

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Stanovení polohy, počtu a rozměrů dřevěných
hmoždíků pravoúhlého průřezu v roštovém
nosníku o délce 9 m**

Diplomová práce

Autor: Bc. Šimon Hačecký

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Horáček

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Šimon Hačecký

Dřevařské inženýrství

Název práce

Stanovení polohy, počtu a rozměrů dřevěných hmoždíků pravouhlého průřezu v roštovém nosníku o délce 9 m

Název anglicky

Design of the position, number and size of the wooden dowels in a laminated girder of 9 m

Cíle práce

Cílem práce je vytvoření inženýrské studie s využitím principů reverzního inženýrství se zaměřením na použití roštového nosníku v současných stavebních konstrukcích.

Ze zpracování studie budou patrné odpovědi na následující otázky:

Jaký princip lze použít pro návržení optimálního počtu, rozměrů a polohy hmoždíků v ohýbaném roštovém nosníku?

Jaké dřeviny, vlhkost a jaký odklon vláken zvolit pro hmoždík?

Může být ekonomicky výhodné využití roštových nosníků na bázi KVH profilů větších dimenzí?

Metodika

Metodika práce bude zpracována v následující struktuře:

- 1/ Zpracování literární rešerše a úvodu do problematiky
- 2/ Formulace cílů, otázek výzkumu případně hypotéz
- 3/ Návrh metodiky řešení práce – využití FEM, alternativní výpočty a modelování napětí
- 4/ Definování principů navrhování roštového nosníku
- 5/ Případová studie uplatnění navržených principů v novodobých stavebních konstrukcích
- 6/ Diskuze
- 7/ Závěr

Doporučený rozsah práce

50-70 stran

Klíčová slova

roštový nosník, dřevěný hmoždík, dřevěné konstrukce, pevnost v ohybu, smyk za ohybu

Doporučené zdroje informací

- DUTKO, P a kol. Drevené konštrukcie. 2. prep. vydání. Bratislava: ALFA, 1976, 460 s.
- HÁJEK, E.; REIF, P.; VALENTA F. Pružnost a pevnost I. 1. vydání. Praha: STNL, 1988. 432 s.
- KUKLÍK, Petr. Dřevěné konstrukce. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03310-4.
- LEXA, J.; NEČESANÝ, V.; PACLT, J.; TESAŘOVÁ, M.; ŠTOFKO, J. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava: Drevársky výzkumný ústav, 1952.
- MILLER, Joseph F. a William M. BULLEIT. Analysis of Mechanically Laminated Timber Beams Using Shear Keys. Journal of Structural Engineering [online]. 2011, 137(1), 124-132. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000273. ISSN 0733-9445. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000273>
- POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURAJTKO, BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva.1. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- ŠEFCŮ, O; ŠTUMPA. B. 100 osvědčených stavebních detailů: tradice z pohledu dneška. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3114-8.
- TSOUMIS, G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Chapman, 1991. ISBN 04-120-7851-1.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

prof. Dr. Ing. Petr Horáček

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 2. 4. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 2. 4. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 03. 04. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Stanovení polohy, počtu a rozměrů dřevěných hmoždíků pravoúhlého průřezu v roštovém nosníku o délce 9 m“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Petra Horáčka a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona 111/1998 Sb. O vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne: 17. 4. 2019

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilu Trgalovi, Ph.D. za inspirativní zadání a odborné vedení práce. Nesčetné díky patří mému dědovi bez jehož životní zkušenosti, moudrosti a znalostí by tato práce nemohla vzniknout. Díky patří i doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a doc. Ing. Lukáši Čapkovi za konzultaci problematiky a modelování MKP. Z celé své podstaty děkuji mému Slunci za její bytí, lásku, podporu.

Stanovení polohy, počtu a rozměrů dřevěných hmoždíků pravoúhlého průřezu v roštovém nosníku o délce 9 m

Abstrakt

Tato práce se zabývá stanovením polohy, počtu a rozměrů dřevěných hmoždíků pravoúhlého průřezu v roštovém nosníku délky 9 metrů. Zaměřuje se na rozdíl mezi podélným a příčným hmoždíkem ze dřeva buku a smrku. Hledá vliv orientace vláken hmoždíku na jeho únosnost a počet potřebný k přenosu horizontálních smykových sil. Řešení je provedeno početně a graficky pro případ čtyřvrstvého roštu z KVH hranolů, každý o průřezu 180 x 140 mm. Výšky posuzovaných hmoždíků jsou 40, 56 a 100 mm při různých délkách. Pro každý rozměr jsou stanoveny únosnosti v usmýknutí, otlačení a klopení. Výpočet počtu hmoždíků je proveden pro ohybem namáhaný nosník zatížený silou 80 kN v polovině rozpětí a spojitým zatížením 17,8 kN/m. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s podélným bukovým hmoždíkem o rozměrech 180 x 40 x 142 mm (6 a 10 ks) a smrkovým podélným hmoždíkem o rozměrech 180 x 40 x 168 mm (5 a 7 ks). Použití příčných hmoždíků není možné. Vliv orientace vláken se stanovit nepodařilo. Závěr je, že zkonstruovat roštový nosník z KVH hranolů možné je a lze jej vyrábět s existujícím strojním zařízením.

Klíčová slova: roštový nosník, dřevěný hmoždík, dřevěné konstrukce, pevnost v ohybu, smyk za ohybu

Design of the position, number and size of wooden dowels in a laminated girder of 9 m

Summary

This thesis determines the position, number and dimensions of wooden rectangular shaped shear keys in a key beam of 9 m length. It is concerned about the difference between longitudinal and transversal shear key made of beech and spruce wood. It aims at effect of grain direction at its bearing capacity and the number required to bear the horizontal shear forces. The problem is solved numerically and graphically for the case of a four-layer key beam. Each layer consists of spruce Solid Structural Timber 180 x 140 mm in section. The heights of discussed shear keys are 40, 56 and 100 mm having variable lengths. The bearing capacity of each dimension is considered by shear, press and tilting. The number of shear keys is calculated for a bended beam loaded by the force of 80 kN at its half span and by uniform load of 17,8 kN/m. The longitudinal beech shear key of dimensions 180 x 40 x 142 mm (6 and 10 pcs) and the longitudinal spruce shear key of dimensions 180 x 40 x 168 mm (5 and 7 pcs) had reached the best results. The use of transversal shear keys is not possible. The effect of grain direction was not determined. The conclusion is that it is possible to design a key beam made of Solid Structural Timber and to produce it with existing machinery.

Key words: keyed beam, wooden dowel, timber construction, bending strenght, shear in bending

Obsah

1	Úvod	13
2	Cíle práce.....	15
3	Rozbor problematiky	16
3.1	Masivní dřevěné konstrukční materiály.....	16
3.1.1	Lepené lamelové dřevo, konstrukční dřevo, vrstvené dřevo.....	17
3.1.2	DLT, Holz100	19
3.2	Roštové nosníky	21
3.2.1	Konstrukce roštového nosníku.....	23
3.3	Mechanické způsoby spojování lamel vrstvených konstrukčních materiálů	26
3.3.1	Spoje s kovovými spojovacími prostředky	26
3.3.2	Mechanické svařování.....	27
3.3.3	Dřevěné spojovací prvky.....	29
3.4	Namáhání ohybem	30
3.4.1	Napětí při ohybu.....	31
3.4.2	Smyková napětí v průřezu nosníku od posouvajíc sil.....	32
3.4.3	Pevnost dřeva v ohybu.....	34
3.5	Pevnost dřeva ve smyku	35
3.6	Pevnost dřeva v tlaku.....	36
4	Metodika	38
4.1	Charakteristika posuzovaného roštu	38
4.2	Konstrukční principy použití hmoždíků v roštovém nosníku.....	40
4.2.1	Předběžné dimenzování hmoždíků	40
4.2.2	Výpočet smykového napětí a horizontálních smykových sil	41

4.2.3	Stanovení rozměru hmoždíku	42
4.2.4	Stanovení počtu a umístění hmoždíků	44
4.2.5	Postup rozmístění hmoždíků v roštu	45
4.3	Ekonomické zhodnocení	46
5	Výsledky a diskuze	48
5.1	Výsledky	48
5.1.1	Horizontální síly	48
5.1.2	Závislost výpočtových únosností na rozměrech hmoždíku	48
5.1.3	Výpočtové únosnosti a počet hmoždíků	53
5.1.4	Rozmístění hmoždíků v roštovém nosníku	56
5.1.5	Optimální konfigurace a orientace vláken hmoždíků	57
5.1.6	Ekonomické zhodnocení	58
5.2	Diskuse.....	58
5.2.1	Případová studie	63
5.2.2	Otázky plynoucí z diskuse	67
6	Závěr	68
7	Použité zdroje	70

Seznam obrázků

Obr. 1 Dřevěné konstrukce s roštovými nosníky v různém provedení hmoždíků: (A) Dlouhé naklopené a rybinové hmoždíky; foto Kamil Trgala, (B) Klínové vodorovné hmoždíky; Cascade Joinery 2019	14
Obr. 2 Přehled konstrukčních materiálů z masivního dřeva; Perkinswill 2019	19
Obr. 3 Varianty panelů systému Holz 100; Thoma Holz100 2019.....	21
Obr. 4 Příklady použití roštového nosníku s naklopenými příčnými hmoždíky klínového tvaru v současné dřevěné konstrukci (A) Tolland, Connecticut, USA; The Barn Yard and Great Country Garage 2019, (B) Costa Rica; Fire tower engineered timber 2019.....	23
Obr. 5 Roštové nosníky: zaskobový (1), svorníkový (2), zazubový (3), záchytkový s dřevěnými hmoždíky (4), záchytkový s ocelovými hmoždíky (5); Derevjaginův (6); Dutko 1976	23
Obr. 6 (A) Posuv hmoždíku v drážce otačením a klopením při zatížení nosníku, (B) síly působící na naklopený hmoždík: N- horizontální síla, P- osová síla, Q- síla potřebná k zamezení rotace hmoždíku; Miller 2011	25
Obr. 7 Čtyřvrstvý nosník spojený vysokorychlostní rotací kolíku při výrobě, ztužidla usnadňují výrobu; O'Loinsigh et al 2012	28
Obr. 8 Napětově–deformační diagram z ohybové zkoušky čtyř vrstvého nosníku; O'Loinsigh et al 2012.....	28
Obr. 9 Naklopený hmoždík ve tvaru klínů z javorového dřeva; Fire tower engineered timber 2019	29
Obr. 10 Zobrazení podélného a příčného hmoždíku; Dutko 1976.....	30
Obr. 11 Průběh tahových a tlakových napětí v nosníku obdélníkového průřezu v závislosti na vzdálenosti y od neutrální osy; Hájek 1988	31
Obr. 12 Průběh smykového napětí v nosníku obdélníkového průřezu v závislosti na vzdálenosti y od neutrální osy; Hájek 1988	33
Obr. 13 (A) Působení nosníků složeného průřezu: lepený nosník (a), roštový nosník s poddajnými spoji (hmoždíky) (b), nosník z volně ložených vrstev (c); Dutko 1976, (B) řez n-vrstvým roštem, působící síly a momenty; Miller 2011	34
Obr. 14 Schéma zatížení osamělou silou F (A) a spojitým zatížením q (B) a průběhu posouvající síly T a ohybového momentu M_o ; autor	40

Obr. 15 K výpočtu základních únosností hmoždíku; Dutko 1976	43
Obr. 16 Vliv poddajnosti spojů na průběh posouvajících sil ve styčné spáře při spojitém zatížení; Dutko 1976	45
Obr. 17 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; příčný hmoždík buk; autor	49
Obr. 18 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; příčný hmoždík smrk; autor.....	49
Obr. 19 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; podélný hmoždík buk; autor	50
Obr. 20 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; podélný hmoždík smrk; autor	50
Obr. 21 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; příčný hmoždík buk; autor.....	51
Obr. 22 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; příčný hmoždík smrk; autor	52
Obr. 23 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; podélný hmoždík buk; autor	52
Obr. 24 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; podélný hmoždík smrk; autor	53
Obr. 25 Ukázka roštu z hranolů velkého průřezu a relativně nízkým počtem hmoždíků; New energy works 2019).....	61
Obr. 26 Automatická zkracovací pila Crossline 650 se spodní drážkovací frézkou; Soukup Woodworking Machinery 2019.....	64
Obr. 27 Detail drážkovací frézky pily Crossline 650; Soukup 2019	64
Obr. 28 Ruční výroba roštového nosníku ze dvou hranolů velkého průřezu s naklopenými javorovými hmoždíky; The Barn Yard and Great Country Garage 2019.....	65
Obr. 29 Schéma nosníků z kónicky řezaných hranolů a trámů a porovnání s navrženým roštovým nosníkem z KVH hranolů; autor.....	66
Obr. 30 Roštový nosník z KVH hranolů a pultový nosník z kónicky řezaných hranolů v sedlové konstrukci s ocelovým táhlem; autor.....	66

Obr. 31 MKP použita k analýze redukovaného napětí v ohýbaném roštovém nosníku; Solfonk, Čapek, TU Liberec	67
--	----

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty pevností dřeva třídy pevnosti C24 a D30 podle ČSN EN 338 použité ve výpočtech; autor	38
Tab. 2 Srovnání maloobchodních cen KVH hranolů 180 x 140 mm a maloobchodních cen BSH hranolů; autor	47
Tab. 3 Zatížení osamělou silou a spojitým zatížením podle vzdálenosti y od osy symetrie svazku; autor	48
Tab. 4 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 40 mm; autor	54
Tab. 5 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 40 mm; autor	54
Tab. 6 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 56 mm; autor	55
Tab. 7 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 56 mm; autor	55
Tab. 8 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 100 mm; autor	55
Tab. 9 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 100 mm; autor	55

Seznam příloh

Příl. 1: Varianty rozmístění hmoždíků v roštovém nosníku.....viz přiložený výkres	
---	--

1 Úvod

Roštový nosník je nejjednodušší typ dřevěného nosníku složeného průřezu, který tvoří dva nebo tři hranoly (ev. kuláče, trámy, polštáře) mechanicky spojené tak, že se při zatížení nosníku nemůžou po sobě posouvat, ale působí jako jeden celek. Patří mezi nejstarší způsoby zesilování průřezu dřevěných nosníků. Jejich výroba je poměrně nenáročná. Kalkulační postupy, byť poměrně složité, kterými lze spočítat únosnost a tuhost roštu jsou známy. Při správné konstrukci je únosnost a tuhost uspokojivá. (Dutko 1976) Přesto se v současných dřevěných konstrukcích vyskytují zřídka. Ukázky konstrukcí s roštovým nosníkem jsou na obrázku 1.

Trendem současných stavebních materiálů na bázi dřeva je omezení nevhodných vlastností dřeva a posílení jeho předností. Děje se tak zejména dělením dřevní suroviny na menší části a opětovným spojením v celek, ponejvíce technologií lepení. Vzhledem k environmentálně příznivým přednostem dřeva jako základního materiálu je kladen požadavek, aby i nově vznikající materiál toto pozitivum neznehodnocoval, což se týká zejména použitých pojiv a ochranných prostředků. (Bílek 2005)

Materiály jako je lepené lamelové dřevo a vrstvené dřevo, mají své významné přednosti, jejich cena je však asi dva až třikrát vyšší než cena rostlého dřeva. To je zapříčiněno množstvím spotřebovaného lepidla, jeho cenou a počtem výrobních operací, v kterých se odrážejí další náklady. Samotná výroba je technologicky i časově náročná. (Bílek 2005; Böhm 2012) Velkou nevýhodou je vysoká ekologická zátěž, zapříčiněná výrobou a použitím lepidla, stejně jako množstvím energie vložené do výroby. A to i zátěž (spotřebovaná energie a voda) výroby kovových spojovacích prostředků nutně používaných v konstrukcích zejména z vrstveného dřeva. Následná likvidace konstrukcí je přítomností lepidla a oceli ve dřevě ztížena. Zkušenosti po požárech a výzkumy zaměřené na kovové spojovací prvky ukazují, že zhoršují požární odolnost konstrukce. Zvýšená teplota také výrazně snižuje pevnost lepených spojů. Zvýšení požární odolnosti se pak dosahuje dodatečnými opatřeními na úkor jednoduchosti, zvýšených nákladů a ekologické stopy. Důsledkem výroby masivních dřevěných konstrukčních materiálů technologií lepení je, že jinak přírodní a trvale udržitelný materiál dřevo je do jisté míry znehodnocen. (O’Loinsigh et al 2012)

Výše zmíněné důvody a potřeba autora přispět k trvale udržitelným a k přírodě šetrným přístupům k dřevěným konstrukcím se staly motivací pro sepsání práce s tématem roštových nosníků. Druhým podnětem se staly předběžné pokusy zadavatele práce provedené v březnu roku 2018 v laboratořích FLD. Roštový nosník nevýhody dřeva sice neodstraňuje, ale zachovává jeho přednosti a přírodní charakter a může být alternativou k nosníkům z lepeného lamelového dřeva.

Práce je zaměřena na stanovení polohy, počtu a rozměrů dřevěných hmoždíků, které přenášejí horizontální smykové síly. Posouzení je provedeno početně a graficky na příkladu čtyřvrstvého roštu z KVH hranolů. Odborná literatura se zabývá převážně stanovením únosnosti a tuhosti roštu a dimenzování hmoždíků za předpokladu užití hranolů velkých průřezů. Proto jsou v této práci zkoumány možnosti a limity konstrukce a výroby roštu (v mírném rozporu s motivací autora) na bázi KVH hranolů. Zjištěné výsledky ukazují souvislost mezi únosností, výškou a délkou hmoždíku, které se odrážejí v potřebném počtu hmoždíků, definují závěry pro příčné a podélné hmoždíky ze dřeva buku a smrku. Zařazená případová studie představuje částečně automatizovaný způsob výroby a alternativní řešení roštu z kónicky řezaných hranolů.



A

B

Obr. 1 Dřevěné konstrukce s roštovými nosníky v různém provedení hmoždíků: (A) Dlouhé naklonené a rybinové hmoždíky; foto Kamil Trgala, (B) Klínové vodorovné hmoždíky; Cascade Joinery 2019

2 Cíle práce

V konstrukci roštového nosníku je zásadní zamezit vzájemnému posuvu jednotlivých vrstev, které jej tvoří. Efektivním způsobem, jak toho dosáhnout je použití dřevěných hmoždíků, které se umísťují ve styčných spárách. Tyto hmoždíky musí přenést působící horizontální smykové síly vyvolané namáháním v ohybu. Možností konstrukce roštových nosníků z KVH hranolů se podle dostupných zdrojů doposud nikdo nezabýval. Cílem této práce je stanovit polohu počet a rozměr dřevěných hmoždíků v čtyřvrstevém roštovém nosníku na bázi KVH hranolů o délce devět metrů zatíženého osamělou silou v polovině rozpětí a spojitým zatížením. Zhodnotit rozdíl mezi podélným a příčným hmoždíkem z bukového a smrkového dřeva. Určit vhodnou vlhkost hmoždíku. Navrhnout zjednodušený postup výroby a uplatnění roštového nosníku v současných dřevěných konstrukcích.

Práce hledá odpovědi na tyto otázky:

Jsou nějaká omezení v rozměrech a počtu hmoždíků, která znemožňují jejich rozmístění ve styčné spáře?

Ovlivní orientace vláken hmoždíku jejich potřebný počet?

Je rozdíl v použití smrkového a bukového hmoždíku?

Je vůbec možné konstruovat roštový nosník z KVH hranolů a může být výroba na úrovni materiálových nákladů ekonomicky výhodná?

3 Rozbor problematiky

3.1 Masivní dřevěné konstrukční materiály

Základním stavebním materiálem dřevěných staveb je rostlé dřevo, jeho nehomogenita a vysoká variabilita vlastností omezuje jeho použití v novodobých dřevěných konstrukcích. Hlavním trendem současného dřevařsko-zpracovatelského průmyslu v této oblasti jsou technologie umožňující zvýšit kvalitu a omezit nepříznivé vlastnosti dřeva. (Bílek 2005) V oblasti masivních konstrukčních materiálů se jedná zejména o vymanipulování vad řeziva příčným dělením a následným spojením přířezů do masivního prvku větších rozměrů. Tímto způsobem je možné získat konstrukční prvek větších dimenzí, méně proměnlivých vlastností, větší pevnosti a kvality. (Král 2005)

Ve stavebnictví je možné použít jehličnaté i listnaté dřeviny vhodných fyzikálních a mechanických vlastností. Přesto se nejvíce používají jehličnaté dřeviny (80–90 %), převážně smrk. To je dáno jejich převažujícím zastoupením v lesích Evropy (podle Zprávy o stavu lesního hospodářství České republiky v roce 2017 je v ČR podíl smrku 50,3 %), rozhodující je však snadnější zpracování, větší délky, menší křivost kmene a nižší cena ve srovnání s listnatými dřevinami. (Bílek 2005) Na dřevěné spojovací prostředky (hmoždíky, kolíky) a jiné zvláštní části dřevěných konstrukcí se používají tvrdá listnatá dřeva jako buk a dub (Kuklík 2005).

Omezené rozměry konstrukčních prvků, které lze získat z jednoho kmene klasickými pilařskými postupy, limitují navrhování novodobých dřevěných konstrukcí větších rozponů. V reakci na tento požadavek se rozvinula výroba délkově, šířkově a výškově nastavovaných materiálů z dých a masivních přířezů, které současně poskytují lepší mechanické vlastnosti oproti rostlému dřevu. Poměr mezi hmotností a pevností těchto materiálů je lepší než u oceli (Král 2005; Böhm 2012). Spojení se realizuje technologií lepení (např. KVH, BSH, LVL), nebo mechanickými spojovacími prostředky ze dřeva nebo oceli (např. DLT, Holz100).

Vstupním materiálem pro výrobu masivních konstrukčních materiálů je deskové a hraněné řezivo, případně dýhy. Řezivo pro použití ve stavebnictví se podle normy ČSN EN 338 třídí do dvanácti tříd pevnosti pro jehličnaté a šesti pro listnaté dřeviny.

Třídy pevnosti C14–C50 (jehličnany a topol) a D30–D70 (listnáče) zahrnují charakteristické hodnoty (spodní 5% kvantil) hustoty pevnosti v ohybu, tahu a tlaku rovnoběžně a kolmo na vlákna, smykové pevnosti a modulů pružnosti. (Bílek 2005; Kuklík 2005)

3.1.1 Lepené lamelové dřevo, konstrukční dřevo, vrstvené dřevo

Lepené lamelové dřevo (LLD) známé pod označením BSH nebo Glulam je konstrukční materiál, který se u nás začal vyrábět už v roce 1952. Principem výroby je plošné slepení dřevěných lamel v celek. Takto lze vyrábět přímé a tvarové nosníky o prakticky neomezených průřezech a délkách. (Böhm 2012)

Ze smrkových lamel (prken, fošen) vysušených na 15 ± 3 %, tloušťky max. 45 mm, délky 2 až 5 m se nejprve vymanipulují vady, na čepovací frézce se vytvoří zubovitý spoj a nanese lepidlo. Poté se jednotlivé přířezy lisují do nekonečné lamely. Ty se čtyřstranně frézují, nanesou lepidlem (PF, MF, MDI) a slisují v šroubovém lisu v jeden celek. Po slepení se výsledný prvek dvoustranně frézuje, nakonec se zkrátí na požadovanou délku a vytvářejí se konstrukční spoje (Böhm 2012). Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky stanovuje norma ČSN EN 386. (Bílek 2005)

Lepené lamelové dřevo se třídí do pevnostních tříd podle ČSN EN 1194. Charakteristickým hodnotám pevnosti v ohybu 20–38 MPa odpovídají třídy GL 20–GL 38. Běžně vyráběné rozměry jsou do šířky 0,24 m, výšky 2 m a délky 32 m. To umožňuje vytvářet konstrukce s velkým rozponem a zatížením. LLD se používá v konstrukcích hal, stadionů, lávek a mostů. Výhodou LLD je lepší rozměrová stabilita a požární odolnost, snížení anizotropie, lepší kvalita povrchů a přesnost profilů. Mechanické vlastnosti jsou o cca 20 až 30 % lepší ve srovnání s rostlým dřevem. (Bílek 2005)

Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem, označované běžně zkratkou KVH (z německého konstruktionvollholz) je délkově nastavovaný, čtyřstranně frézovaný a tloušťkově egalizovaný materiál v délce až 18 m. Kromě vžitého označení KVH se používá anglický název Solid Structural Timber. (Böhm 2012)

Vstupním materiálem pro výrobu KVH hranolů jsou silné fošny, vždy s podélně proříznutou dřevinou (omezení pozdějšího vzniku a šíření trhlin). V Evropě se nejvíce používá smrk, jedle, modřín a douglaska. Řezivo s nadměrou je sušeno na uživatelskou vlhkost 15 ± 2 %. Tím je zajištěna tvarová stálost výrobku a sterilizace dřeva. V dalším kroku jsou na automatické zkracovací pile vyřezány vady a čepovací frézou frézovány zubovité spoje. Do spoje se nanese lepidlo a díly se slisují v nekonečný délkově nastavený vlys. Po vytvrzení lepidla se profil čtyřstranně frézuje, srážejí se hrany (zlepšuje požární odolnost). Výroba je automatizovaná a kontinuální. (Böhm 2012)

Výstupem je kvalitní, hoblovaný hranol v průřezích od 40 x 60 mm až 140 x 240 mm. Běžně vyráběná délka je do 13 m. Podle kvality povrchu se rozlišuje pohledový a standardní nepohledový KVH hranol. Mechanické vlastnosti obou typů jsou stejné. Cena KVH hranolů se pohybuje od 8 000 do 13 000 Kč/m³. (Böhm 2012)

Výhodou KVH hranolů je tvarová stálost (dáno sušením a absencí dřeviny) a lepší mechanické vlastnosti oproti rostlému dřevu (dáno vymanipulováním vad). Dále pak možnost vyrábět přesné dimenze a různé délky při stejném průřezu. Hranoly se třídí do pevnostních tříd podle charakteristické pevnosti. (Böhm 2012).

Vrstvené dřevo je materiál na bázi slisovaného a slepeného souboru dřev. V literatuře je uváděno pod zkratkou LVL– Laminated Veneer Lumber, eventuálně pod obchodními názvy. Jedná se o snahu o homogenizaci dřeva. K výrobě se používají dřeviny (smrkové, bukové, břízové) o tloušťce 3–4 mm, které se po nanesení lepidla za působení tepla a tlaku spojí v kompaktní celek. Oproti překližkám mají dřeviny převážně stejnou orientaci vláken a větší tloušťku. Po slisování se vzniklý deskový materiál o tloušťce do 90 mm a šířce 2,5 m řeže na požadované nosníky. Oproti jehličnatému řezivu třídy pevnosti GL 24 jsou mechanické vlastnosti, vyjma modulu pružnosti, přibližně dvakrát větší. (Bílek 2005; Böhm 2012)

Z plošných dřev se vyrábí americký Microllam a finský Kerto. Liší se v použité dřevině, vyráběných dimenzích, různým uspořádáním a orientací dřev. Materiál prodávaný jako Parallam (PSL) je vyráběn z pásků dřev jedle, douglasky a kanadské borovice o tloušťce 3 mm, šířce 13 mm a délce cca 2 m, slepených fenol-formaldehydovým lepidlem. Výsledný nosník má tloušťku 9–18 cm, šířku 24–45 cm a délku 20 m. Materiál DeltaStrand (TSL) je vyráběn z tyčí průřezu rovnostranného

trojúhelníku o délce strany 9,5 mm a délky cca 1,2 m. Po nanesení lepidla se tyče orientují podélně s délkou nosníku a slisují. (Král 2005; Böhm 2012)

Vrstvené dřevo vykazuje vysokou tvarovou stálost, pevnost v ohybu různých materiálů se pohybuje od 13 MPa do 21 MPa. Modul pružnosti v ohybu je 13 000–14 500 MPa, ve smyku 500–750 MPa (Bílek 2005). Vykazuje vysokou pevnost v tlaku a tahu. Používá se na vaznice, sloupy, nosníky s velkým zatížením a rozpětím. Nevýhodou je nutnost používat ocelové konstrukční spojovací prvky (Král 2005). Problematiku vrstveného dřeva zohledňují normy ČSN EN 14279 a ČSN EN 14374.

3.1.2 DLT, Holz100

Mezi konstrukční materiály z masivního dřeva vyráběné bez použití lepidel patří tzv. **DLT** a **NLT** panely (Obr. 2). Zkratky vycházejí z anglického Dowel Laminated Timber, respektive Nail Laminated Timber, v češtině se setkáme s označením panely z přířezů spojených dřevěnými kolíky nebo hřebíky, v němčině se označují jako Dübelholz, respektive Brettstapel. (Veselý 2013) V této práci je užíváno označení DLT.



Obr. 2 Přehled konstrukčních materiálů z masivního dřeva; Perkinswill 2019

Panely z lamel spojovaných hřebíky se začaly vyrábět ve Švýcarsku s myšlenkou environmentálně šetrného a zdravého stavebního materiálu už v 70. a 80. letech 20. století. Po roce 1990 byl ve Švýcarsku vyvinut systém spojování lamel pomocí dřevěných kolíků, tím se získal čistě dřevěný stavební materiál. Principem výroby je spojení jednotlivých přířezů (lamel) pomocí dřevěných kolíků z tvrdého dřeva. (Structure craft 2017)

Výroba DLT probíhá na plně automatizované lince velké kapacity. Lamely panelu jsou vyráběny z hoblovaného řeziva. V prvním kroku se na zkracovací pile

vymanipulují označené vady. Dále se vytváří zubovitý spoj a lepí nekonečný vlys, ten je čtyřstranně hoblován na přesný rozměr, případně profilován. Následuje skládání lamel širší stranou k sobě a jejich slisování v horizontálním i vertikálním směru. Do předvrtaných otvorů je hydraulicky vtlačen dřevěný kolík. Posledním krokem je egalizace rozměrů panelu a CNC opracování konstrukčních spojů. (Structure craft 2017)

Používají se kolíky z tvrdého dřeva (v našich podmínkách zejména buk) vysušené na vlhkost 5 až 6 %, vlhkost lamel je 12 ± 3 %. Po vsunutí kolíku do otvoru dojde vlivem hygroskopicity dřeva k vyrovnání rovnovážné vlhkosti dřeva kolíku s dřevem lamel, kolík nabobtná a vzniklé tření vytvoří pevný spoj. Větší třecí síla a pevnost spoje je umocněna předvrtáním otvoru o 1 mm menšího průměru, než je průměr kolíku. Pro lamely je vhodnou dřevinou smrk, jedle, douglaska a další. DLT panely se vyznačují dobrou zvukově izolační schopností, velkou tepelnou kapacitou, nízkým tepelným odporem, dobrou požární odolností a nízkou ekologickou zátěží. Vyrábí se v různých profilech a úpravách. Používají se ke konstrukci střech, podlah, stěn a podhledů a pro spřažené dřevo-betonové konstrukce. (Structure craft 2017)

Holz100 je stavební materiál (systém) rakouské firmy Thoma z vrstveného masivu, jehož jednotlivé vrstvy jsou (na rozdíl od DLT) kladeny křížem a spojeny pouze dřevěnými kolíky, zcela bez lepidla. Jednotlivé vrstvy tvoří prkna a fošny kladené užší stranou k sobě, počet vrstev je lichý a ve vztahu k průběhu vláken jsou uloženy křížem (kolmo, pod úhlem 45°). Vzniká tak kompaktní a velmi tuhý, tvarově stálý materiál, který velmi dobře využívá mechanické vlastnosti dřeva. Podobným materiálem je MHM– Masiv Holz Mauer (Veselý 2013).

Za vývojem systému Holz100 stojí Erwin Thoma. Princip spojování vrstev je stejný jako u DLT s rozdílem, že výroba není plně automatizovaná a kolíky se zarážejí do otvoru ručně palicí nebo hydraulicky. Pro lepší průchod jsou kolíky napuštěny slunečnicovým olejem. Pro výrobu se používá výhradně tzv. měsíční smrkové, jedlové, borovicové a modřínové dřevo z vysokohorských oblastí, přirozeně sušené a neošetřené (Thoma 2006; Thoma Holz100 2017).

Výroba začíná volbou vhodného okamžiku těžby stromů, následuje pořez a sušení řeziva. Dřevěné smrkové fošny (vlhkost 12 ± 2 %) se vrství vertikálně, horizontálně a diagonálně bez mezer v kompaktní stavební element. Celek se stáhne pomocí

popruhů a ručních napínáků. Následuje vyvrtání otvorů do předem stanovených pozic (sít' cca 20 x 20 cm) a zaražení vysušených dřevěných kolíků (průměr 20 mm). Na hotovém panelu se zhotovují konstrukční spoje pomocí CNC opracování. Výsledkem je kompletní systém pro výstavbu budovy. Rozměry panelů jsou až 3 x 8 m při tloušťce do 40 cm, řadí se do třídy pevnosti C24, mají dobré tepelně izolační vlastnosti, výjimečnou požární odolnost a velkou tepelnou kapacitu, vykazují velkou míru odstínění vysokofrekvenčního záření. Tloušťka a příčné uspořádání prvků stěny (Obr. 3) se liší podle účelu a místa v konstrukci. (Thoma 2006; Thoma Holz100 2017; Thoma 2018)



Obr. 3 Varianty panelů systému Holz 100; Thoma Holz100 2019

Podobné plošné materiály s obdobným použitím se vyrábějí také technologií lepení, označují se jako lepený vrstvený masiv, obchodními názvy CLT, KLH, Novatop, BSP a BBS (Veselý 2013). Jejich nevýhodou je velká spotřeba lepidla a podobné nedostatky jako u LLD. Materiály spojované dřevěnými kolíky jsou oproti nim zdravější a šetrnější k životnímu prostředí. Jelikož není ve výrobě použito lepidlo vyžadující čas pro lisování a vytvrzení, rychlost výroby je vyšší než u podobných křížem lepených vrstvených masivních panelů. U DLT je rychlost linky až jeden panel za 5-10 min (Thoma 2006; Structure craft 2017).

3.2 Roštové nosníky

Roštový nosník je nejjednodušší typ dřevěného nosníku složeného průřezu, který je složen z dvou nebo tří hranolů (ev. kuláčů, trámů, polštářů) mechanicky spojených tak, že se při průhybu nosníku nemůžou po sobě posouvat, ale působí jako jeden celek se společnou osou těžiště (Dutko 1976). Spojení lamel se zajišťuje různými způsoby: svorníky, kolíky, vruty, skobami. Spojovací prvky zajišťují těsné přilehnutí

vrstev roštu. K zamezení vzájemného posuvu vrstev se používají prvky přenášející smyková napětí při ohybu. Používají se dřevěné hmoždíky (špalíky, záchytky), kovové záchytky (např. typ bulldog), destičkové vložky, případně větší množství dřevěných kolíků, nebo tzv. zazubení. Protože se jedná o poddajné spojení, únosnost a tuhost roštových nosníků je v porovnání s nosníky celistvého průřezu stejné velikosti menší. Mění se také rozdělení smykových sil ve spojích po délce nosníku. (Dutko 1976; Šefců 2010)

Roštové nosníky mají význam v případě, kdy nelze z jednoho kmene získat hranol potřebné délky a dostatečného průřezu (Obr. 4). Jeho použití je spojeno s historickými konstrukcemi velkých rozponů, kde lze tuto techniku s výhodou uplatnit. Rošty se používají jako stropní trámy nebo podélné a příčné průvlaky. (Šefců 2010) V minulosti se roštové nosníky hojně uplatňovaly v konstrukcích mostů (Dutko 1976). Při větších rozponech se rošty nastavují a podepírají sloupem, uložení se provádí pomocí sedla podepřeného pásky. (Šefců 2010) Americký výrobce FraserWood dodává roštové nosníky (anglicky key beam) o výšce až 120 cm a délce až 18 m. Vyrábějí se ze sušeného řeziva smrku, douglasky, amerického cedru a červeného dubu. Rošty ze dvou až tří hranolů jsou spojeny svorníky. Smykové zatížení je přenášeno dřevěnými hmoždíky z tvrdého sušeného dřeva. Vlákna hmoždíku jsou orientována kolmo na směr vláken spojovaných dřev. Výrobce udává až 90 % účinnost plně kompozitního (např. LLD) nosníku stejného průřezu. Za výhodu uvádí potřebu menších dimenzí výchozí kulatiny, tedy menší zátěž pro lesní ekosystém a řemeslně přitažlivý vzhled (Fraser Wood Industries 2018).



A

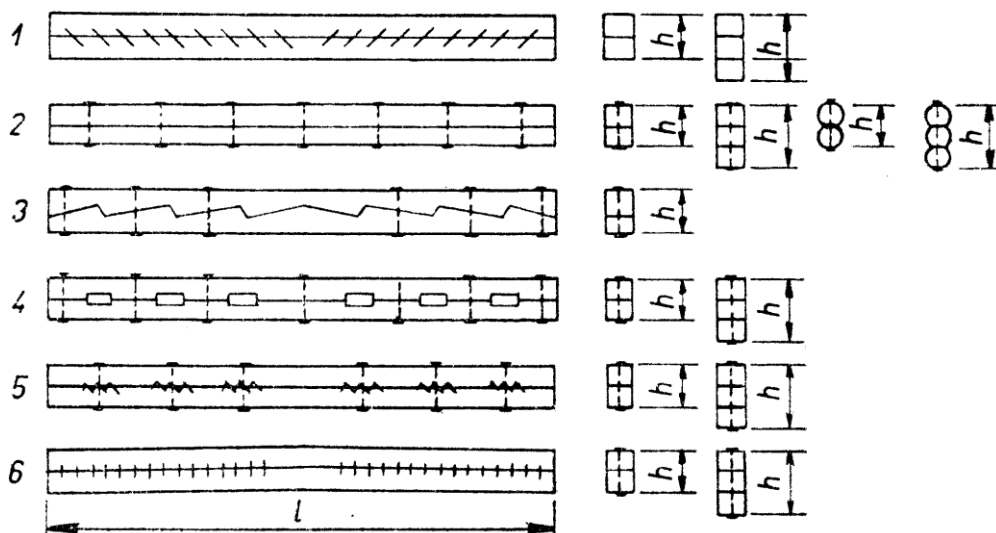
B

Obr. 4 Příklady použití roštového nosníku s nakloněnými příčnými hmoždíky klínového tvaru v současné dřevěné konstrukci (A) Tolland, Connecticut, USA; The Barn Yard and Great Country Garage 2019, (B) Costa Rica; Fire tower engineered timber 2019

3.2.1 Konstrukce roštového nosníku

Dutko (1976) rozděluje roštové nosníky podle konstrukce na (Obr. 5):

- Záchytkové rošty- s dřevěnými, nebo ocelovými hmoždíky a svorníky
- Svorníkové rošty- hranoly spojené svorníky
- Zaskobené rošty- hranoly spojené tesařskými skobami
- Zazubené rošty- hranoly s tvarovými zuby a svorníky
- Hmoždíkové rošty s mezerou- s dřevěnými hmoždíky a svorníky



Obr. 5 Roštové nosníky: zaskobený (1), svorníkový (2), zazubený (3), záchytkový s dřevěnými hmoždíky (4), záchytkový s ocelovými hmoždíky (5); Derevjaginův (6); Dutko 1976

Při **záchytkových** roštech se rozteč hmoždíků volí tak, aby každý přebíral stejný díl smykové síly. V souladu s teoretickým průběhem smykových sil je rozmístění

nerovnoměrné, správněji v souladu se skutečným průběhem smykových sil (ovlivněno poddajností spojů) rovnoměrné. Svorníky, které spojují lamely se umísťují do poloviny vzdálenosti mezi záchytkami. Velikost a počet hmoždíků se určí z velikosti smykových napětí (smykové síly) po délce nosníku. Hmoždíky mají tvar hranolů, klínů nebo kruhových tyčí z tvrdého dřeva. Hmoždíky se kladou vodorovně nebo šikmo zapuštěné. Orientace vláken je buď rovnoběžná s délkou nosníku (podélný hmoždík), nebo kolmá (příčný hmoždík) – lze použít dva klíny zarážené proti sobě. Při více vrstvách se hmoždíky po výšce střídají. Pro velké zatížení je doporučeno volit poměr $b/h = 1/2$ (poměr šířky hranolu ku jeho výšce), pro třívrstvé rošty $b/h = 1/3$. Variantou záchytkového roštu je tzv. Derevjaginův rošt, kde smykové síly přebírají destičky z tvrdého dřeva, překližky, ev. oceli. Dubové destičky tloušťky $t = 10$ až 16 mm, délky $l = 4$ až $6t$ destičky se vkládají do zářezů výšky $h = 1/2 l + 1$ cm, max. $1/5$ výšky hranolu, směr vláken je rovnoběžný s výškou nosníku. Šířka se rovná šířce hranolu. Rozmístění je rovnoměrné po délce roštu. (Dutko 1976; Hájek 1997; Šefců 2010)

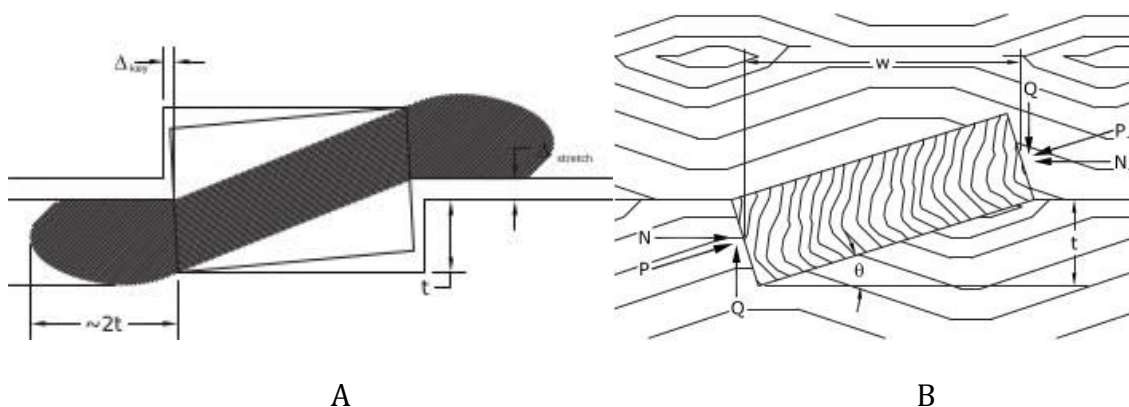
Svorníkové rošty jsou složeny zpravidla ze dvou lamel spojených svorníky ve vzdálenosti asi 50 cm. Průměr svorníků je 20–26 mm, u podpor se dávají svorníky většího průměru. U širších roštů lze svorníky umístit ve dvou řadách. Při zatížení se dřív svorníku zatlačuje do dřeva a ohýbá. **Zaskobené** rošty mají lamely spojené tesařskými skobami umístěními šikmo pod úhlem 45° tak, aby byly namáhány tahem, ve vzdálenosti asi 50 cm. Střídají se krátké a dlouhé skoby, aby bylo zachyceno co nejvíce vláken. Orientace skob je na protilehlých stranách nosníku opačná. Jejich výroba je rychlá, ale náročná na množství ocele. Svorníky a skoby neposkytují dostatečné sevření, tření je malé a smykové síly jsou špatně přenášeny. Dřív svorníku je při zatížení zatlačen do dřeva a ohýbá se. Proto se používají jen na provizorní konstrukce. (Dutko 1976; Hájek 1997; Šefců 2010)

Hranoly **zazubených** roštů mají z jedné strany vyřezány zuby dlouhé 70–90 cm, vysoké max. $1/5$ výšky hranolu, uprostřed zubu se umísťuje silný svorník. Směr zubů je takový, aby při ohybu nosníku na sebe zuby tlačily čelní plochou a neoddalovaly se. Směr zubů se mění v místě změny znaménka příčné síly (v polovině délky nosníku). Spojení pomocí zazubení je velmi náročné na přesnost provedení a

vzniká při něm poměrně velký objem odřezků. (Dutko 1976; Hájek 1997; Šefců 2010)

Hmoždíkové rošty s mezerou se konstruují s mezerou rovnající se téměř výšce hranolu. Tím se zvětší výška roštu, a tedy i moment setrvačnosti (opravený o zmenšovací součinitel 0,6 pro dvouvrství, 0,4 pro třívrství rošt). Výroba je nenáročná, ale vyžaduje vysokou přesnost provedení a použití svorníků v místě hmoždíku. Nevýhodou je oslabení hranolu hmoždíkem a svorníkem současně. Jako hlavní nosník se hodí jen u provizorních konstrukcí. Roštové nosníky je třeba vyrábět s konstrukčním nadvýšením, aby vlivem zatížení osa nosníku vyrovnala. Běžné nadvýšení je $1/200$ rozpětí. (Dutko 1976; Hájek 1997; Šefců 2010)

Ukazuje se, že tření mezi vrstvami má jen velmi malý vliv na přenos smykových sil, stejně jako prvky spojující lamely (svorníky, vruty, hřebíky, dřevěné kolíky). V teoretické analýze chování roštu se proto neuvažují. Na tuhost roštu a zamezení posunu vrstev má zásadní vliv tuhost hmoždíkového spoje. Ta je negativně ovlivněna otačením dosedacích ploch hmoždíku a snahou hmoždíku se v uložení otočit a oddálit lamely (Obr. 6 A). Otačení a klopení je způsobeno horizontálními silami (Obr. 6 B). Na velikost otačení má vliv pevnost dřeva v tlaku a orientace vláken. U šikmo uložených hmoždíků se zvětšuje tlačaná plocha a snižuje napětí, ale dochází k většímu klopení hmoždíku a oddálení lamel. Pro určení směru vláken hmoždíku je rozhodující velikost smykových napětí. (Miller 2011) Problematika početního řešení únosnosti, tuhosti, dimenzování a rozmístění hmoždíků roštového nosníku je rozebrána v kapitole 4.



Obr. 6 (A) Posuv hmoždíku v drážce otačením a klopením při zatížení nosníku, (B) síly působící na nakloněný hmoždík: N – horizontální síla, P – osová síla, Q – síla potřebná k zamezení rotace hmoždíku; Miller 2011

3.3 Mechanické způsoby spojování lamel vrstvených konstrukčních materiálů

Konstrukční prvky dřevěných konstrukcí spojujeme mechanickými spojovacími prostředky, tesařskými spoji a lepením. Tyto spoje lze použít i při výrobě vrstvených konstrukčních materiálů. Mechanické spojovací prostředky a lepení se velmi liší svou poddajností a nesmí se předpokládat jejich spolupůsobení (Kuklík 2005). Tato práce se níže zabývá pouze mechanickými způsoby spojování, lepení se při výrobě roštového nosníku neuplatňuje.

3.3.1 Spoje s kovovými spojovacími prostředky

Mezi kovové mechanické spojovací prostředky řadíme hřebíky, sponky, vruty, kolíky a svorníky, tesařské skoby, kovové záchytky (prstencový a ozubený hmoždík), destičky s prolisovanými trny (Gang-nail), speciální ocelové spojovací prvky (Kuklík 2005).

Pro vytvoření roštu se z výše uvedených spojů hodí jen některé. Sponky, Gang-nail destičky a ocelové spojovací prvky (úhelníky, patky, třmeny, styčnickové desky apod.) se nepoužívají vůbec. Tesařské skoby a samostatné svorníky nezajistí dostatečné spolupůsobení spojovaných lamel (příliš malé tření ve spárách) a hodí se spíše pro provizorní konstrukce. (Dutko 1976)

Spojovací prostředky kolíkového typu (hřebíky, sponky, kolíky, svorníky, vruty) se v dřevěných konstrukcích vyskytují zejména ve spojih namáhaných stříhem. Únosnost při příčném namáhání je dána jejich ohybovou tuhostí a pevností dřeva v otlacení pod dříkem spojovacího prostředku. Únosnost při zatížení silami ve směru osy dříku se liší podle použitého spojovacího prostředku. (Kuklík 2005)

Hřebíky jsou v dřevěných konstrukcích nejpoužívanější. Zhotovují se v různých délkách, průměrech a provedení dříku a hlavy. Hřebíky se zarážejí ručně nebo pneumaticky přímo do dřeva nebo do předvrtaných otvorů. Předvrtání zvyšuje únosnost spoje i pracnost, ale zmenšuje účinný průřez prvku. Ocelové **kolíky** mají nejmenší průměr 6 mm (tolerance -0,0/+0,1 mm), vždy se zarážejí do předvrtaných otvorů stejného průměru. Používají se v kombinaci s ocelovými plechy. **Svorníky**

jsou ocelové tyče opatřené hlavou, závitem a maticí. Osazují se do předvrtaných otvorů (max. o 1 mm větší) a potom se utahují do těsného sevření dřevěných prvků. Při seschnutí dřeva je nutné je dotahovat. Vždy se používají v kombinaci s ocelovými příložkami. **Vrutky** mají větší únosnost než hřebíky a používají se především pro připojení prvků namáhaných na odtržení. Vrutky s průměrem nad 5 mm se šroubují do předvrtaných otvorů. Jejich stříhová pevnost je menší než u spojovacích prostředků jmenovaných výše. **Hmoždíky** se vkládají a zatlačují do spár mezi spojovanými prvky vždy v kombinaci se svorníky, které zabezpečí přitlačení všech prvků. Hodnoty únosnosti stanovuje obvykle výrobce. Mezi používané typy patří prstencový hmoždík (prstenec z pásoviny) a ozubený hmoždík označovaný bulldog. (Kuklík 2005)

3.3.2 Mechanické svařování

Pokud se mechanicky indukovaným třením dřev vyvine dostatečně vysoká teplota, dojde k tání jeho složek (zejména ligninu ve střední lamelle) a následně vzniku pevného spoje – sváru. K realizaci spoje lze použít mechanické tření vyvozené vibracemi, údery, nebo vysokorychlostní rotací kolíku v podkladu. Vzhledem k principiálně jednoduchému provedení se vysokorychlostní rotace kolíku jeví jako nejvýhodnější. A to i pro použití v dřevěných konstrukcích a výrobě konstrukčních materiálů, nebo v konstrukcích nábytku, kde tato technologie může nahradit lepení. (Pizzi et al. 2004) Při správně zvolených parametrech svařování a provedení je pevnost spoje v tahu srovnatelná nebo vyšší než s použitím PVAc lepidla. Výsledný spoj je poddajný. Technologii lze provést použitím standardních stojanových vrtaček a komerčně používaných bukových kolíků. (Pizzi 2004 et al.; Bocquet et al. 2007)

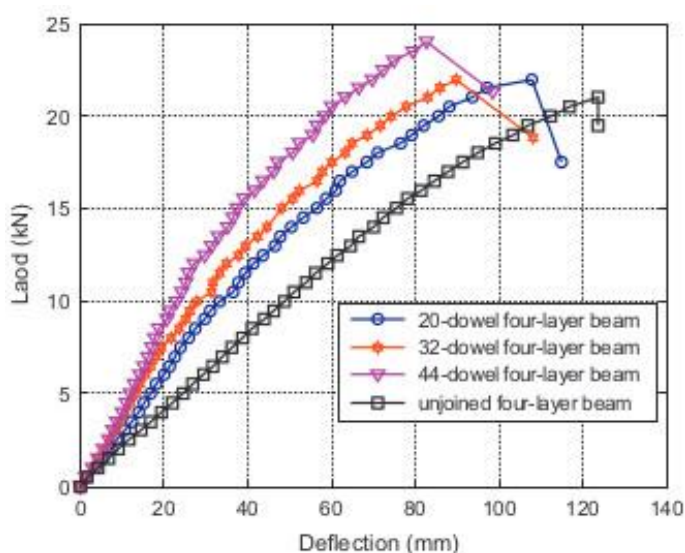
Technologii lze použít i pro výrobu vrstveného nosníku (Obr. 7). Experimentálně bylo zjištěno, že při vhodném úhlu a směru kolíků vzhledem ke způsobu zatěžování (smyk, smyk a tah, smyk a tlak) je rotačně svařovaný spoj schopný přenést značné zatížení. Toho lze využít i v případě ohybem namáhaného nosníku, kde kolíky přejímají smyková napětí. Takto vyrobené nosníky se svou pevností v ohybu a průhybem vyrovnají roštům s hřebíky, a dokonce lepenému lamelovému dřevu. (Bocquet et al. 2007)



Obr. 7 Čtyřvrstvý nosník spojený vysokorychlostní rotací kolíku při výrobě, ztužidla usnadňují výrobu; O'Loinsigh et al 2012

Z experimentu provedeném na nosníku složeném ze čtyř vrstev smrkového řeziva třídy C16 o rozměrech 140 x 38 mm a délce 2200 mm, svárem spojených 56, 44 a 32 bukovými kolíky, zatíženého čtyřbodovým ohybem, vyplynulo následující: svařování rotací kolíku je možné provést i pro prvky větších průřezů, vyšší počet kolíků zvyšuje únosnost a efektivitu kompozitního působení (až 74 % pro 56 kolíků), k porušení dochází v tažené zóně nosníku, kolíky mohou přejímat smyková napětí v kompozitním systému. (O'Loinsigh et al 2012)

Kompozitní nosník má přibližně stejnou pevnost v ohybu, jako nosník z vrstev pouze na sebe položených (Obr. 8). Ovšem průhyb kompozitního nosníku je mnohem menší, tedy jeho tuhost je větší. Závěrem je evidentní efektivita tohoto postupu při výrobě nosných prvků větších dimenzí, bez použití adheziv, a tedy zachování přírodního, trvale udržitelného charakteru dřeva (O'Loinsigh et al 2012).



Obr. 8 Napětově–deformační diagram z ohybové zkoušky čtyř vrstvého nosníku; O'Loinsigh et al 2012

3.3.3 Dřevěné spojovací prvky

Zejména v historických konstrukcích (a jejich rekonstrukcích) se uplatňují dřevěné spojovací prvky jako kolíky, hmoždíky (záchytky, hmoždinky) a klíny. Kolíky se používají samostatně (např. kolíkem jištěné čepy) nebo v kombinaci s hmoždíky (např. nastavovací plátový spoj). Mají zpravidla kruhový, 4, 6, 8 úhelníkový průřez, často jsou mírně kónické a zarážejí se do otvoru menšího průměru. Zhotovují se z tvrdého dřeva (dub, buk). Používají se jako jistící prvek tesařských spojů i k přenosu smykových sil. Hmoždíky jsou důležité prvky nastavovacích tesařských spojů a zejména roštů. Vyrábí se z tvrdého dřeva a jsou namáhány smykem a tlakem. Podobně jako hmoždíky se dají v roštích použít klíny s jednostranným úkošem 1 : 20– 1 : 25. (Šefců 2010)

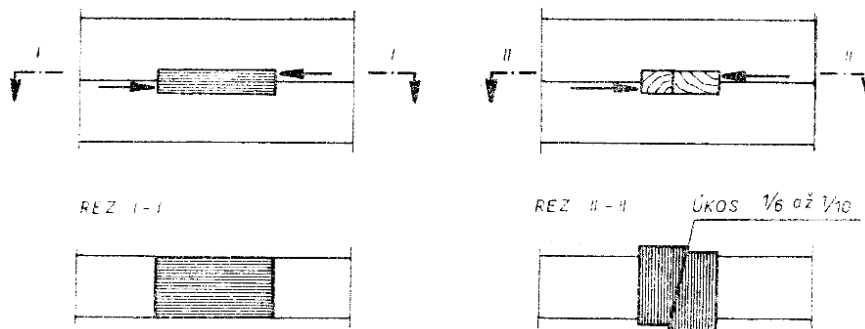
V konstrukci roštu se hmoždíky vkládají do přesných zářezů v hranolech, můžou mít podobu špalíků, destiček, nebo klínů (Obr. 9). Výhodou klínů (úkos 1 : 6–1 : 10) vkládaných proti sobě je možnost jejich dotažení po seschnutí dřeva klínu i hranolu. Šířka hmoždíku je zpravidla větší než šířka hranolu, a to zejména v případě příčných hmoždíků. (Dutko 1976)



Obr. 9 Naklopený hmoždík ve tvaru klínů z javorového dřeva; *Fire tower engineered timber 2019*

Takový spoj nazýváme záchytkový. Je namáhán převážně tlakem a smykem. Vzhledem k průběhu vláken hmoždíku a nosníku rozlišujeme hmoždíky příčné a podélné (Obr. 10). Směr vláken podélného hmoždíku je shodný se směrem vláken (podélnou osou) roštu, směr vláken příčného je kolmý na směr vláken (podélnou osu) roštu. Hloubka zářezu pro hmoždík je nejméně 2 cm, nejvíce 1/5 výšky hranolu. Rozměry hmoždíků se stanoví podle velikosti smykových sil působících v mezivrstvách nosníku. Velikosti smykové síly musí odpovídat velikost plochy,

kteřá smykové napětí přebírá, napětí nesmí překročit pevnost dřeva ve smyku. Stejně tak dosedací plocha musí vyhovět přenosu tlakových napětí. (Dutko 1976; Miller 2011). Pro spojení lamel roštu lze použít i kolíkový spoj, jehož princip je popsán u materiálů DLT a Holz100 (kap. 3.1.2.).



Obr. 10 Zobrazení podélného a příčného hmoždíku; Dutko 1976

3.4 Namáhání ohybem

Prut libovolného tvaru, zatížený vnějšími silovými účinky je namáhán v ohybu, jestliže výslednice vnitřních sil v řezu kolmém k jeho podélné ose vytvářejí dvojici sil N , kterou nazýváme ohybovým momentem M_o . Vektor dvojice M_o je kolmý k podélné ose prutu. Rozlišujeme ohyb rovinný a prostorový. Rovinný ohyb nastává, je-li stopa ohybového momentu totožná s jednou z hlavní centrálních os průřezu. Neutrální osa je k stopě ohybového momentu kolmá a totožná s druhou hlavní centrální osou. Nejsou-li tyto podmínky splněny, mluvíme o prostorovém, šikmém ohybu. (Hájek 1988)

Ohyb patří mezi základní druhy namáhání a v praxi se vyskytuje velmi často, pruty zatížené ohybem nazýváme nosníky. Nosník může být zatížen osamělou silou, spojitým zatížením, nebo osamělou silovou dvojicí. Způsob uložení nosníku musí být navržen tak, aby zachytil předpokládané silové účinky a v uložení vznikající reakce. Ze soustav rovnic rovnováhy lze určit šest neznámých silových účinků. Z momentových podmínek se vypočítají velikosti a směr reakcí v podporách. K určení velikosti a směru vnitřních sil se používá zejména metoda řezu. Posouvající síla v libovolném řezu nosníku je rovna algebraickému součtu všech příčných vnějších sil a dvojic působících po jedné straně uvažovaného řezu (obdobně ohybový moment). Kritéria pevnosti a přetvoření vyžadují znalost průběhu

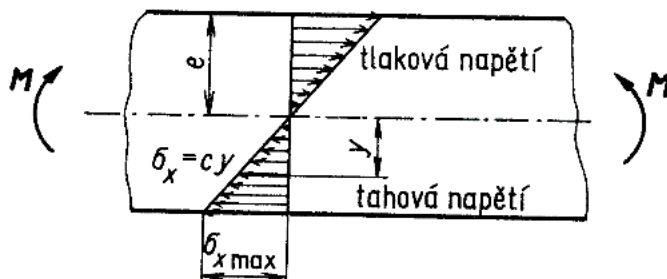
ohybových momentů a posouvajících sil podél osy nosníku. Lze je určit metodou řezu, nebo užitím Schwedlerovy věty. Pro určení napětí a deformací se používají geometrické charakteristiky průřezu– statický moment průřezu, kvadratický moment průřezu a modul průřezu v ohybu. K dimenzování a pevnostnímu posuzování nosníků je nutná i znalost průběhu napětí v průřezu. (Hájek 1988)

3.4.1 Napětí při ohybu

Rozdělení napětí v průřezu lze uvažovat pro prostý ohyb – působí jen ohybové momenty. Výsledná napětí jsou pouze normálová. Technická teorie ohybu k odvození průběhu napětí zavádí předpoklad o rovinnosti průřezů: řezy kolmé k podélné ose nosníku v nezatíženém stavu zůstanou i po zatížení nosníku rovinné a kolmé k prohnuté ose prutu. (Hájek 1988) Při zatížení se nosník prohne, některá vlákna se prodlouží, jiná zkrátí, některá svou délku nezmění. Na konvexní straně vznikají napětí tlaková, na konkávní tahová, mezi nimi se nachází nezatížená neutrální osa (Obr. 11). Lze dokázat, že v oblasti platnosti Hookova zákona je velikost napětí přímo úměrná vzdálenosti od neutrální osy, závislost je lineární. Tento závěr je platný i v případě, že se zároveň vyskytují posouvající síly a smyková napětí. Pro vyšetření průběhu a velikosti napětí v MPa lze uplatnit zákon o rozdělení normálových napětí od ohybu v průřezu nosníku (Michalec a kol. 2010):

$$\sigma_x = \frac{M_o(x)}{J_z} \cdot y$$

kde: M_o – ohybový moment vnějších sil ($N.m^{-1}$); J_z – kvadratický moment průřezu (mm^4); y –vzdálenost od neutrální osy (mm).



Obr. 11 Průběh tahových a tlakových napětí v nosníku obdélníkového průřezu v závislosti na vzdálenosti y od neutrální osy; Hájek 1988

Maximální napětí se nacházejí v bodech průřezu nejvíce vzdálených od neutrální osy pro $y=h/2$. Pro výpočet maximální hodnoty napětí se veličina J_z dělí vzdáleností krajního vlákna, definuje se veličina průřezový modul v ohybu W_o , která zohledňuje vzdálenost krajních vláken od neutrální osy. Je patrné, že z hlediska únosnosti jsou nejvhodnější takové průřezy, kde je nevíce hmoty v maximální vzdálenosti od neutrální osy. (Michalec a kol. 2010)

3.4.2 Smyková napětí v průřezu nosníku od posouvajících sil

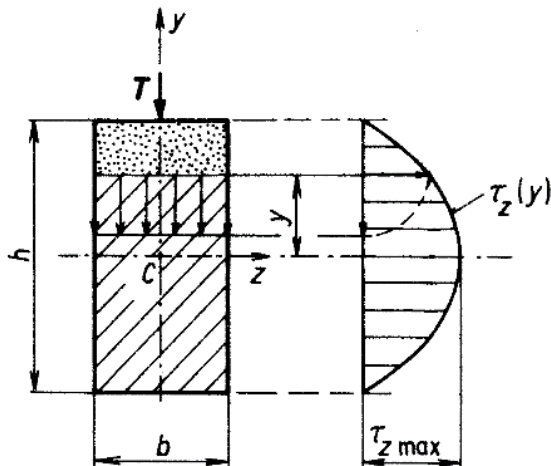
V praxi se prostý ohyb vyskytuje jen zřídka, častěji působí též posouvající síla, která posouvá průřez ve směru působení a je v rovnováze s výslednicí vnitřních sil určených smykovými napětími. Užitím metody řezu je možné dojít k závěru, že k napětím ve směru zatížení existují sdružená napětí (platí zákon o sdružených napětích) mající směr shodný s podélnou osou prutu. Výsledná síla od napětí ve směru podélné osy prutu musí být v rovnováze s další osovou silou. Protože ve směru podélné osy na nosník žádná vnější síla nepůsobí, může být v rovnováze pouze se silou od normálových napětí ve směru podélné osy. Tato posouvající síla vytváří v nosníku smykové napětí ve směru délky nosníku. Velikost středního smykového napětí v MPa je definována vztahem (Hájek 1988):

$$\tau_{ns} = \frac{T \cdot S}{J \cdot b}$$

kde: T– posouvající síla (N); S– statický moment oddělené části průřezu k ose symetrie (mm³); J– kvadratický moment průřezu ose symetrie (mm⁴); b–šířka nosníku (mm).

Tento vztah známý jako Žuravského vzorec, je využíván při stanovení smykových napětí v libovolném místě průřezu. Žuravský formuloval hypotézu zhruba takto: *V symetrickém průřezu, který je zatížen silami kolnými k podélné ose prutu a působícími v rovině souměrnosti, jsou složky napětí τ_z konstantní ve všech bodech stejně vzdálených od neutrální osy.* Platnost hypotézy je omezena na vysoké průřezy, kde $h/b > 2$ a poskytuje řešení blízka přesnému. Velikost napětí je závislá na vzdálenosti y od neutrální osy. Pro obdélníkový průřez se průběh napětí mění parabolicky a maximum se nachází v místě, kde $y=0$ tedy v bodech na neutrální ose,

zatímco v bodech, kde $y = h/2$ (na povrchu průřezu) je smykové napětí nulové (Obr. 12). (Hájek 1988) Ke stejným závěrům dochází Požgaj (1993), největších hodnot dosahuje smykové napětí za ohybu na koncích nosníku (pod podporou) v místě neutrální osy.

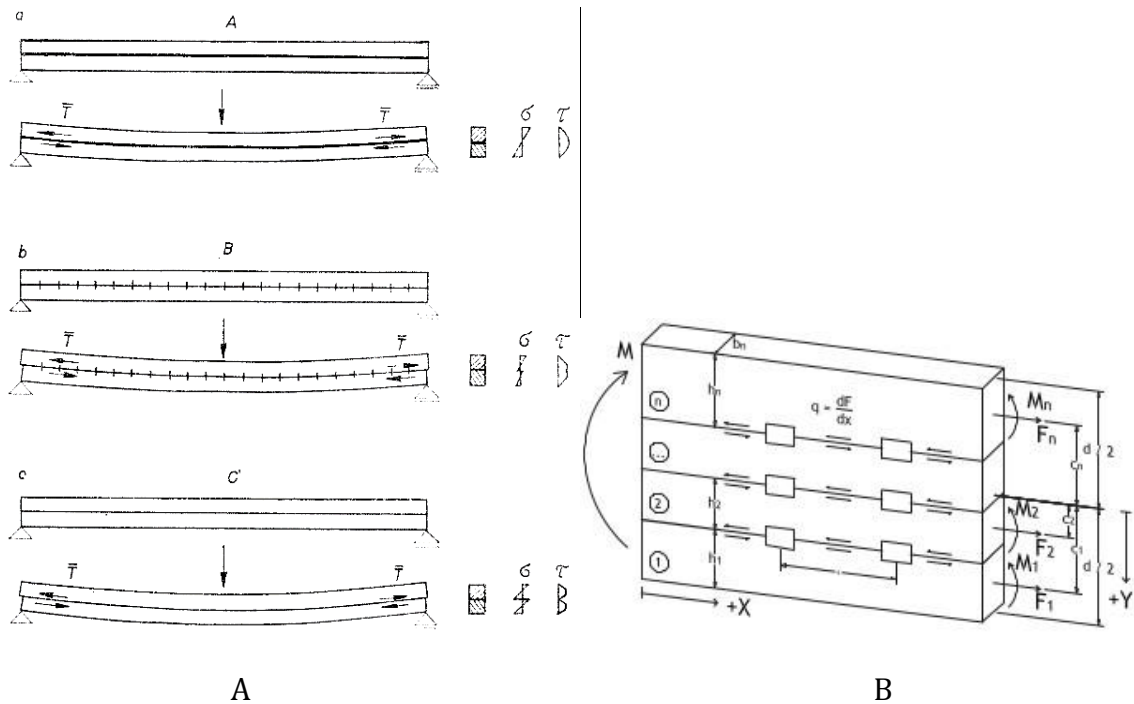


Obr. 12 Průběh smykového napětí v nosníku obdélníkového průřezu v závislosti na vzdálenosti y od neutrální osy; Hájek 1988

Podél výšky nosníku vzniká různý zkos v závislosti na změně smykového napětí. U obdélníkového průřezu je největší zkos v místě neutrální osy, nulový na povrchu. Dochází tak k zborcení řezu od posouvající síly. Mezi osamělými silami je posouvající síla konstantní a průběh normálových napětí neovlivní. Při spojitém zatížení se mění posouvající síla spojitě, zkosity sousedních řezů se liší, v každém řezu vznikají doplňující normálová napětí (průběh se mění) a přestává platit hypotéza o rovinnosti řezů. Žuravského rovnice platí jen přibližně. Přijatelná použitelnost je přípustná při poměru $\tau/\sigma < 1/5$. U dlouhých nosníků je platnost rovnice zajištěna. (Hájek 1988)

Smyková napětí mohou existovat pouze jako sdružená. V podélných rovinách nosníků působí smykové síly, které ovlivňují namáhání v příčném průřezu a mají význam při určování poddajnosti nosníku. U volně vrstvených nosníků a nosníků z poddajně spojených vrstev (roštů) působí posouvání vrstev po sobě (Obr. 13), což má negativní vliv na tuhost nosníku. Posuvům lze zabránit použitím svorníků a hmoždíků, které jsou vystaveny smykovému namáhání, které bude největší v ose symetrie svazku. V takovém případě lze úlohu řešit jako kompaktní nosník. Jsou-li použity hmoždíky, svorníky se do pevnostního výpočtu nezahrnují. (Hájek 1988)

Postup výpočtu posouvajících sil, smykových napětí, zatížení hmoždíků, jejich počtu a dimenzí je uveden v kapitole 4.



Obr. 13 (A) Působení nosníků složeného průřezu: lepený nosník (a), roštový nosník s poddajnými spoji (hmoždíky) (b), nosník z volně ložených vrstev (c); Dutko 1976, (B) řez n -vrstevným roštem, působící síly a momenty; Miller 2011

3.4.3 Pevnost dřeva v ohybu

Ohybová pevnost dřeva je poměrně vysoká, a i díky tomu se dřevo často uplatní pro konstrukční prvky ohybem namáhané. Jedná se o jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva. S ohledem na průběh vláken a letokruhů rozlišujeme pevnost dřeva v ohybu na:

- pevnost v ohybu kolmo na vlákna v tangenciálním nebo radiálním směru, vlákna rovnoběžná s podélnou osou tělesa,
- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, příčný řez orientován ve směru zatěžující síly, nebo kolmo na zatěžující sílu.

První případ je velmi běžný a sledovaný. Rozdíl ohybové pevnosti v radiálním a tangenciálním směru je významný pouze u jehličnatých dřevin. Druhý případ se prakticky nevyskytuje. Mez pevnosti je v tomto případě jen asi 5–10 % meze

pevnosti v ohybu kolmo na vlákna. Při trojbodovém ohybu s nárůstem napětí k mezi pevnosti dochází nejprve k trvalým deformacím vláken od povrchu směrem k neutrální vrstvě, a nakonec k porušení tělesa. Protože pevnost dřeva v tlaku podél vláken je mnohem menší než pevnost v tahu, porušení tělesa začíná v tlakové zóně. Ke konečnému porušení dojde v zóně tahové, nejprve vytrháním vláken a pak zlomem. Zlom je tupý pro křehká dřeva, nebo vláknitý pro pevná a houževnatá dřeva. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu se pro naše dřeviny pohybují od 50 do 130 MPa. (Požgaj 1993) Mez úměrnosti se průměrně pohybuje na 70 % meze pevnosti (Matovič 1993).

Pevnost dřeva v ohybu je ovlivněna vlhkostí a hustotou. Přírůstek vlhkosti o 1 % může způsobit pokles pevnosti až o 4 %. Dalším faktorem jsou rozměry tělesa. Při zkouškách se dodržuje štíhlostní poměr, podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa, na hodnotě $l/h \geq 14$. Při vyšší štíhlosti pevnost stoupá. Vliv na pevnost v ohybu mají vady dřeva, zejména suky, které pevnost snižují, jejich vliv stoupá, pokud se nacházejí v povrchových vrstvách. Při ohýbání dřeva se využívá snížení pevnosti v ohybu, respektive zlepšení plastičnosti, zvýšením vlhkosti a teploty dřeva. (Lexa 1952; Tsoumis 1991)

3.5 Pevnost dřeva ve smyku

Necháme-li na těleso působit dvě stejně velké síly opačného směru, vyvolají tyto síly vzájemné posunutí sousedních průřezů. Mluvíme o čistém smykovém namáhání. S ohledem na vláknitou strukturu dřeva, anatomické roviny a směr působení vnějších sil rozlišujeme tyto druhy smyku (Požgaj 1993):

- a) smyk v radiální rovině při působení sil ve směru vláken
- b) smyk v tangenciální rovině při působení sil ve směru vláken
- c) smyk v radiální rovině při působení sil kolmo na vlákna
- d) smyk v tangenciální rovině při působení sil kolmo na vlákna
- e) smyk (střih) v příčné rovině při působení sil kolmo na vlákna v tangenciálním směru
- f) smyk (střih) v příčné rovině při působení sil kolmo na vlákna v radiálním směru.

Dřevo má ve směru vláken poměrně malou pevnost ve smyku. Dřevo listnáčů má asi 1,5krát větší pevnost než jehličnany. V tangenciální rovině je asi o 10–30 % větší než v radiální rovině (a zvyšuje se se zastoupením dřeňových paprsků). U jehličnanů je rozdíl nepatrný. (Matovič 1993) Průměrné hodnoty se pohybují v rozmezí 6 až 19 MPa (Požgaj 1993). Smyková pevnost kolmo na vlákna v radiální a tangenciální rovině je přibližně 2krát menší než pevnost ve smyku ve směru vláken (průměrně 3 až 8 MPa), rozdíl mezi rovinami je malý (Matovič 1993). Smyk v příčné rovině (střih) je z hlediska uplatnění dřeva významný. Vyskytuje se např. v kolíkových spojích, pod hlavicemi svorníků, u destičkových záchytek apod. Střihová pevnost je asi 3 až 4krát větší než ve směru vláken, průměrné hodnoty dosahují 20 až 52 MPa. (Požgaj 1993)

Smyková pevnost lineárně roste se zvyšující se hustou. Vlhkost má největší vliv od 8 % do meze hygroskopicity. S rostoucí vlhkostí se pevnost snižuje. Změna vlhkosti o 1 % způsobí změnu smykové pevnosti cca o 3 %. (Matovič 1993)

3.6 Pevnost dřeva v tlaku

Pokud na těleso působí vnější síly a stlačují ho (působí proti sobě, kolmo na průřez), mluvíme o tlakovém namáhání. Zatížená vlákna se zkracují a poruší se roztlačením. S ohledem na anizotropii (anatomické směry) dřeva rozlišujeme (Požgaj 1993):

- a) pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken– σ_L
- b) pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna v radiálním směru– σ_R
- c) pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna v tangenciálním směru– σ_T .

Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken je z hlediska praxe nejpodstatnější. U dřev s vysokou hustotou a pevností se porušení projeví smykem dvou částí tělesa vůči sobě. Linie smyku probíhá na radiální ploše pod úhlem 90° a na tangenciální pod úhlem 60°. U vlhkého dřeva s malou pevností dochází k otlacení vláken na čelních plochách a vybočení stěn zatěžovaného tělesa. (Matovič 1993) Pro pevnost je rozhodující vzájemné spojení elementů dřeva, ale také pevnost elementů jako takových. Přičemž se předpokládá, že zatížení přenášejí zejména tlustostěnné struktury dřeva (letní tracheidy, libriformní vlákna). Pevnost v tlaku ve směru vláken se u našich dřevin pohybuje v rozmezí od 30 do 70 MPa. Nejvyšší průměrné

pevnosti dosahuje dřevo akátu, habru a dubu, nejnižší pak dřevo topolu a olše. (Požgaj 1993) Průměrné hodnoty meze úměrnosti závisí na pravidelnosti struktury dřeva a uvádějí se rozlišně: pro tvrdé listnáče 66 %, pro měkké listnáče 70 % a pro jehličnany 78 % z meze pevnosti, variabilita je 18 % (Matovič 1993).

Působením tlaku kolmo na vlákna nedochází k porušení oddělením částí tělesa, ale k deformaci a zhuštění struktury. Je proto obtížné přesně určit mez pevnosti, v úvahu se bere mez úměrnosti vyjádřená pro stanovená kritéria, označuje se jako konvenční mez pevnosti. (Matovič 1993) S ohledem na až 3krát vyšší pevnost letního dřeva oproti jarnímu se průběh napětově–deformačního diagramu liší podle směru zatěžování a pro různé dřeviny. Při tlaku v radiálním směru je rozhodující početnost a velikost dřeňových paprsků (např. dub, buk, habr, javor). Při tangenciálním tlaku probíhá deformace na úkor letních i jarních vrstev letokruhu. Letní tlustostěnné buňky přebírají větší část napětí. To se projevuje zejména u jehličnanů a listnáčů kruhovitě pórovitých. (Požgaj 1993)

Rozlišujeme pevnost v tlaku kolmo na vlákna na celou plochu, na část délky a část délky a šířky. Při zatížení na část plochy se na přírůstu pevnosti (průměrně 20–25 %) podílí vliv ohýbaných vláken na hraně přítlačné desky. Konvenční mez pevnosti v tlaku kolmo na vlákna je průměrně 10krát menší než v tlaku ve směru vláken, variabilita je cca 28 %. (Matovič 1993) Průměrné hodnoty konvenční meze pevnosti v tlaku kolmo na vlákna se u našich dřevin pohybují od 2,5 do 14 MPa, s variabilitou 10 až 25 %. (Požgaj 1993)

Pevnost se snižuje se stoupající vlhkostí dřeva až do meze hygroskopicity cca o 3,5–4 % na 1 % přírůstu vlhkosti. Se stoupající teplotou se pevnost v tlaku snižuje. Naopak s rostoucí hustotou se pevnost lineárně zvyšuje. Vliv má také odklon vláken, při tlaku ve směru vláken odklon vláken o 15° způsobí pokles až o 20 %. (Matovič 1993)

4 Metodika

4.1 Charakteristika posuzovaného roštu

Vzhledem k omezeným možnostem vyrábět z jednoho kmene hranoly dlouhé 9 m v potřebném průřezu, zvolil jsem pro tuto práci roštový nosník složený z nepohledových KVH hranolů. S ohledem na konstrukční principy použití hmoždíků (viz kapitola 4.2), běžně dostupné průřezy KVH hranolů a požadavek přiměřeného celkového průřezu jsem zvolil profil hranolu 180 x 140 mm (šířka x výška) a celkem čtyři vrstvy. Sudý počet vrstev znamená lichý počet styčných spár mezi hranoly, čímž je zajištěno, že se hmoždíky vyskytují v místech největšího smykového namáhání a je usnadněno jejich dimenzování. Celkový průřez 180 x 560 mm odpovídá dostupným profilům z LLD, zajišťuje velkou únosnost a dobré využití kulatiny. Poměr $h/b=3,1$ dovoluje použít Žuravského hypotézu pro výpočet smykových sil a napětí. V níže uvedených výpočtech jsou za pevnosti dřeva dosazeny charakteristické hodnoty pevnosti podle ČSN EN 338 pro třídu pevnosti C24 a D30 (Tab. 1). V práci jsem posuzoval roštový nosník a hmoždíky pro zatížení osamělou silou uprostřed rozpětí (Obr. 14 A) a spojitým zatížením (Obr. 14 B)

Tab. 1 Hodnoty pevností dřeva třídy pevnosti C24 a D30 podle ČSN EN 338 použité ve výpočtech; autor

Hmoždíky			KVH hranol			
Pevnost BK D30 (MPa); ČSN EN 338			Hodnoty pevnosti SM KVH C24 (MPa); ČSN EN 338			
Směr	Smyk	Tlak	Smyk	Tlak	Klopení	
					tg KVH	rad KVH
R	3	8	2,5	2,5	2,5	2,5
T	3	8	2,5	2,5	2,5	2,5
LR/LT	3	23	2,5	21	2,5	2,5
Pevnost SM C24 (MPa); ČSN EN 338						
Směr	Smyk	Tlak				
R	2,5	2,5				
T	2,5	2,5				
LR/LT	2,5	21				

Předběžným výpočtem pevnosti v ohybu celistvého průřezu a předpokladu použití jehličnatého řeziva pevnostní třídy C24 (pevnost v ohybu 24 MPa) jsem stanovil maximální velikost zatěžující síly působící uprostřed rozpětí na 100 kN. Velikosti reakcí v podporách, maximální ohybový moment a průběh posouvajících sil

se stanoví z podmínek rovnováhy. Vzorec pro výpočet největší osamělé síly uprostřed mezi podporami, při známém průřezu a pevnosti v ohybu je:

$$F_{max} = \frac{1}{6} b \cdot h^2 \cdot \sigma \cdot 4 \quad (N)$$

kde: b – šířka (mm); h – výška (mm); σ – pevnost v ohybu (MPa); l – vzdálenost podpěr (mm).

Ověření únosnosti roštu jsem provedl podle vzorce:

$$\sigma = \frac{M_{omax}}{\eta \cdot W_0} \quad (MPa)$$

kde: M_{omax} – největší ohybový moment; W_0 – modul průřezu v ohybu; $\eta=0,8$ – součinitel poddajnosti spoje (Dutko 1976).

Po dosazení a úpravě dostaneme:

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2 \cdot \eta} \quad (MPa)$$

kde: F – působící síla (N); l – rozpon nosníku (mm); b – šířka (mm); h – výška (mm); η – součinitel poddajnosti spoje (-).

Vypočtené napětí dosahuje hodnoty 30 MPa, což je více než pevnost v ohybu pro třídu C24. Lze tedy volit nižší zatěžovací sílu, nebo použít jehličnaté řezivo třídy C30. KVH hranoly se v pevnostní třídě C30 běžně nevyrábějí. Z toho důvodu jsem přepočítal přijatelnou působící sílu na 80 kN, pro kterou vyhovuje pevnost KVH v ohybu 24 MPa. Tato hodnota je uvažována ve všech níže uvedených výpočtech.

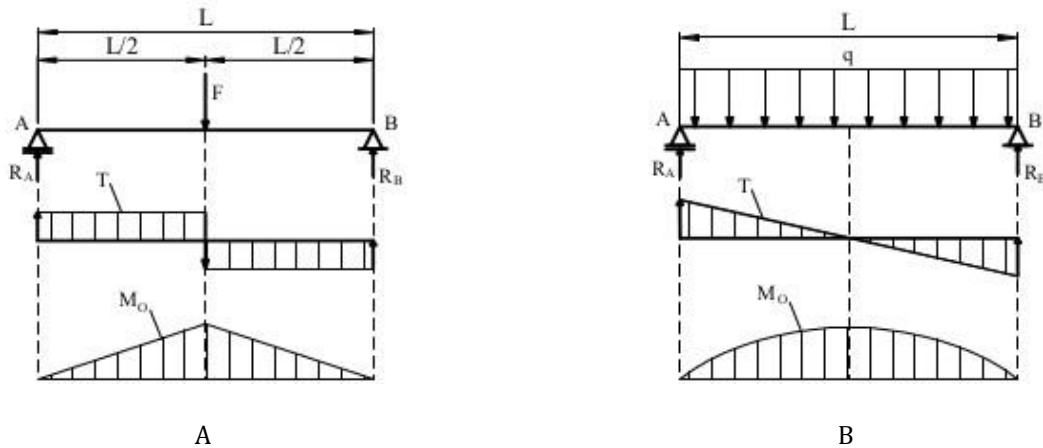
Obdobně jsem postupoval při určení velikosti spojitěho zatížení q . Maximální ohybový moment uprostřed rozpětí při spojitěm zatížení je:

$$M_{omax} = \frac{1}{8} q l^2 \quad (N \cdot m).$$

Po dosazení a úpravě vzorce pro výpočet napětí roštu se velikost spojitěho napětí vypočítá podle:

$$q = \frac{4}{3} \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot \eta \cdot \sigma}{l^2} \quad (N \cdot m^{-1})$$

Takto jsem stanovil přípustné spojité napětí na 17,8 kN/m, tato hodnota je užitá ve výpočtech níže. Spojení vrstev nosníku může být dosaženo vruty, svorníky, nebo dřevěnými kolíky (viz kapitola 3.2). Podmínkou je, aby spoj odolal tahové síle vyvolané klopením hmoždíku a zajistil těsné spojení lamel roštu. Spojovací prvky nejsou do výpočtů v této práci zahrnuty.



Obr. 14 Schéma zatížení osamělou silou F (A) a spojitém zatížením q (B) a průběhu posouvající síly T a ohybového momentu M_o ; autor

4.2 Konstrukční principy použití hmoždíků v roštovém nosníku

Při návrhu roštového nosníku je nutné při daném zatížení určit počet, rozmístění a rozměr hmoždíků, které přenášejí smykové síly. Návrh hmoždíků jsem provedl na základě známých konstrukčních principů a výpočtu. Pro výpočet je nutné znát průřez roštu a jednotlivých hranolů, rozpětí roštu, velikost zatížení a pevnostní podmínky. Výpočtem se stanoví průřezové charakteristiky nosníku, velikost posouvajících sil, smykové napětí a síly, únosnost hmoždíku z hlediska usmýknutí, otlačení a klopení, počet záchytek, a minimální rozteč. Orientaci vláken, dřevinu a rozmístění hmoždíků jsem volil na základě zjištěných poznatků.

4.2.1 Předběžné dimenzování hmoždíků

Dřevinu a orientaci vláken hmoždíku volíme s ohledem na velikost přenášených smykových sil a počet hmoždíků. Rozměry a umístění hmoždíku vycházejí z únosnosti jedné záchytky a principů konstrukce roštových nosníků.

Předběžný rozměr hmoždíků pro čtyřvrstvý rošt o průřezu lamel 180 x 140 mm, celkovém průřezu 180 x 560 mm, délce 9 m jsem určil na základě těchto doporučení:

- tvar je hranol nebo klín
- hloubka zářezu je min. 20 mm, ne víc než $1/5 h$ hranolu
- nejmenší světlá vzdálenost mezi hmoždíky a vzdálenost od konce je dána poměrem nejmenší únosnosti hmoždíku ku šířce a pevnosti dřeva hranolu ve smyku
- svorníky, kolíky se umísťují cca 50 cm od sebe
- hmoždík leží v polovině vzdálenosti mezi svorníky
- hmoždíky se neumísťují nad sebe
- z hlediska únosnosti na otláčení je optimální poměr $t/a=1/5$, délka záchytky $a=5t$
- z hlediska únosnosti na smyk je optimální poměr $t/a=1/10$, délka záchytky $a=10t$
- nelze vyhovět oběma podmínkám, volí se $a=6t$ až $10t$

4.2.2 Výpočet smykového napětí a horizontálních smykových sil

Užitím Žuravského vzorce jsem stanovil maximální smykové napětí uprostřed svazku. Statický moment setrvačnosti oddělené části průřezu pro obdélníkový průřez se rovná:

$$S = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right)$$

y - vzdálenost od osy průřezu (m).

Kvadratický moment obdélníkového průřezu se vypočítá podle:

$$J = \frac{1}{12} b \cdot h^3,$$

zavedením plochy $A = b \cdot h$, po dosazení a úpravě dostaneme největší smykové napětí pro $y=0$:

$$\tau = \frac{3T}{2A}.$$

kde: T - posouvající síla v průřezu.

Výslednou maximální horizontální sílu působící ve styčné spáře na polovině délky nosníku zatíženého osamělou silou v polovině rozpětí, která namáhá hmoždíky na smyk jsem stanovil podle Hájka (1988):

$$Q_{1/2} = b \frac{l}{2} \cdot \tau = \frac{3}{8} \cdot \frac{F \cdot l}{n \cdot h} \quad (N)$$

kde: F – síla působící uprostřed rozpětí (N); l – rozpětí nosníku; h – výška

hranolu (mm); n – počet vrstev (-),

a podle Dutka (1976) na metr délky působí síla:

$$\tau \cdot b = Q = \frac{T \cdot S}{J} \quad (N \cdot m^{-1}).$$

Vynásobením polovinou délky nosníku získáme stejný výsledek jako podle předchozí rovnice. Pro spojitě zatížení je celková smyková síla působící ve styčné spáře na polovině délky nosníku podle Dutka (1976):

$$Q_{1/2} = Q \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{T \cdot S}{J} \cdot \frac{l}{4} = \frac{1}{2} q \cdot l \cdot \frac{l}{4} \cdot \frac{S}{J} = \frac{M_{omax} \cdot S}{J}.$$

Dosazením za $y = h/4$ do rovnice pro výpočet statického momentu S a následně do rovnic pro výpočet horizontální síly Q podle Dutka, jsem vypočítal horizontální síly působící v krajních styčných spárách svazku.

4.2.3 Stanovení rozměru hmoždíku

Aby bylo možné ověřit, zda použité hmoždíky (a v jakém počtu) přenesou působící smykovou sílu, je nutné určit únosnosti jednoho hmoždíku z různých hledisek (Obr. 15) Únosnost hmoždíku je závislá na jeho rozměrech a odpovídající pevnosti dřeva. Základní výpočtové únosnosti jsem vypočítal ze vztahů:

a) z hlediska usmýknutí

$$U_s = a \cdot b \cdot R_{s\perp}$$

b) z hlediska otláčení

$$U_{tl} = b \cdot t \cdot R_{tl\perp}$$

c) z hlediska klopení- za předpokladu trojúhelníkového rozdělení napětí mezi hmoždíkem a spojovanými prvky, lze spočítat z podmínky momentové rovnováhy:

$$U_k = Q \cdot \frac{2}{3} \cdot a$$

kde největší přípustná hodnota síly Q

$$Q = Q \cdot \frac{a}{4} \cdot R_{tl\perp}$$

potom je únosnost záchytky z hlediska klopení

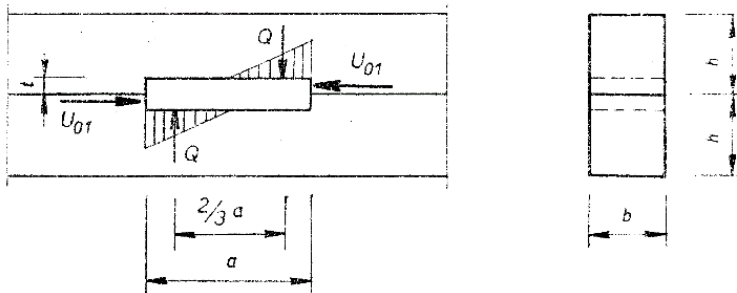
$$U_k = \frac{1}{6t} a^2 \cdot b \cdot R_{tl\perp}$$

kde: a - délka hmoždíku (mm); b - šířka hmoždíku=šířka hranolu (mm);

t - zapuštění hmoždíku (mm); $R_{s\perp}$ návrhová pevnost dřeva ve smyku

kolmo na vlákna (MPa); $R_{tl\perp}$ - návrhová pevnost dřeva v tlaku kolmo na

vlákna (MPa). (Dutko 1976)



Obr. 15 K výpočtu základních únosností hmoždíku; Dutko 1976

Hodnoty pevnosti ve smyku a tlaku ve výše uvedených vzorcích se volí podle směru zatěžování (orientace vláken hmoždíku). V případě styku různých dřevin a ploch se při výpočtu otláčení a klopení bere v úvahu nižší hodnota pevnosti v tlaku.

Stanovení výpočtových únosností (celkem až šestnáct kombinací) jsem provedl pro podélný a příčný hmoždík z bukového a smrkového dřeva. Pro obě dřeviny jsem uvažoval výrobu z radiálního a tangenciálního řeziva, tj. hlavní plochy jsou převážně radiální nebo tangenciální. Dva rozměry hmoždíku odpovídají výše uvedeným zásadám, třetí rozměry hmoždíku jsou použity pro porovnání. Pro minimální a maximální zapuštění $t = 20$ mm, respektive 28 mm, přičemž délka odpovídá spodní hranici podmínky $a = 6$ až 10 t, jsou rozměry hmoždíku (š x v x l) 180 x 40 x 120,

respektive 180 x 56 x 168 mm. Pro porovnání slouží rozměr 180 x 100 x 300, který je ovšem pro zadaný rošt nepoužitelný. Hodnoty potřebných mechanických vlastností dřevin jsem převzal z ČSN EN 338, pro třídu pevnosti C24 a D30 pro smrkové, respektive bukové hmoždíky.

Na smykovou únosnost jsem hmoždík posuzoval pro smyk při působení sil ve směru vláken a při působení sil kolmo na vlákna v tangenciální a radiální rovině. Na únosnost v otláčení pro tlak kolmo na vlákna v obou rovinách a tlak ve směru vláken.

KVH hranol se vyrábí jako půlený, dřev je vždy proříznutá, pravá strana odpovídá radiální ploše a levá tangenciální. Při posuzování únosnosti na klopení se stýkají a vzájemně otláčují různé nebo stejné plochy (případně dřeviny) s rozdílnými vlastnostmi. Volí se vždy nižší pevnost v tlaku v kombinaci. Např. pro radiální plochu KVH hranolu připadá v úvahu kombinace s radiální, nebo tangenciální plochou hmoždíku, který je orientován podélně, nebo příčně, vyroben z různých dřevin. Pro jeden rozměr hmoždíku tak připadá v úvahu osm únosností v klopení, jejichž hodnoty se budou vzhledem k výše popsaným souvislostem opakovat. Celkem pro jeden rozměr a dřevinu hmoždíku připadá až šestnáct možných výpočtových únosností, z nichž se vypočítá nutný počet a minimální světlá vzdálenost.

4.2.4 Stanovení počtu a umístění hmoždíků

Ze známé horizontální síly $Q_{1/2}$ a výpočtových únosností jsem stanovil počet hmoždíků na polovinu délky nosníků podle rovnice:

$$n_{hm} = \frac{Q_{1/2}}{U_{min}} (-).$$

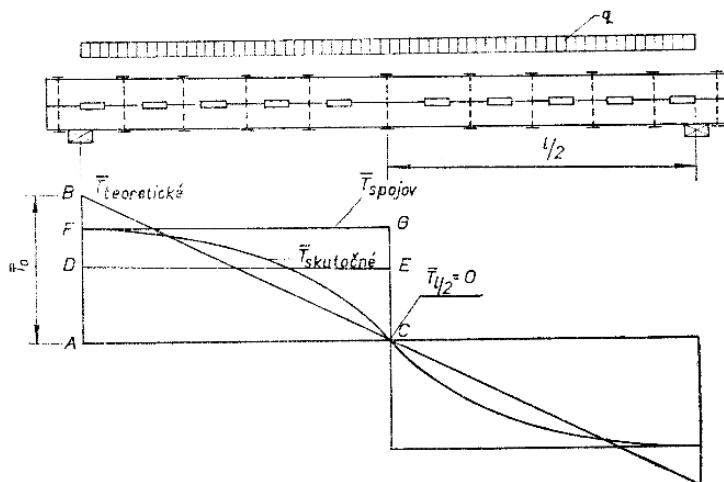
Ve vzorci je nutné volit vždy minimální výpočtovou únosnost U_{min} pro daný rozměr a orientaci vláken hmoždíku. Nejmenší světlá vzdálenost mezi hmoždíky a délka zhlaví závisí na šířce nosníku a smykové pevnosti KVH hranolu ve směru vláken. Výpočet jsem provedl z rovnice:

$$v = \frac{U_{min}}{b \cdot R_{s||}} (-).$$

Takto stanovený počet hmoždíků a velikost mezer mezi nimi zajistí přenos smykových sil v maximálně namáhané styčné spáře v ose symetrie svazku. Rozmístění po délce roštu je vzhledem ke konstantnímu průběhu posouvající síly rovnoměrné.

Při spojitém zatížení se teoretický průběh posouvajících sil po délce nosníku mění spojitě. Hmoždíky by měli být rozmístěny nerovnoměrně a přenášet stejnou sílu. Ve skutečnosti se vlivem poddajnosti spojů mění i skutečný průběh posouvajících sil ve styčné spáře a je rovnoměrnější (Obr. 16). Proto se hmoždíky rozmisťují po délce roštu též rovnoměrně. Potřebný počet hmoždíku se pak vypočítá podle (Dutko 1976):

$$n_{hm} = 1,5 \cdot \frac{Q_{1/2}}{U_{min}} (-).$$



Obr. 16 Vliv poddajnosti spojů na průběh posouvajících sil ve styčné spáře při spojitém zatížení; Dutko 1976

Ve styčných spárách vzdálených od osy symetrie svazku o $h/4$, tedy mezi krajními hranoly, působí menší síly a lze v nich umístit odpovídající nižší počet hmoždíků.

4.2.5 Postup rozmístění hmoždíků v roštu

Výrobou zářezů pro hmoždíky a otvorů pro spojovací prostředky se oslabuje účinný průřez lamel, respektive roštu. Z toho důvodu jsem volil umístění, tak aby hmoždíky nebyly nad sebou a v těsné blízkosti spojů. Hmoždíky jsem umístil ve světlé

vzdálenosti 50 mm od spojovacího prostředku. Osová vzdálenost mezi hmoždíky je vždy stejná. Horizontální světlou vzdálenost mezi hmoždíky v sousedních spárách jsem volil s ohledem na symetrii rozmístění. Rozteč mezi spojovacími prostředky (kolíky, svorníky o průměru 20 mm) jsem uvažoval min. 500 mm a jejich umístění do poloviny rozteče hmoždíků v ose symetrie roštu. První spojovací prostředek je umístěn v osově vzdálenosti 200 mm od zhlaví. Hmoždíky v krajních styčných spárách jsou umístěny ve světlé vzdálenosti minimálně 50 mm od spojovacího prostředku. V polovině rozpětí roštu jsem mezi hmoždíky ponechal vždy světlou vzdálenost 500 mm. V krajních styčných spárách jsem počet hmoždíků snížil. Návrh rozložení hmoždíků jsem provedl graficky v programu TurboCAD 19. Rýsoval jsem jen varianty pro zatížení osamělou silou, které obsahují nízký počet hmoždíků. Vyšel-li počet hmoždíků příliš velký, nebylo možné je s ohledem na výše uvedené požadavky v roštu umístit. Pro každou z rýsovaných variant jsem vytvořil dvě alternativní možnosti uspořádání, které jsou zakresleny společně ve stejné variantě.

4.3 Ekonomické zhodnocení

Do kalkulace přibližné ceny posuzovaného roštového nosníku jsem zahrnul pouze náklady na materiál. K porovnání ekonomické výhodnosti výroby roštového nosníku z KVH hranolů slouží materiál s podobnými vlastnostmi a použitím, tedy lepený lamelový hranol BSH.

Na výrobu zadaného roštu je potřeba 4 x 9 bm KVH hranolu 180 x 140 mm, celkem 36 bm. Druhou uvažovanou položkou je řezivo na výrobu hmoždíků. Kalkulaci jsem provedl pouze orientačně pro podélný hmoždík z bukového dřeva o rozměrech 180 x 56 x 199 v počtu 5 ks (š x v x l), vyrobený z normovaného deskového řeziva. Pro kalkulaci jsem zvolil řezivo 200 x 60 (norma ČSN EN 1313-2), ze kterého je možné daný hmoždík vyrobit. Potřebná délka je z důvodů nadmír na sesychání a opracování cca 1300 mm.

Výslednou cenu roštu, která se rovná součtu ceny KVH hranolů a řeziva na hmoždík, jsem porovnal s BSH hranolem stejného průřezu a délky. Průměrné ceny jsem stanovil z dostupných maloobchodních cen internetových prodejců (Tab. 2). Uvedené ceny jsou včetně DPH.

Tab. 2 Srovnání maloobchodních cen KVH hranolů 180 x 140 mm a maloobchodních cen BSH hranolů; autor

Prodejce KVH	Cena (Kč/bm)	Prodejce BSH	Cena (Kč/m ³)	Prodejce řeziva	Cena (Kč/m ³)
Stavbaonline.cz	368,1	Bios s.r.o.	19 663	Susenerezivo.cz	13 000
Holzhandeldeutschland.de	505,4*	Holzhandeldeutschland.de	19 623*	Palubky-rezivo.eu	14 000
České stavebniny s.r.o.	344	Stasa.cz	19 498	Dřevo HŽV s.r.o.	11 495
Baushop s.r.o.	473,19	Palis s.r.o.	18 000	Lika-zn.cz	13 000
Bios s.r.o.	372	DEK a.s.	22 772	Pila Lipůvka s.r.o.	14 250
Drevoonline.cz	334,6	-	-	Drevoprodejdomino.cz	14 520
Průměr	399,6	Průměr	19 911	Průměr	13 378

*cena v EUR, přepočteno dle kurzu ČNB k 30.3. 2019

Přibližné ceny srovnávaných materiálů jsem vypočítal následovně:

Cena za BSH= průměrná cena za m³ x objem nosníku (š x v x l) = 19911 x (0,18 x 0,56 x 9)

Cena za KVH 180x 140 celkem= průměrná cena za bm x počet bm= 399,6 x 36

Cena za BK řezivo: průměrná cena za m³ x potřebný objem řeziva= 13 378 x (0,2 x 0,06 x 1,3)

Cena za materiál roštu= cena za KVH + cena za řezivo

5 Výsledky a diskuze

5.1 Výsledky

5.1.1 Horizontální síly

Pro napětí v ohybu $\sigma = 24 \text{ MPa}$ jsem výpočtem stanovil velikosti zatěžující síly F , spojitěho zatížení q a napětí ve smyku při ohybu τ . Dále horizontální síly působící na metr délky Q a na polovině rozpětí $Q_{1/2}$ ve styčných spárách vzdálených o y od neutrální osy:

- a) v ose symetrie svazku pro $y = 0$,
- b) v okrajových spárách pro $y = h/4$.

A to pro oba zmíněné způsoby zatížení. Výsledné hodnoty zobrazuje tabulka 3.

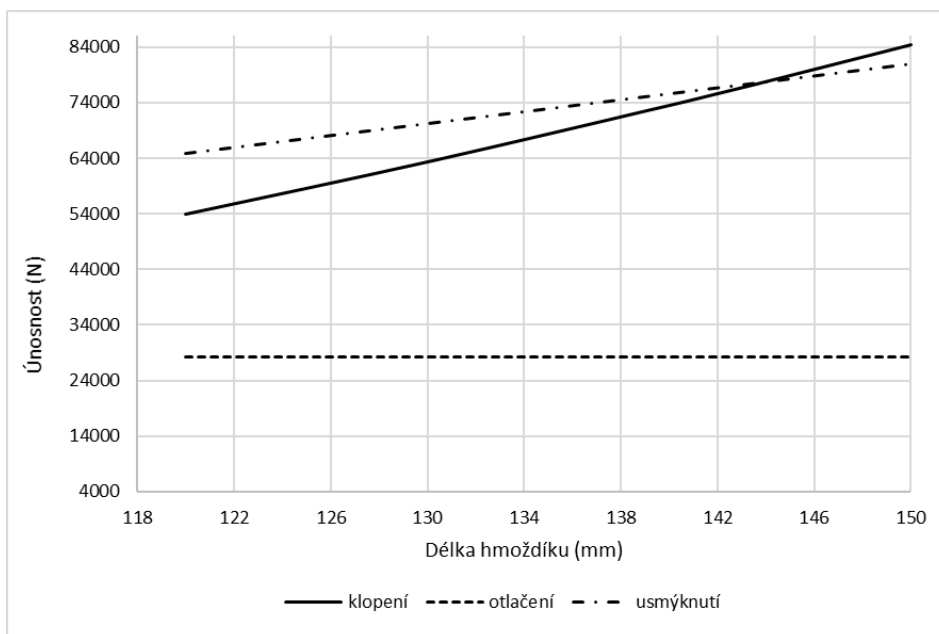
Tab. 3 Zatížení osamělou silou a spojitým zatížením podle vzdálenosti y od osy symetrie svazku; autor

Zatížení osamělou silou						Spojitě zatížení				
	F (kN)	σ (Mpa)	τ (Mpa)	Q (N/m)	$Q_{1/2}$ (N)		q (kN/m)	σ (Mpa)	Q (N/m)	$Q_{1/2}$ (N)
y=0	80	24	0,595	107143	482143	y=0	17,8	24	102455	482746
y=h/4	80	12	0,446	80357	361607	y=h/4	17,8	12	76842	362059

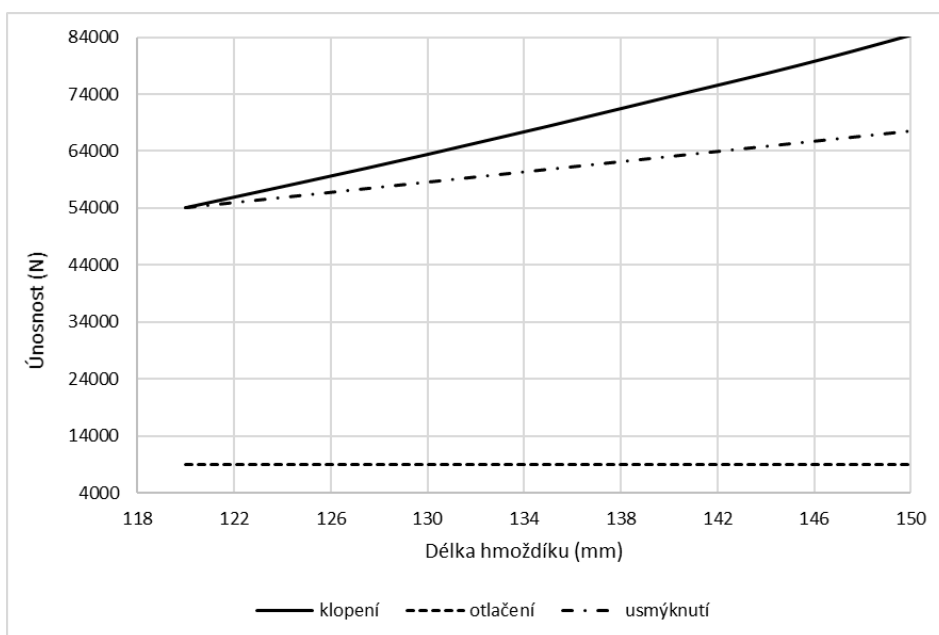
Z tabulky je patrné, že velikost smykových napětí i horizontálních sil je nižší pro okrajové styčné spáry. Smyková napětí jsou malá, ale působí na značné ploše, horizontální síly jsou proto velké. Pro spojitě zatížení vyšly horizontální síly nepatrně větší.

5.1.2 Závislost výpočtových únosností na rozměrech hmoždíku

Velikost horizontální síly spolu s výpočtovou únosností určuje, kolik hmoždíků je nutné pro přenos smykových napětí (resp. sil) použít. Z grafu závislosti únosnosti v otačení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku pro stejnou hloubku zapuštění je patrné, která z uvedených o počtu rozhoduje. Závislost je pro všechny případy lineární. Průběh se liší podle orientace vláken hmoždíku a dřeviny.



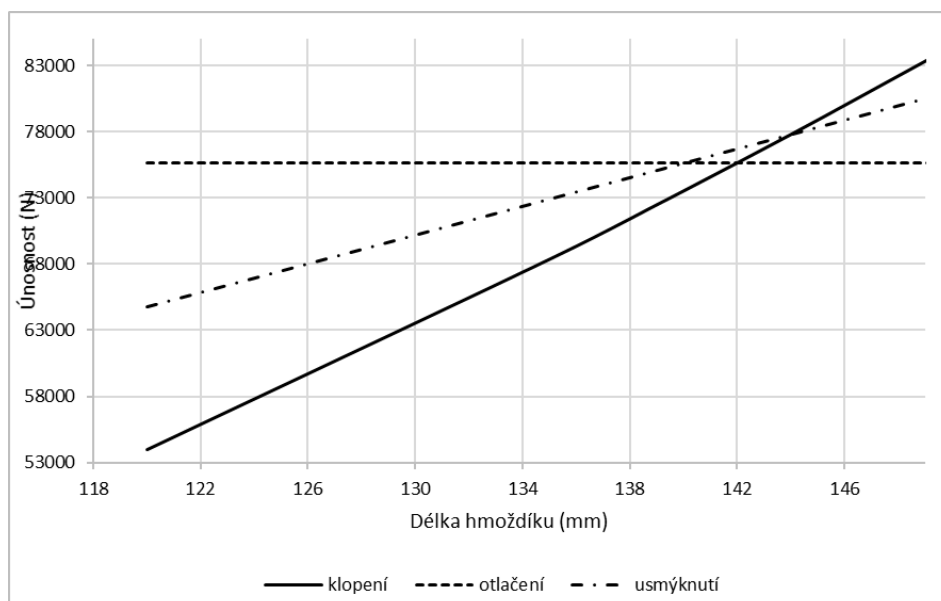
Obr. 17 Závislost únosnosti v otlačení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; příčný hmoždík buk; autor



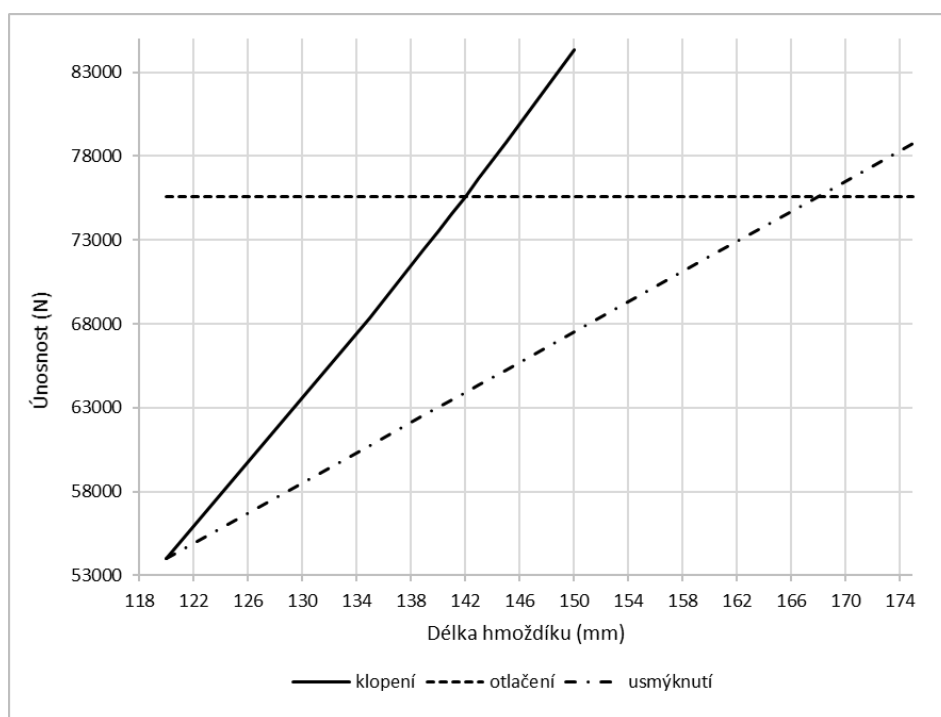
Obr. 18 Závislost únosnosti v otlačení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; příčný hmoždík smrk; autor

Z grafu na obrázcích 17 a 18 závislosti únosností na délce hmoždíku pro příčný hmoždík z buku a smrku při zapuštění 20 mm je patrné, že únosnost v otlačení je pro všechny délky hmoždíku konstantní. Zároveň je nejnižší a nezávisle na délce hmoždíku rozhoduje o počtu hmoždíků. Únosnost v usmýknutí je pro příčný bukový hmoždík (Obr. 17) vyšší, než únosnost v usmýknutí až do délky hmoždíku 144 mm, od této délky hmoždíku převládá únosnost v klopení. U příčného smrkového

hmoždíku (Obr. 18) je od počáteční délky 120 mm velikost únosnosti v klopení a usmýknutí shodná, s rostoucí délkou hmoždíku roste únosnost v klopení strměji.



Obr. 19 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; podélný hmoždík buk; autor



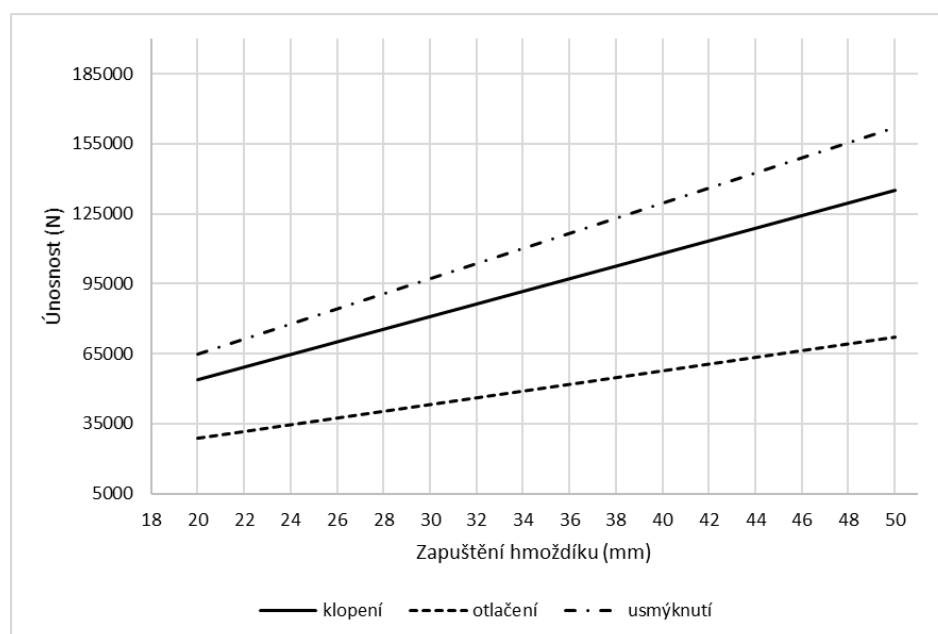
Obr. 20 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na délce hmoždíku při zapuštění 20 mm; podélný hmoždík smrk; autor

Z grafů závislosti únosností na délce hmoždíku (Obr. 19 a Obr. 20) pro příčné hmoždíky z buku je vidět oproti podélným hmoždíkům rozdílný průběh. Únosnost v otláčení je na délce hmoždíku opět nezávislá, nicméně dosahuje od počáteční délky hmoždíku 120 mm dosahuje vyšší hodnoty než únosnosti v klopení a usmýknutí.

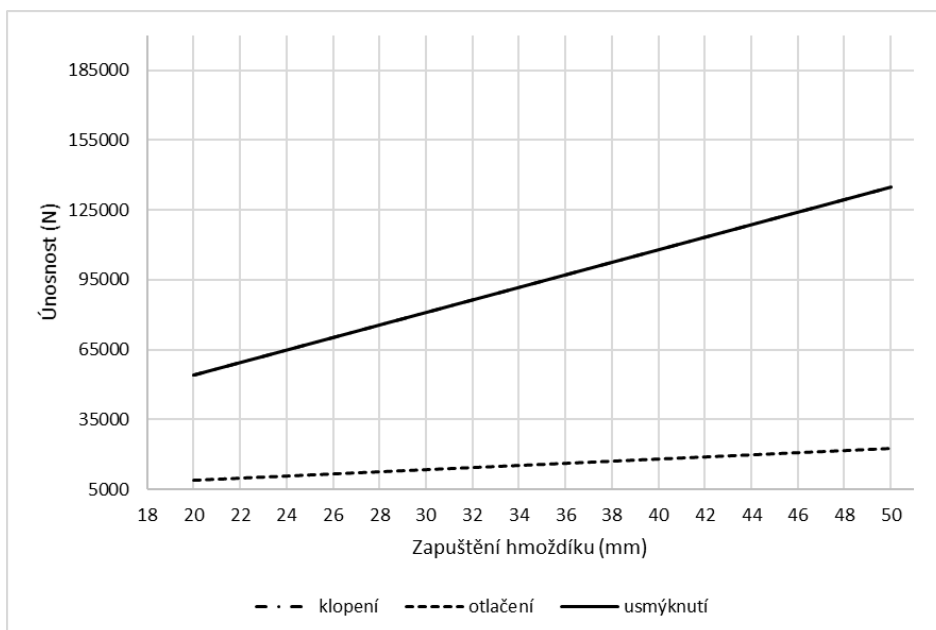
U podélného bukového hmoždíku (Obr. 19) je od počáteční délky 120 mm nejnižší únosnost v klopení. S rostoucí délkou hmoždíku stoupá strměji než únosnost v usmýknutí a jejich přímky se protnou opět v bodě odpovídající délce hmoždíku 144 mm. Přímka náležící únosnosti v otačení protíná přímku únosnosti v usmýknutí v bodě odpovídající délce 140 mm. Mnohem zajímavější je protnutí s přímkou únosnosti v klopení v bodě pro délku hmoždíku 142 mm. Při této délce je dosaženo maximální únosnosti a z hlediska počtu podélných bukových hmoždíků ji lze považovat za optimální. Poměr mezi délkou hmoždíku a ku zapuštění hmoždíku t je 7,1.

Pro únosnosti v klopení a usmýknutí podélného smrkového hmoždíku (Obr. 20) platí, že od počáteční délky roste únosnost v klopení s rostoucí délkou hmoždíku strměji. Protnutí s přímkou únosnosti v otačení odpovídá bod při délce hmoždíku 142 mm. Z hlediska maximální únosnosti a optimální délky podélného smrkového hmoždíku je podstatné protnutí přímek únosnosti v otačení a usmýknutí. Tomu odpovídá bod pro délku hmoždíku 168 mm. Poměr $a/t=8,4$.

Poměry délky hmoždíku ku zapuštění hmoždíku 7,1 a 8,4 pro podélný bukový, respektive smrkový hmoždík lze použít při stanovení optimální délky hmoždíku i pro další výšky (a zapuštění) hmoždíku. Jak je patrné, zvětšování délky hmoždíku při stejné výšce hmoždíku má význam pouze pro podélné hmoždíky.

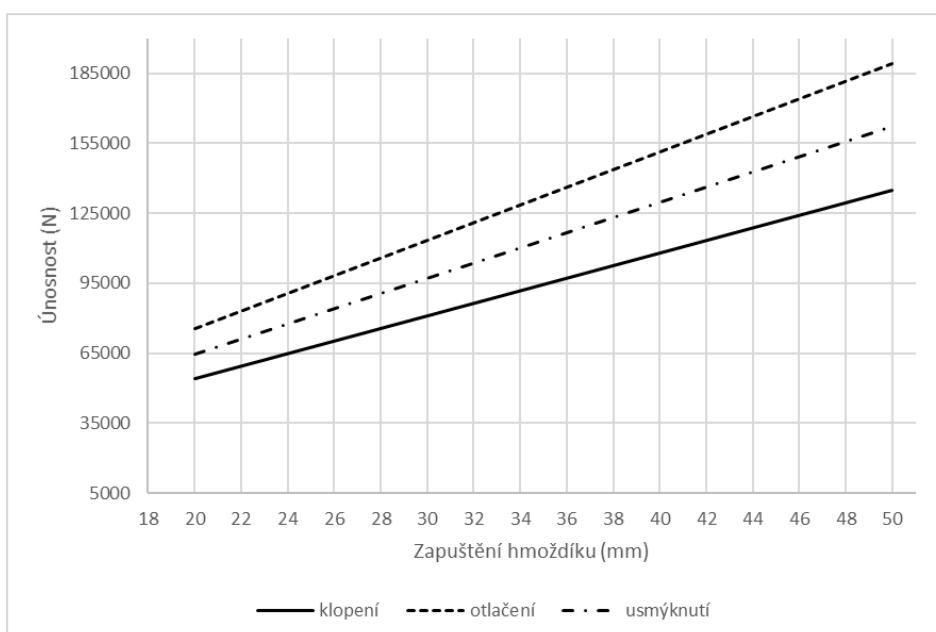


Obr. 21 Závislost únosnosti v otačení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; příčný hmoždík buk; autor

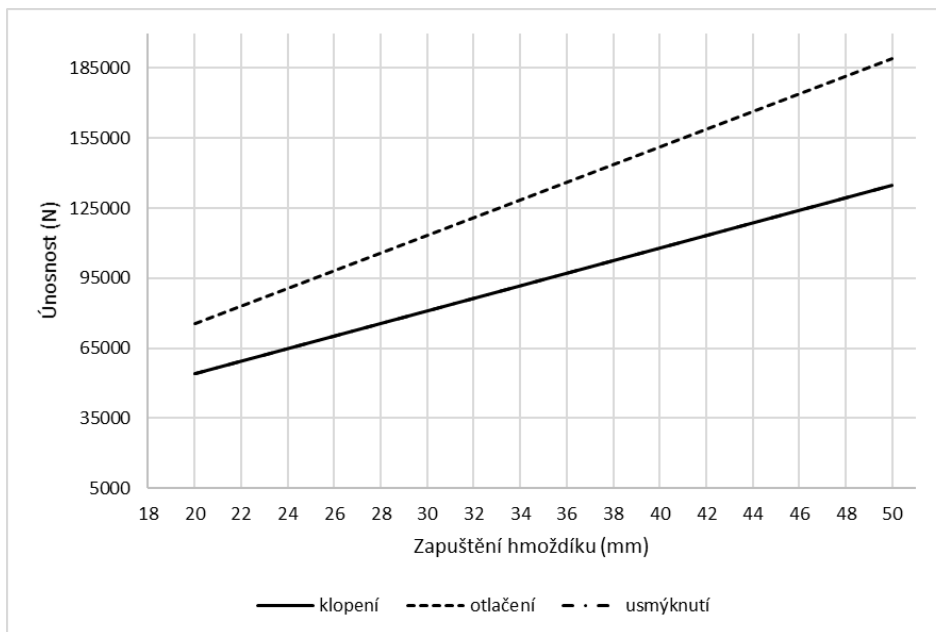


Obr. 22 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; příčný hmoždík smrk; autor

Závislost jednotlivých únosností příčných hmoždíků na velikosti zapuštění pro $a=6t$ zobrazují grafy na obrázcích 21 a 22. Závislosti jsou lineární a s rostoucí velikostí zapuštění (pro stejný poměr a/t) se únosnosti zvětšují. U bukového hmoždíku (Obr. 21) je nejnižší únosnost v otláčení, nejvyšší v usmýknutí. U smrkového hmoždíku (Obr. 22) je nejnižší únosnost v otláčení, únosnosti v klopení a usmýknutí se překrývají.



Obr. 23 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; podélný hmoždík buk; autor



Obr. 24 Závislost únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí na zapuštění hmoždíku pro $a=6t$; podélný hmoždík smrk; autor

Pro podélné hmoždíky je závislost únosností na velikosti zapuštění hmoždíku pro $a=6t$ opět lineární a přímo úměrná velikosti zapuštění. U bukového hmoždíků (Obr. 23) je na rozdíl od příčných nejvyšší únosnost v klopení, nejvyšší v otláčení. Pro smrkový hmoždík (Obr. 24) je také nejvyšší únosnost v otláčení, únosnosti v klopení a usmýknutí se překrývají.

Z uvedených grafů a popsaných souvislostí vyplývá, že největší únosnosti hmoždíku, respektive nejmenšího počtu hmoždíků lze dosahovat zvětšením zapuštění, respektive výšky hmoždíku a u podélných hmoždíků současným zvětšováním délky až do poměru $a/t=7,1$ a $8,4$ pro bukový, respektive smrkový hmoždík.

5.1.3 Výpočtové únosnosti a počet hmoždíků

V níže uvedených tabulkách (Tab. 4 až Tab. 9) jsou zobrazeny výsledné výpočtové únosnosti v otláčení, klopení a usmýknutí, odpovídající počet hmoždíků potřebných na přenesení horizontálních (smykových) sil na polovině délky nosníku a minimální světlé vzdálenosti mezi hmoždíky. V tabulkách jsou zaneseny počty hmoždíků pro styčnou spáru v ose symetrie svazku ($y=0$) a krajní styčné spáry ($y=h/4$) pro zatížení osamělou silou 80 kN v polovině rozpětí a spojitým zatížením $17,8$ kN/m. Hodnoty

jsou spočítány pro bukové a smrkové hmoždíky z řeziva pevnostní třídy D30 a C24 podle ČSN EN 338. Výšky hmoždíků jsou 40, 56 a 100 mm, délky příčných hmoždíků jsou 120, 168 a 300 mm, délky podélných hmoždíků odpovídají výše zmíněným poměrům a/t , tedy jsou 142, 168, 199, 236, 355 a 420 mm.

V tabulkách 4 až 9 je pod označením *směr působení smykových sil* myšleno, jakým směrem vzhledem k orientaci vláken hmoždíku smykové síly působí. Značka R znamená smyk v radiální rovině při působení sil kolmo na vlákna- příčný hmoždík radiální, T smyk v tangenciální rovině při působení sil kolmo na vlákna- příčný hmoždík tangenciální, LR/LT v radiální a tangenciální rovině při působení sil ve směru vláken- podélný hmoždík radiální, nebo tangenciální.

Použité značky mají následující význam: \dot{U}_s - únosnost ve smyku; \dot{U}_t - únosnost v otláčení; $\dot{U}_{k\ tg\ KVH}$ - únosnost v klopení pro tangenciální plochu KVH hranol; $\dot{U}_{k\ rad\ KVH}$ - únosnost v klopení pro radiální plochu KVH hranolu; \dot{U}_{min} - minimální únosnost pro daný hmoždík; $L/2$ - polovina rozponu nosníku; $y=0$ - spára v ose symetrie svazku; $y=h/4$ - okrajová spára.

Tab. 4 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 40 mm; autor

Hmoždíky BUK; výška 40 mm			Směr působení smykových sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdálenost (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		\dot{U}_s	\dot{U}_t	$\dot{U}_{k\ tg\ KVH}$	$\dot{U}_{k\ rad\ KVH}$	\dot{U}_{min}	Počet na $L/2; y=0$ (-)	Počet na $L/2; y=h/4$ (-)	Počet na $L/2; y=0$ (-)	Počet na $L/2; y=h/4$ (-)	
180	20	120	R	64800	28800	54000	54000	28800	17	13	25	19	64
180	20	120	T	64800	28800	54000	54000	28800	17	13	25	19	64
180	20	142	LR/LT	76680	75600	75615	75615	75600	6	5	10	7	168

Tab. 5 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 40 mm; autor

Hmoždíky SMRK; výška 40 mm			Směr působení smykových sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdálenost (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		\dot{U}_s	\dot{U}_t	$\dot{U}_{k\ tg\ KVH}$	$\dot{U}_{k\ rad\ KVH}$	\dot{U}_{min}	Počet na $L/2; y=0$ (-)	Počet na $L/2; y=h/4$ (-)	Počet na $L/2; y=0$ (-)	Počet na $L/2; y=h/4$ (-)	
180	20	120	R	54000	9000	54000	54000	9000	54	40	80	60	20
180	20	120	T	54000	9000	54000	54000	9000	54	40	80	60	20
180	20	168	LR/LT	75600	75600	105840	105840	75600	6	5	10	7	168

Tab. 6 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 56 mm; autor

Hmoždíky BUK; výška 56 mm			Směr působení smykovýc h sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdáleno st (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		Ús	Út	Úk tg KVH	Úk rad KVH	Úmin	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	
180	28	168	R	90720	40320	75600	75600	40320	12	9	18	13	90
180	28	168	T	90720	40320	75600	75600	40320	12	9	18	13	90
180	28	199	LR/LT	107460	105840	106074	106074	105840	5	3	7	5	235

Tab. 7 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 56 mm; autor

Hmoždíky SMRK; výška 56 mm			Směr působení smykovýc h sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdáleno st (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		Ús	Út	Úk tg KVH	Úk rad KVH	Úmin	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	
180	28	168	R	75600	12600	75600	75600	12600	38	29	57	43	28
180	28	168	T	75600	12600	75600	75600	12600	38	29	57	43	28
180	28	236	LR/LT	106200	105840	149186	149186	105840	5	3	7	5	235

Tab. 8 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro BK hmoždík výšky 100 mm; autor

Hmoždíky BUK; výška 100 mm			Směr působení smykovýc h sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdáleno st (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		Ús	Út	Úk tg KVH	Úk rad KVH	Úmin	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	
180	50	300	R	162000	72000	135000	135000	72000	7	5	10	8	160
180	50	300	T	162000	72000	135000	135000	72000	7	5	10	8	160
180	50	355	LR/LT	191700	189000	189038	189038	189000	3	2	4	3	420

Tab. 9 Výpočtové únosnosti a počty hmoždíků pro SM hmoždík výšky 100 mm; autor

Hmoždíky SMRK; výška 100 mm			Směr působení smykovýc h sil	Únosnosti (N)					Zatížení osamělou silou		Spojitě zatížení		Min světlá vzdáleno st (mm)
Šířka (mm)	Zapuštění (mm)	Délka (mm)		Ús	Út	Úk tg KVH	Úk rad KVH	Úmin	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	Počet na L/2; y=0 (-)	Počet na L/2; y= h/4 (-)	
180	50	300	R	135000	22500	135000	135000	22500	21	16	32	24	50
180	50	300	T	135000	22500	135000	135000	22500	21	16	32	24	50
180	50	420	LR/LT	189000	189000	264600	264600	189000	3	2	4	3	420

V tabulkách je vidět, že pro jeden rozměr a dřevinu hmoždíku se hodnoty únosností a počty příčných hmoždíků opakují. Největší minimální únosnost mají podélné hmoždíky, což má přímý vliv na potřebný počet kusů nezbytných pro přenos smykových sil. Souvislosti mezi rozměrem hmoždíku a únosností jsou vysvětleny v předchozí kapitole. Pro spojitě zatížení je počet potřebných hmoždíků, které přenesou smykové síly ve středové spáře o 30 až 35 % větší než pro zatížení osamělou silou. V okrajových spárách je potřebný počet hmoždíků při zatížení

osamělou silou o 24 až 29 %, pro spojitě zatížení o 20 až 28 % menší než ve středové spáře.

Mezi dřevinami je největší rozdíl v počtu příčných hmoždíků. Rozhodující je únosnost v otačení a ta je vyšší pro bukové hmoždíky. Zatímco u nejmenšího rozměru 180x 40 x 120 mm je pro bukový hmoždík ve středové spáře potřeba 17 (pro F) a 25 (pro q) kusů, pro smrkový hmoždík je to 54 a 80 příčných hmoždíků. Nejnižší počet příčných hmoždíků je dosažen pro buk při rozměru hmoždíku 180x 100 x 300 mm a to 7, respektive 10 kusů. Smrkové příčné hmoždíky o stejném rozměru je nutné použít v počtu 21, respektive 32 kusů, tedy zhruba 3x více.

V případě podélných hmoždíků jsou výsledky jiné. Důležité je vzít v potaz, že smrkové podélné hmoždíky mají větší délku, než podélné hmoždíky bukové stejné výšky (viz kap. 5.1.2). Prodloužením podélného hmoždíku (oproti příčnému stejné výšky) je zajištěno, že o únosnosti rozhoduje otačení, které je (vzhledem k nižší pevnosti dřeva smrku v tlaku ve směru vláken než dřeva buku) ve všech případech počítáno podle hodnot pevnosti v tlaku KVH hranolu. Počet potřebných podélných hmoždíků stejné výšky (ve vztahu ke způsobu zatížení a vzdálenosti od neutrální osy) je pak shodný pro buk i smrk. Počet se liší podle výšky hmoždíku. Nejvíce kusů je potřeba pro výšku hmoždíku 40 mm, a to 6 a 5 (pro F) nebo 10 a 7 (pro q). Pro výšku hmoždíku 56 mm je to 5 a 3, respektive 7 a 5 kusů. Pro výšku hmoždíku 100 mm vychází 3 a 2, respektive 4 a 3 kusy.

5.1.4 Rozmístění hmoždíků v roštovém nosníku

Nejlepších výsledků, tedy nejmenšího počtu potřebných hmoždíků na polovině délky rozpětí, které přenesou smykové síly, dosahují podélné hmoždíky. Z hlediska požadavku na co nejmenší oslabení účinného průřezu roštu jsou výhodné kratší bukové podélné hmoždíky. Přepočtem oslabení na plochu (ev. objem) se nejmenší hodnota získá pro bukové hmoždíky výšky 40 mm a délky 142 mm. Znamená to tedy, že i přes nižší počet vyšších (56 a 100 mm) a zároveň delších (199 a 355 mm) hmoždíků nejsou tyto nutně výhodnější.

Z příčných hmoždíků vykazují nízký počet pouze bukové hmoždíky o rozměrech 180 x 56 x 168 mm a 180x 100 x 300 mm. Příčné hmoždíky ze smrku jsou potřebné

v příliš velkém počtu. Oslabení roštového nosníku příčnými hmoždíky je nepřijatelné a ani je nelze vzhledem na požadavky vycházející z kap. 4.2.4 a 4.2.5 rozmístit.

Výsledná uspořádání roštového nosníku a rozmístění hmoždíků při zatížení osamělou silou v polovině rozpětí jsou na přiloženém výkresu (Příl.1). Výkres obsahuje alternativní konfigurace pro tyto typy, rozměry a počty hmoždíků:

- a) Buk
 - pozice 1: podélný R/T; 180 x 40 x 142 mm; 6ks/ 5 ks
 - pozice 2: podélný R/T; 180 x 56 x 199; 5ks/ 4 ks
 - pozice 3: příčný R/T; 180 x 56 x 168 mm; 12 ks/ 12ks
 - pozice 4: příčný R/T; 180 x 100 x 300 mm; 7ks/ 6ks
- b) Smrk
 - pozice 5: podélný R/T; 180 x 40 x 168 mm; 6ks/ 5ks
 - pozice 6: podélný R/T; 180 x 56 x 236 mm; 5ks/ 4ks
 - pozice 7: podélný R/T; 180 x 100 x 420 mm; 3ks/ 2ks.

Minimální světlá vzdálenost mezi hmoždíky není ani v jednom z uvedených případů překážkou.

5.1.5 Optimální konfigurace a orientace vláken hmoždíků

Z uvedených kombinací dřevin, typů a rozměrů hmoždíku, s ohledem na metodiku práce a výsledky prezentované výše, jsou nejvhodnější podélné hmoždíky z buku o rozměru 180 x 42 x 142 mm. Ze smrkových hmoždíků jsou nejvhodnější podélné o rozměru 180 x 40 x 168 mm. Některé ostatní kombinace jsou také vyhovující, nicméně představují méně vhodné varianty, jiné použité metodice práce nevyhovují.

Jakou nejvhodnější orientaci vláken hmoždíku zvolit– tj. příčný a podélný hmoždík z tangenciálního nebo radiálního řeziva– se nepodařilo určit. Stejně tak optimální uspořádání KVH hranolů v roštovém nosníku– tj. zda orientovat do středové spáry KVH hranoly pravou nebo levou stranou (radiální nebo tangenciální plochou) – nebylo zjištěno.

5.1.6 Ekonomické zhodnocení

Na úrovni materiálových nákladů jsou stanovené ceny:

- a) cena za BSH hranol o rozměru 180 x 560 x 9000 mm: 18 063 Kč
- b) cena za 36 bm KVH hranolu 180 x 140 mm: 14 358 Kč
- c) cena za BK řezivo tl. 60 mm v objemu 0,0156 m³: 209 Kč
- d) cena za materiál posuzovaného roštového nosníku: 14 567 Kč

Rozdíl v průměrné ceně BSH hranolu stejné dimenze a materiálu k výrobě zkoumaného roštového nosníku je 3 496 Kč. Materiál na výrobu roštového nosníku je levnější. Z porovnání uvedených cen za materiál roštu a BSH hranolu je možné říci, že výroba roštového nosníku na bázi KVH hranolů může být na úrovni materiálových nákladů ekonomicky výhodná. Je nutné zde poznamenat, že náklady na výrobu, které nejsou do kalkulace zahrnuty výslednou cenu roštového nosníku ovlivní a nepochybně zvýší.

5.2 Diskuse

Navzdory očekáváním, která plynou z prostudované literatury a nalezených ukázek aplikací roštového nosníku v dřevěných konstrukcích se ukázalo, že v případě zkoumaného čtyřvrstvého roštu z KVH hranolů jsou výhodnější podélné hmoždíky a příčné použít nelze. Zároveň vyplynulo, že rozdíl mezi podélnými hmoždíky ze dřeva buku a smrku není nijak zásadní. Při stejné výšce hmoždíku je jejich počet nutný pro přenos smykových napětí od ohybu stejný, liší se v délce a ve vlivu na oslabení účinného průřezu roštu (v tomto ohledu jsou výhodnější nižší bukové hmoždíky). Posuzované příčné hmoždíky je podle výsledků nezbytné použít ve velkém množství, což ale není možné, ve styčných spárách je lze umístit velmi nevhodně, nebo vůbec. A to i v případě únosnějších hmoždíků z buku. Přitom v literatuře a na prezentovaných fotografiích příčné hmoždíky použity jsou. Miller (2011) dosáhl s dubovými klínovými hmoždíky dobrých výsledků, zmiňuje výhodu postupného zarážení oproti podélným hmoždíkům během usazování do drážek. O'Loinsigh (2012) úspěšně vyrobil a otestoval čtyřvrstvý kompozitní nosník s 56 bukovými mechanicky svařovanými kolíky. V této práci je ve výpočtech zařazen i hmoždík výšky 100 mm, na kterém byla snaha ukázat, že příčný hmoždík použít lze,

sloužil též k porovnání s hmoždíky nižšími. Ovšem z důvodu zvolených principů a doporučení pro dimenzování hmoždíků se v daném roštu použít nedá, protože velikost zapuštění přesahuje maximum $1/5$ výšky hranolu. Vysoké příčné hmoždíky z buku dostačují v počtu 7 a 5 (zatížení F), případně 10 a 8 ks (zatížení q). Jejich délka je 300 mm a na polovinu délky roštu se podle použité metodiky rozmístit nedají.

Jedno z vysvětlení této neshody je v použitých hodnotách pevností dřeva dosazených do výpočtů. Jednak třídy pevnosti dřeva v normě ČSN EN 338 pracují s charakteristickými hodnotami spodního 5 % kvantilu. Což má své oprávněné důvody, ale zároveň se tím pro výpočet omezí skutečnost, že dřevo může dosáhnout pevností vyšších. V některých případech několika násobně. Výpočtová únosnost hmoždíků by teoreticky mohla být vyšší a použité množství ev. rozměry menší. Zadruhé norma rozlišuje pevnosti pouze ve směru vláken a kolmo na vlákna, nikoli však s ohledem na anatomické roviny. Přitom mechanické vlastnosti dřeva závisí na obojím.

Dosazováním stejných hodnot pevností v tlaku a smyku při výpočtech únosností pro různé orientace vláken hmoždíku, pak pro stejný rozměr a dřevinu vycházejí shodné únosnosti, respektive počty hmoždíků. Rozdíl se projeví jen na úrovni dřeviny a podélného či příčného hmoždíku. Zda je výhodnější hmoždíky orientovat vzhledem ke směru působení smykových sil radiální, nebo tangenciální plochou se tímto způsobem nepodařilo prokázat. Stejná zjištění platí při rozhodování, zda má smysl nějak, případně jak, uspořádat KVH hranoly v roštu. Tedy jestli je možné dosáhnout vyšších únosností při styku pravých (radiálních), nebo levých (tangenciálních) stran (ploch) KVH hranolu ve styčné spáře. Obdobně lze uvažovat při přemýšlení nad volbou jiných dřevin (např. MD, BO, DG, TIS x DB, JS, JV, HB, AK). Tyto nuance by bylo možné přesněji rozhodnout dosazením pevností podle jiného zdroje (např. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin; Zeidler, Borůvka 2016*), nebo vhodně designovaným experimentem.

Ze znalostí nabytých studiem a z odborných publikací usuzuji, že orientace vláken hmoždíku a uspořádání KVH hranolů v roštu (jak je popsáno výše) na únosnost a počet hmoždíků vliv má. V provedené studii rozhoduje o únosnosti, potažmo počtu hmoždíků vždy otačení. Rovněž Miller (2011) v závěru své práce zdůrazňuje, že pro

tuhost spoje je nutné zajistit pevné sevření hranolů, aby docházelo spíše k otlacení než ke klopení hmoždíku.

Pevnost dřeva buku v tlaku kolmo na vlákna je větší v radiálním směru, značný je vliv početných dřeňových paprsků. Příčný bukový hmoždík s velkou únosností v otlacení by měl být vyroben z radiálního řeziva. Na druhou stranu použít pro hmoždík kvalitní a cenné radiální řezivo se zdá být nerozumné. Pro dřevo smrku je pevnost v tlaku kolmo na vlákna mírně větší v tangenciálním směru. Pro vyšší únosnost v klopení by KVH hranoly měly být do středové styčné spáry orientovány spíše pravou stranou (radiální plochou). U podélných hmoždíků není orientace vláken, ani uspořádání KVH hranolů zásadní. Únosnost smrkového KVH hranolu v tlaku ve směru vláken se nezvyší. Přesto je logické použít na hmoždíky tangenciální řezivo a uspořádat KVH opět spíše pravou stranou k sobě.

Druhé vysvětlení lze nalézt uvážením skutečnosti, že prostudované publikace a nalezené ukázky realizovaných roštů uvažují při konstrukci daleko větší průřezy hranolů (Obr. 25) jednotlivých vrstev a relativně nízký počet hmoždíků. Například hranoly šířky 180–280 mm a výšky 250–370 mm (Šefců 2010). Při takových dimenzích se zvětší šířka hmoždíku, zároveň je možné volit hmoždík vyšší (více zapuštěný). Plocha, na které se realizuje otlacení hmoždíku (ev. hranolu) je větší a únosnost vzroste, čímž je umožněno použít ve styčné spáře méně hmoždíků. Při zachování metodiky a respektování výsledků této práce, by měli vyšší hmoždíky při maximální únosnosti i větší délku. Uvažujme největší průřez hranolu, rozměr největšího bukového příčného hmoždíku pak je 280 x 148 x 444 mm a dostačují v počtu 3 a 2 (zatížení F), nebo 4 a 3 kusů (zatížení q), při rozměru 280 x 100 x 300 mm v počtu 4 a 3, nebo 6 a 5 kusů. Nabízí se otázka, zda by značná délka hmoždíků nebyla překážkou v jejich rozmístování po délce roštu. Hmoždíky umístěné nad sebou by se mohli překrývat a účinný průřez roštu by byl oslaben. Ovšem citované zdroje zároveň počítají s použitím roštu z dvou nebo tří lamel. Z toho vyplývá existence pouze jedné nebo dvou styčných spár. Obavy o umístění hmoždíků nad sebou odpadají. Na prezentovaných fotografiích se zdá být délka hmoždíků poměrně krátká (Obr. 25), je tedy možné, že není nutné volit minimální délku hmoždíku vzhledem k zapuštění $6t$. Nabízí se tedy otázka, zda není vhodnější vyrábět roštový nosník z KVH hranolů jako tzv. Derevjaginův rošt (viz kap. 3.1.3).



Obr. 25 Ukázka roštu z hranolů velkého průřezu a relativně nízkým počtem hmoždíků; *New energy works 2019*)

Třetím důvodem může být značná velikost zvoleného zatížení, na kterou byl nosník a hmoždíky posuzován. Při návrhu dřevěné konstrukce a jejích prvků se návrh neprovádí pro zatížení na mezi pevnosti materiálu. Kdyby se do výpočtu zavedl vliv doby trvání zatížení, třídy provozu konstrukce a další, jak udává Eurokód 5, působící zatížení by muselo být menší (ale i návrhová pevnost nosníku) a konečné výsledky by se lišily.

Problematiku rozmístění hmoždíků po délce roštu řeší Miller (2011) obdobně, jako tato práce. Vzhledem k poddajnosti spojů a prokluzu vrstev se mění průběh posouvajících sil při spojitém zatížení i zatížení osamělou silou. Přitom nelze zajistit, že tuhost každého hmoždíku bude stejná a horizontální síla bude distribuována přesně rovnoměrně. Proto navrhuje rozmístit hmoždíky rovnoměrně, tuhost spojů na jednotku délky definuje jako podíl sumy únosností hmoždíku ku délce nosníku. Nezbytné je brát v potaz oslabení průřezu drážkami pro hmoždíky, podle Millera (2011) dochází po zatížení na mez pevnosti k náhlému porušení tahem ve spodních vrstvách a rychlému vzniku dodatečných trhlin v rozích zapuštění hmoždíků blíže středu. Uspořádání navržená v této práci počítají ve středu rozpětí s mezerou 500 mm, kde není žádný hmoždík ani spojovací kolík či svorník.

Vhodnost použitého průřezu KVH hranolu lze hodnotit i z pohledu využití kulatiny. Hranoly se při výšce 140 mm vyrábějí v šířkách až 240 mm. Při několika vrstvách by bylo možné získat nosník délky až 13 m pro velká rozpětí a s velkou únosností. Z kulatiny se KVH vyrábí jako půlený hranol, přibližný průměr potřebného čepu lze vypočítat pomocí Pythagorovy věty. Na výrobu šířky 180 mm

je potřeba kulatina o čepovém průměru cca 34 cm, pro šířku 240 mm cca 37 mm. Použijeme-li KVH profil 180 x 120 mm, nebo 160 x 120 mm, potřebný průměr čepu bude cca 30, respektive cca 29 cm. Zmenší-li se výška hranolu, je rozdíl v potřebném průměru čepu značný a náročnost výroby na hmotu větší dimenze se snižuje. Vzhledem k probíhající kůrovcové kalamitě na území České republiky, odhadům objemu těžby na rok 2019 (až 50 mil. m³), dopadům na trh dřívím a stav lesů se dá v budoucnu očekávat nedostatek silné kulatiny v potřebné kvalitě. Z toho důvodu by bylo vhodné vyrábět roštový nosník na bázi KVH hranolů menších průřezů. Přizpůsobit tomu celkový profil a únosnost roštu, počet, rozmístění a rozměry, případně orientaci vláken hmoždíků. Případně vyrábět rošt způsobem popsáním v případové studii (kap 5.3.2).

V českých lesích stoupá zastoupení buku (a pokud se kůrovcová kalamita bude řešit žádoucí a správnou změnou dřevinné skladby), bukové dřevo bude dostupnější, čemuž by mělo odpovídat rozšíření jeho využití. Efektivního využití a uplatnění dostupné hmoty lze dosáhnout použitím bukového dřeva na hmoždíky. Při použití vysušených bukových kolíků jako spojovacích prostředků roštu se efekt znásobí. Vhodnost spojování roštů pomocí bukových kolíků je ovšem nutné ověřit.

Otázka vhodné vlhkosti dřeva hmoždíků nebyla v metodice pro svou složitost zařazena. Jedná se o komplexní problematiku, kde promlouvá vliv vlhkosti na pevnost dřeva, rozměrové změny, stav napjatosti hmoždíků a okolí od vlhkostních změn, vznik dodatečných napětí (např. tlak vyvolaný bobtnáním hmoždíku v omezeném prostoru drážky) a další. Dřevo více sesychá/ bobtná v příčném než podélném směru. Je proto výhodné použít příčný hmoždík jako dva klíny zaražené proti sobě a v případě seschnutí je dalším zarážením dotahovat. Zároveň při použití suchého dřeva (menší vlhkosti, než odpovídá rovnovážné vlhkosti ve stavu po zabudování) lze po usazení hmoždíku očekávat jeho nabobtnání a dotažení spoje se vznikem dodatečných napětí. U podélných hmoždíků tento efekt očekávat nelze. Dutko (1976) doporučuje vlhkost hmoždíku 10 %, Kuklík (2005) 8–10 %. Rovněž Miller (2011) zdůrazňuje, že jakékoli sesychání dřeva hmoždíku, nebo hranolu má negativní efekt na tuhost a pevnost spojů i celého roštu. Doporučuje hmoždíky vysušené v sušárně a sušené hranoly.

Vlhkost KVH hranolu je 15 ± 2 %. Hmoždík bude vlivem vyšší vlhkosti KVH hranolu po usazení bobtnat. Charakter a průběh dalších změn vlhkosti dřeva hmoždíku i KVH hranolu závisí na podmínkách v jakých bude konstrukce s roštovým nosníkem provozována. Změny vlhkosti hmoždíku se projeví i na pevnosti použitého dřeva. V práci jsou použité hodnoty pevnosti podle ČSN EN 338, které odpovídají rovnovážné vlhkosti dřeva při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60 %. V rámci rozsahu této práce není v silách autora tuto problematiku zodpovědět přesněji.

5.2.1 Případová studie

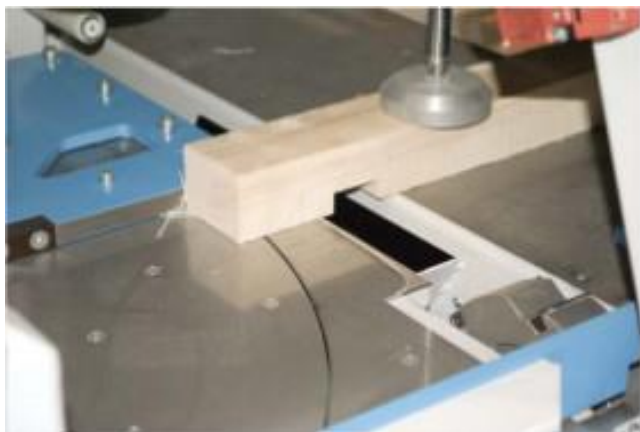
Případová studie se zabývá zjednodušeným návrhem výrobního postupu s využitím automatické zkracovací pily Crossline 650 od firmy Soukup s.r.o. Alternativou je ruční výroba. Uvážením poznatků zjištěných z literární rešerše, nedostatků roštového nosníků z KVH hranolů (viz kap. 5.1) a přebytku smrkové kulatiny na českém trhu jsem popsal možný alternativní postup výroby roštových nosníků z hranolů, eventuálně trámů a polštářů konického tvaru. V poslední části se zabývám aplikací roštového nosníku větší dimenze v dřevěných konstrukcích.

Postup výroby roštových nosníků je na rozdíl od LLD jednodušší a rychlejší. Urychlení je zejména dáno použitím KVH hranolu (přesně definovaný a dokončený výrobek) a absencí procesu lepení. Výrobu je možné částečně uspořádat do linky. KVH hranoly lze nakupovat v maximální délce 13 m. V prvním kroku se hranoly zkrátí na požadované délky a v předem definovaných pozicích se frézují drážky pro usazení hmoždíků. S výhodou lze použít automatickou zkracovací pilu Crossline 650 od firmy Soukup s.r.o. (Obr. 26). Tato pila disponuje vstupním válečkovým dopravníkem s kleštinovým podáváním (0–2 m/s) pro materiál neomezené délky, výkonnou pilovou jednotkou, výstupním dopravníkem s vykládacím zařízením. Materiál je fixován hydraulickým přitlakem. Stroj je doplněn o spodní frézovací jednotku (Obr. 27), kterou lze využít právě k výrobě drážek pro hmoždíky. Stroj je řízen pomocí programu pro manuální tvorbu schémat pořezu a drážkování.



Obr. 26 Automatická zkracovací pila Crossline 650 se spodní drážkovací frézkou; Soukup Woodworking Machinery 2019

Druhým krokem je vrtání otvorů pro spojovací prostředky v předepsaných pozicích. K tomu může sloužit rovněž automatická vrtačka, nebo ruční sloupová vrtačka. Technologie vrtání a osazení spojovacího prostředku bude záviset od zvoleného způsobu spojování lamel. Vrtání odpadá při použití samořezných vrutů. Dalším krokem je sesazení roštu, umístění hmoždíků do drážek a spojení roštu v celek. Příčné hmoždíky ve tvaru klínu je potřeba dotahovat postupným zarážením. Konstrukční opracování (např. spojů) může předcházet, nebo následovat po spojení roštu. Nadvýšení roštu se provádí cíleným posunem protilehlých drážek, tak aby lícovaly v nadvýšeném stavu před zatížením.

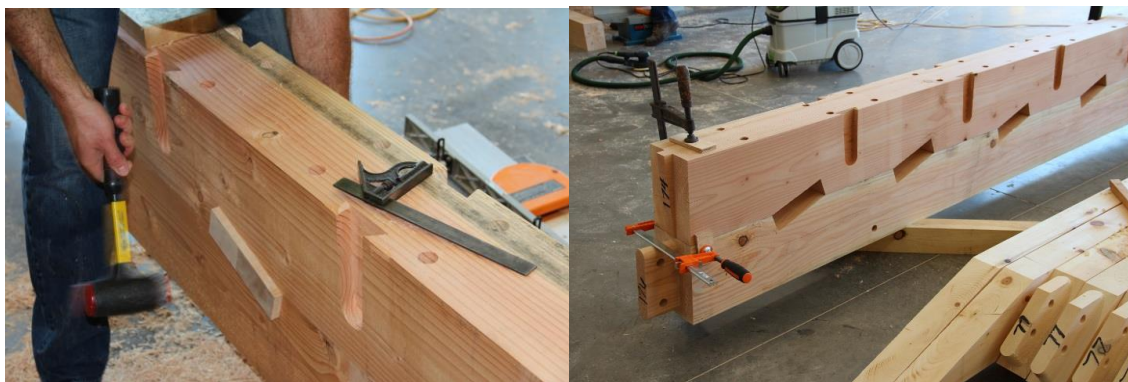


Obr. 27 Detail drážkovací frézky pily Crossline 650; Soukup 2019

Výroba hmoždíků je v podstatě otázkou truhlářské technologie. Hmoždíky lze vyrábět jako sdružený přířez v těchto krocích: vysušení řeziva, příčné krácení řeziva, omítání a rozmítání řeziva na předepsaný rozměr, srovnání plochy a hran, tloušťkování na předepsaný rozměr, příčné krácení přířezu na dílec- hmoždík. Broušení a povrchová úprava odpadá. S výhodou je volit řezivo omítané, pokud rozměry odpovídá rozměrům hmoždíků, v případě podélného smrkového hmoždíku

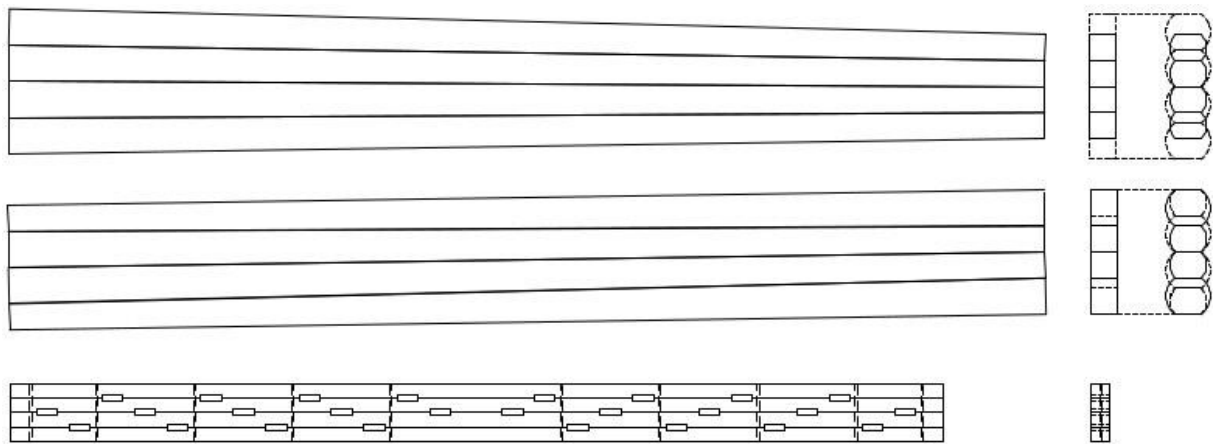
použít KVH hranol. Z důvodu zjednodušení výrobního procesu je vhodné použít hmoždíky o stejném rozměru ve všech styčných spárách, rozmístění může být různé.

Alternativou je méně přesné opracování hranolů pomocí ručního náradí (Obr. 28): zkracovací pily/ ruční okružní pily, dláta a palice, nebo ruční drážkovací frézy. Výrobu je tedy možné provádět bez nákladného zařízení přímo na stavbě.



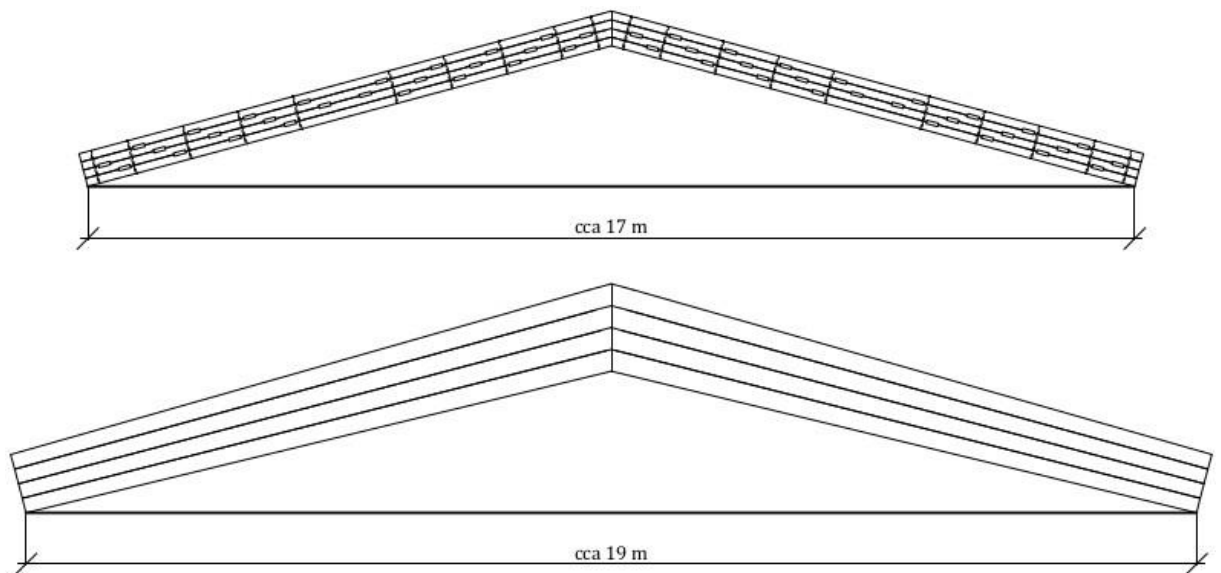
Obr. 28 Ruční výroba roštového nosníku ze dvou hranolů velkého průřezu s naklopenými javorovými hmoždíky; *The Barn Yard and Great Country Garage 2019*

S přihlédnutím k přebytku smrkové kulatiny na českém trhu a její nízké ceny se nabízí možnost zajistit odbyt hmoty výrobou roštových nosníků přímo z kulatiny. Pro co nejvyšší využití hmoty a zjednodušení výrobního procesu je možné vyrobit rošt z dlouhých **kónicky řezaných hranolů**, eventuálně odkorněných kónických trámů, nebo polštářů. V případě výřezu délky 10 m, čepového průměru cca 31 cm a uvážením sbíhavosti kmene 1 cm/m, můžeme na kmenové pásové pile vyrobit např. kónický hranol šířky 180 mm, na čepu o výšce 250 mm, na oddenku 365 mm. Boční plochy hranolu budou řezány rovnoběžně. Skládáním několika hranolů na sebe získáme pultový roštový nosník o značném průřezu. Střídavým skládáním získáme roštový nosník prizmatický. Použití odkorněných trámů/ polštářů se zdá nevhodné. Problematický je po délce proměnlivý průřez, respektive celková šířka trámu/ polštáře. Vysoký konec pultového nosníku by byl zároveň absurdně široký. Schéma skládání kónicky řezaných hranolů a trámů/polštářů do roštu je na obrázku 29, hmoždíky nejsou zobrazeny. Otázka vlhkosti použité kulatiny je při popsaném způsobu ošemetná.



Obr. 29 Schéma nosníků z kónicky řezaných hranolů a trámů a porovnání s navrženým roštovým nosníkem z KVH hranolů; autor

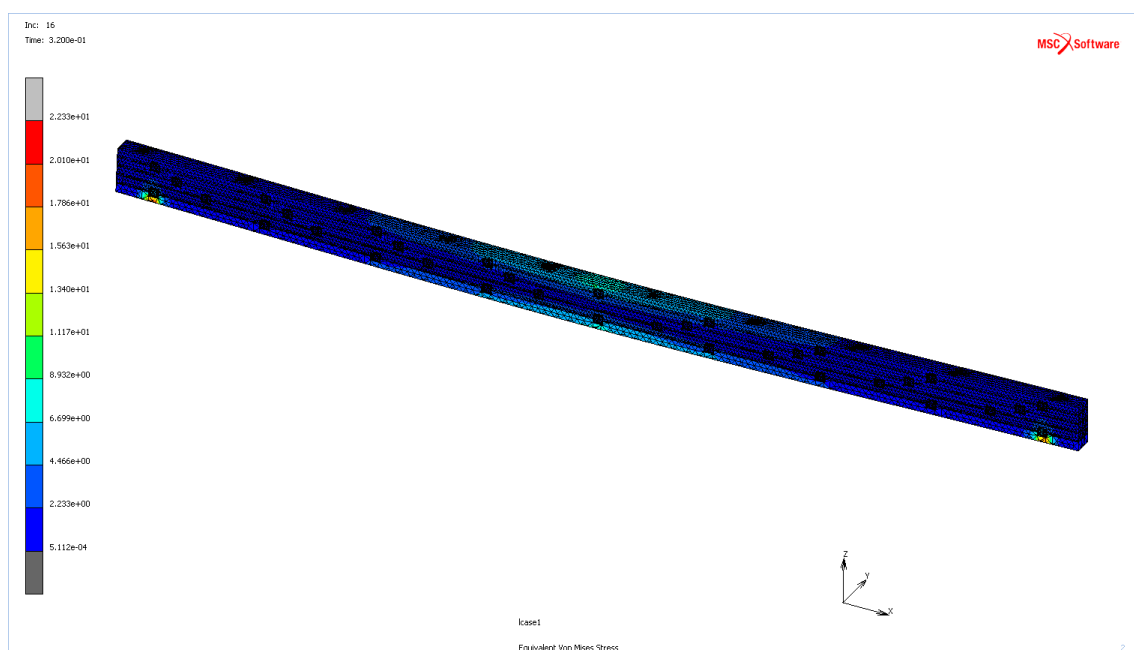
Lepené lamelové prvky dřevěných konstrukcí se většinou používají ve větších dimenzích pro velké rozpory a zatížení. Hledáme-li alternativu k LLD v podobě roštového nosníku, měl by i tento splňovat podobná kritéria. Roštový nosník může v dřevěné konstrukci sloužit jako průvlak, pultový nosník, sedlový nosník, tvořit rameno plnostěnného rovinného rámu, nebo plnostěnný nosník v konstrukci mostu. Existují i možnosti použití obdobného systému pro zesílení svislých prvků dřevěných konstrukcí. Obrázek 30 zobrazuje navržený roštový nosník v kombinaci s ocelovým táhlem v sedlové konstrukci velkého rozpětí.



Obr. 30 Roštový nosník z KVH hranolů a pultový nosník z kónicky řezaných hranolů v sedlové konstrukci s ocelovým táhlem; autor

5.2.2 Otázky plynoucí z diskuse

Proces zpracování práce, výsledků a následná diskuse přinesly řadu otázek a hypotéz, v jejichž duchu mohou pokračovat další práce a výzkumy. Je možné posoudit navržené varianty roštového nosníku z KVH hranolů pomocí metody konečných prvků? Viz obrázek 31. Nabízí rovnoměrné rozmístění hmoždíku optimální řešení? Je stav napjatosti v okolí hmoždíku významně rozdílný pro různá umístění po délce roštu? Je nějaké omezení v počtu vrstev roštu? Je výhodnější otočit průřez KVH hranolu na výšku? Jaký je vliv vlhkosti a orientace vláken? Má podélný hmoždík oproti příčnému zásadní nevýhody? Je možné použít vysušené bukové kolíky ke spojení vrstev roštu a vytvořit tak čistě dřevěný nosník velké dimenze a únosnosti? Je vhodné kombinovat mechanicky svařovaný kolíkový spoj s hmoždíky? Není výhodnější použít hmoždík ve tvaru rybinové spojky, nebo vyrábět tzv. Derevjaginův rošt? Může roštový nosník konkurovat lepenému lamelovému dřevu? Je reálné vyrábět roštové nosníky z kónicky řezaných hranolů? Jaký vliv má způsob výroby na poddajnost spojů, tuhost a únosnost roštu? Je možné vyrobit rošt s předpětím a omezit tak poddajnost spojů po zatížení? Má vůbec smysl zabývat se dalším výzkumem, pokud víme, že empirické zkušenosti a analytické přístupy našich předků prokázali účinnost roštových nosníků? Proč je prostě nezačít vyrábět a používat?



Obr. 31 MKP použitá k analýze redukovaného napětí v ohýbaném roštovém nosníku; Solfonk, Čapek, TU Liberec

6 Závěr

Cílem práce bylo stanovit polohu, počet a rozměry dřevěných hmoždíků ve čtyřvrstevném roštovém nosníku na bázi KVH hranolů o délce devět metrů. Zhodnotit rozdíl mezi podélným a příčným hmoždíkem z bukového a smrkového dřeva. Zhodnotit jaká omezení přináší rozměry a počet hmoždíků při rozmístování ve styčné spáře. Posoudit vliv vlhkosti a orientace vláken. Navrhnout zjednodušený postup výroby a uplatnění roštových nosníků v dřevěných konstrukcích a na úrovni materiálových nákladů zhodnotit ekonomickou výhodnost. Z použité metodiky práce, zpracovaných výsledků a jejich diskuse vyplývají následující závěry:

- V případě čtyřvrstevného roštového nosníku z KVH hranolů, každý o průřezu 180 x 140 mm a délce 9 m je nejvhodnější použít bukové podélné hmoždíky o rozměru 180 x 40 x 142 mm. Potřebný počet na polovině rozpětí ve středové spáře je 6 kusů při zatížení osamělou silou, nebo 10 kusů při spojitém zatížení. Uspořádání je vyobrazeno na přiloženém výkresu na pozici 1 (Přil.1).
- Maximální únosnosti podélných hmoždíků je dosaženo při poměru délky hmoždíku ku hloubce zapaštění: pro buk $a/t=7,1$; pro smrk $a/t= 8,4$.
- O únosnosti hmoždíku rozhoduje únosnost v otlacení, která je vyšší pro podélné hmoždíky. Množství potřebných podélných bukových a smrkových hmoždíků jsou stejná. Vzhledem k oslabení účinného průřezu roštu jsou vhodnější kratší bukové hmoždíky.
- Příčné hmoždíky (zejména smrkové) je nutné použít v takovém počtu, který znemožňuje jejich rozmístění ve styčné spáře. Vysoké a dlouhé hmoždíky se ve spárách nad sebou překrývají.
- Přesnější vliv orientace vláken na úrovni anatomických směrů se určit nepodařilo.
- Vliv vlhkosti na počet a rozměry hmoždíku se pro komplexnost problematiky posoudit nepodařilo.
- Konstruovat rošt z KVH hranolů možné je, ale pouze s použitím podélných hmoždíků. Výhody klínových příčných hmoždíků využít nelze. Nabízí se možnost vyrábět jej jako tzv. Derevjaginův rošt.

- Na úrovni materiálových nákladů je roštový nosník na bázi KVH hranolů oproti nosníku z LLD stejné dimenze levnější.
- Strojní zařízení, která je možné pro výrobu roštových nosníků s výhodou použít jsou na trhu k dispozici.
- Roštový nosník může být z hlediska využití v dřevěných konstrukcích alternativou k lepenému lamelovému dřevu. Například jako stropní průvlak nebo v sedlové konstrukci s ocelovým táhlem. Nabízí se varianta vyrábět jej ve velkých dimenzích z kónicky řezaných hranolů.

Následující výzkum je vhodné zaměřit na experimentální ověření předložených výsledků a závěrů. Případně na posouzení navržených variant roštových nosníku z KVH hranolů metodou konečných prvků. Z hlediska hledání čistě dřevěné alternativy navrhnout a ověřit spojení vrstev roštu pomocí vysušených bukových kolíků.

7 Použité zdroje

Literatura

- BÍLEK, Vladimír. *Dřevostavby: navrhování dřevěných vícepodlažních budov*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03159-4.
- DUTKO, P. a kol. *Drevené konštrukcie*. 2. přep. vydání. Bratislava: ALFA, 1976, 460 s.
- HÁJEK, Václav. *Stavíme ze dřeva*. Praha: Sobotáles, 1997. ISBN 80-85920-44-1.
- HÁJEK, E.; REIF, P.; VALENTA F. *Pružnost a pevnost I*. 1. vydání. Praha: STNL, 1988. 432 s.
- KRÁL, Pavel a Jaroslav HRÁZSKÝ. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005. ISBN 80-7157-878-9.
- KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03310-4.
- LEXA, J.; NEČESANÝ, V.; PACLT, J.; TESAŘOVÁ, M.; ŠTOFKO, J. *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*. Bratislava: Drevársky výzkumný ústav, 1952.
- MATOVÍČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.
- MICHALEC, J. a kol. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 20010. ISBN 8001042243.
- POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURAJTKO, BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- ŠEFCŮ, Ondřej a Bohumil ŠTUMPA. *100 osvědčených stavebních detailů: tradice z pohledu dneška*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3114-8.
- THOMA, Erwin. *Viděl jsem tě růst: o prastarém a novém životě se dřevem, lesem a Měsícem*. Ústí nad Labem: Paprsky, 2006. ISBN 80-903553-4-x.
- THOMA, Erwin. *Tajná řeč stromů*. 3. vydání. Mautweg: ANCH BOOKS, 2018, 255 s. ISBN 978-3-9815576-7-1.
- TSOUMIS, George. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York: Chapman, 1991. ISBN 04-120-7851-1.

Ústní sdělení– Doc. Solfronk, Doc. Čapek, TU Liberec

Elektronické dokumenty

BOCQUET, J.; PIZZI, A.; DESPRES, A.; MANSOUIRIM, H. R.; RESCH, L.; MICHEL, D.; LETORT, F. *Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels*. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 2007, Vol. 21, No. 3–4, pp. 301–317 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/238425755_Wood_joints_and_laminated_wood_beams_assembled_by_mechanically-welded_wood_dowels

Structure craft. *DLT Design Guide* © Ver. 3 Nov 2017 [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://structurecraft.com/blog/dlt-design-guide>

Structure craft. *DLT Profile Handbook 2017* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://structurecraft.com/blog/dlt-design-guide>

Fraser Wood Industries. *Key-laminated beam product sheet* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.fraserwoodindustries.com/products.keylaminated.html>

MILLER, Joseph F. a William M. BULLEIT. Analysis of Mechanically Laminated Timber Beams Using Shear Keys. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2011, 137(1), 124-132 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000273. ISSN 0733-9445. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000273>

O'LOINSIGH, C.; OUDJENE, M.; AIT-AIDER, H.; FANNING, P.; PIZZI, A.; SHOTTON, E.; MEGHLAT, E. *Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels*. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, No. 36, pp. 245–250 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257389348_Experimental_study_of_timber-to-timber_composite_beam_using_welded-through_wood_dowels

PIZZI, A.; LEBAN, J.; KANAZAWA, F.; PROPERZU, M.; PICHELIN, F. *Wood dowel bonding by high-speed rotation welding*. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 2004, Vol. 18, No. 11, pp. 1263-1278 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/228091143_Wood_dowel_bonding_by_high-speed_rotation_welding

Thoma Holz 100. *Stavební katalog* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://www.thomaholz100.cz/wp-content/uploads/2017/07/17-07-03-thomacz-catalog_stavebni_final.pdf

EAGRI. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky: Report on the state of forests and forestry in the Czech Republic : stav k 2017* Praha: Ministerstvo zemědělství v nakladatelství Lesnická práce, 2018. ISBN 978-80-7434-477-0 [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/609179/Zprava_o_stavu_lesa_2017.pdf

VESELÝ, Vojtěch. *Masivní dřevostavby a požadavky na ně kladené* [online]. 2013 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/vlastnosti-drevostaveb/10345-masivni-drevostavby-a-pozadavky-na-ne-kladene>

Normy

ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo – třídy pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016. 16 s.

Webové stránky

Baushop s.r.o.. *Hranoly* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.baushop.cz/hranoly?page=2>

Bios s.r.o.. *BSH NSI* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.biossro.cz/bsh/185--bsh-nsi.html>

Bios s.r.o.. *KVH NSI 140 x 180 mm* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.biossro.cz/kvh/765--kvh-nsi-140-mm-x-180-mm.html>

Cascade joinery. *Crafted Timberwork* [online]. 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.cascadejoinery.com/about-us/crafted-timberwork/>

Česká národní banka. *Kurzy devizového trhu* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/financni_trhy/devizovy_trh/kurzy_devizoveho_trhu/denni_kurz.jsp

České stavebniny s.r.o.. *KVH HRANOL 140 X 180 13 000 MM* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z:
https://www.ceskestavebniny.eu/product.php?id_product=1943

DEK a.s.. *Lepené lamelové dřevo BSH, NSi, smrk* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/3020203705-bsh-lep-profil-nsi-zakazka-nepohledova-kvalita?>

Drevoonline.cz. *KVH hranoly* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.drevoonline.cz/drevoonline/eshop/2-1-KVH-hranoly>

Drevoprodejdomino.cz. *Sušené truhlářské řezivo* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.drevoprodejdomino.cz/truhlarske-rezivo.htm>

Dřevo HŽV s.r.o.. *Ceník produktů* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.drevo-hzv.cz/cenik.html>

Fire tower engineered timber. *Portfolio* [online]. 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://ftet.com/portfolio/fun-connections>

Holzhandel-deutschland. *KVH, 140x180 mm Fichte, NSi, nach DIN 4074, S10, gehobelt und gefast, Holzfeuchte 15% +/- 3%* [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://holzhandel-deutschland.de/kvh-140x180-mm-fichte-nsi-nach-din-4074-s10-gehobelt-und-gefast-holzfeuchte-15-3-p15345>

Lika-zn.cz. *Truhlářské řezivo* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://lika-zn.cz/truhlarske-rezivo.html>

New energy works. *Rebuilding St. Pius X church* [online]. 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://timber-frame-design.com/rebuilding-st-pius-x-church/>

Perkinswill. *Products* [online]. 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://blog.perkinswill.com/wp-content/uploads/2017/11/Products.jpg> (2. 3. 2019)

Palis s.r.o.. *BSH – lepené lamelové dřevo* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.palis.cz/dalsi-produkty/dreveny-sortiment/lepene-profil-y/bsh---lepene-lamelove-drevo/>

Palubky-rezivo.eu. *Truhlářské řezivo* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.palubky-rezivo.eu/truhlarske-rezivo.html>

Pila Lipůvka s.r.o.. *Sušené řezivo* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.pilalipuvka.cz/>

Soukup Woodworking Machinery. *Automatická pila s otočným stolem CROSSLINE* [online]. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://w.soukup.cz/eshop-produkt/cnc_stroje_pro_drevostavby/automaticka_pila_s_otocnym_stolem_crossline/cz

Stasa.cz. *Lepené hranoly, duotrio a bsh* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.stasa.cz/bsh-duotrio-lepene-hranoly.html>

Stavbaonline.cz. *KVH hranoly 140 mm* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.stavbaonline.cz/kvh-hranoly-140-mm.html>

Susenerezivo.cz. *Řezivo truhlářské vysušené, celý sortiment tl 25–60 mm Ceník* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://susenerezivo.cz/9-rezivo/>

The Barn Yard and Great Country Garage. *Timber Frame Spotlight: CNC Barn Addition* [online]. 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.thebarnyardstore.com/blog/detail/?id=589>