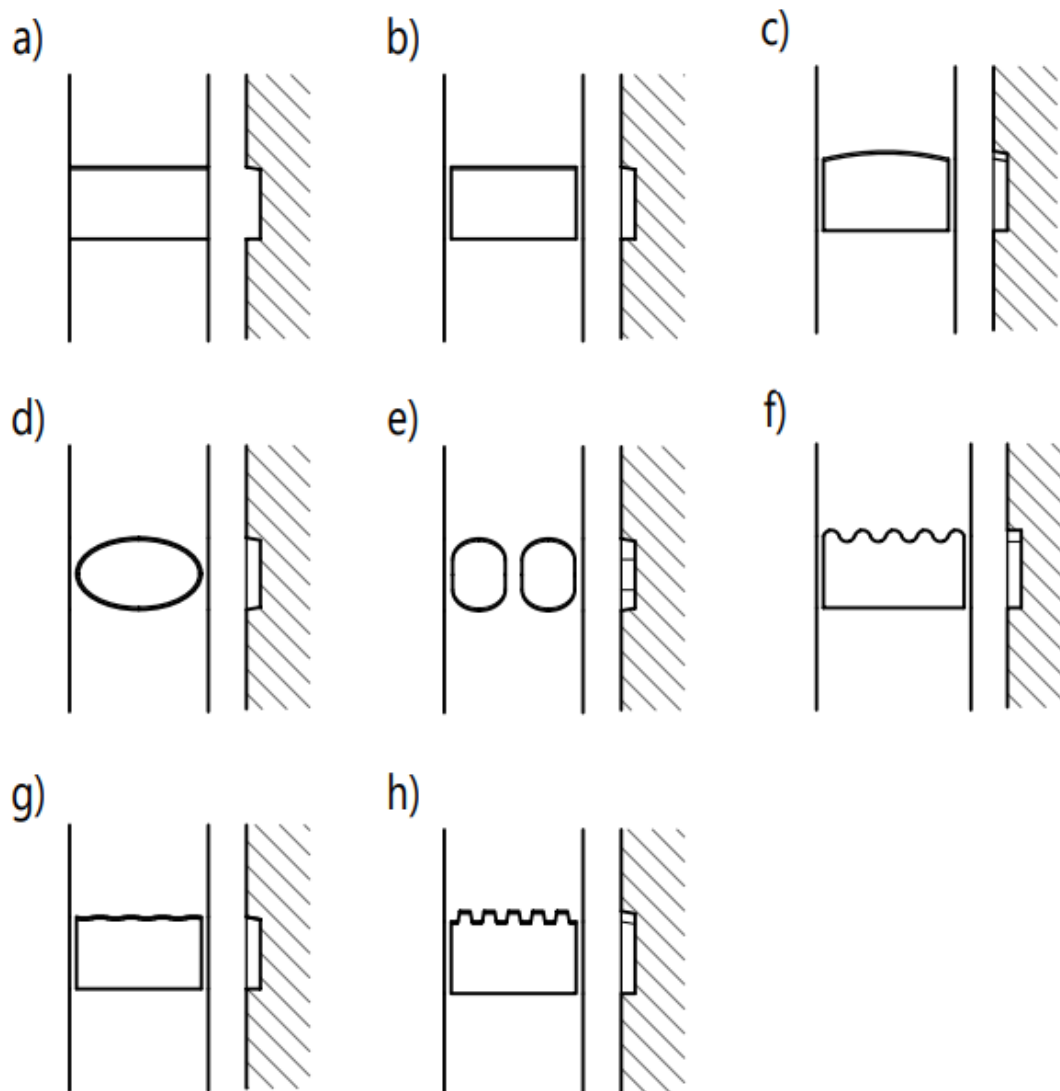
Pro ověření chování optimalizovaného spoje jsem se rozhodl navrhnout různé varianty geometrického uspořádání. Pro možnost porovnání s původní variantou bude základní geometrie téměř totožná – pouze dojde k nahrazení ocelové desky s trny ozubem z UHPC. Hloubku ozubu v dřevěném nosníku budu uvažovat 20, 30 a 40 mm. Dělat ozub hloubky pouze 10 mm mi přijde zbytečné a jeho chování v experimentálním programu pro původní geometrii spoje nebylo příliš dobré.

Jako další možnost mě napadlo provést ozub ve dřevěném nosníku tak, aby mohl sloužit jako ztracené bednění – tedy nedělat ho průběžný na celou šířku nosníku. To je sice výhodné z hlediska provádění spoje, nicméně vede k redukci kontaktní plochy přenášející zatížení a tím i redukci únosnosti.

Navrhl jsem tedy i varianty využívající různě zaoblené či profilované kontaktní plochy pro kompenzaci zmenšení základní šířky ozubu. Pro zaoblené kontaktní plochy je nutné si dát velký pozor, aby zaoblení nebylo příliš výrazné, jelikož dřevo má malou pevnost v tahu kolmo k vláknům a zaoblená plocha namáhaná tlakem vnáší do průřezu příčné tahy, které by mohly mít za následek rozšíření průřezu.

Inspiraci pro profilaci kontaktní plochy jsem čerpal i ze samotného způsobu výroby lepeného dřeva, které pro spoj jednotlivých lamel v podélném směru využívá pilovitý spoj. Ten většinu příčných tahových napětí díky svému uspořádání eliminuje při současném výrazném nárůstu kontaktní plochy. Pro UHPC bylo nutné tuto ideu modifikovat, aby se zajistilo vyplnění styku směsí. Pro většinu navržených způsobů jsem zachoval uklonění čela ozubu o 10°.

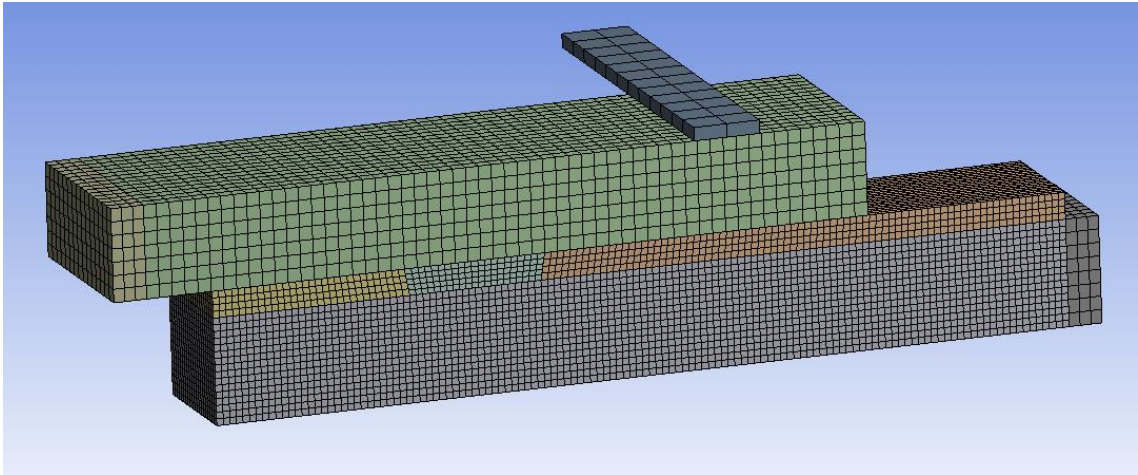
Navržené geometrie spoje jsou viditelné na obrázku 82. Je zde základní geometrie spoje s průběžným ozubem (a) a dále následují různé varianty s ponechanou boční hranou pro ztracené bednění – přímý zkrácený ozub (b), oblouk s velkým poloměrem (c), elipsa (d), dvojice oválů (e), vlnovka s malým poloměrem (f), vlnovka s velkým poloměrem (g), zazubený spoj (h). Pro každý typ je zobrazen půdorysný pohled a podélný řez v ose prvku.



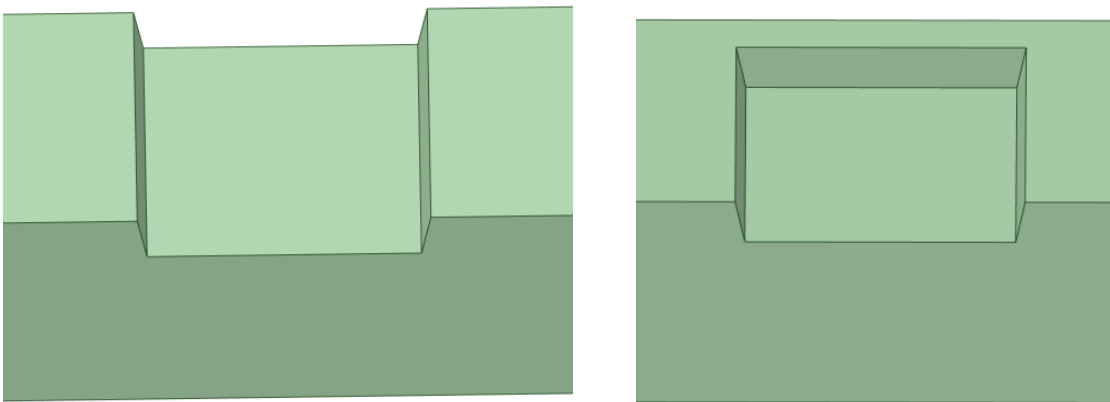
Obr. 82: Na obrázku jsou zobrazeny následující varianty spoje: (a) průběžný přímý ozub, (b) přímý zkrácený ozub, (c) oblouk s velkým poloměrem ($r = 375$ mm), (d) elipsa, (e) dvojice oválů se zaoblením ve formě elipsy, (f) vlnovka s malým poloměrem ($r = 22,5$ mm), (g) vlnovka s velkým poloměrem ($r = 45$ mm), (h) zazuběný spoj (velikost zubu je 15×15 mm, jeho boky jsou pod úhlem 10°)

3.5.2 Numerická analýza optimalizovaného spoje – popis modelů

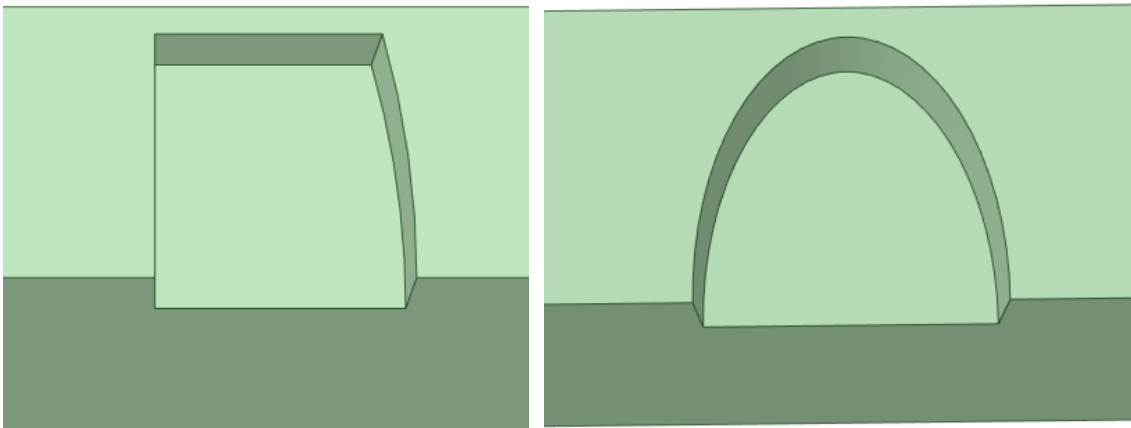
Posouzení spoje proběhlo na modelu odvozeného ze série D10. Byla pouze nahrazena ocelová deska s trny za ozub z UHPC betonu. Odstraněny byly též vruty, jelikož jejich příspěvek k únosnosti ve smyku je díky jejich výrazně nižšímu modulu prokluzu zanedbatelný a delaminaci spoje je bráněno jiným způsobem. Pro zrychlení výpočtu se díky absenci smykových trnů, dala redukovat velikost modelu na $1/4$. Materiálové vlastnosti dřeva, spoje a UHPC jsou totožné. UHPC je tedy uvažováno opět jako lineární elastický materiál. Ověření smykové únosnosti ozubu UHPC bylo provedeno v programu Atena 3D s využitím validovaného materiálového modelu. Vytvořené modely (či detaily spojů) s hloubkou ozubu 20 mm jsou zobrazeny na obrázcích 83-87. Vždy jde o jednu čtvrtinu celku.



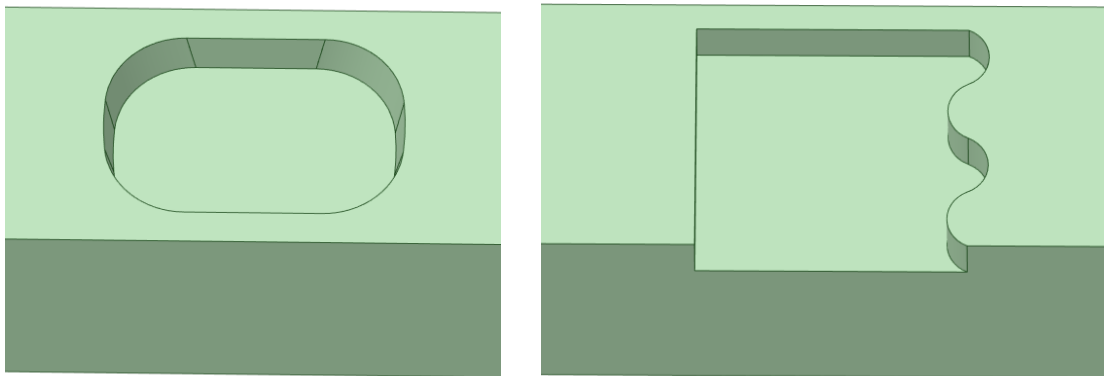
Obr. 83: Model pro přímý průběžný ozub se zobrazenou sítí konečných prvků



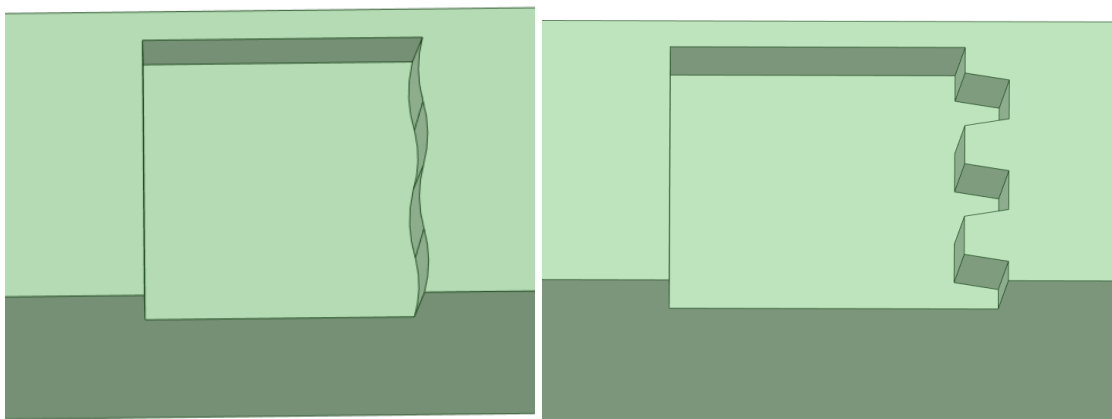
Obr. 84: Detail pro průběžný přímý ozub (nalevo) a přímý zkrácený ozub (napravo)



Obr. 85: Detail pro ozub s čelem ve formě oblouku s velkým poloměrem (nalevo) a ve tvaru elipsy (napravo)



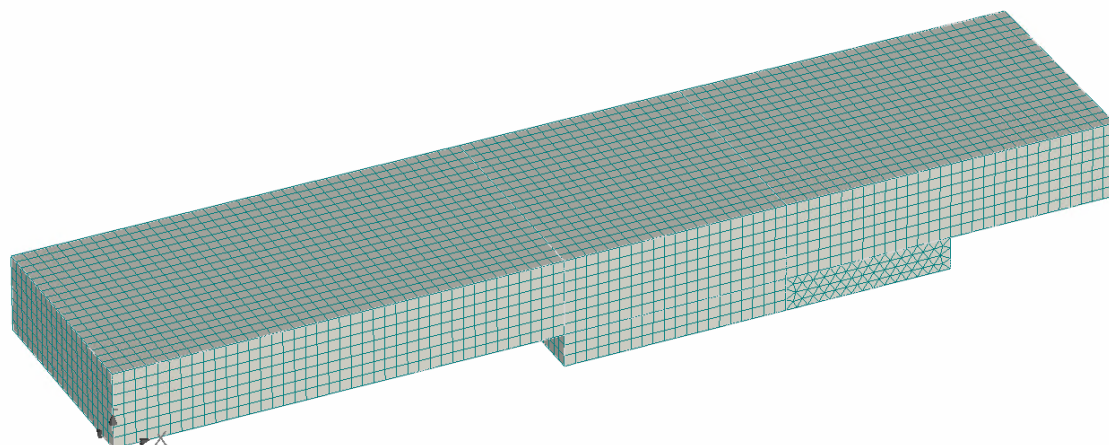
Obr. 86: Detail pro ozub tvořený dvojicí oválů se zaoblením ve formě elipsy (nalevo) vlnovkou s malým poloměrem (napravo)



Obr. 87: Detail pro ozub tvořený vlnovkou s velkým poloměrem (nalevo) a se zazubeným čelem (napravo)

Pro variantu hloubky smykového ozubu 20 mm byly počítány všechny navržené varianty geometrie smykových ozubů. Pro hloubky 30 a 40 mm byly následně počítány už jen varianty, které vykazovaly slibné výsledky na ozubu hloubky 20 mm.

Model pro posouzení ozubů z UHPC, které co se týče způsobu namáhání, odpovídají krátké konzole – jsou tedy namáhané kombinací smykové síly a ohybového momentu. Model, který jsem vytvořil, je víceméně analogií modelů používaných v Ansysu. Tvoří je deska z UHPC s ozubem, které jsou modelovány pomocí nelineárního materiálového modelu. Tyto prvky doplňuje makroprvek pro vnášení zatížení. Kontakt mezi UHPC prvky a prvkem pro vnášení zatížení jsou řešeny pomocí třecího kontaktu s materiálovým modelem 3D interface (součinitel tření je použit 0,2). Zatížení je opět vnášeno vynucenou deformací, podepření modelu je na čele desky z UHPC. Tyto okrajové podmínky jsou doplněny o podmínky symetrie, které brání deformaci ve směru kolmém na roviny symetrie. Model pro ozub výšky 30 mm je zobrazen na obrázku 88, pro ozuby výšky 20 a 40 mm se mění pouze výška ozubu.



Obr. 88: Model smykového ozubu UHPC desky v axonometrii

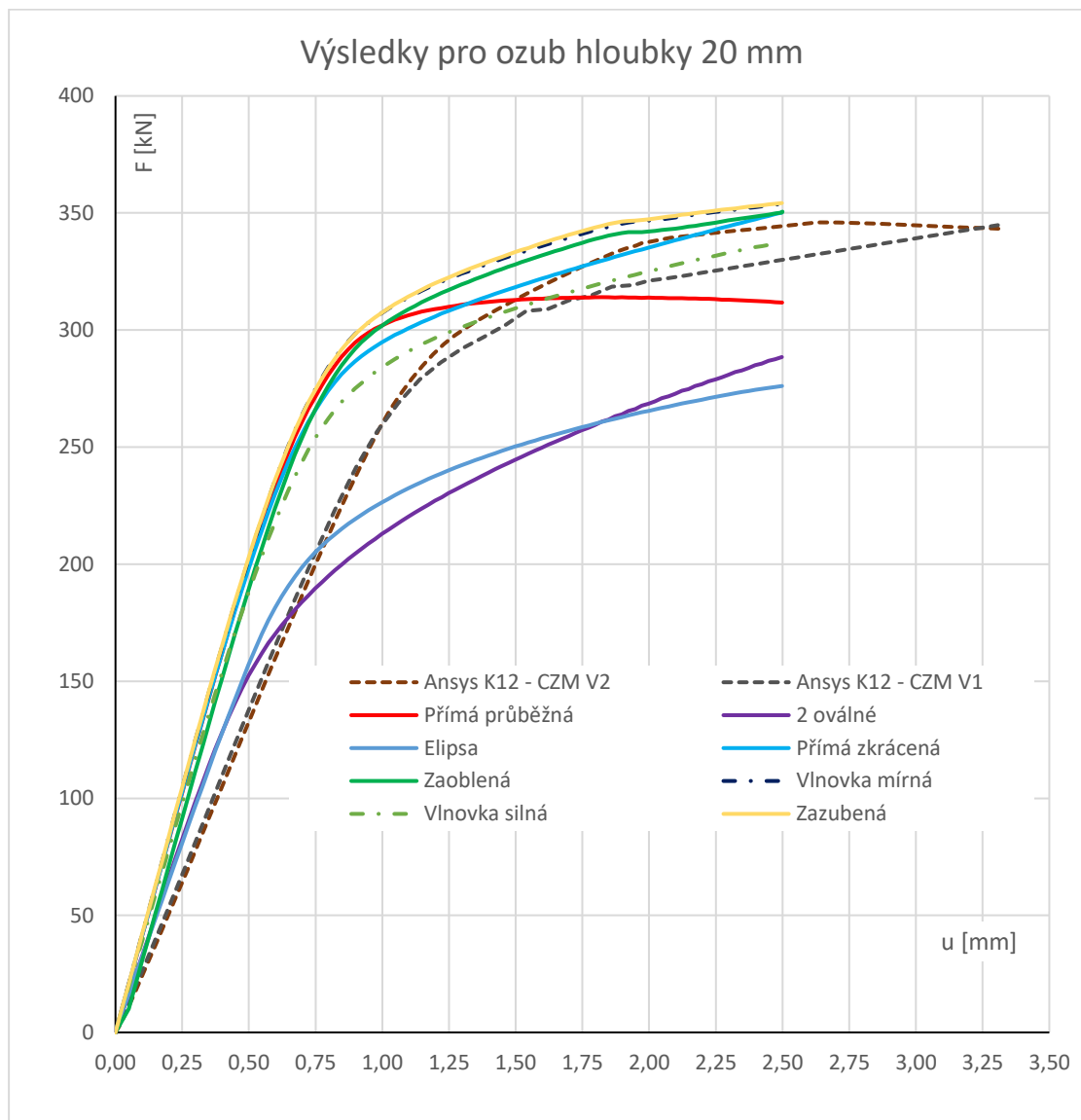
3.5.3 Výsledky numerické analýzy optimalizovaného spoje

Výsledky posudků ukázaly, že většina navržených geometrických variant vychází poměrně dobře a únosnost je podobná či vyšší, než v porovnání s původní variantou spřažení. Nahrazení ocelové desky s trny a její náhrada ozubem z UHPC měla výrazně pozitivní výsledek, co se týče tuhosti spřažení tím, že došlo k nahrazení části spoje s výraznými koncentracemi sil. Výsledky výpočtů jsou zobrazeny formou L-D diagramů pro jednotlivé hloubky smykových ozubů. Zvlášť jsou též uvedeny posudky smykových ozubů z UHPC. Pro přehlednost jsou všechny výsledky prezentovány formou souhrnné tabulky 20. V tabulce jsou uvedeny maximální dosažené únosnosti F_{\max} a odhad velikosti síly, kdy končí lineární oblast diagramů F_{el} .

Tab. 20: Souhrnné výsledky pro různé varianty geometrie spoje a hloubky ozubu

Geometrie spoje	Hloubka ozubu					
	20 mm		30 mm		40 mm	
	F_{el} [kN]	F_{\max} [kN]	F_{el} [kN]	F_{\max} [kN]	F_{el} [kN]	F_{\max} [kN]
Původní varianta s trny	256	346	384	457	-	-
Přímý průběžný	268	314	324	464	475	577
Přímý zkrácený	268	350	324	492	475	578
Zaoblený	268	351	324	495	475	597
Elipsa	181	276	-	-	-	-
Dvojice oválů	142	288	-	-	-	-
Vlnovka silná	195	337	324	474	410	557
Vlnovka mírná	268	353	324	496	475	604
Zazubený	268	354	324	495	475	601
Smyk UHPC ozubu	890	1771	890	2042	890	1782

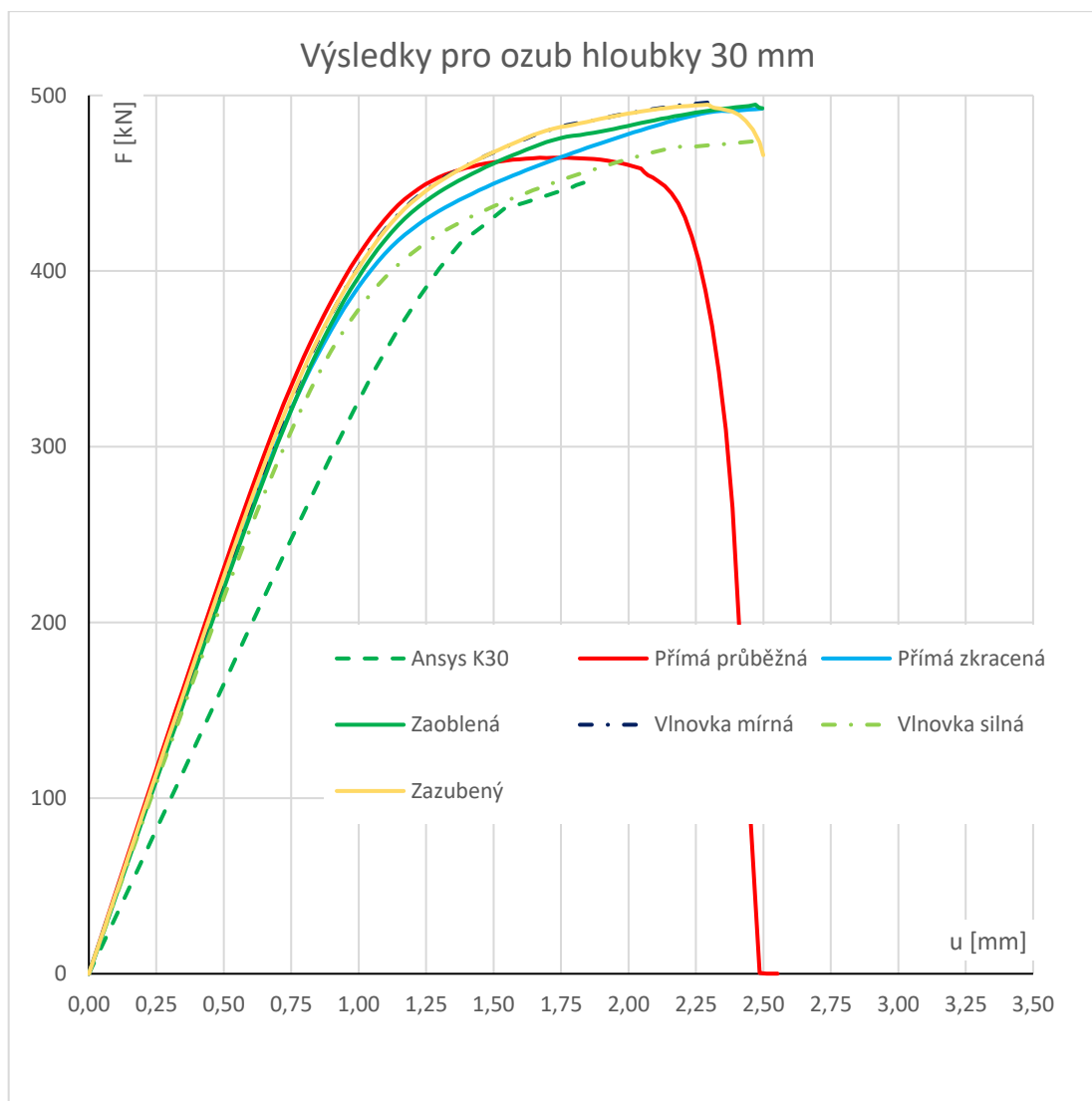
Z tabulky vyplývá, že únosnost smykového ozubu z UHPC je ve všech případech pro odhadnutou lineární oblast vyšší, než je celková únosnost smykového ozubu ve dřevěném nosníku. Nemělo by tedy docházet ke vzniku trhlin větších šířek. Zároveň lze říci, že chování smykových ozubů ve dřevěném nosníku je pro lineární oblast u většiny typů velmi podobné a ani jejich únosnost se nijak výrazně neodlišuje.



Obr. 89: Výsledky pro ozub hloubky 20 mm

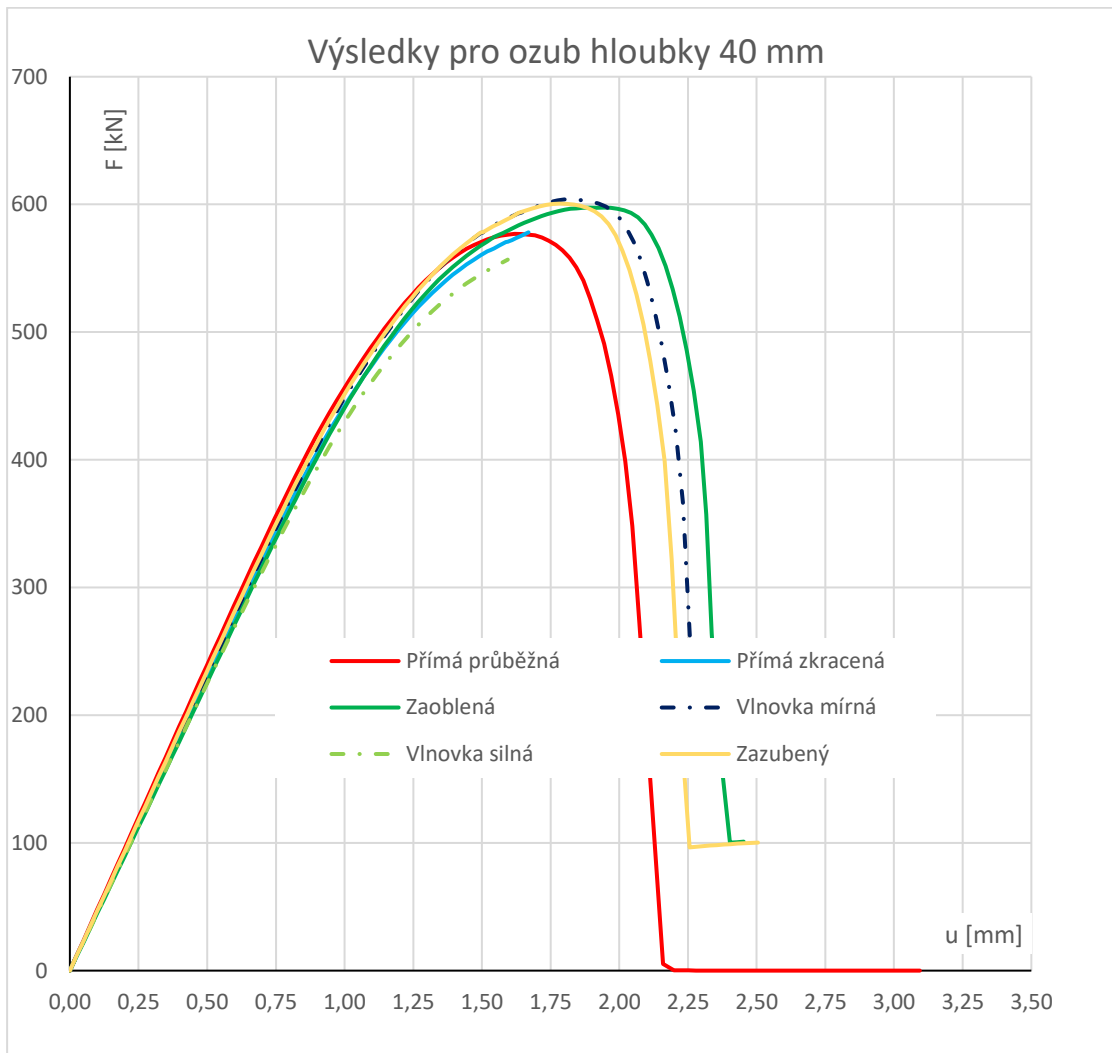
Na obrázku 89 jsou zobrazeny výsledky pro ozub hloubky 20 mm. Zde byly spočteny všechny varianty spoje uvedené na obrázku 82. Z grafu je patrné, že pro všechny nově počítané varianty vychází tuhost spoje lépe, než pro dříve počítané modely. Pro variantu s tvarem ozubu ve formě elipsy a dvojice oválů vychází tuhost spoje sice stále vyšší, než pro původní posudky modelů série K12, ale jejich lineární i celková únosnost klesá. Tento jev je způsoben vnesenými příčnými tahy. Pro ostatní typy získáváme únosnost v lineární oblasti víceméně totožnou, nejnižší dosahuje varianta s přímým zkráceným ozubem a je to zapříčiněno snížením velikosti kontaktní plochy. Celková únosnost je nepatrně nižší pro variantu geometrie s průběžným i zkráceným přímým ozubem. Ostatní varianty geometrie vykazují maximální únosnost podobnou. Její nárůst

oproti ostatním variantám přisuzuji jistému spolupůsobení ponechané části dřevěného průřezu, který má sloužit jako ztracené bednění, v tahu. Vzhledem ke špatným výsledkům jsem pro další hloubky smykového ozubu nepočítal s geometrií ve formě elipsy a dvojice oválů.



Obr. 90: Výsledky pro ozub hloubky 30 mm

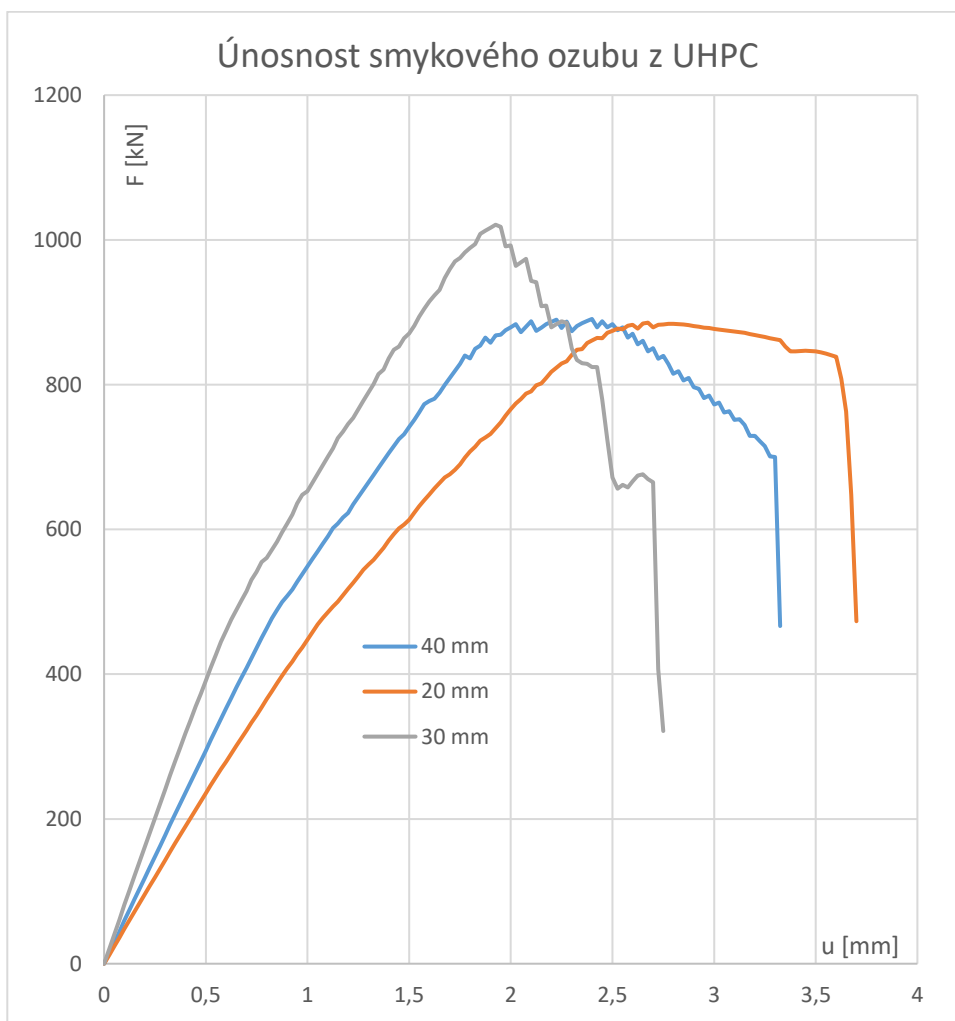
Na obrázku 90 jsou zobrazeny výsledky pro ozub hloubky 30 mm. Z grafu je patrné, že pro všechny nově počítané varianty vychází tuhost spoje lépe, než pro dříve počítané modely. Únosnost v lineární oblasti dosahují nově počítané varianty víceméně totožnou, nejnižší dosahuje varianta s výrazným zvlněním a je to zapříčiněno vnášením příčných tahových napětí. Celková únosnost je nepatrně nižší pro variantu geometrie s průběžným přímým ozubem. Ostatní varianty geometrie vykazují maximální únosnost podobnou, její nárůst oproti ostatním variantám přisuzuji jistému spolupůsobení ponechané části dřevěného průřezu, který má sloužit jako ztracené bednění, v tahu.



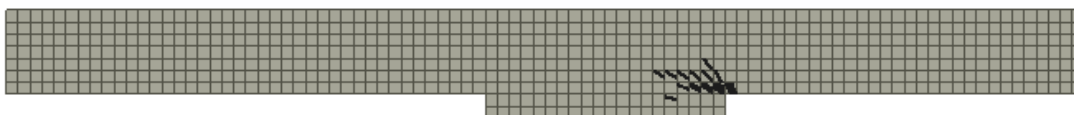
Obr. 91: Výsledky pro ozub hloubky 40 mm

Na obrázku 91 jsou zobrazeny výsledky pro ozub hloubky 40 mm. Pro tuto variantu hloubky smykového ozubu nejsou výsledky z dříve prováděných výpočtů. Únosnost dosahují všechny počítané varianty víceméně totožnou, nejnižší dosahuje varianta s výrazným zvlněním a je to zapříčiněno vnášením příčných tahových napětí. Celková únosnost je nepatrně nižší pro variantu geometrie s průběžným přímým ozubem. Ostatní varianty geometrie vykazují maximální únosnost podobnou, její nárůst oproti ostatním variantám přisuzují jistému spolupůsobení ponechané části dřevěného průřezu, který má sloužit jako ztracené bednění, v tahu.

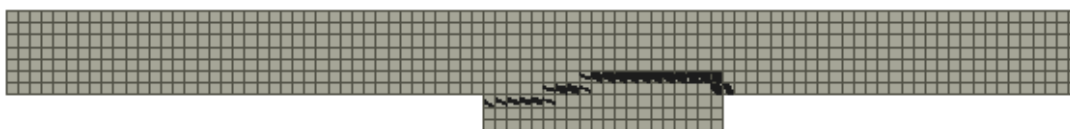
Výsledky posudku smykových ozubů je vidět na obrázku 92. Jedná se o výslednou únosnost jednoho ozubu, je tedy pro porovnání s výsledky simulací kompozitu potřeba násobit hodnotu dvěma. Na obrázcích 93-95 jsou pak znázorněny způsoby selhání smykových ozubů z UHPC.



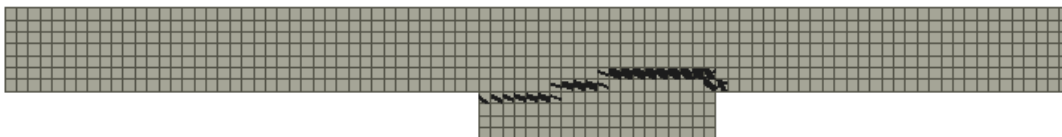
Obr. 92: L-D diagram se znázorněnou únosností smykových ozubů z UHPC



Obr. 93: Trhliny před selháním výpočtu pro ozub výšky 20 mm. Trhliny naznačují selhání betonu v tlaku.



Obr. 94: Trhliny před selháním výpočtu pro ozub výšky 30 mm. Trhliny naznačují selhání ve smyku.



Obr. 95: Trhliny před selháním výpočtu pro ozub výšky 40 mm. Trhliny naznačují selhání ve smyku.

Na obrázcích 92-95 jsou zobrazeny výsledky pro posouzení únosnosti smykového ozubu UHPC desky. Z průběhu L-D diagramů lze zjistit, že nejnižší tuhost měl ozub výšky 20 mm, který měl i podobnou únosnost jako ozub výšky 40 mm, který byl i o něco tužší. Nejlepších výsledků dosáhl ozub výšky 30 mm. Důvod nižší únosnosti ozubu výšky 20 mm je jeho menší plocha a tím i výraznější namáhání ozubu v tlaku, to vedlo k selhání tohoto ozubu v tlaku.

Ozub výšky 40 mm má oproti tomu kontaktní plochu dostatečně velikou, ale zase je zde větší excentricita působící síly, která zvyšuje namáhání spoje, který selhal na kombinaci smykové síly a ohybového momentu.

Ozub výšky 30 mm selhal stejným způsobem jako ozub výšky 40 mm, ale díky menší excentricitě působící síly dosáhl vyšší únosnosti. Při zvyšování výšky ozubu bude dále docházet k poklesu únosnosti a tuhosti.

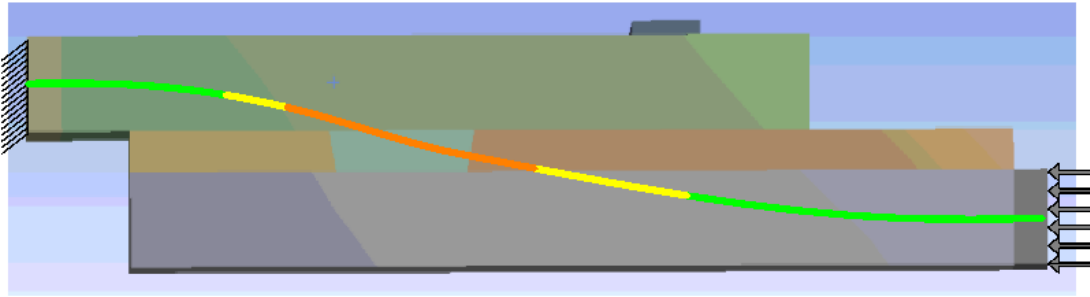
3.5.4 Závěrečné zhodnocení fungování optimalizovaného spoje

Optimalizovaný spoj dosahuje vyšší tuhosti než původní koncept spřažení dřeva a UHPC desky pomocí ocelové desky s trny. Mimo základní geometrie, kde je deska s trny nahrazena ozubem z UHPC přes celou šířku nosníku, jsem prověřil řadu dalších možných geometrických možností provedení smykového ozubu. Jejich zhotovení je nicméně podstatně technologicky náročnější.

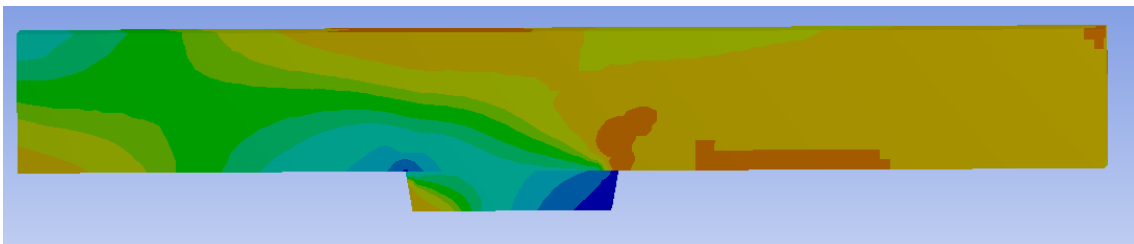
Konzultoval jsem tedy jejich potenciální možnost výroby s několika společnostmi, které se zabývají obráběním dřeva či jiných materiálů pomocí CNC strojů. Závěr byl takový, že navržené geometrie vytvořit lze, nicméně je na to zapotřebí přesný 5-osý stroj s jemným obráběcím nástavcem. Zde je potencionální problém, jelikož většina společností, které jsem oslovil, nemá možnost pracovat s velkými obrobky. Pak jsou tu přímo výrobci LLD nosníků, kteří dovedou opracovat nosník potřebných rozměrů, ale mají pouze hrubé stroje pracující ve 3 osách. Jistě na trhu je společnost, která disponuje obojím, ale je otázka, zda nepatrný nárůst únosnosti a zjednodušení výroby bude kompenzovat nárůst nákladů.

Abych demonstroval přínos optimalizovaného spoje, i co se týče statického chování, tak jsem provedl totožnou analýzu toku sil v průřezu. Ta je zobrazena na obrázcích 96-98. Je zde stejný princip, zelená čára představuje běžný tok sil v průřezu a její postupné zbarvení do tmavších odstínů, kdy červená značí silnou koncentraci sil, znázorňuje kumulaci vnitřních napětí.

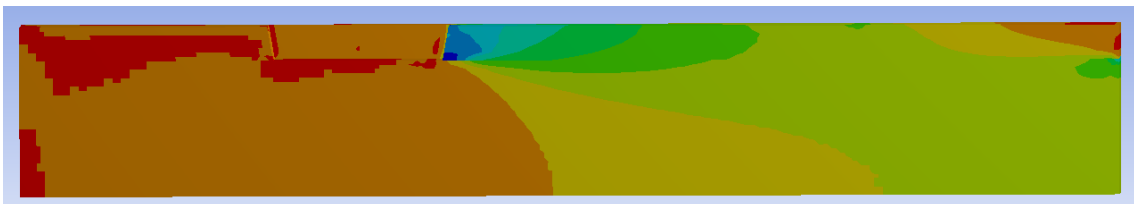
Následující obrázky poté představují vykreslení hlavních tlakových napětí na průřezu, kde tmavě modrá značí nejvyšší koncentrace sil, světle oranžová místa jsou s téměř nulovým napětím. Tmavě oranžová a červená místa pak představují působiště tahových napětí.



Obr. 96: Znázornění koncentrace sil na průřezu. Jak je z obrázku patrné, tak dochází pouze k mírné koncentraci napětí v místě smykového ozubu.



Obr. 97: Průběh hlavních tlakových napětí pro UHPC desku. Dochází zejména ke koncentraci napětí v místě čela smykového ozubu. Další menší lokace s koncentrací napětí je v protějším rohu, kde se koncentrují napětí vlivem nedostatečné délky pro zajištění plynulého toku sil do podpory.



Obr. 98: Průběh hlavních tlakových napětí pro dřevěný nosník. Je zde patrné, že dochází ke koncentraci napětí na čele smykového ozubu, zejména pak ve spodním rohu.

4 Parametrická studie

Rozhodl jsem se pro optimalizovaný spoj provést dvě parametrické studie s cílem získat podklady pro možnost navrhnout bezpečné spojení dřeva s UHPC deskou pomocí analytických metod, bez nutnosti vytvářet složité nelineární modely pro návrh dimenzí, ale pouze pro případné ověření finálního návrhu.

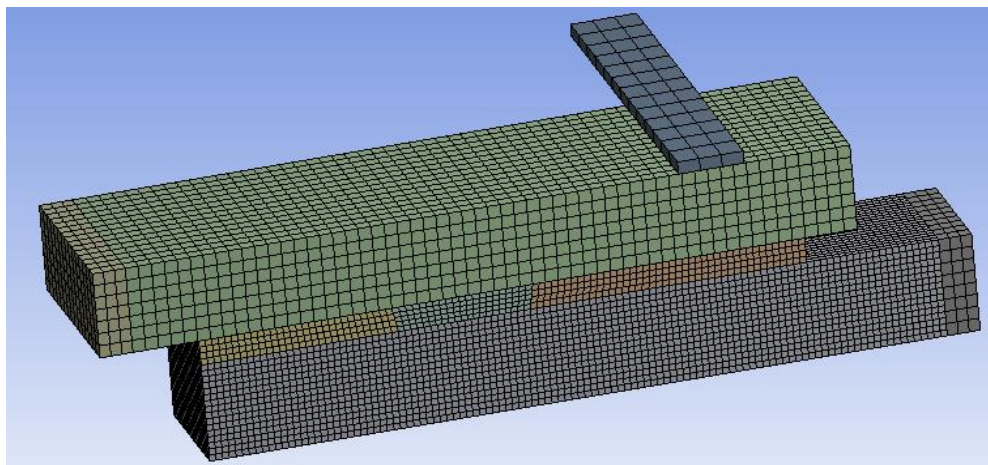
První studie se bude zabývat vlivem hloubky smykového ozubu a jeho délky na celkovou únosnost spoje. Druhá studie bude zaměřená na vliv teplotních zatížení (a jiných nesilových zatížení rozdílných pro použité materiály) na napjatost ve spoji a konstrukci. Jedním z důvodů pro tento krok je, dle mého názoru, nedostatečná kvalita normových postupů pro tento typ způsobu spřažení z hlediska určení únosnosti a tuhosti spoje.

Normové podklady pro určení teplotního zatížení pak chybí zcela pro mostní konstrukce tvořené spřažením dřeva a betonu obecně. Tento podnět jsem získal z práce ing. Holého [42], který provedl důkladnou analýzu dostupných analytických výpočetních metod pro spřažené dřevo-betonové konstrukce s ozuby. Eurokód 5 [43] například nijak neomezuje uvažovanou délku smykového ozubu, což může být velmi nebezpečné. Dle souběžně platné normy ČSN 731702 [82] je tato hodnota omezena na 8 násobek výšky smykového ozubu.

4.1 Vliv hloubky a délky smykového ozubu na únosnost

Tato parametrická studie bude sledovat vliv hloubky a délky smykového ozubu na únosnost spoje. Studii jsem provedl detailně pro hloubku ozubu (h_z) 20 mm, kdy jsem délku smykového ozubu (L_z) volil od 3 násobku hloubky ozubu až po jeho 15 násobek. Násobky byly po 0,5 – tedy změna byla 10 mm. Tyto násobky jsem volil z důvodu rovnoměrného nastavení sítě konečných prvků, která měla základní délku 5 mm. Délka smykového ozubu tedy začínala na 60 mm a končila na 300 mm. Výsledky pro ozub hloubky 20 mm jsem následně porovnal s výsledky pro hloubku ozubu 30 a 40 mm. Délka smykového ozubu byla násobkem jeho hloubky a to 8x a 15x.

Výpočetní model jsem získal jednoduchou úpravou výpočetního modelu získaného pro optimalizaci spoje, kdy jsem měnil délku modelu. Abych omezil namáhání spoje na jeho konci od stlačení čela dřevěného nosníku, tak jsem odsadil konec nosníku od konce smykového ozubu o 100 mm. Model je zobrazen na obrázku 99.



Obr. 99: Model se sítí použitý pro parametrickou studii. Model pro ozub délky 220 mm

Na závěr jsem provedl vyhodnocení získaných výsledků s cílem zjistit případnou závislost mezi výsledky a docílit výpočetního vztahu, který by dovedl určit únosnost a tuhost spoje pro případný návrh konstrukce.

4.1.1 Výsledky studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu

Výsledky studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu jsem se rozhodl rozdělit do tří skupin. Pro ty budou zobrazeny grafické výsledky. Souhrnné výsledky budou následně zobrazeny pouze formou tabulek. Rozdělení do tří skupin vychází ze získaných výsledků. První skupinu budou tvořit ozuby s velmi krátkým smykovým ozubem, na které je možné uvažovat průběh smykových napětí konstantní po celé délce a je tedy využita na 100%. Další skupina je přechodová a v rámci zvětšování délky smykového ozubu průměrné napětí ve smyku klesá, nicméně stále dochází k nárůstu tuhosti a únosnosti spoje. Třetí skupina je tvořena ozuby s velmi velkou délkou smykového ozubu, kdy už lze považovat únosnost a tuhost za maximální a při dalším zvyšování délky již nedochází k výrazným změnám v hodnotě únosnosti spoje.

Souhrnné výsledky pro ozub hloubky 20 mm jsou zobrazeny v tabulce 21. Délka smykového ozubu L_z a násobek hloubky ozubu h_z jsou dány geometrií modelu. Maximální dosažená síla F_{max} je odečtena ze získaných L-D diagramů. Tuhost spoje K_{ser} byla vypočtena pro lineární oblast L-D diagramů jako podíl F_i/u_i (příslušná únosnost lineární části diagramu dělená odpovídající hodnotou posunu). Průměrné smykové napětí τ_{av} je odečteno z programu a odpovídá podílu $F_{max}/(L_z \times \text{šířka prvku})$. Využití spoje je určeno jako podíl τ_{av}/σ_t (tečná pevnost spoje $\sigma_t = 5,5$ MPa).

Z tabulky je možné vyvodit několik závěrů. Jedním s nich je, že se zvětšováním délky ozubu nedochází od určitého bodu k lineárnímu nárůstu maximální dosažené síly F_{max} , trend poklesu nárůstu únosnosti spoje má spíše exponenciální charakter. V případě tuhosti spoje K_{ser} dochází při zvětšování délky smykového ozubu k jeho nárůstu, ten se zastavuje pro délku smykového ozubu 160 mm ($8 \times h_z$) a začíná klesat. Pokles je dle mého názoru způsoben spíše narůstající délkou modelu, který vykazuje celkově nižší tuhost a tuhost spoje tedy budu uvažovat po dosažení délky smykového ozubu $L_z \geq 8 \times h_z$, za konstantní. Průměrné smykové napětí τ_{av} a využití spoje má totožný trend vývoje jako maximální síla.

Na základě výsledků je tedy možné provést definici skupin ozubů. Rozdělení provedu dle dosaženého využití spoje. První skupinu ozubů s krátkou smykovou plochou tvoří prvky, kde je $L_z \leq 3 \times h_z$, pro tuto skupinu je využití spoje téměř 100%. Třetí skupinu s velmi dlouhou smykovou plochou představují prvky, kde je $L_z \geq 12 \times h_z$, pro tuto skupinu už nárůst únosnosti můžeme považovat za nulový. Druhou skupinu tedy představují mezilehlé hodnoty, kde $3 \times h_z < L_z < 12 \times h_z$, pro tuto skupinu dochází k pozvolnému poklesu využití spoje, avšak za stálého nárůstu únosnosti. Porovnávací výsledky pro ozuby hloubky 30 a 40 mm jsou uvedeny v tabulce 22.

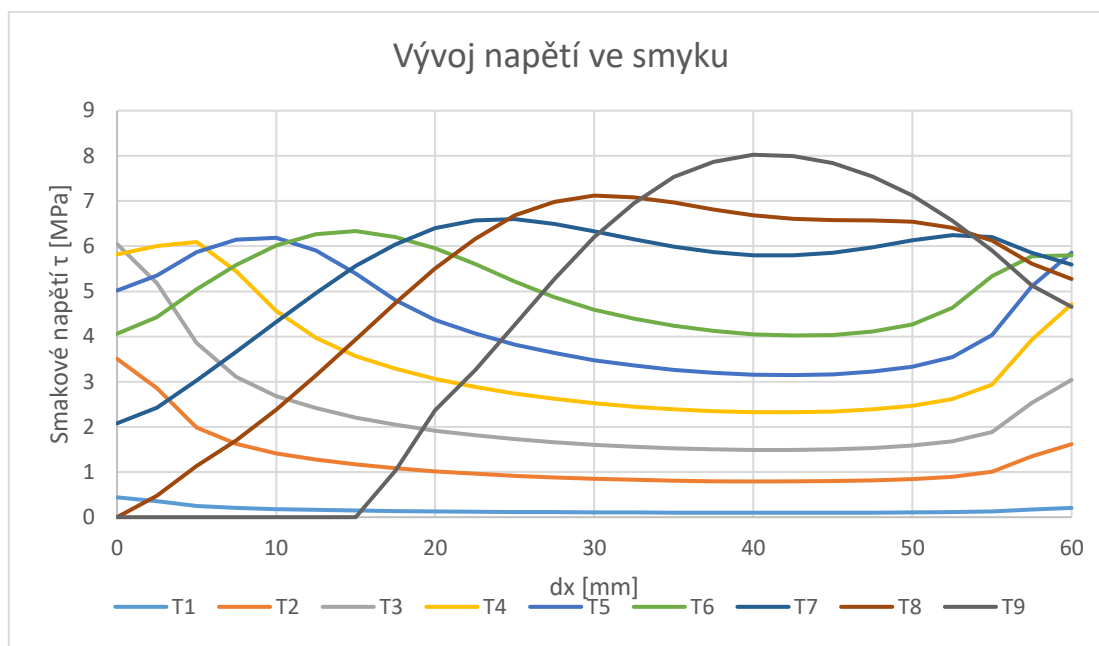
Z výsledků v tabulce 22 je patrné, že navyšování hloubky smykového ozubu při zachování definice délky smykového ozubu na základě násobku výšky ozubu vede k téměř lineárnímu chování při využití spoje. Lze tedy extrapolovat výsledky získané z analýzy chování spoje s ozubem hloubky 20 mm pro různě dlouhé smykové ozuby i pro spoje s odlišnou hloubkou ozubu.

Tab. 21: Tabulka souhrnných výsledků pro ozub hloubky 20 mm

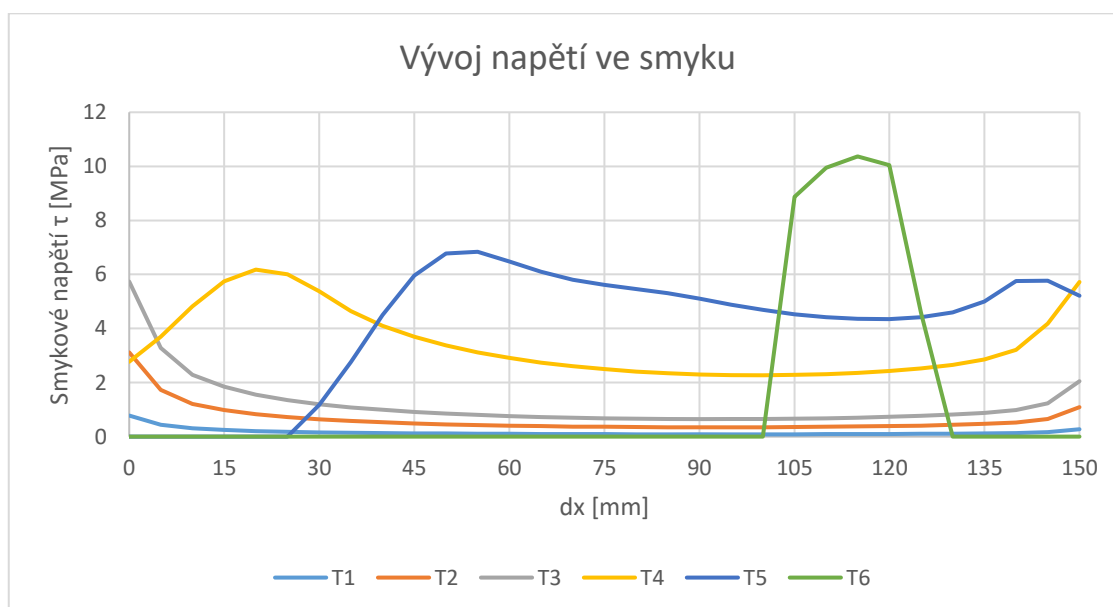
Délka smykového ozubu L_z [mm]	násobek h_z	Maximální dosažená síla F_{max} [kN]	Tuhost spoje K_{ser} [kN/mm]	Maximální prům. smyk. napětí τ_{av} [MPa]	Využití spoje [%]
40	2	90,50	303,89	5,66	100
50	2,5	108,54	326,98	5,43	98,7
60	3	130,63	248,13	5,44	99
70	3,5	147,46	365,72	5,27	95,8
80	4	163,14	381,20	5,10	92,7
90	4,5	177,56	394,61	4,93	89,7
100	5	190,68	405,69	4,77	86,7
110	5,5	202,72	415,63	4,61	83,8
120	6	213,84	424,69	4,46	81,0
130	6,5	224,12	432,93	4,31	78,4
140	7	233,63	440,40	4,17	75,9
150	7,5	242,38	447,32	4,04	73,4
160	8	250,44	453,73	3,91	71,1
170	8,5	257,32	452,75	3,78	68,8
180	9	263,28	451,30	3,66	66,5
190	9,5	268,80	449,31	3,54	64,3
200	10	273,41	446,99	3,42	62,1
210	10,5	277,78	444,34	3,31	60,1
220	11	281,31	441,42	3,20	58,1
230	11,5	284,49	438,30	3,09	56,2
240	12	301,2	435,15	3,14	57,0
250	12,5	302,97	431,68	3,03	55,1
260	13	304,47	428,06	2,93	53,2
300	15	319,9	396,54	2,67	48,5

Tab. 22: Porovnávací výsledky pro ozuby hloubky 20, 30 a 40 mm

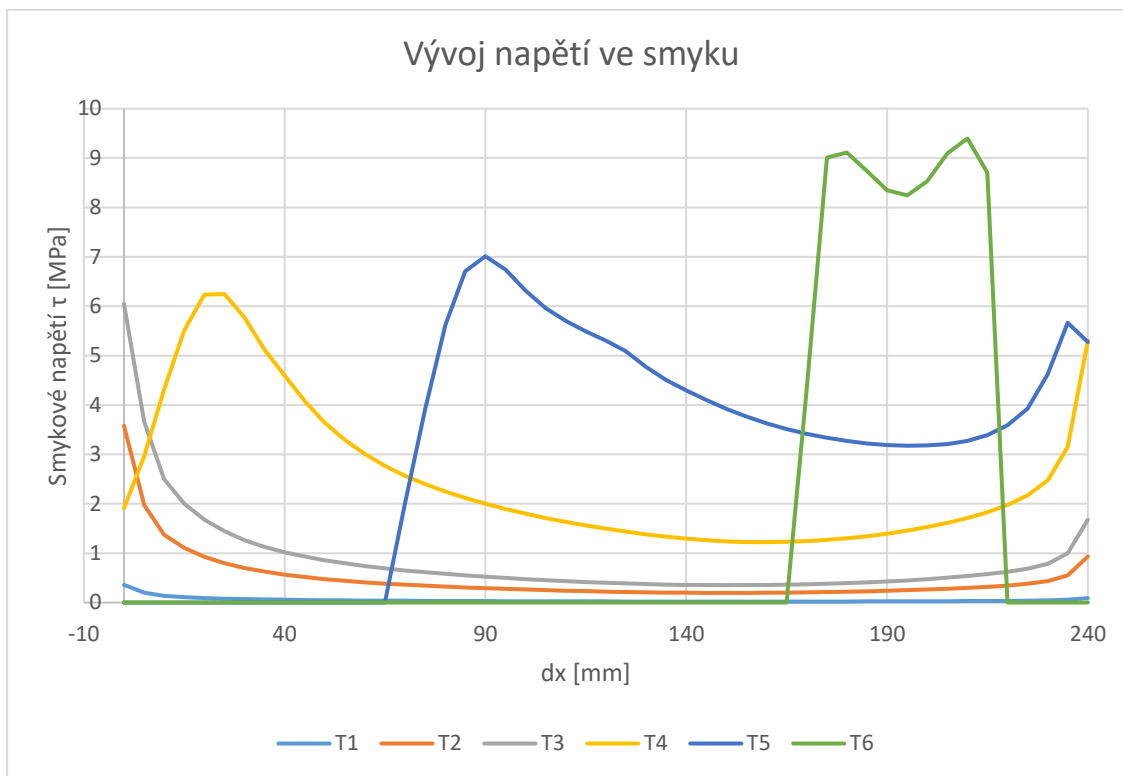
Hloubka ozubu h_z [mm]	20		30		40	
L_z [mm]	160	300	240	450	320	600
násobek h_z	8	15	8	15	8	15
F_{max} [kN]	260,08	319,9	374,49	473,08	511,68	646,08
K_{ser} [kN/mm]	442,42	396,45	453,72	373,92	427,16	314,84
τ_{av} [MPa]	4,06	2,67	3,90	2,63	4,00	2,69
využití [%]	73,9	48,5	70,9	47,8	72,7	48,9



Obr. 100: Graf průběhu smykového napětí pro ozub délky 60 mm. Křivka pro čas T1 představuje vývoj napětí na počátku zatěžování spoje, T2 je napětí přibližně v polovině lineární oblasti působení spoje, T3 představuje napětí na konci lineárního působení spoje, čas T4 reprezentuje vývoj na počátku plastického chování spoje, T5 je vývoj napětí přibližně ve třetině vzestupné větve plastické části diagramu, T6 reprezentuje vývoj napětí ve fázi plastického chování spoje, kdy je minimální napětí ve smyku na nejvyšší hodnotě, čas T7 představuje napětí při dosažení maximální únosnosti spoje, čas T8 reprezentuje okamžik, kdy dochází k delaminaci na čele smykového ozubu a čas T9 je vývoj napětí před selháním spoje.



Obr. 101: Graf průběhu smykového napětí pro ozub délky 150 mm. Křivka pro čas T1 představuje vývoj napětí na počátku zatěžování spoje, T2 je napětí přibližně v polovině lineární oblasti působení spoje, T3 představuje napětí na konci lineárního působení spoje, čas T4 reprezentuje vývoj napětí ve fázi plastického chování spoje, kdy je minimální napětí ve smyku na nejvyšší hodnotě, čas T5 představuje napětí při dosažení maximální únosnosti spoje – zde je patrné, že již dochází na části spoje k delaminaci, čas T6 je vývoj napětí těsně před selháním spoje.



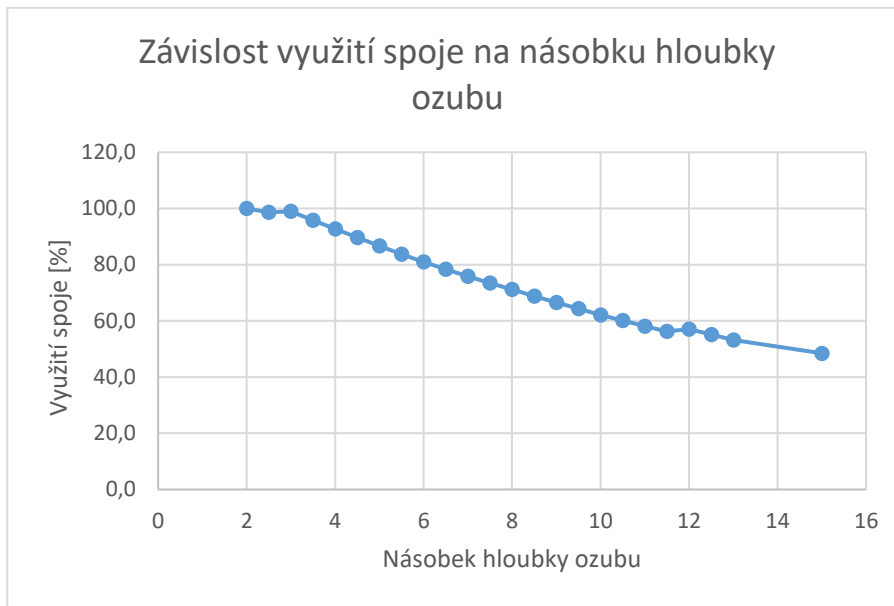
Obr. 102: Graf průběhu smykového napětí pro ozub délky 240 mm. Křivka pro čas T1 představuje vývoj napětí na počátku zatěžování spoje, T2 je napětí přibližně v polovině lineární oblasti působení spoje, T3 představuje napětí na konci lineárního působení spoje, čas T4 reprezentuje vývoj napětí ve fázi plastického chování spoje, kdy je minimální napětí ve smyku na nejvyšší hodnotě, čas T5 představuje napětí při dosažení maximální únosnosti spoje – zde je patrné, že již dochází na části spoje k delaminaci, čas T6 je vývoj napětí těsně před selháním spoje.

4.1.2 Vyhodnocení výsledků

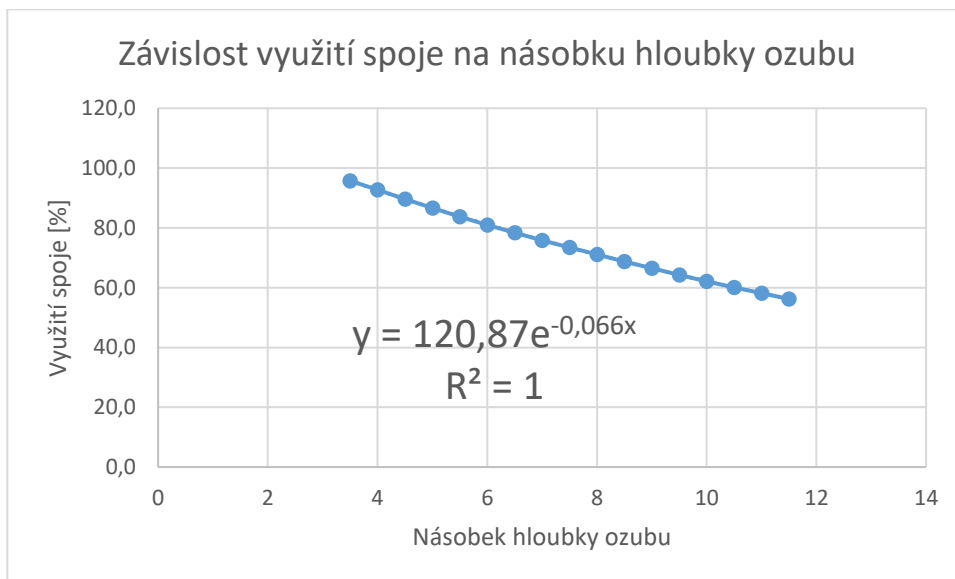
Pro vyhodnocení výsledků únosnosti jsem se rozhodl provést jejich srovnání v rámci relativních veličin – procentuální využití spoje vůči násobkům hloubky smykového ozubu h_z . To mi umožnilo získat relativní vztah, který by měl umožnit srovnání výsledků pro různé hloubky smykových ozubů. Jak je patrné z tabulky 22, tak je využití spoje téměř lineární pro totožné násobky hloubky smykového ozubu. Výsledný graf pro závislost využití spoje na násobku hloubky smykového ozubu je na obrázku 103.

Pro získání spojnice trendu jsem graf omezil na výsledky druhé skupiny prvků, která je specifikována v předchozí kapitole a odpovídá $3 \times h_z < L_z < 12 \times h_z$. Pro tuto skupinu jsem vložím spojnice trendu získal exponenciální rovnici pro určení procentuálního využití spoje (7), kde x je násobek hloubky smykového ozubu.

$$y = 120,87 \cdot e^{-0,066x} \quad (7)$$



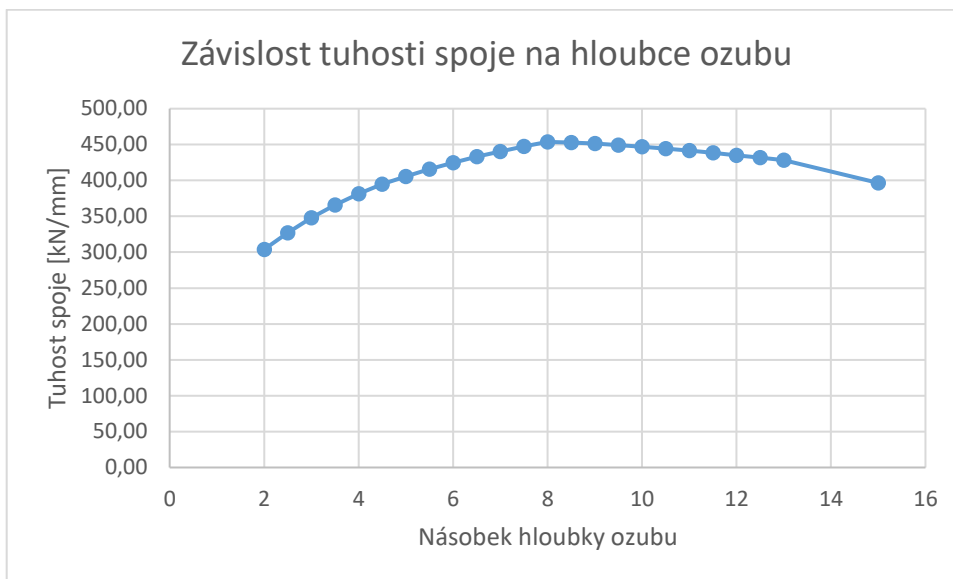
Obr. 103: Graf závislosti využití spoje na násobku hloubky smykového ozubu pro všechny provedené výpočty ozubu hloubky 20 mm.



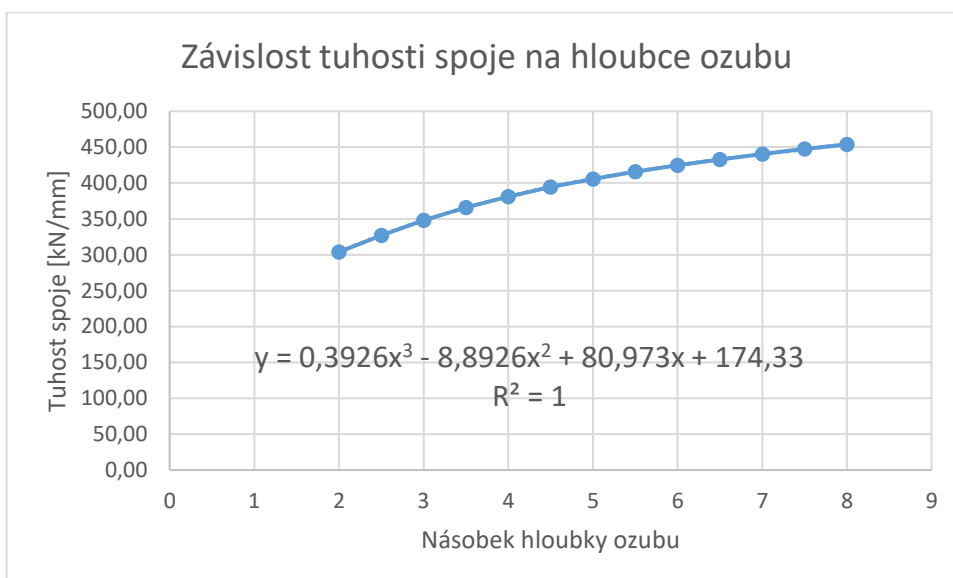
Obr. 104: Graf závislosti využití spoje na násobku hloubky smykového ozubu pro výsledky skupiny 2 ozubů hloubky 20 mm.

Obdobný postup jsem volil pro vyhodnocení tuhosti spoje. Tuhost spoje jsem opět porovnal s násobky hloubky smykového ozubu. Graf pro celkový soubor výsledků získaných na posudcích modelů s hloubkou smykového ozubu 20 mm je na obrázku 105. Jak jsem uvedl v předchozí kapitole, pokles tuhosti po překročení 8 násobku hloubky ozubu je způsoben nárůstem délky modelu. Proto budu od této úrovně považovat tuhost spoje za konstantní a závislost pro výpočet tuhosti spoje odvodím pro prvky s $L_z < 8 \times h_z$. Po proložení této řady spojnicí trendu jsem získal kubickou rovnici pro určení tuhosti spoje (8).

$$y = 0,3926 \cdot x^3 - 8,8926 \cdot x^2 + 80,973 \cdot x + 174,33 \quad (8)$$



Obr. 105: Graf závislosti tuhosti spoje na násobku hloubky smykového ozubu pro všechny provedené výpočty ozubu hloubky 20 mm.



Obr. 106: Graf závislosti tuhosti spoje na násobku hloubky smykového ozubu pro výsledky se vzestupnou tendencí tuhosti u ozubů hloubky 20 mm.

Pro ověření správnosti výsledků jsem provedl výpočet využití spoje a jeho tuhosti pro výsledky porovnávacích výpočtů mezi ozuby hloubky 20, 30 a 40 mm se smykovou plochou délky pro 8 a 15 násobek hloubky ozubu uvedené v tabulce 23. Hodnoty získané nelineárním výpočtem jsou označeny F_{\max} a K_{ser} . Hodnoty získané výpočtem pomocí odvozených rovnic jsou označeny F_{cal} a K_{cal} . Dále je v tabulce uvedeno procentuální porovnání odchylky mezi oběma hodnotami.

Z výsledků vyplývá, že pro data s 8 násobkem hloubky smykového ozubu dává odvozená rovnice pro určení únosnosti téměř přesnou hodnotu. Pro prvky s násobkem $15 \times h_z$ je rozdíl nepatrně vyšší, jelikož se pro délku smykového ozubu větší než $12 \times h_z$ uvažuje únosnost jako konstantní hodnota. Uvažovat nižší únosnost je dle mého názoru přijatelné, jelikož je toto řešení na straně bezpečnosti.

Tab. 23: Ověření pro odvozené rovnice

Hloubka ozubu h_z [mm]	20		30		40	
L_z [mm]	160	300	240	450	320	600
násobek h_z	8	15	8	15	8	15
F_{max} [kN]	260,08	319,9	374,49	473,08	511,68	646,08
F_{cal} [kN]	250,93	289,06	376,40	448,14	501,86	597,52
Odchylka [%]	-3,64	-10,67	0,50	-5,57	-1,96	-8,13
K_{ser} [kN/mm]	442,42	396,45	453,72	373,92	427,16	314,84
K_{cal} [kN/mm]	453,97	453,97	453,97	453,97	453,97	453,97
Odchylka [%]	2,55	12,67	0,06	17,63	5,91	30,65

Porovnáme-li data ohledně tuhosti spoje, tak pro data s 8 násobkem hloubky smykového ozubu dává odvozená rovnice pro určení tuhosti spoje přesnou hodnotu pro ozub hloubky 20 a 30 mm, pro ozub hloubky 40 mm se již nepatrně projevuje vliv, který snižoval tuhost u dlouhých smykových ozubů při nelineárních výpočtech. Pro prvky s násobkem $15 \times h_z$ je rozdíl nepatrně vyšší, jelikož se pro délku smykového ozubu větší než $8 \times h_z$ uvažuje tuhost jako konstantní hodnota. Větší rozdíl v tuhosti byl očekávaný výsledek a odpovídá závěrům, které jsem učinil na základě výsledků nelineární analýzy.

4.1.3 Odvození charakteristických hodnot

Pro odvození charakteristické hodnoty únosnosti spoje a jeho tuhosti jsem se rozhodl využít postup definovaný v normě ČSN P ENV 1995 [83] z roku 1993, která je již nahrazena novější normou, v té však tento postup již není uveden. Postup je založen na znalosti průměrné hodnoty sledované charakteristiky $m_{(x)}$, směrodatné odchylce $v_{(x)}$ a počtu vzorků n . Za průměrnou hodnotu $m_{(x)}$ lze považovat výsledky získané výpočetní analýzou. Směrodatnou odchylku $v_{(x)}$ připouští norma odhadnout, nesmí ale být nižší než 0,1.

Já jsem se pro odhad směrodatné odchylky rozhodl vyhodnotit provedené experimentální testy, u kterých došlo k selhání porušením dřeva. Jednalo se o série K12, K13, K20, K31, D10 a D11. Každá série byla po třech vzorcích – celkem jsem tedy získal vzorek o 18 kusech. Pro vyhodnocení jsem použil pouze hodnoty maximálních dosažených sil. Výsledky statistického vyhodnocení jsou v tabulce 24. Jelikož hodnota výsledného průměrného variačního koeficientu je menší než 0,1, rozhodl jsem se pro odvození využít dvojnásobnou hodnotu. Výpočet charakteristické hodnoty X_k se provádí dle rovnice (9). Do rovnice vstupuje součinitel k_1 a průměrná hodnota počítané charakteristiky $m_{(x)}$. Součinitel k_1 se počítá dle rovnice (10) a do výpočtu vstupuje variační koeficient $v_{(x)}$ a počet vzorků n . Dosazením hodnot, které jsem získal vyhodnocením zkoušek, mi vychází součinitel $k_1 = 0,743$.

$$X_k = k_1 \cdot m_{(x)} \quad (9)$$

$$k_1 = \exp \left[- \left(2,645 + \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \cdot v_{(x)} + 0,15 \right] \quad (10)$$

Tab. 24: Vyhodnocení průměrného variačního koeficientu

Série/vzorek	K12	K13	K20	K31	D10	D11
1 [kN]	371	422	195	509	350	335
2 [kN]	372	395	255	601	389	282
3 [kN]	352	389	245	562	340	336
Průměr [kN]	365,00	402,00	231,67	557,33	359,67	317,67
Odchylka [kN]	11,27	17,58	32,15	46,18	25,89	30,89
Variační koeficient [-]	0,031	0,044	0,139	0,083	0,072	0,097
Průměrný variační koeficient [-]						0,078

Pro výpočet charakteristické únosnosti spoje ve smyku $F_{v,k}$ [N] tedy můžeme využít vztah (11), kde k_1 je součinitel pro určení charakteristické hodnoty získaný rovnicí (10), A_v [mm²] představuje plochu smykové roviny a je možné ji určit rovnicí (12), součinitel k_2 což je součinitel využití smykového ozubu a je možné ho určit rovnicí (13), pevnost kontaktu ve smyku σ_T [MPa] – konstantní hodnota 5,5 MPa. V dalších rovnicích vystupují hodnoty: hloubka smykového ozubu h_z [mm], šířka nosníku b [mm], délka smykového ozubu L_z [mm] a násobek hloubky smykového ozubu x určeného dle rovnice (14).

$$F_{v,k} = k_1 \cdot A_v \cdot k_2 \cdot \sigma_T \quad (11)$$

$$A_v = L_z \cdot b \quad \text{pro } L_z \leq 12 \cdot h_z; \quad A_v = 12 \cdot h_z \cdot b \quad \text{pro } L_z > 12 \cdot h_z \quad (12)$$

$$k_2 = \begin{cases} 1 & \text{pro } L_z \leq 3 \cdot h_z \\ 1,2087 \cdot e^{-0,066 \cdot x} & \text{pro } 3 \cdot h_z < L_z \leq 12 \cdot h_z \\ 1,2087 \cdot e^{-0,792} & \text{pro } L_z > 12 \cdot h_z \end{cases} \quad (13)$$

$$x = \frac{L_z}{h_z} \quad (14)$$

Obdobně jsem postupoval při odvození charakteristické tuhosti spoje (modulu prokluzu spoje) $K_{ser,k}$ [kN/mm], pro který je možné využít vztah (15). Do vztahu vstupují totožné proměnné jako v předchozím případě - k_1 je součinitel pro určení charakteristické hodnoty získaný rovnicí (10), délka smykového ozubu L_z [mm], hloubka smykového ozubu h_z [mm] a násobek hloubky smykového ozubu x určeného dle rovnice (14).

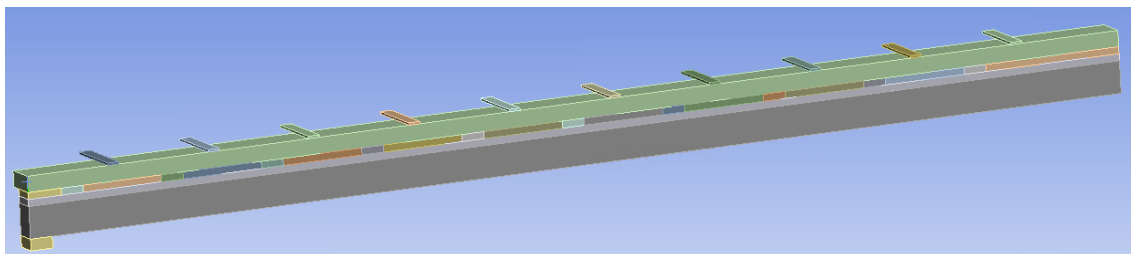
$$K_{ser,k} = \begin{cases} k_1 \cdot (0,3926 \cdot x^3 - 8,8926 \cdot x^2 + 80,973 \cdot x + 174,33) & \text{pro } L_z \leq 8 \cdot h_z \\ k_1 \cdot (0,3926 \cdot 8^3 - 8,8926 \cdot 8^2 + 80,973 \cdot 8 + 174,33) & \text{pro } L_z > 8 \cdot h_z \end{cases} \quad (15)$$

Návrhové hodnoty je následně možné získat dle normových postupů s využitím součinitelů spolehlivosti materiálu γ_M a součinitele trvání zatížení a třídy provozu k_{mod} .

4.2 Parametrická studie vlivu teploty

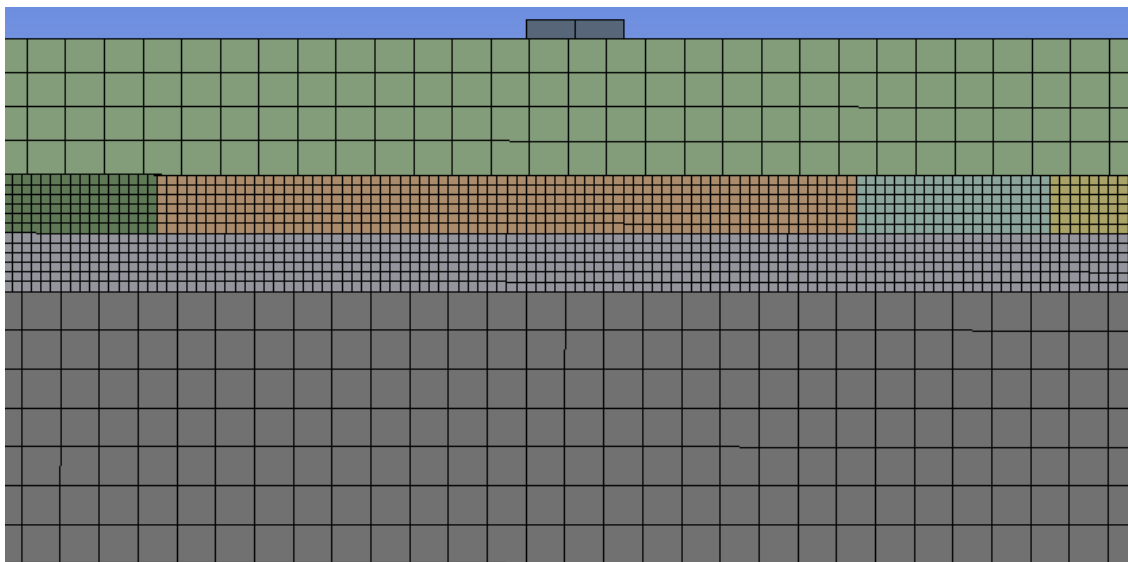
Pro posouzení vlivu teploty na napjatost ve spoji spřažené konstrukce a případnému nárůstu napětí na dřevěném nosníku jsem vytvořil model čtvrtiny spřaženého T průřezu. Ten tvořil dřevěný nosník délky 4-10 m (délka se měnila po 1 m) a UHPC deska. Smykové ozuby hloubky 30 mm byly rozmístěny rovnoměrně ve vzdálenosti 460 mm (osová vzdálenost), délka smykového ozubu tedy byla 12 násobek hloubky ozubu. Výška dřevěného nosníku byla volena pro 3 různé tuhosti. Základní model pracoval s nosníkem výšky 200 mm. Další výšky byly voleny tak, aby jejich moment setrvačnosti k ose vyšší tuhosti byl 2x a 4x větší. Nosník s dvojnásobnou hodnotou měl výšku 252 mm, ten se čtyřnásobnou hodnotou měl výšku 317,5 mm. UHPC deska měla ve všech případech totožnou výšku a to 70 mm. Model pro nosník délky 10 m a výšky 200 mm je zobrazen na obrázku 107.

Nosník výšky 200 mm by byl vhodný pro lávku délky 5m, nosník výšky 252 mm pro lávku délky 6 m a nosník výšky 317,5 mm, pak pro lávku délky 7m. Pro případ lávky délky 10m by byl potřeba nosník výšky cca 450 mm.



Obr. 107: Model použitý pro parametrickou studii teploty. Na obrázku model pro nosník výšky 200 mm a délky 10 m.

Aby bylo možné spočítat i ty největší nosníky v rozumném časovém intervalu, bylo nutné oproti předchozím výpočtům změnit nastavení rozměrů sítě konečných prvků. Jelikož jsem chtěl zachovat jemnější síť v místě kontaktu, tak jsem dřevěný nosník rozdělil po výšce do 3 částí. V oblasti spoje jsem tedy mohl zachovat velikost sítě 5 mm, zbytek dřevěného průřezu a UHPC deska měly poté síť o velikost 20 mm. Detailní pohled na síť konečných prvků je na obrázku 108.



Obr. 108: Detailní pohled na použitou síť konečných prvků

Délková teplotní roztažnost dřeva byla použita dle EC5 [43] s hodnotou $\alpha_T = 5,4 \text{ E}^{-6} \text{ K}^{-1}$ pro podélný směr, $\alpha_T = 34,1 \text{ E}^{-5} \text{ K}^{-1}$ pro ostatní směry. Rozhodující je však hodnota délkové teplotní roztažnosti ve směru vláken, která je velmi nízká. Pro UHPC desku byla použita hodnota dle metodiky 1 KÚ [16] $\alpha_T = 11 \text{ E}^{-6} \text{ K}^{-1}$. Jedná se tedy přibližně o dvojnásobnou hodnotu oproti délkové teplotní roztažnosti dřeva.

Teplotní zatížení ve výpočtu jsem uvažoval v základním schématu rovnoměrně pro všechny prvky s hodnotou $\Delta T = \pm 30^\circ\text{C}$, pro nosník výšky 252 mm délky 6 m jsem následně ještě ověřil rozdíl v případě, kdy betonová deska je navíc ještě o dalších $+15^\circ\text{C}$ teplejší než dřevěný nosník, či o -8°C chladnější. Teplotní zatížení jsem rozdělil tak, že bylo ve výchozím nastavení rozděleno do 300 kroků a v případě dobré konvergence mohlo být použito 150 kroků – přírůstek teploty byl tedy 0,1 či 0,2 $^\circ\text{C}$ na jeden krok.

Při ohřívání konstrukce dochází k navýšení namáhání použitého spřažení, působící síla se tedy přičítá k účinkům od silových zatížení konstrukce. Při ohřívání zároveň dochází k tvorbě záporného momentu a má tedy tendenci snižovat namáhání dřevěného trámu i UHPC desky. Pro ohřev konstrukce budu tedy primárně sledovat nárůst napětí ve spoji.

Při ochlazování konstrukce dochází k opačnému efektu – spřahovací systém je odlehčován, ale navyšuje se namáhání UHPC desky a dřevěného nosníku. Pro ochlazení konstrukce budu tedy mimo změnu napětí ve spřažení též sledovat nárůst tahových napětí na dřevěném nosníku. Jelikož mi Ansys umožňuje na spoji sledovat přímo průměrnou hodnotu napětí, mohu na základě její znalosti určit působící sílu ve spoji, bez nutnosti složité integrace skutečného průběhu napětí ve spoji.

4.2.1 Výsledky vlivu teplotních zatížení

Výsledky vlivu teplotních zatížení jsem se rozhodl prezentovat formou tabulkových výstupů společně se znázorněním vývoje sledovaných veličin pomocí grafů. V grafech sledovanou veličinu porovnávám s vypočtenou relativní ohybovou tuhostí k [Nmm^{-1}] dle rovnice (16). V rovnici je použit modul pružnosti dřeva E [MPa], moment setrvačnosti dřevěného průřezu I_y [mm^4] a délka nosníku L [mm]. Tato interpretace grafů

lépe vystihuje vliv klesající tuhosti nosníku s rostoucí délkou. V tabulkách 25-30 bude tučně zvýrazněno, pro jaký rozpon byl daný nosník navržen. Ve všech případech vychází maximální namáhání kontaktu od oteplení pro tuto hodnotu a nosníky mají pro tyto délky podobnou relativní ohybovou tuhost.

$$k = \frac{E \cdot I_y}{L^3} \quad (16)$$

Tab. 25: Výsledky pro rovnoměrné oteplení modelu s nosníkem výšky 200 mm

Nosník výšky 200 mm - oteplení rovnoměrné					
Délka [m]	kontakt 1		kontakt 2		k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]	τ [MPa]	F [kN]	
4	0,438	13,13	0,175	12,62	19,79
5	0,449	13,46	0,183	13,19	10,13
6	0,438	13,15	0,180	12,97	5,86
7	0,435	13,06	0,179	12,86	3,69
8	0,433	13,00	0,178	12,78	2,47
9	0,432	12,97	0,177	12,74	1,74
10	0,431	12,92	0,177	12,71	1,27

Tab. 26: Výsledky pro rovnoměrné oteplení modelu s nosníkem výšky 252 mm

Nosník výšky 252 mm - oteplení rovnoměrné					
Délka [m]	kontakt 1		kontakt 2		k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]	τ [MPa]	F [kN]	
4	0,441	16,67	0,179	12,89	39,59
5	0,464	17,53	0,194	13,97	20,27
6	0,466	17,61	0,197	14,19	11,73
7	0,464	17,52	0,196	14,13	7,39
8	0,461	17,42	0,195	14,01	4,95
9	0,459	17,35	0,193	13,93	3,48
10	0,457	17,26	0,193	13,88	2,53

Tab. 27: Výsledky pro rovnoměrné oteplení modelu s nosníkem výšky 317,5 mm

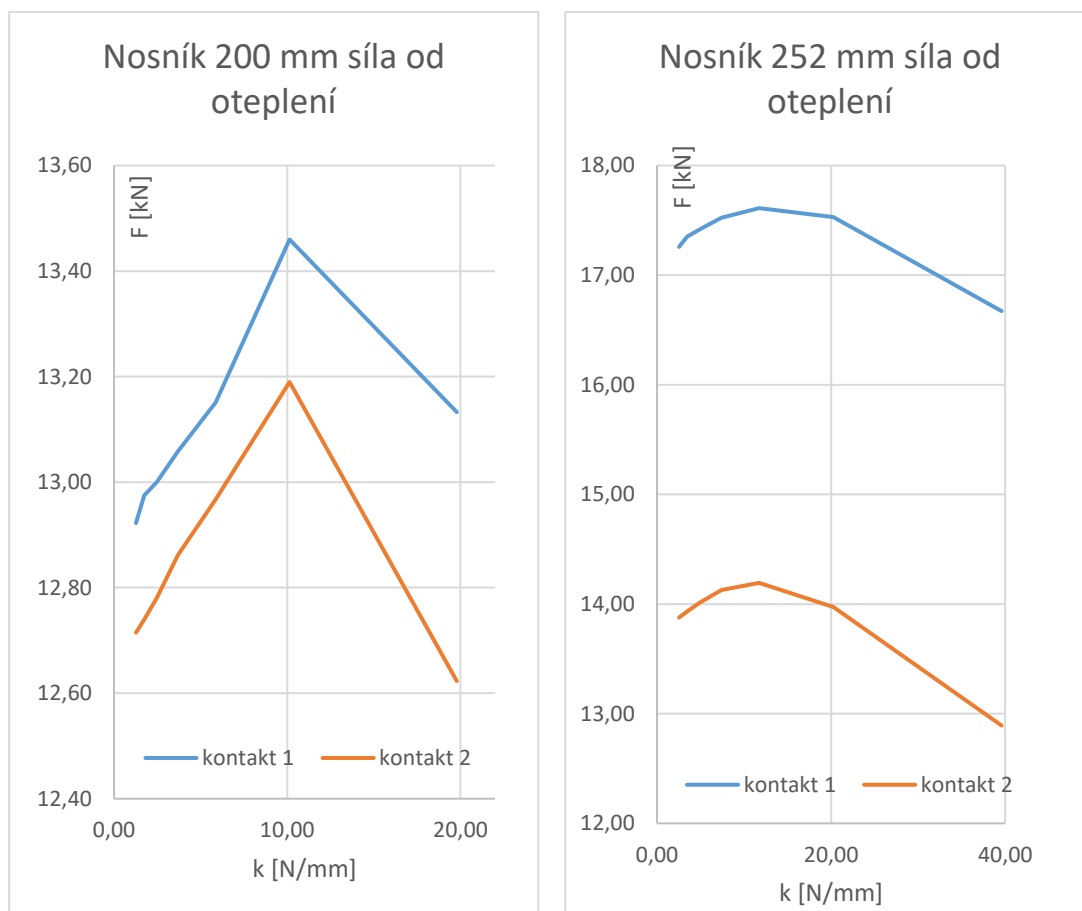
Nosník výšky 317,5 mm - oteplení rovnoměrné					
Délka [m]	kontakt 1		kontakt 2		k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]	τ [MPa]	F [kN]	
4	0,448	16,95	0,186	13,36	79,18
5	0,479	18,09	0,206	14,84	40,54
6	0,488	18,43	0,214	15,39	23,46
7	0,488	18,46	0,215	15,48	14,77
8	0,486	18,38	0,214	15,39	9,90
9	0,484	18,29	0,212	15,28	6,95
10	0,481	18,17	0,211	15,18	5,07

Z tabulek 25-27 pro rovnoměrné oteplení nosníků je patrné, že do dosažení délky, na kterou byl nosník navržen, dochází k mírnému nárůstu síly ve spoji. Maximální síly dosahuje vždy pro danou délku nosníku, přičemž relativní tuhost v ohybu se pohybuje v rozsahu 10,13 – 14,77, což je poměrně dobrá shoda. Pokud by byly nosníky navrženy na přesně totožné využití pro danou délku, tak věřím, že by relativní tuhost byla totožná.

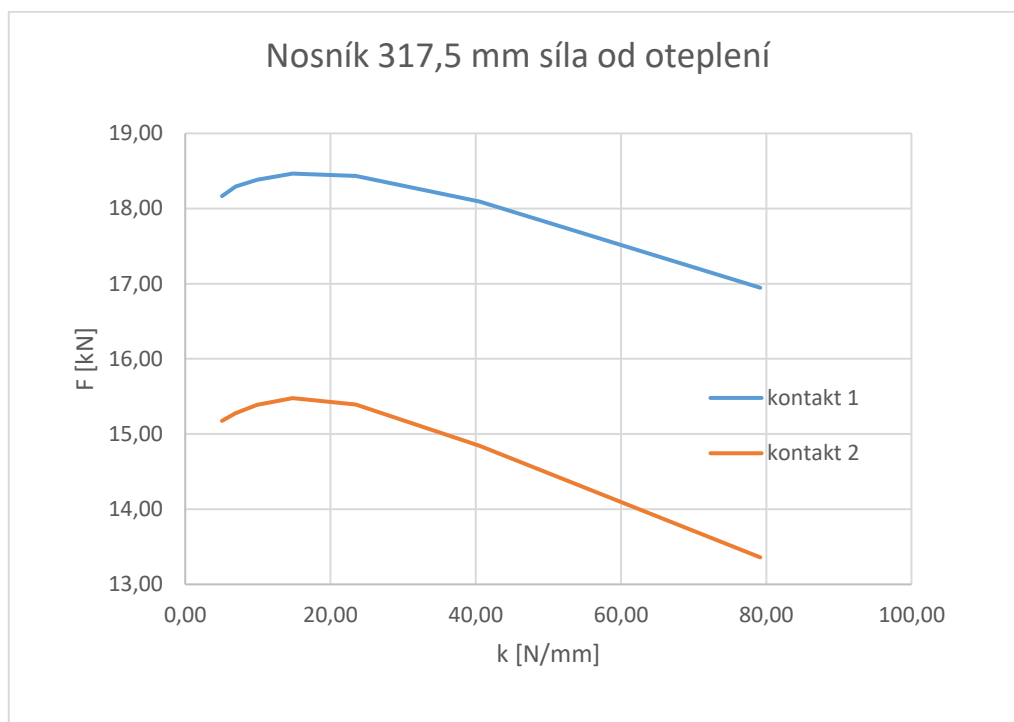
Po překročení této délky již ve všech případech velikost síly opět klesá. Průběh síly v závislosti na relativní ohybové tuhosti je zobrazen na obrázcích 109-110. Z grafů je patrné, že vývoj sil je velmi podobný. Nicméně nepodařilo se mi najít souvislost mezi jednotlivými výškami nosníku, pro určení univerzální závislosti. Provedl jsem tedy pouze porovnání maximálně dosažených hodnot v závislosti na délce nosníku a vložil lineární spojnicí trendu.

Získal jsem tím rovnici pro určení velikosti síly F [kN] pro krajní spoj (17), kde L [m] představuje délku konstrukce. Za předpokladu, že bude použit nosník odpovídající svou tuhostí pro návrh na dané rozpětí, mělo by být možné alespoň přibližným odhadem určit velikost síly působící na spoj od oteplení o rovnoměrnou hodnotu pro celou konstrukci o velikosti $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. V případě uvažování jiné rovnoměrné teploty je možné lineární interpolací upravit velikost síly. Pro přidání nerovnoměrné složky oteplení pro UHPC desku o dalších 15°C postačí výslednou hodnotu získanou rovnicí vynásobit 2.

$$F = 2,5 \cdot L + 1,51 \quad (17)$$



Obr. 109: Průběh síly pro modely s nosníkem 200 mm (vlevo) a 252 mm (napravo) vysokým od rovnoměrného oteplení o $\Delta T = +30^\circ\text{C}$



Obr. 110: Průběh síly pro model s nosníkem 317,5 mm vysokým od rovnoměrného oteplení o $\Delta T = +30^{\circ}\text{C}$

Tab. 28: Výsledky pro rovnoměrné ochlazení modelu s nosníkem výšky 200 mm

Nosník výšky 200 mm - ochlazení rovnoměrné				
Délka [m]	kontakt 1		Spodní vlákna nosníku σ [MPa]	k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]		
4	0,078	5,63	0,629	19,79
5	0,078	5,59	0,635	10,13
6	0,078	5,59	0,637	5,86
7	0,078	5,59	0,638	3,69
8	0,078	5,59	0,640	2,47
9	0,078	5,59	0,641	1,74
10	0,078	5,59	0,642	1,27

Tab. 29: Výsledky pro rovnoměrné ochlazení modelu s nosníkem výšky 252 mm

Nosník výšky 252 mm - ochlazení rovnoměrné				
Délka [m]	kontakt 1		Spodní vlákna nosníku σ [MPa]	k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]		
4	0,100	7,17	0,644	39,59
5	0,099	7,14	0,647	20,27
6	0,099	7,14	0,648	11,73
7	0,099	7,14	0,650	7,39
8	0,099	7,14	0,651	4,95
9	0,099	7,14	0,652	3,48
10	0,099	7,13	0,652	2,53

Tab. 30: Výsledky pro rovnoměrné ochlazení modelu s nosníkem výšky 317,5 mm

Nosník výšky 252 mm - ochlazení rovnoměrné				
Délka [m]	kontakt 1		Spodní vlákna nosníku σ [MPa]	k [N/mm]
	τ [MPa]	F [kN]		
4	0,124	8,96	0,639	79,18
5	0,124	8,93	0,642	40,54
6	0,124	8,93	0,644	23,46
7	0,124	8,93	0,645	14,77
8	0,124	8,93	0,646	9,90
9	0,124	8,93	0,646	6,95
10	0,124	8,93	0,647	5,07

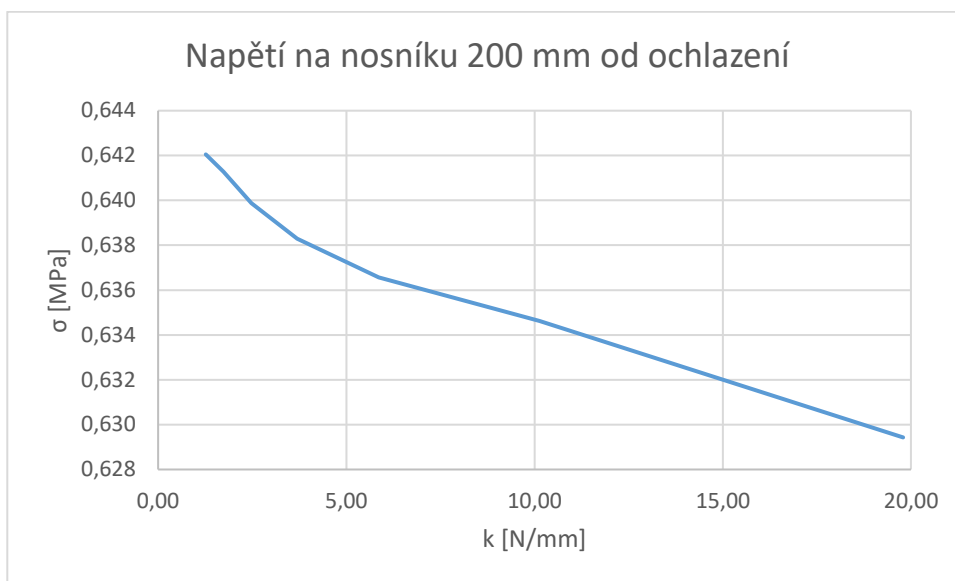
Z tabulek 28-30 pro rovnoměrné ochlazení nosníků je patrné, že napětí i velikost sil pro kontakt je téměř konstantní, zvyšuje se pouze velikost s tím, jak roste výška nosníku. Na druhou stranu, napětí v dřevěném nosníku téměř neustále s rostoucí délkou prvku stoupá, ale má téměř stejnou hodnotu bez ohledu na výšku nosníku. Průběh napětí ve spodních vláknech nosníků v závislosti na relativní ohybové tuhosti je zobrazen na obrázcích 111-113. Z grafů je patrné, že vývoj napětí je velmi podobný – do dosažení určité kritické hodnoty relativní tuhosti je průběh lineární a po jejím překročení má spíše exponenciální charakter. Graf vývoje síly v kontaktu jsem vzhledem ke konstantnímu průběhu nevytvářel.

Pro získání přibližného odhadu působící síly v kontaktu a velikosti napětí ve spodních vláknech dřevěného nosníku jsem postupoval shodně, jako v případě ohřátí konstrukce. Provedl jsem tedy pouze porovnání maximálně dosažených hodnot v závislosti na délce nosníku a vložil lineární spojnici trendu.

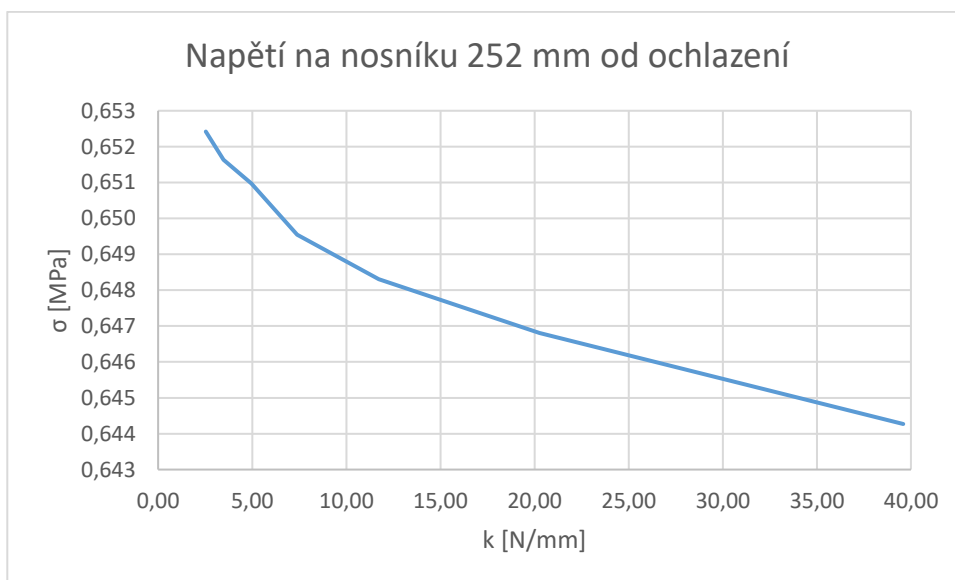
Získal jsem tím rovnici pro určení velikosti síly F [kN] pro krajní spoj (18) a rovnici pro určení velikosti tahových napětí v krajních vláknech nosníku σ [MPa] (19), kde v obou případech L [m] představuje délku konstrukce. Za předpokladu, že bude použit nosník odpovídající svou tuhostí pro návrh na dané rozpětí, mělo by být opět možné alespoň přibližným odhadem určit velikost síly působící na spoj a velikost napětí ve spodních vláknech dřevěného nosníku od ochlazení o rovnoměrnou hodnotu pro celou konstrukci o velikosti $\Delta T = -30^\circ\text{C}$. V případě uvažování jiné rovnoměrné teploty je opět možné lineární interpolací upravit velikost síly. Pro přidání nerovnoměrné složky ochlazení pro UHPC desku o dalších -8°C postačí výslednou hodnotu získanou rovnicí vynásobit 1,5.

$$F = 1,68 \cdot L - 2,8 \quad (18)$$

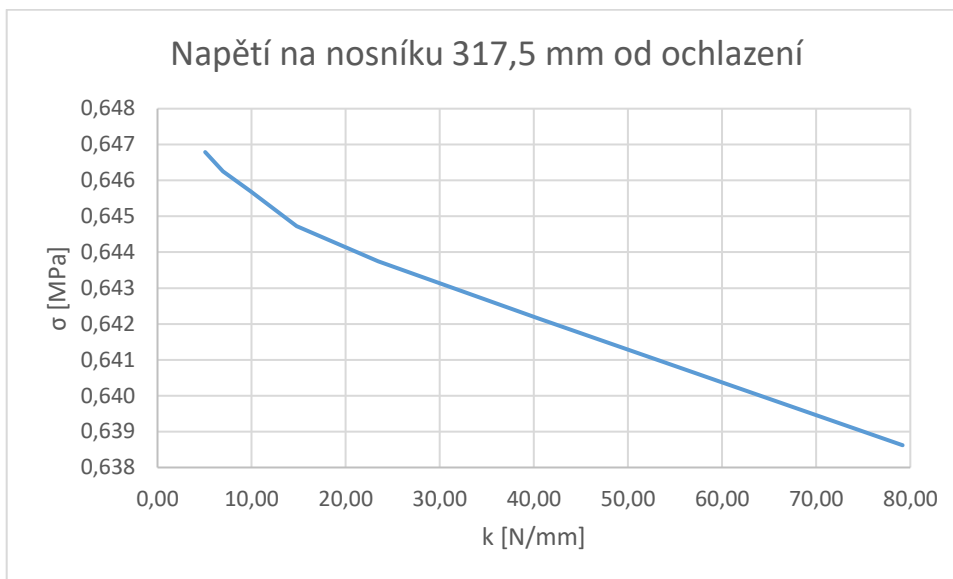
$$\sigma = 0,005 \cdot L + 0,6127 \quad (19)$$



Obr. 111: Průběh napětí ve spodních vláknech nosníku vysokého 200 mm od rovnoměrného ochlazení o $\Delta T = -30$ °C.



Obr. 112: Průběh napětí ve spodních vláknech nosníku vysokého 252 mm od rovnoměrného ochlazení o $\Delta T = -30$ °C.



Obr. 113: Průběh napětí ve spodních vláknech nosníku vysokého 317,5 mm od rovnoměrného ochlazení o $\Delta T = -30$ °C.

Výsledky studie vývoje teploty neprokázaly přímou lineární souvislost mezi velikostí působících vnitřních sil vznikajících v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti použitých materiálů. Je zde sice zjevná závislost tuhosti dřevěného nosníku v ohybu v případě, kdy je konstrukce zahřívána, ale vnitřní síly jsou ovlivňovány též tuhostí spoje a tuhostí UHPC desky. Jejich kombinace dosahuje odlišných efektivních tuhostí i přesto, že se tuhost dřevěného nosníku mění lineárním způsobem. Zjištěné hodnoty působících sil a napětí jsou nicméně podstatně nižší, než by odpovídaly klasické lineární analýze, kterou by byl vyhodnocen pouze rozdíl v délkové roztažnosti obou materiálů.

Pokusil jsem se tedy určit alespoň zjednodušené vztahy založené na délce nosníku pro získání odhadu vnitřních sil. Síly od oteplení konstrukce budou rozhodující při posouzení smykových sil ve spoji, jelikož se sčítají s těmi od silových zatížení. Ochlazení je pak rozhodující pro posouzení napětí ve spodních vláknech dřevěného nosníku.

5 Zhodnocení výsledků

V této kapitole provedu zhodnocení provedených výpočtů a zhodnocení získaných výsledků. V rámci zhodnocení se budu věnovat kladům a záporům původní i optimalizované geometrie spoje, získaným výsledkům parametrických studií, které jsem prováděl. Uvedu též postřehy získané v rámci řešení prováděných analýz ohledně možností budoucího vývoje a výzkumu v oblasti spřažených dřevo-UHPC konstrukcí.

5.1 Validace materiálových modelů a spřahovacího systému

Jako první součást své disertační práce jsem se věnoval validaci materiálových modelů a spřahovacího systému, které představovaly úvodní cíl mé práce. Jako vstupní data pro tyto analýzy jsem využil výsledky získané v rámci řešení grantového projektu TH02020730. Validoval jsem materiálový model UHPC v programech Atena a Ansys, materiálový model oceli, dřeva a predikované smykové plochy (kontaktu) v programu Ansys. Na základě těchto dat jsem následně mohl provést validaci chování celého spřahovacího systému tak, jak byl v rámci grantového projektu navržen. Na závěr jsem provedl rozbor působení spřahovacího systému, abych mohl provést jeho optimalizaci.

5.1.1 Výsledky a diskuse

Jako první jsem se věnoval validaci materiálového modelu UHPC. Jako podklad jsem využil výsledky ze zkoušek na deskových tělesech zkoušených ve 4-bodovém ohybu. Zkoušena byla řada desek s tloušťkami od 40 do 80 mm, nicméně některé výsledky vybočovaly a byly ovlivněny produkcí desek. Rozhodl jsem tedy pracovat pouze s daty pro desky tl. 60 a 80 mm. Měl jsem tedy k dispozici výsledky pro 4 tělesa tl. 60 mm a 3 tělesa tl. 80 mm.

Validaci UHPC jsem provedl nejprve v softwaru Atena, který se specializuje na simulaci kvazi-křehkých materiálů. Díky dostupným pokročilým materiálovým modelům z rodiny CC3D Cementitious 2 (mnou používaný byl typ User, který umožňuje uživatelsky definovat závislost chování materiálu v tlaku, tahu i smyku) jsem byl schopen (na základě výsledků získaných v rámci grantového projektu) validovat materiálový model pro desky tl. 60 a 80 mm s velmi dobrou shodou výsledků. Jelikož se desky těchto tloušťek chovaly odlišně zejména s ohledem na duktilitu, bylo nutné pro každou tloušťku desky připravit odlišný materiálový model. Ty se mezi sebou v zásadě lišily pouze definicí chování materiálu v tahu, kde pro silnější desku byly hodnoty redukovány cca o 25%. V lineární oblasti působení materiálu bylo definování materiálového modelu shodné. Měnit závislost chování v tlaku a smyku nebylo nutné.

Následně jsem se věnoval validaci UHPC i v programu Ansys, kde v počátku mé práce nebyl k dispozici žádný materiálový model, který by dovedl zachytit unikátní vlastnosti, které UHPC má oproti běžnému betonu. Zejména zpevnění materiálu v tahu. Byl jsem tedy nucen použít pouze běžnou multilineární plasticitu, která sice vedla k získání velmi dobré shody, jak pro desku tl. 60 mm, tak pro tu s tl. 80 mm, nicméně materiálový model nebylo možné použít pro jiný způsob zatěžování, než v ohybu – materiálový model tímto získal totožné chování v tlaku i tahu.

Později byl přidán do programu materiálový model s názvem Coupled Damage Plastic Microplane, který již byl schopen zachytit tahové zpevnění materiálu a následné změkčení po překročení kritické síly. Nicméně ani tento model není pro modelování

UHPC příliš vhodný, jelikož je ovlivňována pevnost materiálu v tahu i tlaku skrze jeden součinitel zpevnění materiálu. Jistou cestou, jak toto obejít, by mohlo být využití modulu, který Ansys nabízí, jenž umožňuje modelování mikrostruktury kompozitních materiálů definováním zvlášť vyztužení vláknů a zvlášť matrice.

Tento postup je nicméně poměrně složitý, zejména v případě, kdy pracujeme s náhodně orientovanými drátky. Nejsem si jist, zda by bylo možné matici přiřadit potřebné materiálové vlastnosti křehkého betonu a plastické zpevnění pro drátky z oceli. Modul je určen především pro polymerní matrice a jeho princip je v nahrazení složitého fungování kompozitu zprůměrováním jeho vlastností na homogenní materiál.

Pro validaci oceli, dřeva a s ním souvisejícího kontaktu na smykové ploše jsem měl k dispozici pouze protlačovací zkoušky celého kompozitu, který tvořil dřevěný nosník s vyfrézovaným smykovým ozubem, ocelová deska s navařenými trny, která byla k nosníku připevněna dvojicí vrutů a desky z UHPC. Kompozit má poměrně složitý způsob rozdělení vnitřních sil a výsledná tuhost je dána souběhem všech dílčích částí.

Abych tedy byl schopen provést validaci použitých materiálů, musel jsem nejprve provést počáteční odhad jejich vlastností na zjednodušených modelech. Experimentální ověřování spřahovacího systému bylo nastaveno tak, aby se prověřily různé způsoby selhání – selhání v oblasti dřeva či ocelových smykových trnů. Nejsilnější součástí byla deska z UHPC, toho jsem využil pro zjednodušení systému a rozhodl se použít pro UHPC desku lineární materiálový model.

Materiálové vlastnosti oceli a modul pružnosti lineárního modelu UHPC jsem tedy ověřoval na základě výsledků experimentu, který byl navržen na selhání smykových trnů ve střihu – jednalo se o prvky série K11. Zde bylo možné soustředit se na odvození pevnosti oceli pro použitý bilineární materiálový model a modulu pružnosti betonu bez výrazného vlivu dřevěného nosníku. Po získání těchto hodnot jsem se mohl soustředit na získání materiálových vlastností dřeva a kontaktu.

Použitý materiálový model pro dřevo byl anizotropní materiálový model s plasticitou a kontakt byl řešen pomocí Cohezive Zone materiálového (CZM) modelu pro kontakty. Validace těchto materiálových modelů proběhla vůči výsledkům sérií K12 a D10, které se lišily způsobem vnášení zatížení při experimentu. U série K12 byla roznášecí deska přes celé čelo dřevěného trámu a bránila smykovému ozubu v čistém usmyknutí. Ten se místo toho o roznášecí desku rozepřel. Jelikož byla takto řešena i většina ostatních experimentů, které mohly být použity pro ověření výsledků výpočtů, byl jsem nucen toto uspořádání respektovat. Ve výsledku jsem však získal dvě fungující varianty nastavení pro kontakt, které se ukázaly jako funkční. Nejnáročnější na validaci materiálových modelů bylo získat jak shodu v tuhosti a únosnosti systému spřažení, tak zejména ve způsobu, jakým došlo k selhání.

V rámci validace materiálových modelů jsem získal dobrý přehled o fungování systému spřažení. Dovedl jsem tak identifikovat, jaké má nevýhody, na které bych se rád zaměřil v rámci optimalizace. Únosnost systému jsem považoval za dostatečnou, soustředil jsem se tedy zejména na problém, který dle mého názoru přináší použití ocelové desky s trny. Tam dochází k výrazným koncentracím napětí. Je to dále součást, která klade velmi vysoké nároky na přesnost výroby a tím, že je téměř zcela zabudována, není zde možná kontrola případné koroze v kritickém místě svarů spřahovacích trnů.

Při validaci materiálových vlastností jsem narazil na řadu problémů, které by asi bylo možné vyřešit tím, že bych se soustředil na jednotlivé materiály postupně. Bylo by

tedy vhodnější provést zkoušku ocelových prvků v tahu a pro validaci použít přesnější multilineární materiálový model. Obdobně by bylo vhodnější mít k dispozici detailní materiálové testy dřeva v tlaku, tahu, smyku a ohybu, nicméně to je pro lepené lamelové dřevo velmi nákladné z důvodu nutnosti zachování alespoň nějakých minimálních rozměrů daných způsobem výroby. Do budoucna by tedy bylo vhodné provést aktualizaci použitých materiálových modelů vůči experimentům na dostatečně reprezentativním počtu prvků a ověřovat materiálové vlastnosti postupně.

Abych rozšířil základnu dostupných dat, nechal jsem provést alespoň doplňkové zkoušky dřevěných hranolů ve smyku, jelikož se jedná o klíčový prvek pro návrh mnou optimalizovaného spoje. Vzhledem k velké variabilitě vlastností dřeva, jsem neočekával přesnou shodu výsledků. Výsledky experimentu byly bohužel ovlivněny skladbou lepeného dřeva, kdy jedna z krajních lamel měla výrazně odlišnou stavbu dřeva, než ta protější a všechny vzorky selhaly jednostranným smykem.

Výsledky se tedy daly porovnat s předpokládanou únosností jen velmi orientačně, jelikož únosnost neporušené strany byla neznámá. Výsledná únosnost byla vždy udávána jako součet únosnosti dvou smykových ozubů a v tomto případě jsem získal pro jeden z nich pouze částečné informace a porovnání výsledků bylo tedy neúplné.

Pro budoucí experimentální program je výsledek provedených testů jistým ponaučením. Vzhledem k velkému rozptylu vlastností dřeva je nutné provádět experimenty na dostatečném počtu zkušebních těles, která budou připravena ideálně z materiálu pocházejícím z více zdrojů. To by mělo zajistit větší rozptyl výsledků, které nebudou ovlivněny jednou vadou materiálu.

5.2 Optimalizace způsobu spřažení

Dalším krokem v mé disertační práci byl návrh optimalizace způsobu spřažení. Jako řešení mě napadlo využít místo ocelové desky s navařenými trny ozub tvořený přímo UHPC a využít tak jeho výborné vlastnosti, mezi které patří vysoká únosnost ve smyku. V rámci ověření svého návrhu jsem provedl posouzení smykových ozubů z UHPC v softwaru Atena. V softwaru Ansys jsem poté provedl řadu výpočtů, které jsem porovnal s výsledky pro původní uspořádání spoje. Optimalizace spoje byla hlavním cílem mé disertační práce.

5.2.1 Výsledky a diskuse

Mé řešení zjištěných nedostatků použitého způsobu spřažení s ocelovou deskou s navařenými trny spočívalo v její náhradě za ozub z UHPC. Smykové ozuby se používaly i dříve, nicméně v případě použití běžného betonu bylo nutné navrhnout velmi hustý rastr, jelikož únosnost nevyztuženého prostého betonu ve smyku je výrazně nižší. Rozptýlená výztuž v podobě drátků zvyšuje pevnost ve smyku UHPC zhruba desetinásobně. To vede k lepšímu využití dřeva i UHPC a není nutné smykové ozuby dále vyztužovat klasickou výztuží.

Navržený spoj je použitelný jak pro prefabrikovanou výstavbu, tak i pro monolitický způsob. Vzniká pouze problém s nutností provést bednění boků smykového ozubu. Tento problém jsem chtěl vyřešit ponecháním části nosníku a vyfrézovat pouze menší ozub. To sebou však nese snížení kontaktní plochy mezi UHPC a dřevem a tím i snížení únosnosti.

Zkoušel jsem tedy různé geometrické tvary pro kontaktní plochu s cílem ji zvětšit. Zde je třeba dát si pozor zejména na vnášení příčných tahů, jelikož pevnost dřeva ve směru kolmém na směr růstu vláken je mnohem nižší a hrozí rozštípnutí prvku. Některé z navržených variant – zejména zaoblená čelní plocha s velkým poloměrem vycházely velmi slibně a došlo i k překonání původní únosnosti spoje. Nicméně je otázka, zda se zvýšené náklady na výrobu takového spoje vyplatí, jelikož nárůst únosnosti nebyl až tak dramatický a zejména v lineární oblasti působení spoje byla únosnost téměř identická. Je zde totiž problém s rozměry dřevěných prvků používaných pro konstrukce lávek a mostů a prostorovými kapacitami výrobců, kdy ti, kteří mají dostatečně přesné stroje, také často mají striktní rozměrové omezení pro výrobu.

Pro ověření únosnosti smykových ozubů z UHPC jsem vytvořil v programu Atena 3 modely pro různé výšky smykového ozubu. Výsledkem všech výpočtů bylo potvrzení dostatečné únosnosti smykových ozubů z UHPC. Pro nejnižší ozub výšky 20 mm došlo k selhání betonu v tlaku vzhledem k jeho malé ploše. Ozuby výšky 30 a 40 mm již selhaly kombinací smyku a ohybového momentu. U ozubu výšky 40 mm byla již excentricita působící síly větší a nejvyšší únosnost tedy prokázal ozub výšky 30 mm. Očekávám, že s rostoucí výškou ozubu by i nadále klesala únosnost ozubu z UHPC až do bodu, kdy by byla menší, než únosnost dřevěné části, kde naopak s rostoucí hloubkou únosnost roste (za předpokladu dodržení dostatečného rozestupu mezi ozuby).

V čem optimalizovaný spoj vyniká, je výrazné navýšení tuhosti spoje, kterého dosahuje díky odstranění výrazně namáhaných detailů v oblasti smykových trnů, kde vznikala výrazná přetvoření už pro poměrně nízké namáhání spoje.

Dle platných norem je pro spřažené konstrukce požadavek, aby spoj přenesl minimálně 10% své smykové únosnosti v tahu. Za tímto účelem bude nutné spoje vytvořené pomocí smykových ozubů doplnit o prvky, které by tahové síly mohly přenést – například speciální vruty pro spřažené dřevo-betonové konstrukce. Ty díky nízké tuhosti budou mít minimální příspěvek k únosnosti ve smyku a budou moci být navrženy na přenos tahových sil.

Pro další vývoj tohoto spoje by bylo vhodné provést experimentální ověření samostatného UHPC na smyk krátké konzoly tvořící smykový ozub a následně provést protlačovací zkoušku optimalizovaného způsobu spřažení. U té by bylo vhodné ověřit i některé z navržených geometrií kontaktní plochy mezi UHPC a dřevěným ozubem, za předpokladu nalezení vhodného partnera na jejich zhotovení. Dále by bylo vhodné ověřit možnost využití chemicky modifikovaného dřeva, které má velkou výhodu v redukci náchylnosti dřeva na změny vlhkosti a výrazně by mohlo prodloužit životnost dřevěné části spřažené konstrukce.

5.3 Parametrická studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu na únosnost

Po dokončení optimalizace jsem se mohl věnovat provedení parametrické studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu na únosnost a tuhost spřažení. Cílem této analýzy bylo získat vztah pro určení únosnosti a tuhosti spoje bez nutnosti provedení nelineárního výpočtu, který je časově náročný a zároveň dosáhnout možnosti vytvořit ze získaných hodnot charakteristickou únosnost a tuhost spoje použitelnou ve statickém

výpočtu. Parametrickou studii jsem prováděl na optimalizovaném systému spřažení v programu Ansys.

5.3.1 Výsledky a diskuse

Za účelem provedení parametrické studie vlivu hloubky a délky smykového ozubu na únosnost a tuhost spřažení jsem v programu Ansys vytvořil řadu modelů pro různé délky smykového ozubu. Ty byly řešeny jako násobky hloubky smykového ozubu. Největší počet modelů byl vytvořen pro hloubku ozubu 20 mm, kde jsem vytvořil sérii modelů s délkou smykového ozubu od 60 do 300 mm odstupňovaných po 10 mm. Výjimkou byl skok z 260 na 300 mm, jelikož zde již nedocházelo k navýšení únosnosti. Pro potřeby porovnání jsem pak již jen vytvořil modely i pro hloubku smykového ozubu 30 a 40 mm. Ty měly délku smykového ozubu rovnající se 8 a 15-ti násobku hloubky ozubu.

Z výsledků parametrické studie jsem získal závislost únosnosti a tuhosti spoje na základě násobku hloubky ozubu. Aby tyto hodnoty bylo možné využít pro návrh, provedl jsem statistické vyhodnocení experimentálních výsledků získaných v rámci grantového projektu TH02020730. Tím jsem získal odhad variačního koeficientu, na základě kterého jsem mohl provést odhad součinitele na převod průměrných hodnot získaných numerickou analýzou na charakteristické hodnoty.

Tuto parametrickou studii by bylo vhodné v budoucnu dále rozšířit a upřesnit získané hodnoty, například provedením experimentálních protlačovacích zkoušek pro tělesa s různou délkou smykového ozubu, aby se ověřila funkčnost numerických modelů pro širší spektrum dat. Cílem tohoto snažení by mělo být získání normových vztahů, jelikož Eurokód se obecně spřaženými dřevo-betonovými konstrukcemi zabývá pouze okrajově.

5.4 Parametrická studie účinků teploty

Jako poslední analýzu jsem provedl parametrickou studii vlivu teploty na napjatost spřažené dřevo-UHPC konstrukce. Vzhledem k rozdílné teplotní roztažnosti použitých materiálů může být teplotní zatížení jedním z rozhodujících zatěžovacích stavů. Nicméně současná verze Eurokódu problematiku spřažených dřevo-betonových mostních konstrukcí vůbec neřeší.

V případě pozemních staveb toto nepředstavuje problém, jelikož se stropní konstrukce, na které se spřažené dřevo-betonové konstrukce nejčastěji používají, většinou nachází v teplotně stabilním prostředí a tuhost používaných spřahovacích prostředků nebývá vysoká.

5.4.1 Výsledky a diskuse

Pro analýzu vlivu teplotních zatížení na napjatost spřažené dřevo-UHPC konstrukce jsem vytvořil řadu modelů v programu Ansys. Cílem bylo vyhodnotit vliv různé délkové teplotní roztažnosti použitých materiálů, kdy UHPC ji má cca 2x větší než dřevo. Vytvořené modely tvořil dřevěný nosník s délkou 4-10 m, která se zvyšovala po 1 m. Ten byl spřažen s UHPC deskou tl. 70 mm.

Výšku nosníku jsem volil ve třech variantách tak, abych mohl vyhodnotit případný vliv tohoto parametru na výsledky. Nejnižší nosník byl výšky 200 mm a odpovídá výškou nosníku, který by mohl být použit pro lávku délky 5m. Výšku dalšího nosníku jsem volil

tak, aby jeho moment setrvačnosti byl dvojnásobkem předchozího nosníku, měl tedy výšku 252 mm a odpovídal výškově lávce délky 6 m. Výška nosníku pro poslední variantu byla volena opět tak, aby moment setrvačnosti byl dvojnásobkem toho předchozího a 4x větší než u první varianty – výsledná výška nosníku byla 317,5 mm a byla vhodná pro lávku délky 7m.

Modely jsem zatěžoval rovnoměrným teplotním zatížením s hodnotou $\pm 30^{\circ}\text{C}$. Pro ověření jsem pro jednu variantu (nosník výšky 252 mm délky 6m) provedl ověření též pro zatížení, kdy na UHPC desku bylo aplikováno dalších $+15$ či -8°C , aby se zohlednilo např. případné oslunění povrchu desky, která se díky nízké tloušťce prohřeje celá.

Pro parametrickou studii teploty se mi bohužel nepovedlo získat přímý vztah, který by byl použitelný pro různé nosníky na základě jejich relativní ohybové tuhosti ani jiného parametru. Výsledky pouze prokázaly přímý vliv tuhosti dřevěných nosníků na napjatost na konstrukci při jejím zatížení teplotou.

Provedl jsem tedy alespoň zjednodušené odvození velikosti síly působící na spoj konstrukce a velikost normálového tahového napětí v dolních vláknech dřevěného nosníku. V případě použití jiné teploty, či nestejnomyerného oteplení, je možné výsledné síly upravit pomocí lineární interpolace hodnot. Pro dodatečné ohřátí UHPC desky o 15°C vedlo k nárůstu sil přibližně na dvojnásobek oproti rovnoměrnému oteplení o 30°C . Ochlazení pak vedlo díky menšímu rozdílu teplot pouze k navýšení o 1,5 násobek sil a napětí získaných ochlazením o -30°C . Díky těmto zjednodušeným vztahům je možné alespoň přibližným odhadem určit příspěvek teplotních zatížení při návrhu konstrukce a spřažení. Ochlazování konstrukce bude důležité při návrhu dřevěného nosníku, ohřátí konstrukce poté pro návrh spřažení.

Pro budoucí vývoj vedoucí k získání lepšího povědomí o účincích teploty na spřažené dřevo-UHPC konstrukce by bylo vhodné provést dlouhodobé sledování průběhu teplot na konstrukci. Výsledky by mohly být následně využity pro numerickou simulaci šíření tepla v konstrukci a dle výsledného rozdělení teplot provedení statické analýzy napětí, které tento teplotní stav vyvolá. Doplnění normových vztahů o konstrukce typu „spřažená dřevo-betonová konstrukce“ považuji za nezbytný krok.

6 Závěr

Ve své disertační práci jsem na úvod provedl rešerši o stavu současného vývoje a výzkumu spřažených dřevo-betonových konstrukcí. V té jsem se zaměřil na vytvoření souhrnu informací dostupných pro použité materiály – dřevo a beton. U betonu jsem se zaměřil mimo obecných vlastností též na informace o UHPC. Další součástí rešerše byly informace o vývoji spřažených dřevo-betonových konstrukcí, jejich historii a možnosti provádění. Důležitou součástí rešerše bylo studium dostupných nelineárních výpočetních materiálových modelů pro software Atena 3D a Ansys, které jsem ve své práci využíval. Poslední součástí rešerše byly příklady spřažených dřevo-betonových mostních konstrukcí ve světě a ČR. Vypracováním rešerše se podařilo naplnit úvodní cíl práce.

Pro svou nelineární výpočetní analýzu jsem využíval výsledky experimentálních zkoušek provedených v rámci řešení grantového projektu TAČR TH02020730. Jednalo se o výsledky ohybových zkoušek UHPC a protlačovacích zkoušek pro vyvíjený způsob spřažení, na který jsem prováděl v rámci grantu validaci výpočetních modelů. Způsob spřažení spočíval ve využití smykových ozubů. Do dřevěných nosníků byly vyfrézovány ozuby. Do nich se následně vkládaly ocelové desky s navařenými smykovými trny, pomocí kterých se napojovaly prefabrikované desky z UHPC.

Ve mnou provedené nelineární analýze jsem se nejprve soustředil na získání validovaných materiálových modelů pro UHPC. Následně jsem se již zaměřil na materiálový model dřeva a kontaktu tvořícího smykovou plochu. Poté jsem mohl validovat model samotné protlačovací zkoušky. Díky jeho validaci jsem získal dobrý přehled o fungování způsobu spřažení.

Na základě těchto informací jsem navrhl jeho optimalizaci. Abych doplnil informace o chování samostatného dřevěného ozubu, bez vlivu ostatních prvků spřažené konstrukce, navrhl jsem doplňující experimenty na určení únosnosti dřevěného ozubu ve smyku. Bohužel, použitý materiál měl nevhodnou skladbu lamel, kdy jedna z krajních lamel, které měly vliv na výslednou únosnost, měla výrazně horší mechanické vlastnosti, než ta protější a všechny zkoušené elementy selhaly jednostranným smykem a nepodařilo se tak získat celkovou únosnost zkušebních těles. Tento výsledek je pro mě poučením k přípravě dalších experimentálních testů dřevěných prvků. Vzhledem k velkému rozptylu jejich vlastností je potřeba testovat dostatečný počet vzorků, aby se vyloučilo ovlivnění získaných výsledků totožnou vadou materiálu.

Optimalizace spoje, kterou jsem provedl, spočívala v nahrazení ocelové desky se spřahovacími trny ozubem vytvořeným přímo z UHPC. Využil jsem tak tedy jeho výborné vlastnosti při namáhání smykem a zároveň odstranil nákladnou součást spoje, která negativně ovlivňovala jeho tuhost a případně i únosnost. Bylo zde též riziko koroze v zásadním místě pro správné fungování konstrukce. Provedené změny zachovaly únosnost spoje, která je limitována zejména ozubem ve dřevěném nosníku a umožnily navýšení jeho tuhosti. Ozub z UHPC je nicméně nutné doplnit o nějaký další způsob spřažení, který přenesení tahové namáhání, které požaduje norma – například vruty pro spřažení dřeva a betonu. Úspěšnou optimalizací spoje pro spřaženou dřevo-UHPC konstrukci jsem splnil hlavní cíl mé práce.

Na závěr své disertační práce jsem provedl dvě parametrické studie využívající mnou optimalizovaný spoj. První studie spočívala ve sledování vlivu hloubky smykového ozubu na únosnost a tuhost spoje v závislosti na jeho délce. Tato studie prokázala jasnou

závislost těchto parametrů a podařilo se mi odvodit rovnice pro analytické určení únosnosti a tuhosti spoje na základě jejich znalosti. Tento dílčí cíl mé práce tedy vedl k získání použitelného analytického postupu pro návrh smykových ozubů.

Druhou studií představovalo sledování vlivu teplotních zatížení na napjatost v kompozitní konstrukci. Zde jsem zkoušel nalézt závislost tuhosti dřevěného nosníku na velikosti vznikajících napětí. Tato spojitost se mi podařila zjistit pouze částečně a opět jsem mohl odvodit přibližný vztah pro určení namáhání dílčích částí spřažené konstrukce pro možnost jejího analytického návrhu na účinky teplotních zatížení.

V rámci disertační práce se mi tedy podařilo splnit všechny stanovené cíle. Validované výpočetní modely mi umožnili provést funkční optimalizaci způsobu spřažení dřevo-UHPC konstrukcí pomocí smykových ozubů. Následné parametrické studie vedly k získání použitelných analytických nástrojů, které usnadní navrhování tohoto typu konstrukcí.

Práce na mé disertační práci mi zásadním způsobem pomohla rozšířit svou znalost fungování používaných materiálových modelů a principu nelineárních výpočtů. V rámci předchozích stupňů studia jsem měl možnost seznámit se pouze s principem výpočtů metodou konečných prvků. Dalším přínosem pro mě byly komplikace při validaci modelu protlačovací zkoušky způsobené nedostatkem dat pro dílčí součásti spřažené konstrukce. Bylo by tedy do budoucna lepší provést materiálové testy všech použitých materiálů odděleně a nejlépe ve větších počtech, aby bylo možné lépe zachytit rozptyl vlastností použitých materiálů a použít pro validaci získanou střední hodnotu.

Přínos své práce pro výzkum a vývoj spřažených dřevo-UHPC konstrukcí vidím v položení základů pro budoucí numerické analýzy, které se díky výsledkům mé disertační práce jeví jako vhodný způsob pro omezení nákladných experimentů. Je však nejprve nutné vybudovat dostatečně silnou databázi výsledků materiálových testů jednotlivých součástí konstrukce, ideálně pro různé způsoby namáhání. Jedním z klíčů pro správné výsledky nelineární analýzy jsou totiž vhodně nastavené vlastnosti použitých materiálových modelů. Mnou odvozené vztahy získané v rámci parametrických studií považuji za úvodní bod, který by mohl v případě pokračujícího výzkumu přinést rozšíření a doplnění normových vztahů pro navrhování dřevo-UHPC i dřevo-betonových konstrukcí. Zejména pro teplotní zatížení těchto kompozitních konstrukcí jsou v evropských normách velké mezery. V budoucnu bych rád na základech položených svou disertační prací pokračoval a provedl jejich ověření a zpřesnění.

7 Literatura

- [1] POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-070-0600-1.
- [2] BALABÁN, Karel. *Nauka o dřevě*. 1. část, Anatomie dřeva. 1. vyd. Praha: SZN, 1955, . Lesnická knihovna. Velká řada, sv. 16.
- [3] KUKLÍK, Petr a Lenka MELZEROVÁ. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04958-7.
- [4] ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDLEROVÁ. *Stavba dřeva*. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1994. ISBN 80-715-7137-7.
- [5] GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.
- [6] KOŽELOUH, Bohumil. *Konstrukční materiál vrstvené dřevo*. IMateriály [online]. 2016 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-material-vrstvene-drevo_43529.html
- [7] KUKLÍK, Petr, Anna GREGOROVÁ a Lukáš VELEBIL. *Požární odolnost a tuhost dřevostaveb*. Konstrukce [online]. 2018 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/pozarni-odolnost-a-tuhost-drevostaveb/>
- [8] *Lepené lamelové dřevo (BSH)*. Dekwood [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://dekwood.cz/produkty/bsh>
- [9] *Lepené lamelové dřevo*. Kasper.cz [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://www.kaspercz.cz/produkty/lepene-lamelove-drevo_3/
- [10] ROWELL, Roger. *Acetylation of wood: Journey from analytical technique to commercial reality*. Forest Products Journal. 2006, 56(9), 4-12. ISSN 0015-7473.
- [11] HILL, Callum. *Acetylated Wood: The Science Behind the Material*. Dostupné také z: <https://www.accoya.com/app/uploads/2020/04/Acetylated-Woods-Callum-Hill.pdf>
- [12] *Modifikované dřevo*. NIS - Nábytkářský informační systém [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/fyzikalni-a-mechanicke-vlastnosti-dreva/page/217/>
- [13] ACCSYS TECHNOLOGIES. *Accoya Wood* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.accoya.com/>
- [14] *Dřevo Accoya*. Totem international [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.totem-international.com/>
- [15] *Příručka technologa BETON* [online]. 1. vyd. Českomoravský beton, 2013 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1025>
- [16] KOLÍSKO, Jiří, Petr BOUŠKA, David ČÍTEK, Petr HUŇKA, Milan RYDVAL a Miroslav VOKÁČ. *Metodika 1 Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*. 2015. Dostupné také z: <http://www.klok.cvut.cz/certifikovane-metodiky/>
- [17] TICHÝ, Jan, Jiří KOLÍSKO, Miroslav VOKÁČ, David ČÍTEK, Vladislav TREFIL a Milan KALNÝ. *Metodika 3 Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. 2015. Dostupné také z: <http://www.klok.cvut.cz/certifikovane-metodiky/>
- [18] KALNÝ, Milan, Jan KOMANEC, Václav KVASNIČKA, Jiří KOLÍSKO a Petr TEJ. *Metodika 2 Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. 2015. Dostupné také z: <http://www.klok.cvut.cz/certifikovane-metodiky/>
- [19] *FIB model code for concrete structures 2010*. Berlin: Ernst, 2013. ISBN 978-3433030615.
- [20] SETRA/AFGC. *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Recommendations*. Paříž: CEDEX, 2013.
- [21] GRAYBEAL, Benjamin, Florent BABY, Pierre MARCHAND a François TOUTLEMONDE. *Direct and Flexural Tension Test Method for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC*. In: *Hipermat 2012*. Kassel, 2012. ISBN 978-3-86219-264-6.
- [22] BERTOLA, Numa, Philippe SCHILTZ, Emmanuel DENARIÉ a Eugen BRÜHWILER. *A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in*

- Switzerland. *Frontiers in Built Environment*. 2021, 7. ISSN 2297-3362. Dostupné z: doi:10.3389/fbuil.2021.769686
- [23] ASSOCIATION FRANÇAISE DE *NORMALISATION*. *NF P 18-710*: National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPRFC). *AFNOR*, 2016. ISSN 0335-3931.
- [24] KUKLÍKOVÁ, Anna. *Kompozitní dřevobetonové konstrukce*. 2004. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [25] KUKLÍK, Petr a Anna KUKLÍKOVÁ. *Navrhování kompozitních dřevobetonových stropů*. *IMateriály* [online]. 2012 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/beton/navrhovani-kompozitnich-drevobetonovych-stropu_103879.html
- [26] KÁNOCZ, Jan. *Spriahnuté drevo-betónové nosné sústavy a ich použitie v praxi*. ASB [online]. 2007 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/strop-a-podlaha/stropny-system/spriahnute-drevo-betonove-nosne-sustavy-a-ich-pouzitie-v-praxi>
- [27] RODRIGUES, Joao, *Alfredo DIAS a Paulo PROVIDENCIA*. Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review. *BioResources* [online]. 2013, 8(4) [cit. 2022-02-04]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.4.6630-6649
- [28] YEOH, David, *Massimo FRAGIACOMO, Mary DE FRANCESCHI a Koh HENG BOON*. State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2011, 137(10), 1085-1095 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0733-9445. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353
- [29] CECCOTTI, Ario. *Composite concrete-timber structures*. *Progress in Structural Engineering and Materials* [online]. 2002, 4(3), 264-275 [cit. 2022-02-04]. ISSN 1365-0556. Dostupné z: doi:10.1002/pse.126
- [30] CALDOVÁ, Eva, *Anna KUKLÍKOVÁ a Petr VYMLÁTIL*. Spřažení dřevobetonových nosníků s rozptýlenou výztuží. *Tzb-info* [online]. 2013 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10415-sprazeni-drevobetonovych-nosniku-s-rozptylenou-vyztuzi>
- [31] MIOTTO, José Luiz a *Antonio Alves DIAS*. Glulam-concrete composites: experimental investigation into the connection system. *Materials Research* [online]. 2011, 14(1) [cit. 2022-02-20]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000002
- [32] BERTOLA, Numa, *Célia KÜPFER, Edgar KÄLIN a Eugen BRÜHWILER*. Assessment of the Environmental Impacts of Bridge Designs Involving UHPRFC. *Sustainability*. 2021, 13(22). ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su132212399
- [33] SORELLI, Luca, *Nicolas NAUD, Serge LAMOTHE, Catherine JOLY-LAPALICE a Piere BLANCHET*. Fostering composite structures of UHPC and timber. In: 2nd International interactive symposium on Ultra-High Performance Concrete [online], 2019 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://www.extension.iastate.edu/registration/events/2019UHPCPapers/UHPC_ID163.pdf
- [34] PETŘÍK, Vojtěch, *Norbert PHILIPP, Vladimír KRÍSTEK a Martin PULPÁN*. Full-scale testy kompozitních konstrukcí FRC-dřevo a UHPRFC-dřevo. In: 18. konference Betonářské dny. Praha, 2011, s. 337–342.
- [35] HOLÝ, Milan a *Lukáš VRÁBLÍK*. Spřažení dřeva a prefabrikátů z UHPC. *IMateriály* [online]. 2019 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/sprazeni-dreva-a-prefabrikatu-z-uhpc_46540.html
- [36] NECHANICKÝ, Pavel. *Možnosti provádění kompozitních dřevobetonových konstrukcí*. *Tzb-info* [online]. 2012 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/8362-moznosti-provadeni-kompozitnich-drevobetonovych-konstrukci>
- [37] SCHÄFERS, M. *Entwicklung von hybriden Bauteilen aus Holz und hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen – Experimentelle und theoretische Untersuchungen*. 2010. ISBN 978-3-89958-986-3. Disertační práce. Universita Kassel.
- [38] EISENHUT, L. *Geklebter Verbund aus Holz und hochfestem Beton – Untersuchungen zum Langzeitverhalten*. 2015. Disertační práce. Universita Kassel.

- [39] Connections and Reinforcements *for Timber Construction*: Timber-Concrete Composite fastener VB system. SFS [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://sfsintec.biz/en/web/industry_solutions/construction/timber_work/timber_work_1.html
- [40] KUKLÍK, Petr, *Pavel NECHANICKÝ a Anna KUKLÍKOVÁ*. Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors. *Materials and Joints in Timber Structures* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, 463-470 [cit. 2022-02-04]. ISBN 978-94-007-7810-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-7811-5_42
- [41] TIMBER AND CONCRETE *CONNECTION SYSTEM (HBV SYSTEM)*. Timber Composite Technology [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://ticomtec.de/en/hbv-systems/>
- [42] HOLÝ, Milan. *Optimalizace kompozitních mostních konstrukcí ze dřeva a UHPC*. Praha, 2020. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [43] ČSN EN 1995: *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí*. Český normalizační institut, 2007.
- [44] ČSN EN 1991: *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí*. Český normalizační institut, 2004.
- [45] ČSN EN 338: *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*. Český normalizační institut, 2016.
- [46] ČSN EN 14080: *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo - Požadavky*. Český normalizační institut, 2013.
- [47] ČERVENKA, Vladimír, *Libor JENDELE a Jan ČERVENKA*. *ATENA Program Documentation Part 1: Theory*. Cervenka Consulting, 2020.
- [48] Ansys: Theory reference. 2021.
- [49] MENETREY, P. a K.J. WILLIAM. TRIAXIAL FAILURE CRITERION FOR CONCRETE AND ITS GENERALIZATION. *ACI structural journal* [online]. American Concrete Institute (ACI), 1995, 92(3), 311-318 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0889-3241.
- [50] WILLIAM, K. J. a E. P. WARNKE. Constitutive model for the **triaxial** behaviour of concrete. *Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*. International Association for Bridge and Structural Engineering, 1974. Dostupné z: doi:10.5169/seals-17526
- [51] BAŽANT, Zdeněk P. a Pietro G. GAMBAROVA. Crack *Shear in Concrete*: Crack Band Microplane Model. *Journal of Structural Engineering* [online]. 1984, 110(9), 2015-2035 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0733-9445. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:9(2015)
- [52] BAŽANT, Zdeněk P. a B. H. OH. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions* [online]. 1983, **16**(3), 155-177 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0025-5432. Dostupné z: doi:10.1007/BF02486267
- [53] BAŽANT, Zdeněk P. a Byung H. OH. Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock. *Journal of Engineering Mechanics* [online]. 1985, 111(4), 559-582 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0733-9399. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:4(559)
- [54] LEUKART, Michael a *Ekkehard RAMM*. A comparison of damage models formulated on different material scales. *Computational Materials Science*. 2003, 28(3-4), 749-762. ISSN 09270256. Dostupné z: doi:10.1016/j.commatsci.2003.08.029
- [55] ZREID, Imadeddin a *Michael KALISKE*. Regularization of microplane damage models using an implicit gradient enhancement. *International Journal of Solids and Structures*. 2014, **51**(19-20), 3480-3489. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2014.06.020
- [56] ZREID, Imadeddin a *Michael KALISKE*. An implicit gradient formulation for microplane Drucker-Prager plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2016, 83, 252-272. ISSN 07496419. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijplas.2016.04.013
- [57] ZREID, Imadeddin a *Michael KALISKE*. A gradient enhanced plasticity-damage microplane model for concrete. *Computational Mechanics*. 2018, 62(5), 1239-1257. ISSN 0178-7675. Dostupné z: doi:10.1007/s00466-018-1561-1
- [58] SANDLER, Ivan S., *George Y. BALADI a Frank L. DIMAGGIO*. Generalized Cap Model for Geological Materials. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1976, 102(7), 683-699. ISSN 0093-6405. Dostupné z: doi:10.1061/AJGEB6.0000293

- [59] CERVENKA, Vladimír, Jan CERVENKA a Radomír PUKL. *ATENA — A tool for engineering analysis of fracture in concrete*. *Sadhana* [online]. 2002, **27**(4), 485-492 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0256-2499. Dostupné z: doi:10.1007/BF02706996
- [60] ČERVENKA, Jan a Vassilis K. PAPANIKOLAOU. *Three dimensional combined fracture–plastic material model for concrete*. *International Journal of Plasticity* [online]. 2008, **24**(12), 2192-2220 [cit. 2022-02-04]. ISSN 07496419. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijplas.2008.01.004
- [61] DE BORST, R. *Non-linear analysis of frictional materials. 1986. Disertační práce*. Delft University of Technology.
- [62] WILKINS, M.L. *Calculation of Elastic-Plastic Flow. Methods of Computational Physics*. New York: Academic Press, 1964, 3.
- [63] VAN MIER, J. G. M. *Multiaxial Strain-softening of Concrete, Part I: Fracture. Materials and Structures*. RILEM Publications SARL, 1986, 19(111). ISSN 1359-5997.
- [64] DIAS, A.M.P.G., J.W. VAN DE KUILEN, S. LOPES a H. CRUZ. *A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joints*. *Advances in Engineering Software* [online]. 2007, **38**(8-9), 522-530 [cit. 2022-02-04]. ISSN 09659978. Dostupné z: doi:10.1016/j.advengsoft.2006.08.024
- [65] DVOŘÁKOVÁ, Eva a Anna KUKLÍKOVÁ. *Numerická analýza chování dřevobetonové konstrukce. Tzb-info* [online]. 2012 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/8877-numericka-analyza-chovani-drevobetonove-konstrukce>
- [66] PĚNČÍK, Jan. *Modelování dřeva pomocí ortotropního materiálového modelu s kritérii porušení*. *Stavební obzor*. 2014, 2014(1-2). ISSN 1210-4027.
- [67] CHU, E. *Generalization of hill's 1979 anisotropic yield criteria*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1995, **50**(1-4), 207-215 [cit. 2022-02-04]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/0924-0136(94)01381-A
- [68] HILL, Rodney. *The Mathematical Theory of Plasticity. Dotisk. Clarendon Press, 1998*. ISBN 0198503679, 9780198503675.
- [69] ALFANO, G. a M. A. CRISFIELD. *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001, **50**(7), 1701-1736. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.93
- [70] NOVOTNÁ, Magdaléna, Ctislav FIALA a Petr HÁJEK. *Precast timber-concrete composite floor structures for sustainable buildings-experimental verification*. In: *CESB 2013 PRAGUE: Central Europe Towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*. Praha, 2013, s. 429 - 432. ISBN 978-802475018-7.
- [71] Projects. IB-MIEBACH [online]. [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://www.ib-miebach.de/en/projects/>
- [72] AICHER, Simon a Gordian STAPF. *BLOCK GLUED GLULAM – BRIDGES, BEAMS AND ARCHES*. In: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)* [online]. Quebec City, 2014 [cit. 2022-02-04]. ISBN 9781510858206. Dostupné z: doi:DOI.10.13140/2.1.3777.4720
- [73] JIRKA, Ondřej. *První spřažené dřevobetonové lávky v ČR. Stavebnictví* [online]. 2017, **01**(02) [cit. 2022-02-04]. ISSN 1802-2030. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-prvni-sprazene-drevobetonove-lavky-v-cr.html>
- [74] BERCHTOLD, von Marc-André, Armin HEMMI a Guido LAUBER. *Neubau der Gletschersandbrücke* [online]. 2020 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: http://www.verlagsgruppewiederspahn.eu/wp-content/uploads/brueckenbau_2020_3.pdf
- [75] KÄLIN, Edgar. *Erste Holz-UHFB-Verbundbrücke für Schwerlasten in der Schweiz. Espazium* [online]. 2020 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/erste-holz-uhfb-verbundbruecke-fuer-schwerlasten-der-schweiz>
- [76] GSA-Technology. *NEUE HOLZBAU AG* [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://neueholzbau.ch/en/produkte/gsa-technologie/>
- [77] HOLÝ, Milan, David ČÍTEK, Petr TEJ a Lukáš VRÁBLÍK. *The Experimental Timber–UHPC Composite Bridge. Sustainability* [online]. 2021, **13**(9) [cit. 2022-02-04]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su13094895

- [78] KOŽELOUH, Bohumil. *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5*. Zlín: KODR, 1998. ISBN 80-238-2620-4.
- [79] MICHELFELDER, Birgit Christiane. *Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken*. 2006. Disertační práce. Universita Stuttgart.
- [80] KNĚŽ, Petr, Petr TEJ, David ČÍTEK a Jiří KOLÍSKO. *Design of footbridge with double curvature made of UHPC*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, 246 [cit. 2022-02-04]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/246/1/012042
- [81] HOLÝ, Milan, David ČÍTEK, Petr TEJ a Lukáš VRÁBLÍK. *Flexural Strength of Thin Slabs Made of UHPFRC*. In: *25th Concrete Days 2018*. Curich: Trans Tech Publications, 2019, s. 224-229. ISBN 978-3-0357-1459-3. ISSN 1662-9779.
- [82] ČSN 73 1702: *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí - Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2007.
- [83] ČSN P ENV 1995: *Navrhování dřevěných konstrukcí*. Český normalizační institut, 1993.