



Richard Slávik (ed.)

Dřevo ve stavebnictví materiál minulosti i budoucnosti

Mendelova univerzita v Brně

Richard Slávik (ed.)

DŘEVO VE STAVEBNICTVÍ MATERIÁL MINULOSTI I BUDOUCNOSTI

2023

● MENDELU
● Lesnická
● a dřevařská
● fakulta

Editor

Richard Slávik

¹ Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

Kontakt: richard.slavik@mendelu.cz

Předložená publikace vznikla v rámci projektu INTERREG V-A registrační číslo CZ/FMP/11b/10/147, který si kladl za cíl, ustanovit spolupráci mezi Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně a Stavebnou fakultou Žilinské univerzity v Žiline pro oblast navrhování a obnovy dřevěných konstrukcí a dřevostaveb.

© Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

ISBN 978-80-7509-925-9

<https://doi.org/10.11118/978-80-7509-925-9>



Open Access. Publikace „Dřevo ve stavebnictví materiál minulosti i budoucnosti“ podléhá licenci CC BY-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>)

Obsah

Úvod.	5
Stavba dřeva.	7
Dendrochronologické datování historických dřevěných stavebních konstrukcí.	20
Biologická degradace dřeva	26
Aktuálny výskum v oblasti hygrotermálneho režimu konštrukcií drevostavieb.	39
Počítačová podpora projektování dřevěných konstrukcí	48
Použitie dreva v nevetraných plochých strechách	55
Meranie vonkajšej klímy v nadväznosti na použitie v stavebníctve	73
Priamy výskum obalových konštrukcií drevostavieb.	90
Vzduchotesnosť moderných drevostavieb	100
Problematika otvorových konštrukcií a vonkajšieho tienenia v súčasnosti.	113
Aktuálny stav problematiky vegetačných konštrukcií	130
Mechanické vlastnosti dřeva	144

Předložená publikace vznikla v rámci projektu INTERREG V-A registrační číslo CZ/FMP/11b/10/147, který si kladl za cíl, ustanovit spolupráci mezi Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně a Stavebnou fakultou Žilinské univerzity v Žiline pro oblast navrhování a obnovy dřevěných konstrukcí a dřevostaveb. Nové moderní dřevostavby jsou jednou z možných odpovědí na poptávku po energeticky úsporných budovách sledující environmentální šetrné trendy. Neméně důležité je také zachování kulturního dědictví při obnově památek. Dřevo zaznamenalo ve stavebních konstrukcích dlouhou a dynamickou historii, proto má v České a Slovenské republice bohatou tradici. V minulosti byly doby, kdy šlo téměř o jediný stavební materiál, ale i období, kdy bylo použití dřeva v konstrukcích značně limitováno a na určitý čas dokonce i zakázáno. Tento materiál má velmi zajímavé vlastnosti, ale také je při nevhodných podmínkách velice náchylný k degradaci. Z minulosti jsou u nás dochovány velice zajímavé konstrukce, které přetrvaly celá staletí a dodnes jsou pýchou tehdejších mistrů. S postupným vývojem stavebnictví ale přišly na řadu i jiné materiály. Zprůměrnění a racionalizace stavebnictví v minulém století upřednostňovala hlavně silikátové a syntetické materiály, což vedlo k jeho vytlačení z oblasti převládajících nosných konstrukcí spíše do oblastí pomocných konstrukcí a nábytku. V meziválečné a poválečné Evropě začala být také moderní funkcionalistická architektura, vystřídaná později socialistickým romantismem. Tyto nové trendy v architektuře preferovaly spíše ploché střechy, a tak tradiční tesařské řemesla v tomto období byly spíše na ústupu. I když se našly společnosti, které se věnovaly výrobě i dřevostaveb, poměr těchto staveb vůči celkovému objemu stavební výroby rodinných domů nebyl zdaleka takový jako je tomu dnes. Tímto vývojem v minulosti došlo k přerušení kontinuity využití dřeva ve stavebnictví a tento jev je také patrný i v obou našich regionech. U širší odborné veřejnosti je tak znatelné menší povědomí v oblasti navrhování a obnovy dřevěných konstrukcí, ale také nedůvěra vůči dřevu jako materiálu.

Koncem minulého století se začalo v naší společnosti více dbát na úsporu energie a také na hodnocení environmentálních dopadů staveb. Právě zde se pro dřevěné konstrukce a dřevostavby opět otevřel zajímavý prostor, kde dokáží nejen konkurovat tradičním zděným stavbám, ale také je v mnohém předběhnout. Proto se dřevo a dřevostavby dostávají stále více a více do popředí. V současném stavu vývoje energeticky úsporných staveb jsou právě dřevostavby výhodnou alternativou vůči tradičním zděným konstrukcím. Použití dřevěných konstrukcí umožňuje snížit tloušťku stavebních konstrukcí vůči silikátovým alternativám, čím narůstá možnost více využít zastavěnou plochu nebo také do konstrukcí implementovat přírodní materiály s nižšími environmentálními dopady. Dřevo jako stavební materiál však vyžaduje velice citlivý a pečlivý přístup, což klade daleko vyšší nároky na odborné znalosti, než je tomu u ostatních syntetických stavebních materiálů. Odborné veřejnosti dnes často chybí informace o dřevě, a to jak o materiálu samotném, tak o jeho specifikách, které determinují jeho použití a přináší úskalí při jeho aplikaci. Tato situace je patrná jak v oblasti návrhu dřevěných konstrukcí, tak i obnově historických konstrukcí.

Uvědomujíc si tento stav, snažili jsme se v našich regionech připravit projekt, který by pomohl tyto nedostatky zmírnit. Cíl projektu byl realizován společnými aktivitami mezi partnery projektu, dále také semináři a exkurzemi pro širší odbornou veřejnost, kde jsme se snažili naše nejnovější poznatky sdílet. Hmatatelným výsledkem projektu je právě předložená publikace, která v sobě integruje odborné příspěvky na všechna diskutovaná témata, která byla předmětem jednotlivých přednášek a společných setkání. Při ohlédnutí zpět můžeme konstatovat, že se nám tento cíl projektu podařilo naplnit. Aktivita projektu dopomohly propojit naše pracoviště a vytvořit tak platformu pro vzájemné sdílení informací a navázání nových kontaktů pro odbornou a výzkumnou spolupráci a také sdílet naše nejnovější poznatky se studenty a odbornou veřejností napříč oběma regiony. Rád bych touto cestou poděkoval všem kolegům, kteří na projektu pracovali, i dalším spolupracovníkům, kteří nám pomohli s technickým a administrativním zabezpečením realizace projektu nebo přispěli radou či konzultací. Velké poděkování patří také Ing. Petře Krejčí a paní Ivě Chaloupkové za pomoc s administrativní stránkou projektu.

Richard Slávik

STAVBA DŘEVA

prof. Ing. Vladimír Gryc, Ph.D.¹, doc. Ing. Hanuš Vavrčík, Ph.D.¹

¹ Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

Úvod do stavby dřeva

Dřevo je organický materiál rostlinného původu. Z biologického hlediska se jedná o soubor rostlinných pletiv, která mají převážně zdřevnatělou buněčnou stěnu jednotlivých buněk. Většina buněk, které tvoří dřevo rostoucího stromu, je mrtvá. Dřevo se nachází především v dřevinách.

Dřeviny jsou víceleté semenné rostliny. Lze je rozdělit na:

- stromy,
- keře,
- polokeře,
- liány.

Stromy jsou dřeviny, které v dospělosti dorůstají výšky aspoň 6 metrů a obvykle mají jeden kmen. Termínem **keře** jsou označovány dřeviny, které zřídka dorůstají do výšky větší než 6 metrů a zpravidla mají také více kmenů. Typickými představiteli keřů jsou například líska, dřín, ptačí zob aj. **Polokeře** mají dřevnaté jen starší části, zatímco mladší jsou nezdřevnatělé. Příkladem polokeřů může být borůvka nebo brusinka. **Liány** jsou dřeviny, které nejsou schopny vzpřímeného růstu bez opory. Liány nacházíme především v deštných lesích tropických oblastí. Také u nás lze nalézt dřeviny, které řadíme mezi liány – např. břečtan popínavý. Hospodářské využití ve dřevozpracujícím průmyslu mají především stromy.

Strom lze rozdělit na tři hlavní části. Podzemní část tvoří **kořen**. Střední část tvoří **kmen**, který přechází v **korunu** (soubor větví s listy). Zastoupení jednotlivých částí stromu závisí především na dřevině (tab. 1).

Dřevina	Kmen	Kořeny	Větve
smrk, jedle	80–90	5–15	5–10
modřín	77–82	12–15	6–8
borovice	65–77	15–25	10–20
dub	65–75	15–20	10–20
jasan	55–70	15–25	15–20
javor klen	65–75	15–20	10–15
buk	55–75	20–25	10–20
bříza	78–90	5–12	5–10

Tab. 1: Procentické zastoupení hlavních částí stromu u některých dřevin (podle Perelygina, 1965; Ugoleva, 1986)

Většina buněk, které tvoří dřevo, má protáhlý tvar a tyto buňky jsou převážně orientovány rovnoběžně s podélnou osou kmene. Z toho vyplývá, že vzhled povrchu dřeva bude značně ovlivněn úh-

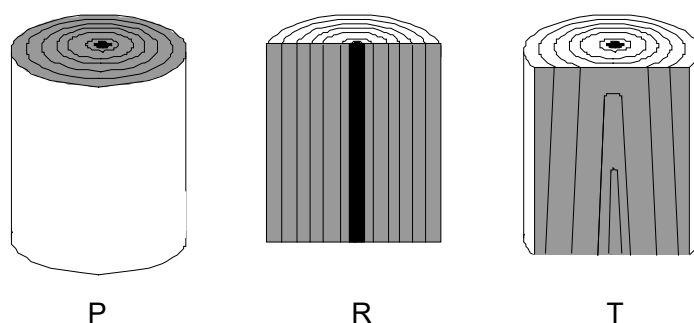
lem, který bude řezná rovina svírat s podélnou osou kmene. Proto zavádíme tzv. základní řezy kmenem. Základní řezy rozlišujeme tři (obr. 1):

- příčný,
- radiální,
- tangenciální.

Příčný řez (značen *P*) je řez, který je vedený rovinou, která je kolmá na podélnou osu kmene. Tento řez lze běžně pozorovat například na pařezu nebo na čele kulatiny. Z tohoto důvodu bývá také někdy označován jako řez čelní.

Radiální řez (značen *R*) je řez, který je vedený rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene, přičemž tato rovina prochází touto osou. Tento řez je z pohledu příčného řezu veden po poloměru, resp. průměru kmene a z tohoto důvodu se někdy používá české označení poloměrový řez (radius = poloměr).

Tangenciální řez (značen *T*) je řez, který je vedený rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene, přičemž tato rovina uvedenou osu neprochází. Z pohledu příčného řezu je tento řez vedený jako tečna k některému z letokruhů, od čehož je odvozen název tohoto řezu (tangenta = tečna).



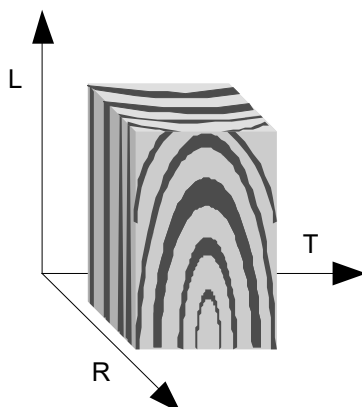
Obr. 1: Základní řezy dřevem kmene. Rovina řezu označena šedě, dřevě označena černě

Radiální a tangenciální řez jsou řezy *podélné*, protože jsou vždy vedeny rovinou rovnoběžnou s podélnou osou kmene.

Pokud je řez dřevem veden rovinou, která neodpovídá ani jedné z výše uvedených definic základních řezů, hovoříme o *šikmém řezu*.

Kromě základních řezů ve dřevě je potřebné rozlišovat základní směry ve dřevě (obr. 2):

- podélný (*L*) – je veden rovnoběžně s osou kmene,
- radiální (*R*) – probíhá kolmo na letokruhy,
- tangenciální (*T*) – je tečnou k některému z letokruhů.

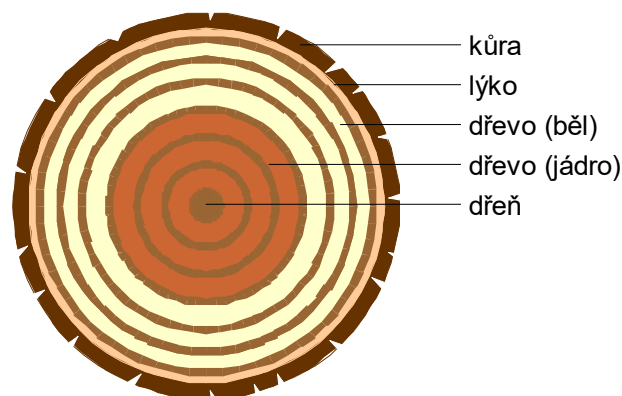


Obr. 2: Směry ve dřevě. *L* – směr podélný, *R* – směr radiální, *T* – směr tangenciální

Při pohledu na příčný řez kmenem můžeme rozlišit ve směru od obvodu ke středu několik pozorovatelných vrstev:

- vnější kůra,
- lýko,
- dřevo,
- dřeň.

V rostoucím stromě plní jednotlivé vrstvy různé funkce. **Vnější kůra** plní funkci ochrannou, mechanickou a tepelně izolační. **Lýko** v rostoucím stromě rozvádí produkty fotosyntézy a také plní funkci zásobní. **Dřevo** má především funkci vodivou a mechanickou. Vodivou funkcí rozumíme vedení vody s rozpuštěnými minerálními látkami od kořenů směrem ke koruně. Pod mechanickou funkcí pak chápeme schopnost dřeva držet kmen ve vzpřímené poloze. **Dřeň** se nachází ve středu kmene. Plní vodivou funkci především v prvním roce života stromu (obr. 3).



Obr. 3: Příčný řez dřevem kmene

Mezi dřevem a lýkem se nachází tzv. **kambium**, což je dělivé pletivo které produkuje nové buňky dřeva i lýka. Mezi lýkem a vnější kůrou se nachází jiné dělivé pletivo – **felogén**, který vytváří nové buňky vnější kůry. Kambium ani felogén není možné pouhým okem rozpoznat.

Poznání stavby, tj. struktury dřeva nám umožní určovat druhy jednotlivých dřev. Určování dřev je zpravidla možné jen na úroveň rodového názvu, nikoliv druhového. Např. lze poznat, že se jedná o dřevo smrku, ale již nejsme schopni určit druhové jméno, tj. jestli se jedná o smrk obecný nebo smrk východní. Na druhou stranu je nutno poznamenat, že některé druhy dřevin mají natolik odlišné dřevo, že je dokonce nutné tato dřeva odlišovat. Příkladem může být dřevo borovice lesní a borovice vejmutovky.

V dalším textu se zaměříme na stavbu dřeva, a to na makroskopické, mikroskopické, submikroskopické i chemické úrovni.

Makroskopická stavba dřeva

Termínem **makroskopická stavba dřeva** označujeme všechny znaky, které lze na povrchu dřeva pozorovat pouhým okem, případně s použitím zvětšovacího skla. Znaky pro makroskopické určování dřev jsou následující:

- základní znaky (letokruhy, jádro a běl, dřeňové paprsky, cévy, pryskyřičné kanálky, dřeňové skvrny, suky),
- doplňkové znaky (barva, lesk, textura),
- fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva ve vztahu k makroskopickému určování dřeva (hustota, tvrdost).

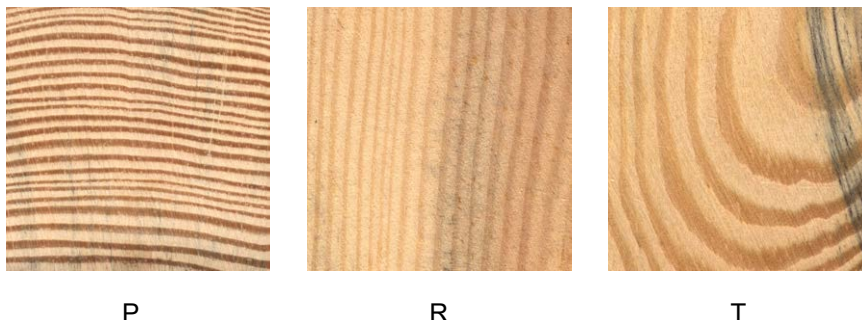
Tyto znaky si nyní podrobně popíšeme v následujících kapitolách.

Základní znaky

Letokruhy

Letokruh představuje různě silnou přírůstkovou vrstvu kmene, kořenů a větví. Letokruh je vytvořen činností kambia v průběhu jednoho vegetačního období. Vegetačním obdobím rozumíme tu část roku, po kterou jsou podmínky vhodné pro růst rostlin. V našich klimatických podmínkách je to období přibližně od dubna do listopadu.

U dřev se zřetelnými letokruhy lze letokruhy pozorovat na všech základních řezech. Na příčném řezu letokruhy vytváří víceméně soustředné kružnice, na radiálním řezu letokruhy vytvářejí rovnoběžné pásy a na řezu tangenciálním zvlněné parabolické útvary (obr. 4).

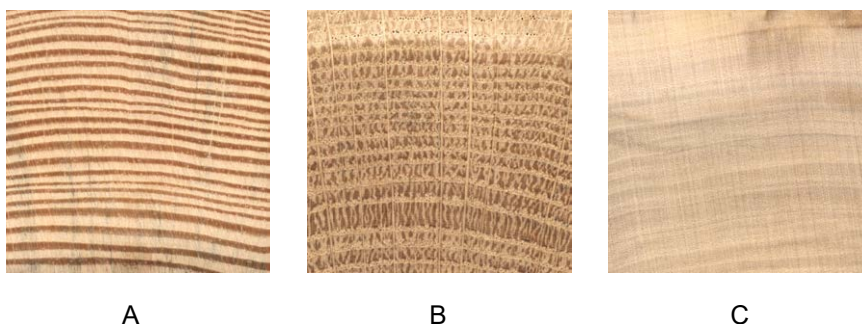


Obr. 4: Zobrazení letokruhů na základních řezech

V oblastech mírného pásma se tvoří letokruh v průběhu vegetačního období. Každý letokruh se skládá ze dvou barevných a i strukturně odlišných částí. Na začátku vegetačního období je činností kambia vytvářeno **jarní dřevo**, které má světlejší barvu. V druhé části vegetačního období pak kambium začíná tvořit **letní dřevo**. Letní dřevo je tmavší částí letokruhu. Rozdílnost v barvě je dána rozdílnou stavbou a funkcí dřeva. Jarní dřevo v rostoucím stromě má především funkci vodivou, letní dřevo plní především mechanickou funkci.

Na základě struktury letokruhu je možné rozdělit dřevo našich dřevin do následujících skupin (obr. 5):

- dřevo jehličnatých dřevin,
- dřevo listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva,
- dřevo listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva,
- dřevo listnatých dřevin s polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva.



Obr. 5: Charakteristika letokruhu u jednotlivých skupin dřev z pohledu příčného řezu; A – dřevo jehličnatých dřevin, B – dřevo listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou a roztroušeně pórovitou (C) stavbou dřeva

Dřevo jehličnatých dřevin

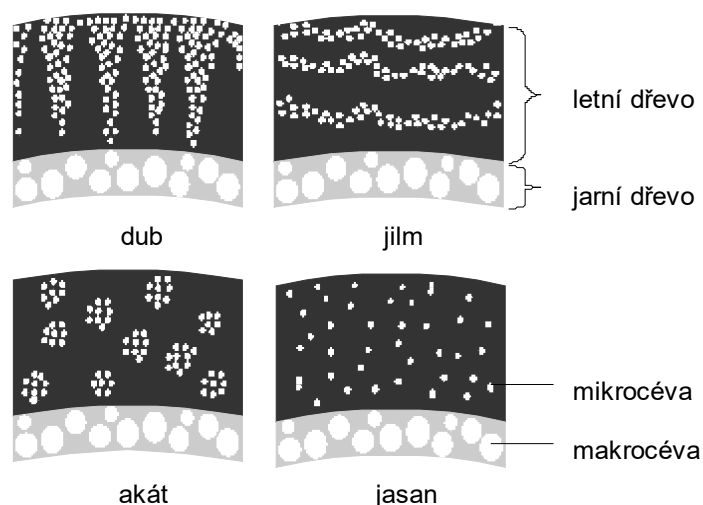
Pro tuto skupinu dřev platí, že letokruhy jsou velmi dobře zřetelné. V letokruhu je možné velmi dobře vylíšit jarní a letní dřevo. Jarní dřevo je zpravidla širší a má světlejší barvu. Letní dřevo má tmavší barvu a je užší. V rámci letokruhu pozorujeme různě zřetelný přechod mezi jarním

a letním dřevem. Dřevo u nás vysazovaných jehličnanů lze podle výraznosti tohoto přechodu (od ostrého k pozvolnému) seřadit následovně:

- nejostřejší: modřín,
- velmi ostrý: douglaska, borovice,
- středně ostrý: tis, jedle, smrk,
- pozvolný: jalovec, vejmutovka.

Dřevo listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva

U této skupiny dřev jsou letokruhy také velmi dobře zřetelné. V rámci letokruhu je možné pozorovat strukturně odlišné jarní a letní dřevo. Na příčném řezu pozorujeme v jarním dřevě otvůrky, tzv. makrocévy (obr. 6). Na podélných řezech jsou makrocévy podélně rozřezány a vytvářejí svislé rýhy. V letním dřevě se vyskytují letní cévy – mikrocévy, které jsou makroskopicky nepozorovatelné. U některých dřev se však mikrocévy seskupují a vytvářejí tak charakteristickou kresbu letního dřeva, která je makroskopicky pozorovatelná (např. dub – plaménky, jilm – vlnkování, akát – tečkování).



Obr. 6: Charakteristika uspořádání cév u dřev listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva

Dřevo listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva

Na rozdíl od předchozích dvou skupin, dřevo listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva má letokruhy zpravidla málo zřetelné. Pouze u dřeva buku, platanu a javoru jsou letokruhy relativně dobře zřetelné. V letokruhu není možné vylišit zónu jarního a letního dřeva. V dřevě jsou přítomny pouze úzké cévy – mikrocévy, které jsou makroskopicky nezřetelné (podélné řezy jsou hladké).

Dřevo listnatých dřevin s polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva

Tato skupina tvoří přechodnou skupinu mezi kruhovitě a roztroušeně pórovitými dřevy. Na základě přítomnosti makrocév a mikrocév lze dřeva v této skupině rozdělit následovně:

- letokruhy jsou relativně dobře zřetelné a ve dřevě se vyskytují jen mikrocévy. Na příčném řezu je možné vylišit úzkou zónu světlejšího jarního dřeva. Vyšší viditelnost jarního dřeva je způsobena větším množstvím mikrocév v této části letokruhu (obr. 7). Podélné řezy jsou hladké. Příkladem může být dřevo třešně a švestky.
- letokruhy nejsou na příčném řezu dobře viditelné (obr. 7). Ve dřevě jsou přítomny pouze makrocévy, které jsou rovnoměrně rozptýleny v rámci každého letokruhu. Průměr makrocév se snižuje od jarního do letního dřeva. Vlivem přítomnosti makrocév se na podélných řezech vyskytují rýhy. Z našich dřev do této podskupiny patří dřevo ořešáku.



třešeň

ořešák

Obr. 7: Struktura letokruhu u dřev listnatých s polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva

Kambium u stálezelených dřevin v oblastech tropického a subtropického pásma tvoří dřevo nepřetržitě nebo dochází k tvorbě *přírůstových zón*. Přírůstové zóny odpovídají střídání období sucha a období dešťů.

Jádro a běl

U některých dřev lze pozorovat tmavěji zbarvenou centrální část kmene, tzv. **jádro**. Jádro má pravidelný tvar (obráz. 8). V jádře se ukládají *jádrové látky*, které zvyšují trvanlivost a odolnost jádra (odolnost proti houbám a povětrnostním vlivům). Jádrové látky uložené v jádrovém dřevě na vzduchu oxidují a způsobují tak ztmavnutí jádrového dřeva.

Tvorba jádra je výsledkem procesů probíhajících v důsledku přirozeného stárnutí stromu. Během procesu tvorby jádra dochází k odumírání živých buněk a k ucpání vodivých cest. Jádrové dřevo v rostoucím stromě již neplní vodivou funkci. Jádrové látky uložené ve vodivých cestách jsou důvodem, proč je jádrové dřevo hůře impregnovatelné. Jádrové dřevo je tvořeno pouze mrtvými buňkami.



Obr. 8: Jádro a běl u dřeva topolu

Běl je světleji zbarvená část dřeva, propustná pro vodu a v rostoucím stromě je charakterizována přítomností živých buněk. I přesto je velká část buněk, které tvoří bělové dřevo mrtvá. Bělí je vedena voda s minerálními látkami od kořenů ke koruně stromu. S vodivou funkcí je spojena vyšší vlhkost běli. Bělové dřevo je oproti jádru méně trvanlivé a odolné, ale snadněji impregnovatelné.

Vyzrálé dřevo je ta část dřeva kmene, která má stejné vlastnosti jako dřevo jádrové (mrtvé buňky, ukládání jádrových látek, ucpané vodivé cesty), avšak zbarvením odpovídá dřevu bělovému. Z toho vyplývá, že vyzrálé dřevo není barevně odlišitelné od bělového dřeva. Pouze po skácení je možné pozorovat vyzrálé dřevo jako světleji zbarvenou středovou část kmene, zatímco běl je v důsledku vyšší vlhkosti zbarvena tmavěji. Po vysušení dřeva barevné rozdíly mezi obvodovou a centrální částí kmene vymizí.

Zatímco jádro se vytváří v důsledku přirozeného stárnutí stromu, u některých dřevin, které jádro nevytvářejí, může být v důsledku působení různých faktorů (houby, hmyz, mráz) vyvolán proces tvorby jádra, které označujeme jako **nepravé jádro** (obr. 9). Ve srovnání s jádrem je nepravé jádro nepravidelného tvaru a je ohraničeno tmavou linií. Nepravé jádro je považováno za vadu dřeva. Je-li nepravé jádro bez hniloby, jedná se pouze o estetickou vadu a toto dřevo může být bez problému zpracováváno.



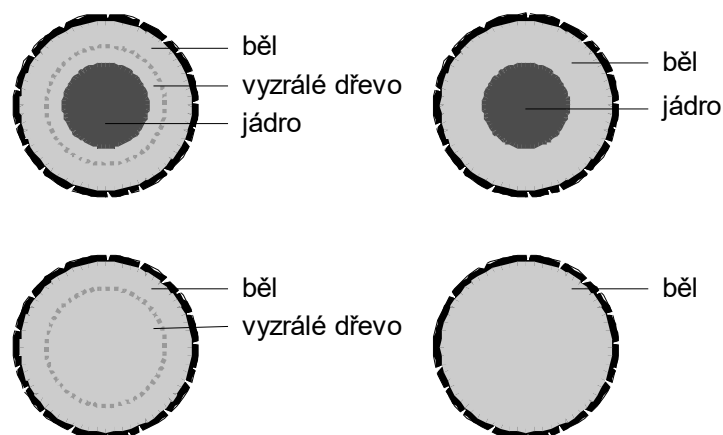
Obr. 9: Nepravé jádro u dřeva břízy

Rozdělení dřev podle výskytu jádra, bělí a vyvrátého dřeva

Na základě barevných rozdílů je možné dřevo našich dřevin rozdělit do následujících skupin (obr. 10):

- dřeva bělová – na příčném řezu kmenem mají stejnou barvu dřeva (žlutobílou, nažedlou nebo narůžovělou). Do této skupiny patří dřeva břízy, olše, habru, javoru, hrušně a osiky.
- dřeva s bělí a jádrem – mají ve střední části kmene výrazně zbarvenou tmavší zónu jádra a na obvodu světlejší vrstvu bělí. Jádro se vyznačuje nižší vlhkostí. Mezi dřeva jádrová patří např. borovice, modřín, dub, akát, třešeň, ořešák.
- dřeva bělová s vyvrátým dřevem – po skácení kmene je pozorována tmavší obvodová část kmene (způsobeno vyšší vlhkostí). Po vyschnutí je barva dřeva po celém poloměru kmene stejná. Do této skupiny je zařazováno dřevo buku, lípy, smrku, jedle, z keřů např. hloh.
- dřeva s bělí, jádrem a vyvrátým dřevem – mezi obvodovou částí (bělí) a tmavou centrální částí kmene (jádro) se nachází mezikruží s vyvrátým dřevem (jasan, jilm, vrba).

Při praktickém určování dřeva vystačíme s rozdělením na dřeva jádrová (běl a jádro) a bělová.



Obr. 10: Schematické členění dřev podle výskytu bělí, jádra a vyvrátého dřeva

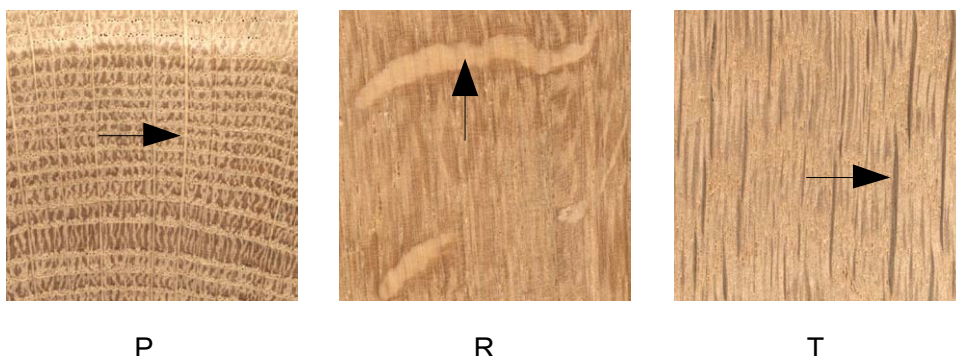
Dřeňové paprsky

Dřeňové paprsky jsou tvořeny souborem parenchymatických buněk a jsou orientovány kolmo na osu kmene. V živém stromě zabezpečují funkci zásobní. Také umožňují horizontální transport organických látek (produkty fotosyntézy) a vody.

Na příčném řezu pozorujeme dřeňové paprsky jako úzké pásy probíhající kolmo na hranici letokruhu (v radiálním směru). Na radiálním řezu tvoří dřeňové paprsky různé velké *lesklé plošky* (zrcadla) a na tangenciálním řezu různě vysoké často tmavěji zbarvené svislé čárky (dub a buk tmavě hnědé, olše načervenalé) – obr. 11.

Dřeňové paprsky jsou přítomny ve dřevě všech dřevin, ale jejich velikost je rozdílná. Podle mohutnosti se dělí dřeňové paprsky na:

- **široké** – viditelné na všech základních řezech (dub, pajasán, buk, platan, habr, olše aj.),
- **úzké** – viditelné pouze na radiálním řezu (jilm, jasan, akát, javor, třešeň, ořešák aj.),
- **velmi úzké** – nejsou viditelné (dřevo všech jehličnanů, vrba, topol, hrušeň aj.).



Obr. 11: Zobrazení dřeňových paprsků na základních řezech u dřeva dubu

U dřeva habru a olše se vyskytují i tzv. **nepravé** (sdružené) dřeňové paprsky. Jedná se o seskupení úzkých dřeňových paprsků do jednoho shluku. Makroskopicky pozorujeme toto seskupení jako jeden velký dřeňový paprsek.

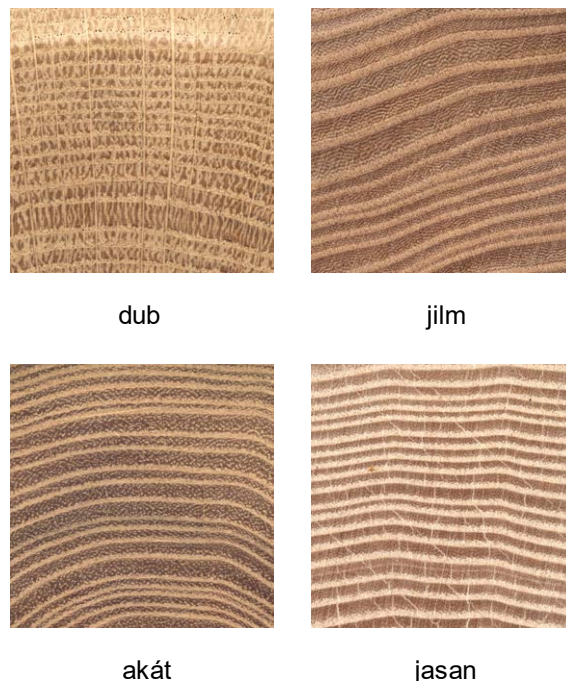
Přítomnost dřeňových paprsků na radiálním řezu zvyšuje rozmanitost kresby dřeva. Podle odrazu světelných paprsků se dřeňové paprsky jeví jako světlejší nebo tmavší část dřeva ve vztahu k okolnímu dřevu. Zastoupení dřeňových paprsků je u jehličnanů 5–10 % u listnáčů více 10–20 % z celkového objemu kmene.

Cévy

Cévy nebo-li póry se vyskytují pouze ve dřevě listnatých dřevin. Cévy si lze představit jako trubičky orientované rovnoběžně s osou kmene. Cévy plní ve dřevě funkci vodivou. Cévy vedou vodu od kořenů do koruny stromů v bělové části dřeva. V jádrovém dřevě jsou cévy vyplněny vodou, jádrovými látkami nebo vzduchem. Cévy lze rozdělit podle příčných rozměrů na:

- makrocévy – jsou makroskopicky pozorovatelné (průměr větší jak 0,1 mm) na příčném řezu jako póry. Na radiálním a tangenciálním řezu jsou makrocévy podélně rozřezány a zobrazují se ve formě rýh.
- mikrocévy – nejsou makroskopicky pozorovatelné (průměr menší jak 0,1 mm).

Na základě přítomnosti jednotlivých typů cév se dřevo listnatých dřevin dělí na dřevo s kruhovitě, polokruhovitě a roztroušeně pórovitou stavbou dřeva.

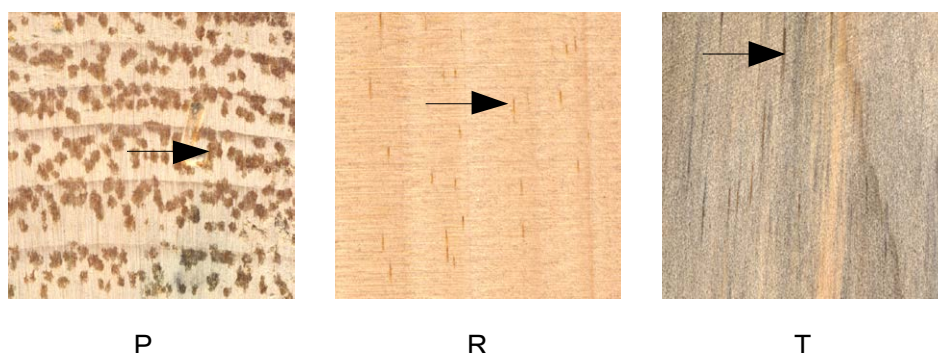


Obr. 12: Charakteristická seskupení mikrocév ve dřevě listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva

Pryskyřičné kanálky

Pryskyřičné kanálky se vyskytují pouze u rodů smrk, modřín, borovice a douglaska. Ostatní rody jehličnatých dřevin mají dřevo bez pryskyřičných kanálků (např. rody jedle, tis a jalovec). Pryskyřičné kanálky plní ve dřevě ochrannou funkci. Ve dřevě jehličnanů se vyskytují pryskyřičné kanálky *vertikální* a *horizontální*. Vertikální pryskyřičné kanálky probíhají rovnoběžně s podélnou osou kmene, horizontální pryskyřičné kanálky se nacházejí ve vícevrstevných dřevňových paprscích a probíhají v radiálním směru. Pryskyřičné kanálky jsou navzájem propojeny a vytvářejí tak ve dřevě souvislou síť.

Pryskyřičné kanálky mají velmi malé rozměry a proto jsou špatně pozorovatelné na neohoblovaném řezivu. Na opracovaném dřevě pozorujeme pouze pryskyřičné kanálky vertikální. Na příčném řezu lze pryskyřičné kanálky pozorovat jako světlejší body v letním dřevě. Na radiálním a tangenciálním řezu vytvářejí pryskyřičné kanálky tmavěji zbarvené svislé čárky medové barvy (obr. 13). Procentické zastoupení pryskyřičných kanálků ve dřevě je 0,5 % z celkového objemu kmene.



Obr. 13: Zobrazení pryskyřičných kanálků na základních řezech u dřeva vejmutovky

Dřeňové skvrny

Pod pojmem dřeňová skvrna rozumíme hojivý parenchym. Dřeňové skvrny vznikají ve dřevě v důsledku poškození kambia hmyzem. Makroskopicky se dřeňové skvrny na příčném řezu zobrazují jako skvrnky tmavé barvy, které jsou na příčném řezu rovnoběžné s hranicí letokruhů.

Na radiálním a tangenciálním řezu tvoří dřeňové skvrny různě dlouhé tmavě zbarvené svislé čárky (obr. 14). Vyskytují se převážně u bělových dřevin jako je např. olše, bříza, javor, hrušeň aj. Dřeňové skvrny se hojně vyskytují u dřeva břízy a olše a pro tato dřeva jsou důležitým makroskopickým znakem (dlouhé několik mm až cm).



Obr. 14: Dřeňové skvrny u dřeva olše

Doplňkové znaky

Barva dřeva

Zbarvení dřeva způsobují látky uložené v buněčných dutinách (lumenech) nebo buněčných stěnách. Jsou to barviva, třísloviny, pryskyřice a produkty jejich oxidace. Barva dřeva je charakteristická pro jednotlivé dřeviny. Je vlastností velmi proměnlivou, mění se vlivem světla, vzduchu, vlhkosti, je také podmíněna klimatickými podmínkami, ve kterých je dřevo uloženo. Dřeviny mírného pásma mají světlejší zbarvení než dřeviny tropického pásma. Intenzita zbarvení se zvyšuje s věkem, což je zejména dobře pozorovatelné u jádrových dřevin. Změna barvy může také poukazovat na počátky hnilobných procesů. Barva dřeva se může také měnit působením fyzikálních a chemických vlivů při dopravě, ochraně a opracování dřeva (např. černání dubového dřeva při delším kontaktu s železnými částmi obráběcích nástrojů a strojů). Barva se mění také v důsledku technologických pochodů (paření, moření, povrchové úpravy). Barva dřeva je významný faktor při návrhu nábytku, hudebních nástrojů, sportovních potřeb, uměleckých děl apod.

Lesk dřeva

Lesk dřeva je schopnost odrazet dopadající světelné paprsky. Nejvíce odrážejí světelné paprsky dřeňové paprsky. Nejvíce lesklým je řez radiální, kde dřeňové paprsky vytvářejí různé velké lesklé plošky. Mezi lesklá dřeva patří javor (používá se termín hedvábný lesk), platan, buk, jilm, z tropických dřev např. mahagon. Dřeva habru, jabloně a hrušně patří mezi dřeva bez lesku. Zvýšení lesku lze u dřev docílit povrchovou úpravou (např. na pololesk, vysoký lesk). Lesk patří mezi doplňkové znaky při makroskopickém určování dřeva.

Textura dřeva

Textura dřeva je typická pro určitý řez a druh dřeva. Texturu dřeva pozorujeme nejlépe na povrchu opracovaného dřeva. Textura dřeva se vytváří kombinací jednotlivých makroskopických znaků. Hlavní vliv na texturu mají letokruhy (podíl a struktura jarního a letního dřeva), dřeňové paprsky, barevná odlišnost jádra a běli, suky, přítomnost pryskyřičných kanálků aj. U některých dřevin je základní struktura dřeva obohacena přítomností zvláštností kresby dřeva. Zvláštnosti textury mohou být následující:

- **svalovitost** (vlnitost dřevních vláken) je růstová odchylka, kdy dřevní vlákna neprobíhají přímo rovnoběžně s osou kmene. Na podélných řezech se vlnitost projevuje střídáním lesklých

a tmavých ploch při změně úhlu pohledu a osvětlení (obr. 15). Tuto texturu je možné pozorovat u dřeva břízy ze severských oblastí (používá se název severská, plaměncová nebo švédská bříza). Vlnitost se také vyskytuje např. u dřeva jasanu, javoru, jilmu a dalších.



Obr. 15: Svalovitost u dřeva jasanu

- **očková kresba** je pro svoji zajímavou texturu v nábytkářském průmyslu velmi vyhledávána. Očka představují zárodky nevyvinutých větví, tzv. zarostlé spící pupeny (obr. 16). Očková kresba je typická pro dřevo javoru, kde mohou očka ojediněle dosahovat velkých rozměrů nebo se vyskytuje větší množství drobných oček. Očková kresba se také může vyskytovat u dřeva topolu, vrby, ořešáku aj.



Obr. 16: Očková kresba u dřeva javoru



Obr. 17: Lískovcové dřevo u smrku

- **lískovcové dřevo** je zřejmě způsobeno genetickou vadou. Na příčném řezu dochází k vychýlení letokruhu v radiálním směru (obr. 17). Lískovcové dřevo je velmi časté u smrku, který roste v horských oblastech, může se také vyskytovat u dřeva jedle, buku a jasanu (u listnatých dřevin je výskyt méně častý). Přítomnost lískovcového dřeva má pozitivní vliv na kresbu dřeva a jeho vyšší přirozený lesk. Lískovcové dřevo je vyhledáváno pro výrobu hudebních nástrojů a dýh. Mechanické vlastnosti lískovcového dřeva jsou nižší než u normálního dřeva smrku.
- **kořenice** se získává z oddenkové části kmene (místo mezi kmenem a kořeny). Rozmanitá kresba je výsledkem vrůstání letokruhů kořenů do spodní kmenové části (obr. 18). Často dochází k zarůstání malých kořínek s kůrou a hlínou. K charakteristickým znakům kořenicové dýhy je i vlnitý lesk. Kořenicová dýha je v nábytkářství velmi ceněna. Kořenici lze získat z jakékoliv dřeviny, ale nejčastěji se zpracovává kořenice ořešáku, jasanu, javoru, topolu a břízy.
- **reakční dřevo** vzniká jako reakce stromu na zvýšené mechanické namáhání větrem, sněhem, ledovkou aj. Charakteristickým znakem pro reakční dřevo je excentrický růst kmene (excentricky uložená dřev; nestejná šířka letokruhů). Reakční dřevo má odlišnou stavbu dřeva

od dřeva normálního na všech úrovních. Reakční dřevo je souhrnným označením pro dřevo tlakové a tahové.

Tlakové dřevo se tvoří u jehličnatých dřevin na spodní straně ohnutého kmene a na spodní straně větví, tedy v místech, kde je ve dřevě tlakové napětí. Tlakové dřevo je dobře identifikovatelné pomocí širokých letokruhů, ve kterých převládá vysoký podíl tmavě zbarveného letního (= tlakového) dřeva. U silně ohnutých kmenů se vytváří tmavá srpovitá zóna (obr. 19). Na podélných řezech je tlakové dřevo pozorovatelné jako tmavé pásy (dochází k rozšíření letního dřeva).

Tahové dřevo se tvoří na horní straně ohnutého kmene a na horní straně větví. Makroskopicky je tahové dřevo od dřeva normálního špatně odlišitelné.



Obr. 18: Kořenecová dýha z dřeva topolu



Obr. 19: Tlakové dřevo u smrku

Suky

Suky představují pozůstatky živých nebo odumřelých větví. Vyskytují se ve dřevě všech dřevin. Na příčném a tangenciálním řezu mají suky oválný tvar, na radiálním řezu procházejí pod určitým úhlem k ose kmene. U dřevin s přeslenovitým uspořádáním větví tvoří suky na příčném řezu růžice. Okrouhlé nebo oválné suky zvýrazňují kresbu dřeva vlastním průběhem letokruhů a také tmavší barvou od okolního dřeva. Tmavá barva suků je způsobena užšími letokruhy a u jehličnatých dřevin přítomností reakčního dřeva. Suky narušují rovnoběžnou strukturu dřeva, snižují výtěžnost řeziva, zhoršují opracování a jsou považovány za vadu. Při makroskopickém určování se hodnotí velikost a barva suků. Jedná se pouze o doplňkový znak, především pro dřevo jehličnanů.

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva ve vztahu k makroskopickému určování dřeva

Hustota dřeva

Při makroskopickém určování dřeva nezjišťujeme jeho přesnou hustotu, ale pouze odhadujeme hmotnost vzorku, která nám může dát přibližnou informaci o hustotě dřeva. Hustota dřeva je definována jako podíl hmotnosti a objemu (jednotkou je $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Při odhadu hustoty dřeva je nutné vzít do úvahy nejen velikost vzorku, ale i jeho vlhkost. Podle hustoty dřeva při vlhkosti 12 % (podmínky prostředí odpovídají vytápěné místnosti, která má teplotu 20 °C a relativní vzdušnou vlhkost 65 %) se dřeva dělí do následujících skupin:

- dřevo s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – smrk, jedle, borovice, topol, vrba, olše, lípa aj.
- dřevo se střední hustotou ($\rho_{12} 550\text{--}750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – modřín, dub, jasan, jilm, buk, bříza, javor, třešeň aj.
- dřevo s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – akát, habr, eben, quajak aj.

Tvrdost dřeva

Tvrdostí dřeva rozumíme schopnost materiálu odolávat vnikání cizího tělesa do jeho struktury. Při makroskopickém určování druhu dřeva se orientačně odhaduje vrypem pomocí nehtu. Dřevo lze pak rozdělit do skupin na:

- *dřeva měkká* – nehtem lze snadno vytvořit rýhu na všech řezech (např. smrk, jedle, borovice, topol, vrba, olše, lípa aj.),
- *dřeva středně tvrdá* – nehtem lze vytvořit rýhu pouze na podélných řezech (např. dub, jasan, jilm, buk, bříza, javor, třešeň, ořešák aj.),
- *dřeva tvrdá* – na povrchu nelze vytvořit rýhu (akát, habr, eben, quajak aj.).

Kontakty

Vladimír Gryc: vladimir.gryc@mendelu.cz

Hanuš Vavřík: hanus.vavrcik@mendelu.cz

DENDROCHRONOLOGICKÉ DATOVÁNÍ HISTORICKÝCH DŘEVĚNÝCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Ing. Tomáš Kolář, Ph.D.¹, doc. Ing. Michal Rybníček Ph.D.¹

¹ Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

Úvod

Dendrochronologii je možné v užším slova smyslu chápat jako metodu datování dřeva založenou na měření šířek letokruhů [1]. Nejčastěji je tato metoda používána pro datování dřevěných prvků historických staveb (zejména krovů, stropů, stěn či dveří), dřevěných archeologických nálezů, dřevěných uměleckých předmětů (např. obrazy, hudební nástroje či sochy), nábytku nebo subfossilních kmenů. Pomocí dendrochronologie je možné datovat skácení použitého stromu s přesností na rok nebo roční období. Následující text popisuje přesný metodický postup při dendrochronologickém datování historických stavebních konstrukcí. Soubor všech objektů dosud datovaných na území České republiky je možné nalézt v databázi na stránkách www.dendrochronologie.cz.

Princip

Základním vstupním parametrem v dendrochronologii je šířka letokruhu. Letokruh se utváří v průběhu vegetačního období a je výsledkem přerušení tloušťkového růstu stromu v důsledku vegetačního klidu u dřevin rostoucích v oblasti mírného a chladného pásma. Šířka letokruhu je jedinečná pro určitý čas a místo, ve kterém daný strom roste. Stromy rostoucí na stejném území a tedy i ve stejných klimatických podmínkách vykazují stejnou reakci vyjádřenou šířkou letokruhu. Existuje tedy podobnost ve změnách šířky letokruhu v rámci porostu, zejména pokud se jedná o maximální a minimální hodnoty [2]. Na základě tohoto principu je možné přiřadit každému letokruhu rok jeho vzniku a datovat tak další vzorky dřeva na základě podobnosti letokruhových křivek.

Odběr vzorků a jejich příprava před měřením letokruhů

Šířka letokruhu je obvykle měřena na příčném řezu. Pokud na tomto řezu není možné letokruhy měřit, je možné šířky letokruhů měřit na radiálním řezu. Odběr vzorků se liší v závislosti na datovaném objektu, přičemž zásadní pro správný odběr vzorků je vybrat vhodné místo. Primárně se odebírají vzorky z trámů, kde se předpokládá co největší počet letokruhů, což výrazně zvyšuje pravděpodobnost úspěšného dendrochronologického datování. Vzorky se obvykle odebírají v místě, kde je uchován tzv. podkorní letokruh nebo v případě dubu alespoň letokruhy bělového dřeva, aby následné datování bylo co nejpřesnější. Podkorní letokruh je poslední letokruh, který se vytvořil před pokácením stromu. U trámů historických stavebních konstrukcí se podkorní letokruh nachází na jejich hranách, kde je patrná oblina. V ideálním případě je na trámech možné nalézt i zbytky kůry. Vzorky jsou nejčastěji odebírány pomocí Presslerova přírůstového nebozezu (obr. 20) v podobě vývrtů. Vrt je veden z místa podkorního letokruhu (pokud není zachován

tak z hrany trámu) směrem k jeho středu (dřeni) tak, aby bylo odebráno co nejvíce letokruhů (obr. 21). Vývrty jsou následně nalepeny do dřevěných lišt, aby nedošlo k jejich poškození. Vývrty je nutné do lišt nalepit tak, aby po obroušení byly letokruhy viditelné na příčném řezu. Vhodnější pro dendrochronologické datování jsou však vzorky ve formě příčného řezu daným prvkem (obr. 20), protože je možné si vybrat nejlepší směr měření a vyhnout se případným růstovým anomáliím. Takové vzorky je ovšem možné z historických stavebních konstrukcí odebrat pouze v případě, kdy dochází k rekonstrukci objektu a staré prvky jsou nahrazovány novými. Tenké prvky (např. podlahová prkna, parapety, okenní překlady), dřevo napadené hnilobou nebo značně povrchově poškozené dřevokazným hmyzem nelze navrtat (vzorky se rozpadají) a příčný řez je tak v podstatě jedinou možností odběru vzorků pro datování. Dále je možné pro datování využít fotografie o vysokém rozlišení pořízené z pečlivě vybraného místa, kde jsou hranice letokruhů dobře čitelné nebo je nutné před fotografováním povrch upravit žiletkou. Tohoto postupu je možné využít například v případě čel jednotlivých trámů u stěn roubených staveb, protože příčný řez konstrukčních prvků je u krovových konstrukcí zpravidla těžko dostupný. Z každé stavební konstrukce či předpokládané historické stavební etapy je potřebné odebrat alespoň 4 kvalitní vzorky z různých konstrukčních prvků, přičemž přesné místo odběru každého prvku se zapíše do odběrového formuláře. Se zvyšujícím se počtem vzorků se obvykle zvyšuje pravděpodobnost úspěšného datování. Pro následné měření šířek letokruhů je nezbytné, aby hranice letokruhu byly co nejzřetelnější. Z tohoto důvodu je před měřením vzorků jejich povrch obroušen brusným papírem s postupným zvyšováním zrnitosti (minimálně 400) nebo směr měření vyřezán žiletkou.



Obr. 20: Presslerův přírůstkový nebozez (vlevo) a příčný řez trávem (vpravo)

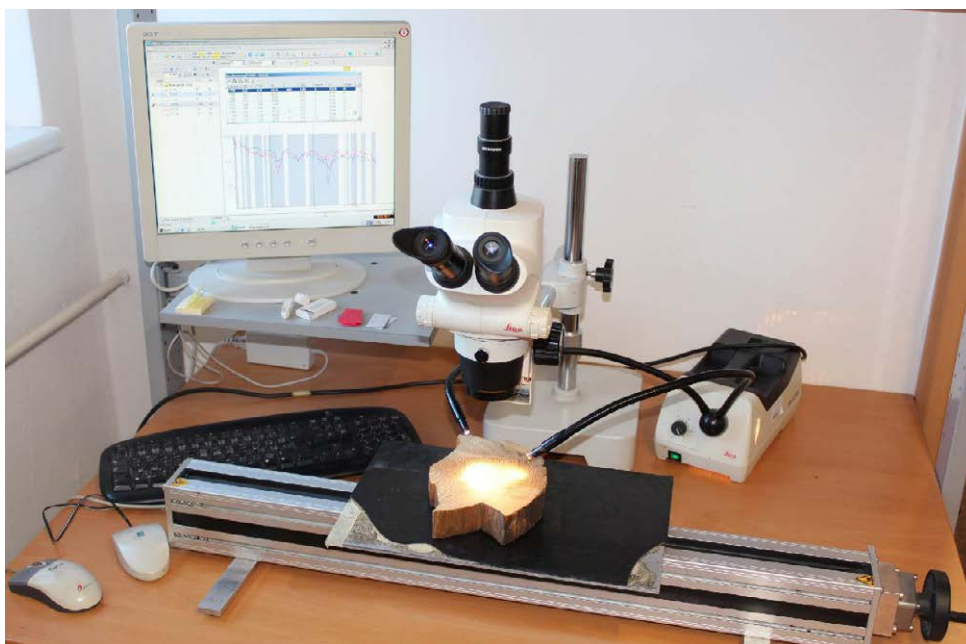


Obr. 21: Odběr vzorků Presslerovým přírůstovým nebozezem v místě podkorního letokruhu směrem ke středu konstrukčního prvku

Měření vzorků

Měření šířek letokruhů se provádí pomocí speciálního měřicího stolu (obr. 22), který je vybaven posuvným šroubovým mechanismem a impulsmetrem, který zaznamenává interval posunu desky stolu a tím i šířku letokruhu. Součástí celého měřicího setu je na stativu umístěná stereolupa s nitkovým křížem a osvětlení měřicího stolu (nejčastěji husí krky). Pokud se jedná o předmět menších rozměrů (vývrt), je tento předmět umístěn přímo na měřicí stůl. Pokud se jedná o větší předmět (nábytek), je na měřicí stůl umístěna stereolupa a měřený předmět je statický. Měření je prováděno s přesností na 0,01 mm ve směru od dřene po kůru a obvykle ve více radiálních směrech. Měření šířek letokruhu je také možné využitím ruční světelné lupy (obr. 23), která se používá u objektů, které je nutné měřit v terénu a není možné je přemístit do laboratoře na měřicí stůl. V tomto případě je přesnost měření 0,1 mm.

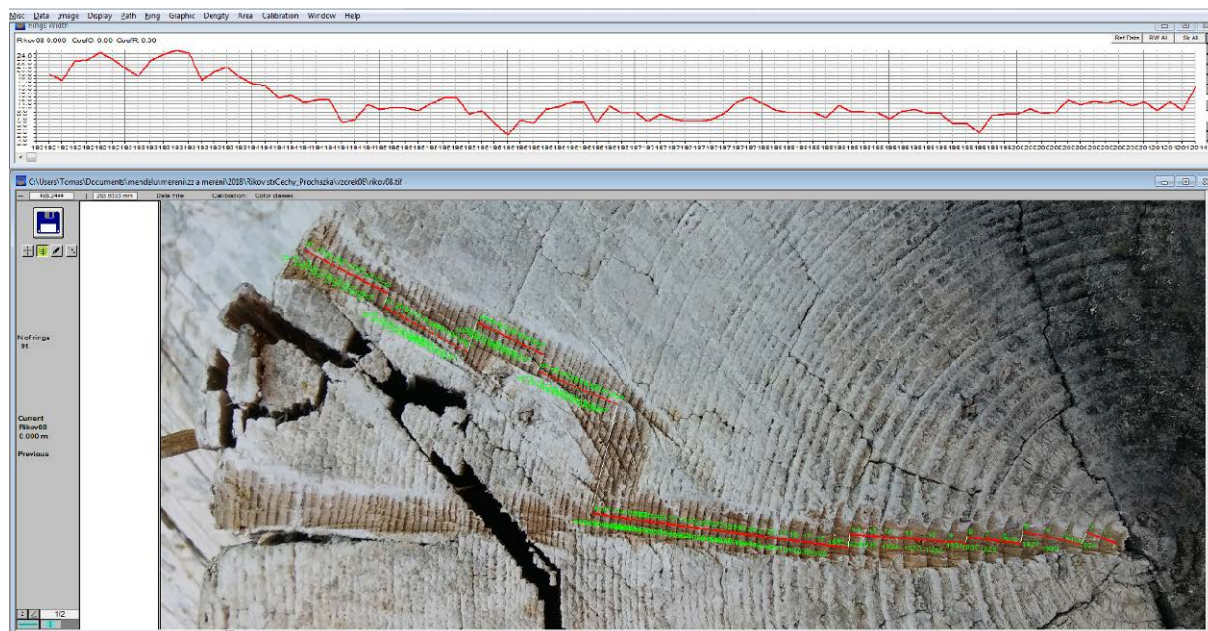
V případě, že se měření provádí z fotografie, jsou pro tyto účely využívány speciální programy na analýzu obrazu, který automaticky detekuje hranice letokruhu (obr. 24). Správnost detekce letokruhů musí být následně zkontrolována. Ve speciálních případech může pro datování posloužit snímek z počítačové tomografie, který je zpracován stejným způsobem jako fotografie.



Obr. 22: Speciální měřicí stůl se stereolupou a husími krky



Obr. 23: Ruční světelná lupa



Obr. 24: Měření fotografie s využitím softwaru na analýzu obrazu

Zpracování dat a limity datování

Změřené šířky letokruhů daného vzorku jsou zobrazeny ve formě letokruhově křivky, přičemž každý vzorek má svou jedinečnou letokruhovou křivku. Jednotlivé letokruhové křivky ze stejné konstrukce jsou následně křížově datovány (synchronizovány). Z dobře synchronizovatelných letokruhových křivek je vytvořena tzv. průměrná letokruhová křivka, která zvýrazní společné extrémy související s klimatickými změnami a potlačí všechny ostatní oscilace způsobené jinými vlivy. Průměrná letokruhová křivka, která reprezentuje příslušnou historickou stavební konstrukci či historickou stavební etapu, je následně porovnána se zvolenou standardní chronologií pro danou dřevinu a oblast původu dřeva. Míra podobnosti mezi letokruhovými křivkami a standardními chronologiemi je posuzována pomocí následujících statistických parametrů: T-test podle Baillie–Pilcher [3], T-test podle Hollsteina [4] a tzv. koeficient souběžnosti (Gleichläufigkeit) [5]. Tyto výpočty slouží k usnadnění optického srovnání obou křivek, které je pro konečné datování rozhodující.

Dendrochronologické datování historických nálezů má několik problémů a omezení. Klíčový parametr pro spolehlivé dendrochronologické datování je minimální počet letokruhů na datovaném vzorku. Letokruhové křivky by měly mít alespoň 40–50 letokruhů. Datovat lze i kratší letokruhové křivky, pokud jsou ovšem součástí většího souboru vzorků. Problematické může být i datování prvků vyrobených z jednoho kmene, protože růst stromu mohla ovlivňovat celá řada faktorů, které ovšem nebyly společné pro daný porost, a proto pravděpodobnost úspěšného datování je podstatně nižší. Změřená letokruhová křivka pak nemusí dobře korelovat s použitou standardní chronologií. Dalším problémem při dendrochronologickém datování je stupeň biotického poškození dřeva, druh dřeviny a lokalita původu dřeva použitého na výrobu. Z dendrochronologického hlediska jsou nejvhodnějšími dřevinami pro datování dřeva listnatá s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva a dřeva jehličnatá. Dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva jsou jen velmi obtížně dendrochronologicky datovatelné.

Standardní chronologie

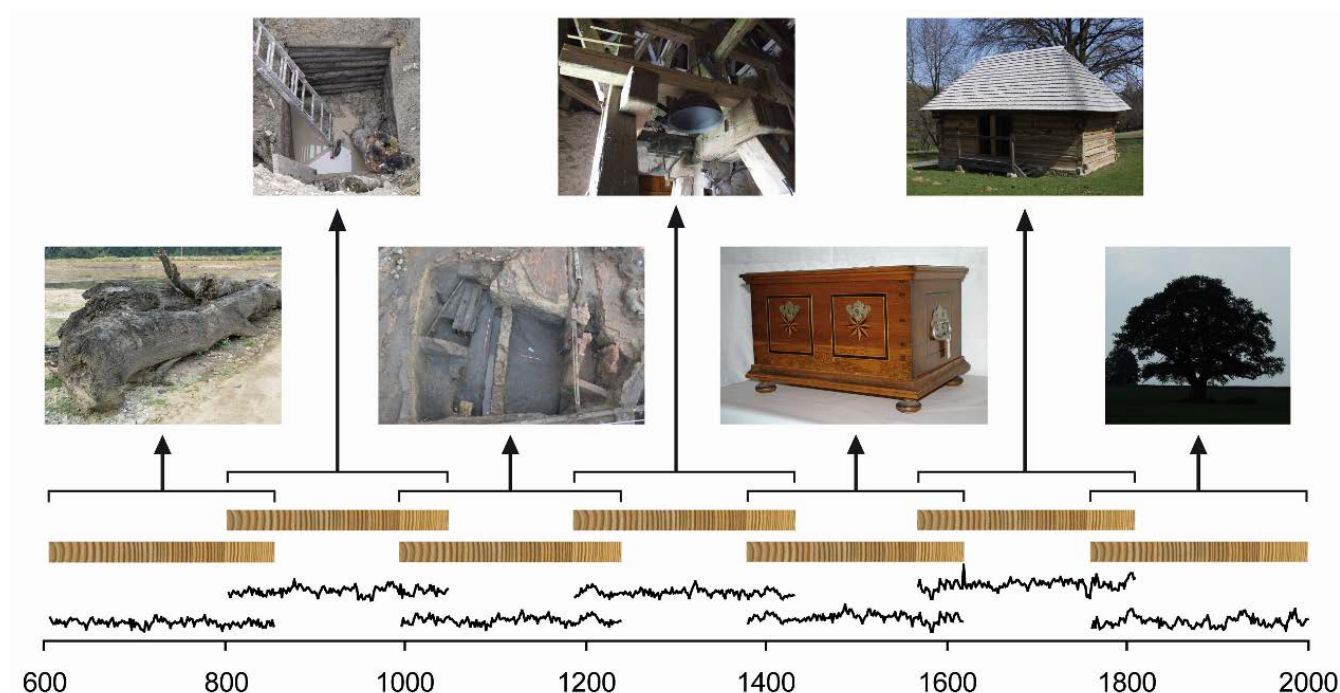
Základním předpokladem pro úspěšné dendrochronologické datování historického dřevěného materiálu je existence standardní chronologie pro danou dřevinu a oblast. Standardní chronologie se tvoří pro každou dřevinu zvlášť a vzniká postupným překrýváním letokruhových sekvencí od současnosti směrem do minulosti (obr. 25). Kvalita standardní chronologie se hodnotí podle počtu jednotlivých letokruhových křivek, které ji v každém roce tvoří. Současně je důležité, jak tyto letokruhové křivky spolu vzájemně korelují. Použitelnost standardních chronologií na daném území klesá se vzdáleností, odkud datované dřevo pochází. Geografický rozsah, pro který

je standardní chronologie použitelná, není jednoznačně definovaný a závisí na řadě faktorů. Každá dřevina se vyznačuje odlišným areálem svého rozšíření a odlišnou reakcí na klimatické parametry, proto se oblast použitelnosti standardních chronologií značně liší mezi jednotlivými dřevinami.

Pro spolehlivé dendrochronologické datování je potřeba sestavovat hustou síť regionálních standardních chronologií, která může být využita pro identifikaci přesného původu dřeva nalezaného v historických konstrukcích. Standardní chronologie mohou sloužit mimo dendroarcheologické aplikace také například k rekonstrukci klimatu v minulosti, geomorfologických procesů, historie lesních požárů, zemětřesení, imisních kalamit a podobně. Pro datování ostatních dřevin lze v některých případech využít některých stávajících standardních chronologií, např. pro datování jilmu nebo buku lze použít dubovou standardní chronologii. V současné době jsou pro Českou a Slovenskou republiku sestaveny standardní chronologie pro dub, jedli, borovici, smrk a modřín (tab. 2).

Stát	Dřevina	Název	Začátek	Konec	Autor
Česká republika	dub	CZGES 2016	4682 př. n. l.	2014	Mendelu, Kyncl
	buk	není sestavena	–	–	Mendelu, Kyncl
	jedle	jedle-ČR 2005	1056	1996	Kyncl, Mendelu
	smrk	smrk-ČR 2005	1101	2004	Kyncl, Mendelu
	borovice	borovice-ČR 2005	1183	1995	Kyncl, Mendelu
Slovenská republika	dub	dub_Slovensko	967	2013	Mendelu, Kyncl
	modřín	modrin_Slovensko	963	2011	Kyncl
	jedle	ABNCAR16	1077	2015	Kyncl
	smrk	Slovensko-sever	1498	2011	Kyncl
	borovice	Slovensko_Spiš	1620	1854	Kyncl

Tab. 2: Přehled standardních chronologií na území České a Slovenské republiky



Obr. 25: Princip tvorby standardních letokruhových chronologií

Interpretace výsledků dendrochronologického datování

Přesné stanovení letopočtu skácení stromu je možné provést pouze v případě, kdy je na vzorku zachován podkorní letokruh. Pokud není zachován podkorní letokruh, nelze s jistotou odhadnout, kolik letokruhů na datovaném vzorku chybí. U dřevin bez jasně odlišeného jádra a běle (např. jedle, smrk) je zpravidla možné pouze stanovit rok, po kterém byl daný strom skácen. Konstatuje se tedy pouze, že strom byl skácen po roce nejmladšího datovaného letokruhu. Pokud se jedná o dubový vzorek, na kterém byly zachovány letokruhy bělového dřeva, je možné chybějící letokruhy s určitou tolerancí dopočítat. Pro území České republiky platí, že podle stáří stromu a lokality obsahuje dřevo dubu 5–25 letokruhů bělového dřeva.

Je také důležité upozornit na fakt, že rok, kdy došlo ke skácení stromu, nemusí odpovídat roku, ve kterém byl daný strom použit k výrobě datovaného konstrukčního prvku. Při interpretaci je tedy nutné brát v úvahu, že dřevo nemuselo být zabudováno ihned po svém skácení, ale mohlo být nějakou dobu vysoušeno nebo transportováno, proto také může dojít k odchylkám mezi výsledky dendrochronologického datování a údaji z archivních pramenů nebo dochovaných nápisů na stavbách. Dále je nutné počítat s možností, že dřevo bylo druhotně použito, i když se nejedná o příliš častý jev.

Kromě samotného dendrochronologického datování lze z výsledků vyvodit i další zajímavé poznatky týkající se například ročního období lesní těžby. Pokud je podkorní letokruh na datovaném vzorku dobře zachovalý, je možné určit roční období, kdy byl strom pokácen. Pokud je u podkorního letokruhu zachováno pouze jarní dřevo, které se tvoří v první polovině vegetačního období, strom musel být pokácen během jara nebo počátkem léta. Naopak přítomnost letního dřeva u podkorního letokruhu ukazuje, že strom byl pokácen mezi koncem vegetačního období jednoho roku a počátkem vegetačního období roku následujícího.

Použitá literatura

- [1] KAENNEL, M.; SCHWEINGRUBER, F. H. 1995. *Multilingual Glossary of Dendrochronology: Terms and Definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian*. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna: Paul Haupt Publisher, s. 91–92.
- [2] DOUGLASS, A. E. 1937. *Tree rings and chronology*. Bulletin, University of Arizona, 8(4). Physical Science Series 1.
- [3] BAILLIE, M. G. L.; PILCHER, J. R. 1973. A simple Cross-dating Program for Tree-Ring Research. *Tree Ring Bulletin*, 33, 7–14.
- [4] HOLLSTEIN, E. 1980. Mitteleuropäische Eichenchronologie. In: *Trierer Grabungen und Forschungen*. Band XI. Mainz a Rh: Phillip von Zabern.
- [5] ECKSTEIN, D.; BAUCH, J., 1969. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwiss. Centralblatt*, 88, 230–250.

Kontakty

Ing. Tomáš Kolář, Ph.D.: tomas.kolar.und@mendelu.cz

doc. Ing. Michal Rybníček Ph.D.: michal.rybnicek@mendelu.cz

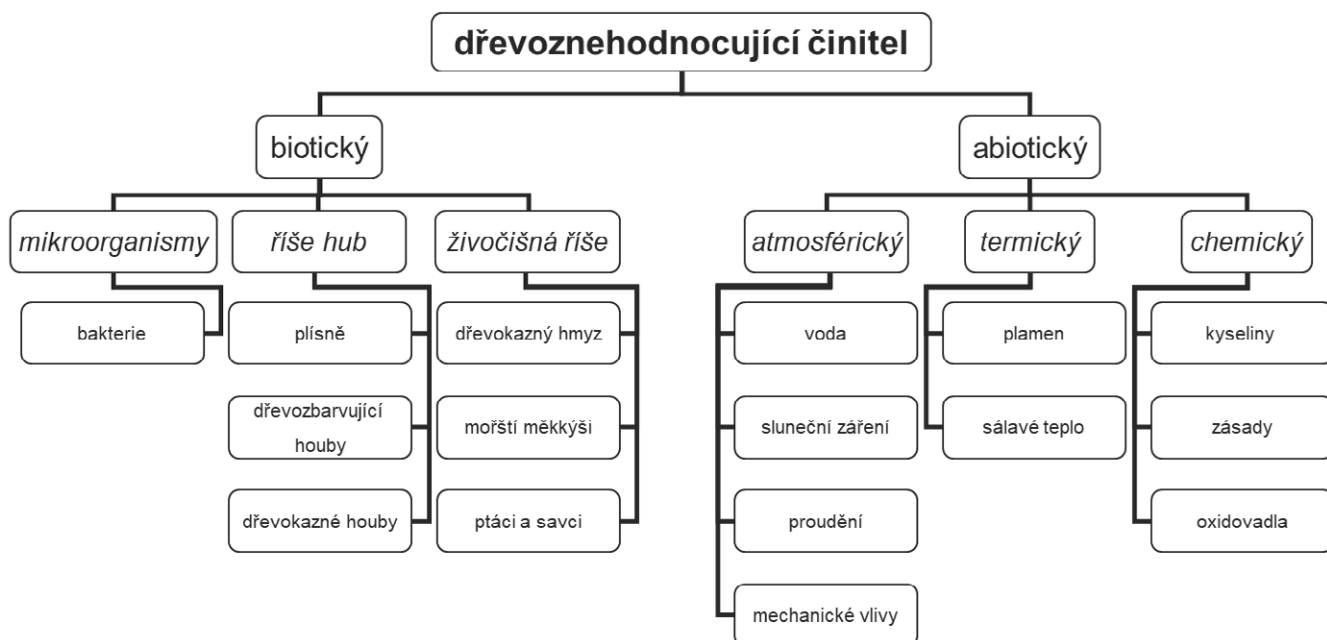
BIOLOGICKÁ DEGRADACE DŘEVA

Ing. Jan Baar, Ph.D.

¹ Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

Způsoby poškození dřeva

Dřevo je materiálem přírodním, s čímž je spojena jeho hlavní nevýhoda z pohledu zpracování dřeva do výrobků s předpokládanou dlouhou životností, a tou je jeho degradovatelnost vlivem různých faktorů (obr. 26). Vlivem působení abiotických a biotických činitelů dochází ke změně struktury dřeva, jejíž následkem se mění i jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Intenzita a charakter změn jsou typické pro jednotlivé degrační procesy.



Obr. 26: Přehled faktorů způsobujících degradaci dřeva

Biotičtí škůdci dřeva

Biotičtí škůdci způsobují nejen významné ztráty dřevní suroviny v lesích a na skladech, ale jsou i častými příčinami poškození hotových výrobků, ať už v exteriérech nebo interiérech. Mohou tedy napadat dřevo už během růstu stromu, v podobě vstupní suroviny (kulatina, řezivo, štěpka atd.), ale poškozují i samotné dřevěné výrobky a konstrukce. Dřevo je pro ně zejména zdrojem živin, ale v některých případech v něm pouze nachází útočiště.

V našich podmínkách jsou primárním zdrojem poškození dřevokazné houby a následně dřevokazný hmyz. V některých oblastech světa se ale může významnost jednotlivých skupin škůdců měnit – např. v tropických a subtropických oblastech hrají primární roli termiti, naopak v mořském prostředí působí největší škody mořští škůdci.

Mechanismus poškození dřeva se různí v závislosti na konkrétním škůdci, ale obecně lze říci, že dřevokazné houby poškozují dřevo na molekulární úrovni chemickou dekompozicí, zatímco dřevokazný hmyz a mořští škůdci způsobují mechanické poškození zpravidla na geometrické úrovni struktury dřeva a až následně může probíhat biochemický rozklad dřeva v jejich trávicím ústrojí.

Houby znehodnocující dřevo

Dřevoznehodnocujícími houbami jsou obecně nazývány houby, které jsou schopny kolonizovat dřevo a měnit jeho původní vlastnosti svou činností v různém rozsahu. Houby se rozmnožují nejen pomocí pohlavních či nepohlavních výtrusů (spór), ale i vegetativně pomocí úlomků samotného mycelia. Spóry hub se přirozeně vyskytují ve vzduchu, ať už v exteriéru či interiéru. Vyklíčení spor a kolonizace dřeva je závislé na okolních podmínkách, mezi něž patří zejména: a) vhodný zdroj živin – substrát, b) vhodná vlhkost substrátu a c) vhodná teplota prostředí.

V případě substrátu se bavíme o dřevě či jiném materiálu, který má obdobné chemické složení jako dřevo, tedy se jedná o lignocelulózové materiály či produkty z nich vyrobené. V některých případech jsou zdrojem živin pouze látky doprovodné (jednoduché cukry, škrob atd.) či organické nečistoty na povrchu dřeva.

Nezbytnou vlhkostí pro klíčení spor a následný rozvoj hub je vlhkost dřeva 30 % a vyšší, nicméně dřevokazné houby jsou schopny degradovat i dřevo o nižší vlhkosti (20 %), pokud se již jedná o rozvinuté stádium napadení.

Optimální rozsah teplot prostředí pro rozvoj většiny dřevokazných hub je 18–35 °C, ale mohou být schopny aktivně fungovat i v širším rozpětí teplot (–2–50 °C).

Kromě těchto tří primárních faktorů vývoj hub dále ovlivňují: pH substrátu, přítomnost vzduchu ve dřevě (5–20 % objemu), koncentrace oxidu uhličitého, sluneční záření či činnost jiných organismů.

Dřevoznehodnocující houby lze rozdělit do tří základních skupin:

- plísň
- dřevozbarvující houby
- dřevokazné houby

Plísň

Plísň jsou mikroskopické vláknité houby, které rostou pouze na povrchu dřeva a nejsou schopny poškozovat jeho buněčnou stěnu. Mají nízké nároky na živiny, jejichž zdrojem jsou pouze snadno stravitelné zásobní látky uložené ve dřevě či organické nečistoty ulpívající na povrchu dřeva. Vyžadují pro svůj rozvoj vysokou relativní vzdušnou vlhkost (vyšší než 85 %) a optimální teplotu od 25 do 37 °C. Jsou schopny však růst i při nižších teplotách okolo 5 °C, je tím však ovlivněná rychlost jejich růstu. Plísň mění pouze estetické vlastnosti dřeva, nemají vliv na jeho mechanické vlastnosti. Vyskytují se v interiérech budov často v důsledku stavební závady, nedostatečného větrání či vytápění. Zpravidla je přítomnost plísni prvním varovným signálem, který upozorňuje na vytvoření vhodných podmínek vedoucích k činnosti dřevokazných hub. Přítomnost plísni má tedy spíše negativní dopad na životní prostředí člověka v interiéru (těkavé organické látky, spory, mykotoxiny) a s tím spojená zdravotní rizika (např. chronické respirační nemoci).



Obr. 27: Plísň rostoucí v bělové zóně dubového dřeva (vlevo) a na exteriérové straně povrchově upraveného okna (vpravo)

Dřevozbarvující houby

Dřevozbarvující houby (houby *Ascomycetes* a *Deuteromycetes*) jsou houby, které jsou na rozdíl od plísní schopny prorůstat dřevem do hloubky, nicméně svým působením rovněž neovlivňují jeho mechanické vlastnosti, mírně může být snížena pouze rázová houževnatost dřeva. Dochází primárně ke změně barvy dřeva (tzv. „zamodráání“), ale může být ovlivněna propustnost např. dřeva smrku v důsledku poškozování uzavřených ztenčenin při průchodu hyf z jedné buňky do druhé. Následně má toto dřevo vyšší nasákavost, ale současně může být lépe impregnovatelné.

I u těchto hub jsou zdrojem živin zásobní látky uložené ve struktuře dřeva (v parenchymatických buňkách). Houby prorůstají do hloubky v radiálním směru bělové části dřeva a následně dochází k jeho zabarvení. V první fázi vznikají typické „paprscité“ skvrny a následně může dojít k úplnému zabarvení běle. S dřevozbarvujícími houbami se zejména setkáme u poškození kulatiny a řeziva (*Ophiostoma* spp., *Fusarium sambucinum*), ale některé druhy (*Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium herbarum*) jsou schopny poškozovat i zpracované dřevo v konstrukcích, pokud se vyskytnou vhodné podmínky pro jejich rozvoj. Dřevozbarvující houby napadají dřevo s vlhkostí vyšší než 50 % (skladované dříví) nebo 30 % (výrobky ze dřeva) při optimálních teplotách od 18 do 29 °C.

Zamodráání lze výrazně omezit zimní těžbou, optimálním uskladněním kulatiny či rychlým zpracováním dřeva. Rovněž lze preventivně použít fungicidní přípravky s krátkodobou účinností.



Obr. 28: Dřevozbarvující houby – „zamodráání“ běle borové kulatiny (vlevo) a jehličnatého řeziva (vpravo)

Dřevokazné houby

Dřevokazné houby mohou způsobovat problémy nejen v exteriéru, ale stejně tak i v interiéru. Jedná se o houby, které jsou schopny svou činností chemicky rozkládat buněčné stěny dřeva, čímž dochází k významné změně jeho mechanických a fyzikálních vlastností.

Ke kolonizaci dřeva dochází nejčastěji pomocí výtrusů, které za vhodných podmínek vyklíčí a vyrůstá z nich houbové vlákno – hyfa. Větvením hyf vzniká vegetativní část houby – podhoubí (mycelium). Substrátové mycelium prorůstá dřevem a způsobuje jeho rozklad. Některé dřevokazné houby vytváří i povrchové mycelium, které je dobře viditelné. Porůstá povrch dřeva a je schopné šířit nákazu i na větší vzdálenosti.

K degradaci dřeva dochází za vhodných podmínek, v případě jejich nepřízně dochází k omezení až zastavení činnosti hub, jejíž přerušení může trvat i několik let. Po obnovení vhodných podmínek dřevokazné houby mohou pokračovat ve svém růstu a tudíž i degradaci dřeva.

Proces degradace dřeva nazýváme tlením. Nejen v dřevařské praxi se často používá termín hniloba, který není správný vzhledem k faktu, že se jedná na rozdíl od tlení o anaerobní proces (bez přístupu kyslíku).

Tlení dřeva způsobené dřevokaznými houbami všeobecně rozdělujeme do tří základních typů:

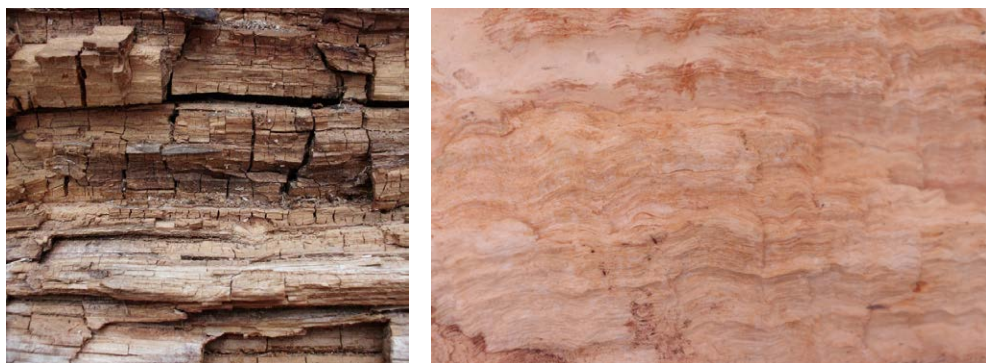
- měkké tlení
- hnědé tlení
- bílé tlení.

Měkké tlení

Houby měkkého tlení (*Ascomycetes* a *Deuteromycetes*) dokáží enzymaticky odbourávat všechny základní složky dřeva, přesto primárně poškozují polysacharidickou složku dřeva. Proto je jejich aktivita soustředěná zejména do S2 vrstvy buněčné stěny, kde vytváří podélně orientované dutiny. Rozklad dřeva je poměrně pomalý a povrchový. Tento typ tlení je typický pro velmi mokré dřevo s nízkým obsahem vzduchu, což odpovídá podmínkám přechodu půdy a vzduchu nebo vody a vzduchu. Zpravidla se na degradaci stejného prvku podílí více druhů hub najednou.

Hnědé tlení

Hnědé tlení je způsobeno houbami *Basidiomycetes*, které jsou schopné rozkládat ve dřevě pouze polysacharidické složky dřeva (celulóza, hemicelulózy). K rozkladu je mimo enzymů typu hydroláz (hemicelulózy a amorfní celulóza) využíváno i agresivního oxidačního systému peroxidu vodíku, železitých iontů a kyseliny šťavelové (krystalická celulóza). Na rozdíl od měkkého tlení probíhá rozklad v objemu dřeva. Degradované dřevo má typický vzhled, získává tmavší červenohnědou barvu a kostkovitě se rozpadá (dřevo praská v příčném i podélném směru). V konečných stádiích se dřevo drolí a rozpadá na prach. Činnost hub hnědého tlení je nejčastěji spjatá s jehličnatým dřevem. Mezi nejznámější houby, které způsobují hnědé tlení, patří: houby z rodu trámovky (*Gloeophyllum* spp.), koniofora sklepní (*Coniophora puteana*) a dřevomorka domácí (*Serpula lacrymans*). Působením dřevokazných hub hnědého tlení dřevo velice rychle ztrácí své mechanické vlastnosti vlivem intenzivní depolymerizace celulózy.



Obr. 29: Charakteristický vzhled dřeva napadeného houbou hnědého tlení (vlevo) a bílého tlení (vpravo)

Gloeophyllum spp. – rod trámovky

Nejběžnějším zástupcem je trámovka plotní – *Gloeophyllum sepiarium* (Wulfen: Fr.) P. Karsten.

Výskyt: typická skladová houba vyskytující se na jehličnatém dřevě – smrk, jedle, borovice. Svou činnost začíná ve vnitřních zónách dřevěných prvků (jádro, vyžralé dřevo), které v pozdějších stádiích rozkladu obsahují vyhnité dutiny. Plodnice často vyrůstají z trhlin na povrchu dřevěného prvku, v tomto stádiu je dřevo už značně poškozené. Nejčastěji se vyskytuje u kulatiny, sloupů, dűlního dříví, mostů či jiných exteriérových konstrukcí (ploty, zábradlí), ale často se nachází i v krovech, do kterých zatéká.

Plodnice: ploché, zpravidla bokem přirostlé v jedné vrstvě i ve více vrstvách nad sebou, vyrůstající z trhlin ve dřevě. Horní strana plstnatá, rezavo-hnědé až tmavě hnědé barvy se světlejším okrajem. Staré plodnice jsou celé tmavé. Na spodní straně má labyrintický hymenofor, lamely jsou u mladých plodnic zlato-žluté barvy.

Mycelium: substrátové mycelium, povrchové mycelium žlutavé barvy se vyskytuje jen ojediněle.

Podmínky růstu: teplotní rozmezí se pohybuje mezi 5 až 45 °C, optimálně 35 °C. Je značně odolná vůči vysokým teplotám. Optimální vlhkost dřeva je okolo 50 %.

Coniophora puteana (Schum.: Fr.) P. Karsten – koniofora sklepní

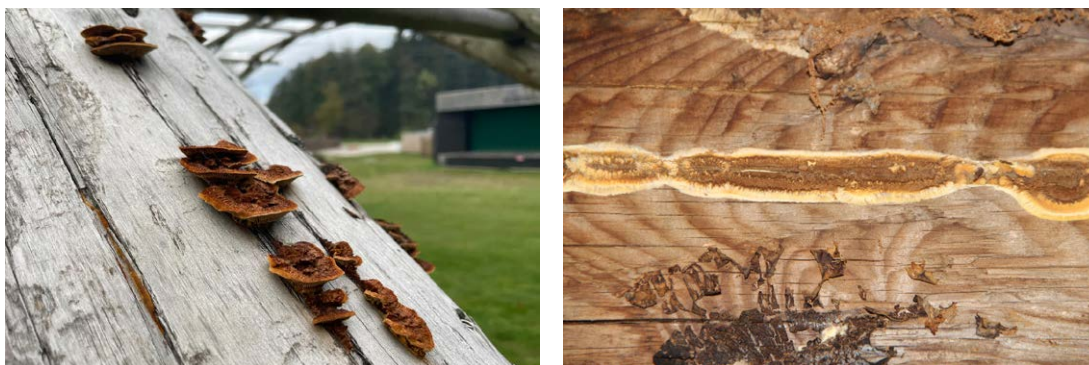
Jedná se o druhou nejčastější houbu způsobující poškození dřevěných konstrukcí v interiérech.

Výskyt: napadá dřevo jehličnaté i listnaté s dostatečně vysokou vlhkostí. V budovách se často vyskytuje u zhlaví stropních trámů, pozednic i jiných prvků dřevěných staveb, typicky tam, kde dochází k zatékání srážkové vody a nebo výrazné kondenzaci. Mimo budovy se vyskytuje často na dűlním dříví, sloupech i mostech.

Plodnice: rozlité tenké povlaky nepravidelného tvaru, přirostlé celou plochou k podkladu, těžko oddělitelné. Hymenofor s bradavičnatými výrůstky má barvu olivově-hnědou. Plodnice má jemné pavučinovité bílé až žlutavé okraje.

Mycelium: vytváří povrchové mycelium, zpočátku bílé, které časem tmavne. Vytváří zhrublá vlákna – rhizomorfy, která jsou kratší a tenčí než u dřevomorky a časem tmavnou do černohnědých odstínů.

Podmínky růstu: teplotní rozmezí je od 3 do 35 °C, optimální teplota je 23 °C. Vyžaduje poměrně vysokou vlhkost dřeva nad 40 %. Dostí odolná proti nízkým teplotám, ale málo odolná vůči nedostatku vlhkosti ve dřevě.



Obr. 30: Plodnice trámovky plotní (vlevo) a koniofory sklepní (vpravo)

Serpula lacrymans (Wulfen: Fr.) Schroeter – dřevomorka domácí

V celosvětovém měřítku je považována za nejdůležitější dřevokaznou houbu v budovách, hlavně v Evropě, Japonsku a Severní Americe. Na exteriérovém dříví se u nás nevyskytuje.

Výskyt: typická dřevokazná houba vyskytující se v zabudovaném dřevě v interiérech. Napadá jehličnaté dřevo, ale i dřevo méně trvanlivých listnáčů. Kromě výrobků ze dřeva (palubky, parkety, obklady, zárubně dveří, nábytek, trámy), poškozují i jiné materiály z polysacharidů (lepenka, knihy, materiály na bázi dřeva atd.). Dokáže v budovách prorůst pomocí speciálních vláknitých provazců – rhizomorfů i přes anorganické materiály (omítka, cihlové a kamenné zdivo, násypy stropů atd.) na větší vzdálenosti.

Plodnice: okrouhlé nebo oválné plodnice, rozlité a přirostlé celou plochou k podkladu. Často srůstají dohromady a dají se poměrně dobře oddělit od povrchu. Z počátku vypadají jako měkké, vatovité polštářky, na kterých se časem vytváří hymenofor s labyrintickými výstupky. Zpočátku je žlutooranžový, rezavohnědý až nakonec tmavohnědý pokrytý jednotlivými kapkami vody. Okraje plodnic jsou žlutobílé.

Mycelium: povrchové mycelium se vyskytuje v podobě světlých vatovitých nadýchaných povlaků anebo dlouhých (až několik metrů) a hrubých (do 6 mm) provazců, které mají šedobílou barvu, jsou tvrdé a lámavé.

Podmínky růstu: preferuje spíše nižší teploty v rozmezí 3 až 26 °C, optimálně při 18–22 °C. Při relativně nízkých teplotách (35 °C a více) dochází k odumírání mycelia. Vlhkostní optimum je v rozmezí 30–60 %, je však schopná rozkládat i sušší dřevo (18 %), které si dokáže aktivně zvlhčovat (přivádění vody pomocí rhizomorfů, intenzivní tvorba metabolické vody rozkladem dřeva, zvýšení relativní vlhkosti vzduchu odpařováním vody ze dřeva).



Obr. 31: Plodnice dřevomorky domácí (vlevo) a povrchové mycelium ze spodní strany podlahových prken (vpravo)

Bílé tlení

Houby bílého tlení (*Ascomycetes*, *Basidiomycetes*) rozkládají ve dřevě pomocí enzymů všechny základní složky (celulózu, hemicelulózy i lignin). Degradace jednotlivých složek probíhá buď souběžně (erozní forma) nebo postupně, kdy dochází k delignifikaci dřeva a následnému rozkladu polysacharidické části (delignifikační forma). Většina hub bílého tlení preferuje listnatá dřeva. Dřevo si až do vysokých stupňů rozkladu zachovává svůj tvar, mění však barvu do světlých odstínů a je měkké, houbovitě. Na rozdíl od hnědého tlení neobsahuje trhliny a drolí se po vláknách. Mezi dřevokazné houby způsobující bílé tlení dřeva patří např. outkovka pestrá nebo klanolístka obecná.

Trametes versicolor (L.) Pilát. – outkovka pestrá

Typická skladová houba na listnatém dřevě, způsobující intenzivní degradaci dřeva erozivní formou.

Výskyt: poškozuje dřevo téměř všech listnáčů, vyjma dřev obsahujících třísloviny, ojediněle napadá i jehličnaté dřevo. Vyskytuje se na skládkách kulatiny, pražcích, plotech, zahradním nábytku a dalších exteriérových konstrukcích.

Plodnice: plodnice jsou jednoleté, ploché, tenké, bokem přirostlé k substrátu, obvykle jsou uspořádané střechovitě nad sebou i vedle sebe. Horní povrch je sametově hebký se soustřednými zónami různého zbarvení. Hymenofor je rourkovitý.

Mycelium: substrátové, povrchové mycelium se tvoří ojediněle a pouze ve stínu.

Podmínky růstu: optimální růstové podmínky jsou při teplotě 26–29 °C, ale je aktivní v teplotním rozpětí od 5 do 38 °C. Napadá pouze mokré dřevo, optimální vlhkost je přibližně 80 %.

Schizophyllum commune Fr. – klanolístka obecná

Výskyt: napadá převážně listnaté dřevo, na jehličnanech je méně častá. Běžně poškozuje skladované dříví, okna, ploty, zahradní nábytek a jiné. Způsobuje bílé tlení nízké intenzity, zato je schopna dřevo degradovat i v náročných klimatických podmínkách.

Plodnice: malé bílošedé vějířkovité plodnice o průměru 10–40 mm se obvykle vyskytují ve velkém počtu. Jsou kožovité a houževnaté, vrchní strana je plstnatá. Na spodní straně jsou šedofialové lupeny.

Mycelium: substrátové, povrchové pouze ojediněle.

Podmínky růstu: optimálního růstu dosahuje při teplotě 30–35 °C. Pro růst je vhodné mokré dřevo s vlhkostí 50 až 70 %, krátkodobě snáší i nízkou vlhkost dřeva.



Obr. 32: Plodnice outkovky pestré (vlevo) a klanolístky obecné (vpravo)

Dřevokazný hmyz

Dřevokazný hmyz napadá a poškozuje živé i odumřelé stromy, kulatinu, řezivo i různé výrobky ze dřeva. Druhy, které napadají zpracované dřevo, se řadí mezi tzv. technické škůdce. Ti působí jak na dřevě v exteriérech, tak i v interiérech. Hmyz využívá dřevo jako zdroj potravy nebo jako úkryt k rozmnožování. V obou případech dochází k mechanickému poškození dřeva, přičemž

oddělené části jsou buď enzymaticky tráveny v zažívacím ústrojí (tesaříci, červotoči a jiní) nebo odstraňovány z napadeného prvku (mravenci, dřevokazi a jiní).

Dřevokazný hmyz zpravidla prodělává přeměnu dokonalou. Rozmnožuje se tedy pomocí vajíček, které jsou kladeny samičkami do kůry nebo dřeva. Z vajíček se následně líhnou larvy, které se ve dřevě vyvíjí a rostou. Larvy se v určitém období života zakuklí a v tomto klidovém stádiu prodělávají přeměnu, na jejímž konci je dospělec hmyzu, který vylétá ze dřeva.

Škody na dřevě způsobují především larvy, které ve dřevě vytváří různě orientované chodby – požerky, které v některých případech ucpávají dřevní drť s exkrementy. Požerky jsou situovány uvnitř dřeva a jsou těžko odhalitelné. Napadení se většinou projeví až v okamžiku výletu dospělců, kdy se na povrchu objeví výletové otvory, které jsou svým tvarem a rozměry typické pro konkrétní druhy. Mimo larvy mohou dřevo poškozovat požerky i samotní dospělci, např. mravenci nebo dřevokazi. U některých druhů dřevokazného hmyzu (dřevokazi, pilořitky) se vyvinula symbióza s dřevokaznými houbami, kdy dochází ke kombinovanému poškození dřeva.

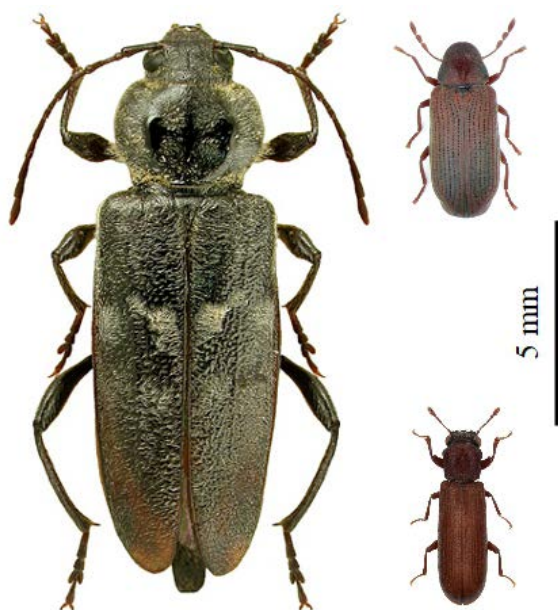
Stejně jako u všech živých organismů, i dřevokazný hmyz potřebuje ke svému rozvoji vhodné životní podmínky. Primárně se jedná o druh a stav dřeva, kdy některé druhy jsou vázány na konkrétní dřeviny (tesařík dubový na dubu), jiné druhy napadají pouze dřevo v kůře (tesařík fialový) nebo preferují dřevo v určitém stádiu tlení (červotoč umrlčí).

Teplota dřeva je velmi významná, jelikož hmyz je studenokrevný živočich, jehož pohybová a fyziologická aktivita je odvislá od okolní teploty. Optimální teplota se zpravidla pohybuje mezi 20 až 30 °C v závislosti na druhu. Spodní teplotní mez závisí na druhu a vývojovém stádiu, ale při nižších teplotách je hmyz schopen hibernovat, aniž by zahynul. Naopak horní mez aktivity je poměrně ustálená a pohybuje se mezi 40 a 50 °C.

U technických škůdců je nutná minimální vlhkost dřeva alespoň 10 %. Optimální vlhkost dřeva je závislá na druhu a může se pohybovat od 15 % (hrbohlavi), přes 20–35 % (tesařík krovový) až po vlhkost vyšší než 60 % (tesařík zavalitý, dřevokaz čárkovaný). Vlhkost dřeva ovlivňuje rychlost vývoje dřevokazného hmyzu.

Při poškození dřeva hmyzem se dřevo v okolí požerků zpravidla strukturálně nemění a zachovává si své vlastnosti. Nicméně v případě dřeva jako celku dochází vlivem přítomnosti požerků k poklesu jeho mechanických vlastností. Míra poklesu je závislá na počtu a prostorové distribuci jednotlivých požerků, případně i zda jsou vyplněny drťí či nikoliv. V praxi se dá těžko předvídat vzhledem k nehomogenosti a neurčitelnosti vnitřního poškození. Napadené dřevo má rovněž omezené použití z hlediska estetického vzhledem k přítomnosti chodbiček a otvorů, které se objevují na opracovaném povrchu.

Dřevokazný hmyz, který působí největší škody na zabudovaném (zpracovaném) dřevě na našem území, patří do řádu *Coleoptera* – brouci. Mezi nejproblematictější druhy působící ve stavbách patří zástupci čeledi tesaříkovití (*Cerambycidae*), červotočovití (*Anobiidae*) a hrbohlavovití (*Lyctidae*).



Obr. 33: Dospělec tesaříka krovového, červotoče proužkovaného a hrbohlava parketového (zleva)

Hylotrupes bajulus (L.) – tesařík krovový

Výskyt: napadá zpracované jehličnaté dřevo (běl a vyztřelé dřevo, nikoliv jádro). Na rozdíl od jiných druhů tesaříků nepotřebuje, aby dřevo bylo stále v kůře. Dokáže poškozovat jak nové konstrukce, tak i starší (50–70 let). Dřevo starší 80 let už údajně cíleně nevyhledává. Nejčastěji působí v krovových konstrukcích, ale napadá i dřevěné stropy, schodiště, srubové stavby, ale i čistě exteriérové konstrukce jako jsou mosty. Do starších konstrukcí bývá často zavlékán v novém dřevě během výměny prvků.

Požerky: larvální chodby jsou oválného tvaru, orientovány převážně v podélném směru v zóně jarního dřeva. Požerky jsou ucpány dřevní drtí a vždy jsou pod tenkou neporušenou povrchovou vrstvou, proto jeho činnost často uniká pozornosti. Dřevo napadá opakovaně v několika generacích. Činnost larev je možné odhalit akusticky, kdy je za ticha slyšet typický chroupavý zvuk. Výletové otvory jsou oválné, o velikosti až 10 × 5 mm, s delší osou zpravidla v podélném směru dřeva.

Dospělec: délka těla se pohybuje od 7 do 25 mm a je zploštělé. Má hnědočerné zbarvení s dvěma lesklými hrbolky na hrudi a párem šedivých skvrn na krovkách. Tykadla má poměrně krátká ve srovnání s jinými tesaříky. Samičky mají na zadečku zřetelné nepravé kladélko.

Podmínky vývoje: larvy se optimálně vyvíjí při teplotě 29 °C (rozmezí asi od 12 do 38 °C) a při vlhkosti dřeva okolo 30 %. Čerstvé dřevo jim vlhkostně nevyhovuje. Doba vývoje se obvykle pohybuje mezi 3 a 7 lety a rojení probíhá od června do srpna.



Obr. 34: Výletový otvor (vlevo) a typické poškození trámů (vpravo) tesaříkem krovovým

Další druhy čeledi tesaříkovití, např. tesařík fialový, tesařík smrkový, tesařík dubový, tesařík skladištní a jiní.

Na rozdíl od tesaříka krovového potřebuje většina ostatních tesaříků k napadení dřeva přítomnost kůry. Samička klade vajíčka do kůry či pod ní.

Zpravidla napadají čerstvé nebo vlhké neodkorněné dřevo, ale někteří jsou schopni vyvíjet se i v suchém dřevě a jejich vývoj může být ukončen až v zabudovaném dřevě (např. tesařík fialový).

Odlišný je i způsob tvorby požerků. Larva během svého růstu vytváří pouze povrchové požerky situované částečně ve dřevě a částečně v kůře. Toto poškození je často viditelné i na oblých plochách zabudovaných trámů po odstranění kůry. Až před fází zakuklení se larva zavrtává hlouběji do dřeva (až několik centimetrů) v radiálním směru a následně chodbu otáčí do podélného směru, kdy vytváří charakteristickou hákovitou chodbu, na jejímž konci je kukelná kolébka. V této fázi může dojít k výraznému poškození dřeva vzhledem k četnosti a hloubce požerků.



Obr. 35: Povrchové požerky tesaříka polokrovového (vlevo) a hákovitá chodba tesaříka dubového (vpravo)

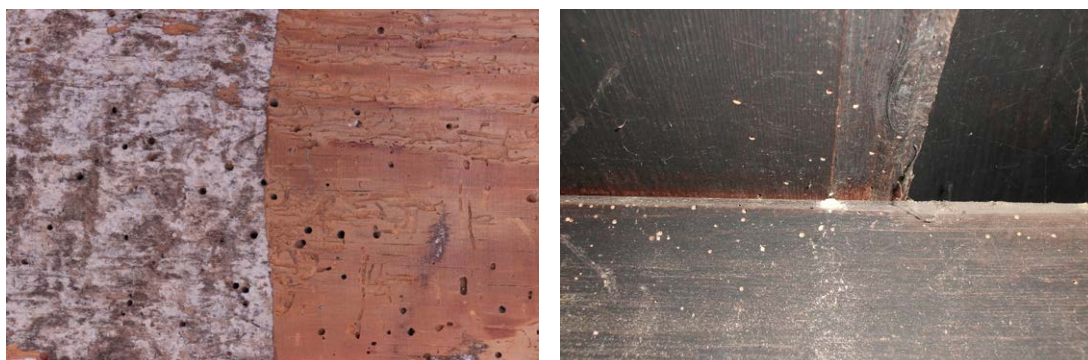
Anobium punctatum (De Geer) – červotoč proužkováný

Výskyt: nejběžněji se vyskytující červotoč u nás, způsobuje značné škody na jehličnatém i listnatém dřevě. Napadá vysušené dřevo, nikoliv čerstvé. Jádrovému dřevu se spíše vyhýbá. Napadá rozličné druhy dřevěných výrobků od nábytku, podlah, obložení, schodišť, oken, dveří, uměleckých předmětů až po drobné součástky strojů a rukojeti náradí.

Požerky: požerky kruhového průřezu (0,5–2 mm) jsou situovány zejména v jarním dřevě (jehličnany) nebo jsou křivolaké (buk a jiné). Jsou vyplněny kyprými drtinkami, které obsahují vejcovité exkrementy. Výletový otvor je kruhový o průměru 1,5 až 2 mm. I tento druh napadá stejné dřevo generaci po generaci.

Dospělec: délka válcovitého těla je mezi 2,5–5 mm, zbarvení do hněda s výrazným liniovým tečkováním krovek. Hlava je schována ze spodní strany hrudi, která tak vytváří pomyslnou „mniškou kápi“. Tykadla jsou krátká, niťovitá.

Podmínky vývoje: optimální teplota vývoje larev odpovídá pokojové teplotě (21–24°C) a optimální vlhkost dřeva je okolo 30 %. Larvy jsou poměrně citlivé na teplotní výkyvy a proto se zpravidla nachází v interiérech, kde jsou stabilní podmínky (např. suterény budov). Doba vývoje je 2 roky a dospělci vylétávají ze dřeva v období duben až červenec.



Obr. 36: Výletové otvory a požerky (vlevo) a typické poškození dřevěného stropu (vpravo) červotočem proužkováným

Lyctus linearis (Goeze) – hrbohlav parketový

Výskyt: druh původně pocházející z tropických a subtropických oblastí, dnes kosmopolitní díky celosvětovému transportu dříví v posledních pár stoletích. Napadá pouze bělové zóny listnáčů obsahujících makropóry, z našich dřev primárně dub a akát, ale často i tropická dřeva. Byl častým škůdcem na skladech velkých nábytkářských a parketových závodů zpracovávajících dubové dřevo. Poškozuje dubové podlahy, nábytek ale i stavebně-truhlářské výrobky, u kterých byla ponechána běl. Hrbohlav není schopen trávit stavební složky dřeva, ale živiny získává pouze ze škrobu uloženého v bělovém dřevě. U konstrukčního dřeva je většina prvku jádrová, takže poškození bělí je spíše jen estetické.

Požerky: kruhové požerky larev jsou orientovány podél vláken dřeva, mají průměr okolo 1 mm a jsou ucpány drtí, která na rozdíl od červotoče neobsahuje exkrementy, je jemná jako hladce mletá mouka. Výletové otvory jsou rovněž kruhové o průměru 0,8–1,5 mm. Doba vývoje je běžně mezi 9 až 12 měsíci, ale za vhodných podmínek může být i kratší, za nevhodných se může naopak prodloužit na 2–3 roky. Při výletu vytlačí dospělec hromádku dřevní moučky, která většinou teprve upozorní na napadení dřeva. Dospělci vylétají v období dubna až září a jsou aktivní za soumraku.

Dospělec: délka těla dospělého se pohybuje mezi 3 až 6 mm, tělo je podlouhle válcovitého tvaru. *L. linearis* má uprostřed štítu typickou prohloubeninu. Barva těla je hnědá až černohnědá a hlava tohoto druhu je pohledem shora dobře viditelná.

Podmínky vývoje: ve vytápěném interiéru o teplotě mezi 17–23 °C a relativní vlhkosti vzduchu mezi 40–60 % může dojít v vylétnutí dvou až tří generací za rok. Dřevo o vlhkostech vyšších než 30 % a nižších než 8 % není napadáno. Optimální vlhkost dřeva je mezi 12 až 15 %. Vzhledem k jeho původu je optimální teplota vývoje vyšší – okolo 26 °C.



Obr. 37: Výletové otvory v bělí dubu (vlevo) a typické poškození dubové podlahy (vpravo) hrbohlavem parketovým

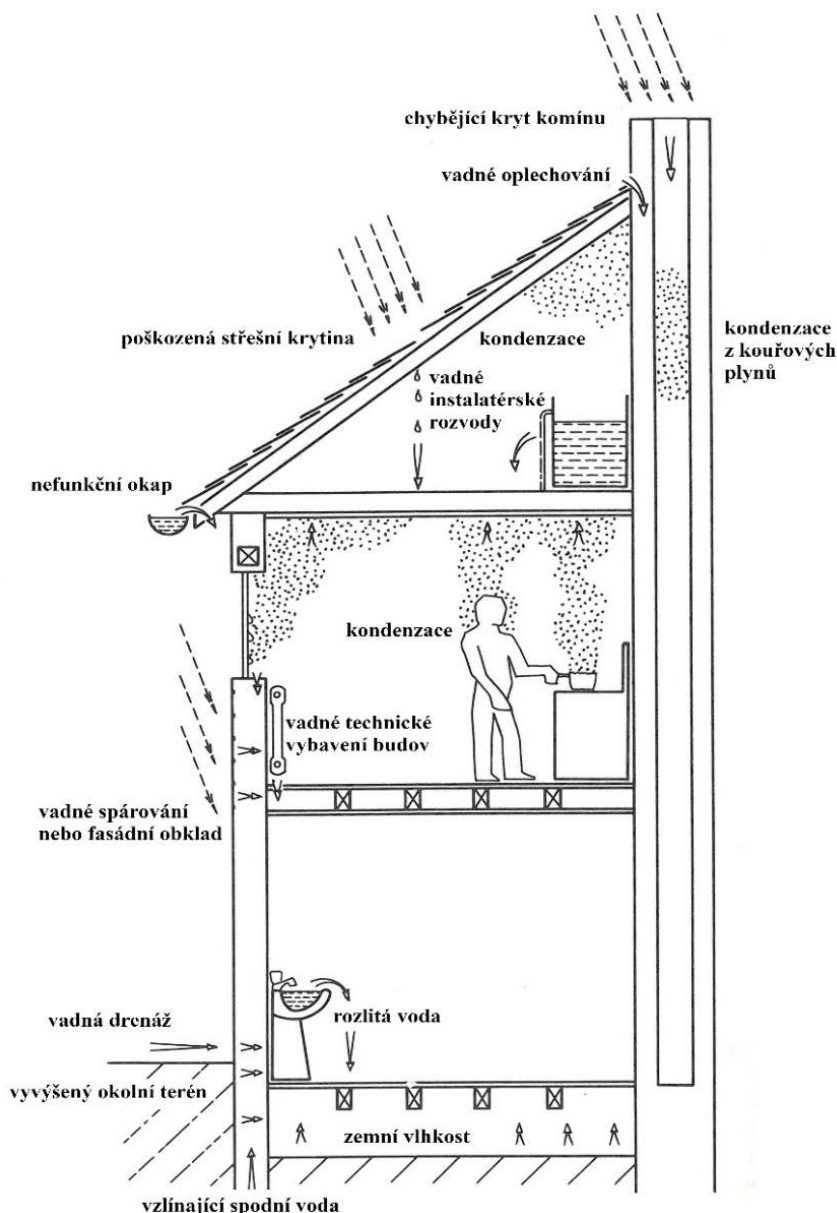
Zásady sanace napadeného dřeva

Dřevokazné houby

Rozvoj dřevokazných hub je vždy spjat s dlouhodobě zvýšenou vlhkostí dřeva (nad 20 %). Je tedy nezbytné nejprve zjistit příčinu vlhnutí dřeva a odstranit ji. V některých podmínkách užití se tomu nedá zabránit (kontakt se zemí), ale u zastřešených a interiérových konstrukcí je ve většině případů na vině nějaká stavební závada, konstrukční chyba či zanedbaná údržba atd. (obr. 38), jejímž odstraněním či napravením by mělo být možné trvale snížit vlhkost dřeva pod 20 % vlhkosti.

Následná sanace se odvíjí od druhu houby, která dřevo degraduje. V praxi se zpravidla rozlišuje, zda se jedná o dřevomorku domácí či jakoukoliv jinou houbu. V případě ostatních druhů dřevokazných hub je sanace jednodušší, po odstranění zdroje vlhkosti se odstraní viditelně poškozená část dřeva s přesahem 0,5–1 m na všechny strany. Ponechané prvky v okolí se po vyschnutí preventivně ošetří fungicidním přípravkem, stejně tak i nové dřevo, které má původní část nahradit. Poškozené dřevo by nemělo v konstrukci zůstat, neboť může dojít v případě opětovného zvýšení vlhkosti k rychlému obnovení růstu houby. Z pohledu přenosu mechanického zatížení je degradovaný prvek zpravidla rovněž nepoužitelný, ale v některých případech je jednodušší poškozený prvek ponechat.

U dřevomorky domácí je sanace komplikovanější kvůli její schopnosti prorůstat pomocí rhizomorf i jinými materiály (zdivo, omítky, násypy) na větší vzdálenosti. V tomto případě je doporučeno přenechat sanaci odborné firmě. Pokud jsou v sanovaném prostoru ponechány dřevěné prvky a sanace je provedena neodborně nebo je zanedbaná, dochází často k recidivě dřevomorky i po odstranění napadených materiálů. Kromě poškozeného dřeva je nezbytné odstranit i všechny anorganické materiály, které byly v kontaktu s napadeným dřevem nebo byly porostlé myceliem dřevomorky. Veškerý materiál je potřeba bezpečně transportovat a likvidovat, aby nedocházelo ke zbytečnému šíření houby do dalších prostor. Při kontaktu dřevomorky se zdivem se provádí osekání omítky do vzdálenosti 0,5 m od viditelného prorůstání povrchového mycelia. Odstraňuje se i narušená malta ze spár mezi cihlami či kameny. Povrch zdiva či jiných ploch se následně sterilizuje pomocí opalování plamenem nebo chemickou metodou. Nejen u silného, neizolovaného zdiva může být provedena intenzivní ochrana injektáží fungicidním prostředkem, který se do větší hloubky zdiva dostává přes předvrtané otvory. Následně se zdivo přespárkuje a omítně, omítky jsou preventivně ošetřeny pomocí fungicidních látek.



Obr. 38: Nejčastější příčiny vzniku zvýšené vlhkosti dřeva (upraveno podle Singh 1994¹)

Dřevokazný hmyz

Dřevokazný hmyz je do konstrukcí často zavlékán s napadeným dřevem. U dřeva poškozeného dřevokazným hmyzem je nejprve potřeba zjistit, zda se jedná o aktivní napadení. Často se stává, zejména u historických krovů, že byly trámy v minulosti poškozeny tesaříkem krovovým, ale ten již ve dřevě není přítomen, zůstaly pouze stopy po jeho dřívější činnosti. Určení druhu či alespoň rodu škůdce, který dřevo napadl, se dá určit ideálně na základě vzhledu dospělce, který má ale omezené období výskytu. Při aktivním napadení bývají ve dřevě přítomny larvy, které lze ze dřeva odstraňováním poškozeného dřeva vyhledat. Nicméně často stačí pouze určit druh dřeva a charakter poškození a vzhled výletových otvorů, které jsou pro jednotlivé druhy typické.

Aktivní napadení se dá stanovit různými způsoby:

- přítomnost živých larev – vyhledání v poškozeném dřevě, akustické projevy činnosti;
- výskyt dospělců – omezená doba daná dobou výletu a jejich životností;
- vznik nových výletových otvorů – nutnost označení, zalepení či zatmelení původních otvorů;
- vypadávání drtinek – po očištění všech ploch a úklidu prostor jsou zřetelné nové hromádky drtinek;

¹ Singh J., 1994. Building Mycology: Management of Decay and Health in Buildings, Taylor & Francis, London, 356 s. ISBN: 0419190201

U prvků, které jsou výrazně poškozeny a nejsou již schopny plnit svou funkci, je nutná výměna, u méně poškozených prvků je vhodná sanační obnova pomocí např. příložkování, protézování, plátování či plombování. V případě aktivního napadení dřevěných výrobků a konstrukcí ve větším rozsahu je nezbytná jejich sterilizace před samotnou sanací jednotlivých prvků. Tu lze provést vícery fyzikálními a chemickými metodami:

- použití insekticidní látky s likvidačním účinkem – aplikace in situ pomocí např. injektaže;
- zvýšená teplota – nejčastěji sálavý („termosanace“) či mikrovlnný ohřev;
- ozařování dřeva – zpravidla gama zářením, pouze pro mobilní předměty;
- působením toxických plynů – tzv. fumigace;
- působení netoxických plynů či vakuua – pouze pro mobilní předměty.

Vyjma první varianty platí, že sterilizační metody jsou pouze krátkodobé způsoby ochrany dřeva a přestávají účinkovat po odstranění sterilizačních vlivů. Ve většině případů je následně doporučená preventivní chemická ochrana, která zajistí dlouhodobou ochranu proti znovu napadení konstrukce.

Přirozená trvanlivost

Přirozená trvanlivost dřeva je popisována jako schopnost dřeva odolávat napadení a degradaci dřevokaznými organismy v podmínkách, které jsou vhodné pro jejich rozvoj. Přirozená trvanlivost dřeva je definována v normě ČSN EN 350, kde jsou rovněž uvedeny jednotné metody jejího určování, způsoby její klasifikace a mimo to i třídy impregnovatelnosti vybraných dřev.

Přirozená trvanlivost dřeva je v praxi ovlivněna mnoha faktory, z nichž nejdůležitější jsou struktura dřeva a expoziční zatížení dřeva. Z pohledu struktury dřeva je nejdůležitější jeho chemické složení a přítomnost toxických extraktivních látek, které vznikají během tvorby jádra. Jedná se o látky na bázi fenolů (trísloviny, flavonoidy, stilbeny a jiné) nebo terpenů. Bělové dřevo je obecně považováno za netrvanlivé, ovšem ani každé jádrové dřevo nemusí být přirozeně trvanlivé. Zde záleží na chemické povaze vytvářených jádrových látek, které ne vždy musí být toxické (např. jádro jasanu). Anatomická struktura může hrát roli např. při pronikání vody, kdy dřeva málo propustná (zathylované jádro dubu) mohou mít sníženou nasákavost spojenou třeba i s omezeným vyluhováním extraktivních látek. Hustota samotná nemá na přirozenou trvanlivost zásadní vliv.

Přirozená trvanlivost vůči dřevokazným houbám je klasifikována do pěti tříd: 1 – dřeva velmi trvanlivá, 2 – trvanlivá, 3 – středně trvanlivá, 4 – málo trvanlivá, 5 – netrvanlivá. Určujícím parametrem je zpravidla hmotnostní úbytek zkušebních vzorků vystavených působení dřevokazných hub za určitou dobu.

Dřevina	Hustota při w 12 % (kg/m ³)	Třída trvanlivosti dle ČSN EN 350*	Pravděpodobná trvanlivost v třídě použití 4 (rok)
modřín opadavý	600	3–4 (3–4)	10–15
borovice lesní	520	3–4 (2–5)	6–15
smrk ztepilý	460	4 (4–5)	6–10
akát bílý	740	1–2 (1–2)	15–25
dub	710	2–4 (1–2)	15–25
ořešák královský	670	3	10–15
buk lesní	710	5 (4–5)	2–6
habr obecný	800	5	2–6
bříza bělokorá	660	5	2–6
jasan ztepilý	700	5	2–6
topol česný	440	5 (5)	2–6

Tab. 3: Hustota dřeva, třída přirozené trvanlivosti (dřevokazné houby) a pravděpodobná trvanlivost v kontaktu se zemí vybraných druhů tuzemských dřev. *třída trvanlivosti určená pro kontakt se zemí, v závorce: určená z laboratorního testu při použití hub *Basidiomycetes*

Expoziční zatížení je dáno okolními podmínkami, kterým je dřevo vystaveno, jako je např. exteriér vs. interiér, v kontaktu se zemí vs. bez kontaktu se zemí. Základním rozdílem je zde výše vlhkosti dřeva a doba, po kterou se dřevo s touto vlhkostí vyskytuje. Existuje pět tříd použití, u kterých je dřevo vystaveno možnosti napadení různými typy škůdců.

Třída použití	Definice	Škůdci
1	w = 10–20 %, neklimatizované suché interiéry (půdní prostory, krovky)	I
2	w někdy vyšší než 20 %, neklimatizované interiéry s relativní vlhkostí vzduchu i více než 80 % (sklepy, prádelny)	I, P, B, FB
3	w často vyšší než 20 %, vliv povětrnosti, exteriér bez kontaktu se zemí	I, P, B, FB
4	w stále vyšší než 20 %, exteriér s kontaktem se zemí nebo vodou	I, P, B, FB, FA
5	w stále vyšší než 20 %, kontakt s mořskou vodou	mořští škůdci, FB, FA

Tab. 4: Třídy použití a škůdci nepadající dřevo v daných podmínkách

I – dřevokazný hmyz, P – plísň, B – dřevozbarvující houby, F_B – dřevokazné houby Basidiomycetes (bílé a hnědé tlení), F_A – dřevokazné houby Ascomycetes (měkké tlení)

Výše dva zmíněné faktory (třída použití a přirozená odolnost dřeva) jsou rozhodující pro posouzení a stanovení rizika napadení dřevěné konstrukce zabudované v konkrétním prostředí a pro kvalifikovaný odhad její životnosti. Porovnání těchto faktorů pro konkrétní podmínky umožňuje kvalifikovaně posoudit potřebnost další ochrany konkrétní dřevěné konstrukce a její způsob (konstrukční, modifikační, chemická aj.)

Třída použití (EN 335)	Třída trvanlivosti (EN 350)				
	1	2	3	4	5
1	I	I	I	I	I
2	I	I	I	(I)	(I)
3	I	I	I	(I)–(X)	(I)–(X)
4	I	(I)	(X)	X	X
5	I	(X)	(X)	X	X

Tab. 5: Porovnání přirozené trvanlivosti dřeva a třídy použití, které určuje potřebu dodatečné ochrany dřevěné konstrukce I – dostačující, (I) – obvykle dostatečná, v určitých podmínkách chemická ochrana vhodná, (X) – chemická ochrana doporučena, v určitých podmínkách je dostatečná, X – chemická ochrana nezbytná

Kontakty

Ing. Jan Baar, Ph.D.: jan.baar@mendelu.cz

AKTUÁLNY VÝSKUM V OBLASTI HYGROTERMÁLNEHO REŽIMU KONŠTRUKCIÍ DREVOSTAVIEB

Ing. Richard Slávik, Ph.D.

¹ Ústav nauky o drevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

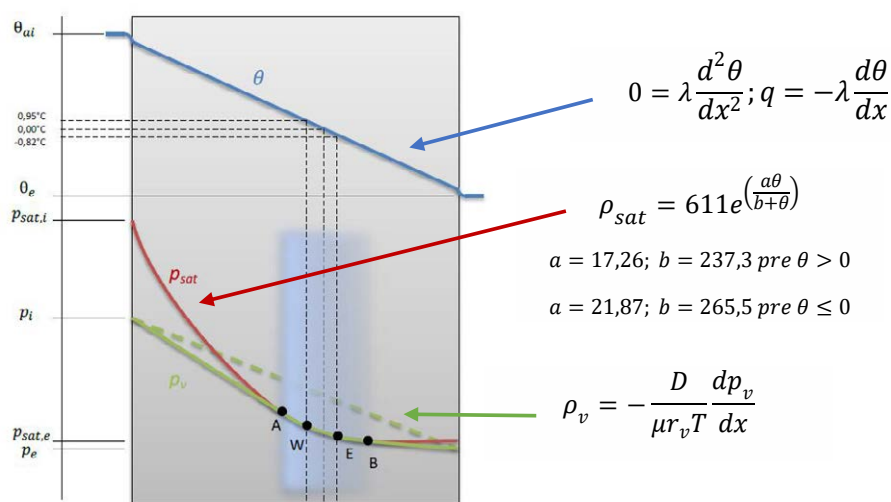
Pre správnu funkciu a primeranú životnosť vyžadujú stavebné konštrukcie s drevenými prvkami osobitý prístup. Výpočtom je potrebné overiť, že nevzniknú také podmienky, za ktorých môže tento materiál stratiť svoje vlastnosti alebo degradovať, či byť napadnutý škodcami alebo hubami. Práve preto má v tomto smere stavebná fyzika a špeciálne oblasť zvaná tepelná technika celkom zásadný význam. Tento odbor má dlhú tradíciu a jeho vývoj dlho sledoval aktuálne trendy a riešil vzniknuté problémy v stavebníctve. Drevo ale v tej dobe nebolo až tak rozšírené ako je tomu dnes, preto aj posudzovanie drevených konštrukcií u nás nie je ešte stále dostatočne etablované. Používané technické normy spomínajú konštrukcie s drevom iba okrajovo a uvádzajú iba niekoľko obmedzení či doporučení. Tento stav rozhodne nezodpovedá vedomostiam a možnostiam, ktoré dnes v rámci stavebnej fyziky máme, a tak si táto téma zaslúži v našej spoločnosti pozornosť a ďalší rozvoj. V Českej a Slovenskej republike používame v inžinierskej praxi pre hodnotenie stavebných konštrukcií stále iba jednoduché nástroje, ktoré sú založené na celom rade zjednodušených predpokladov. Nemôžu tak vystihnúť vierohodne skutočný stav, ale sú pre tieto typy hodnotení aj tak uznávané. Existujú aj pokročilejšie metódy, ktoré sú odbornej verejnosti menej známe. Tieto síce dokážu ďaleko lepšie vystihnúť reálny stav ale na druhej strane ich aplikácia vyžaduje ďaleko väčšiu odbornosť a skúsenosti v oblasti modelovania. Zároveň pokročilejšie modely vyžadujú aj pokročilejšie vstupy, a nie vždy sú k dispozícii relevantné materiálové parametre a okrajové podmienky. V ďalšom texte je priblížená podstata a rozdielnosť jednotlivých modelov, spolu s ich limitmi. Následne sú prezentované činnosti, ktoré na Mendelovej univerzite v Brne realizujeme s cieľom obohatenia vedného odboru stavebnej fyziky o nové výpočtové metodiky, postupným doplnením softwarových nástrojov, materiálových vlastností a okrajových podmienok.

Z hľadiska zachovania správnej funkcie konštrukcie s drevenými prvkami, je kľúčové overenie tepelne-vlhkostného režimu. Modely pre predikciu vlhkostného režimu stavebných konštrukcií môžeme rozdeliť na tri základné skupiny, a to:

- modely pre overenie rizika kondenzácie
- modely pre ročnú bilanciю množstva kondenzátu
- numerické modelovanie.

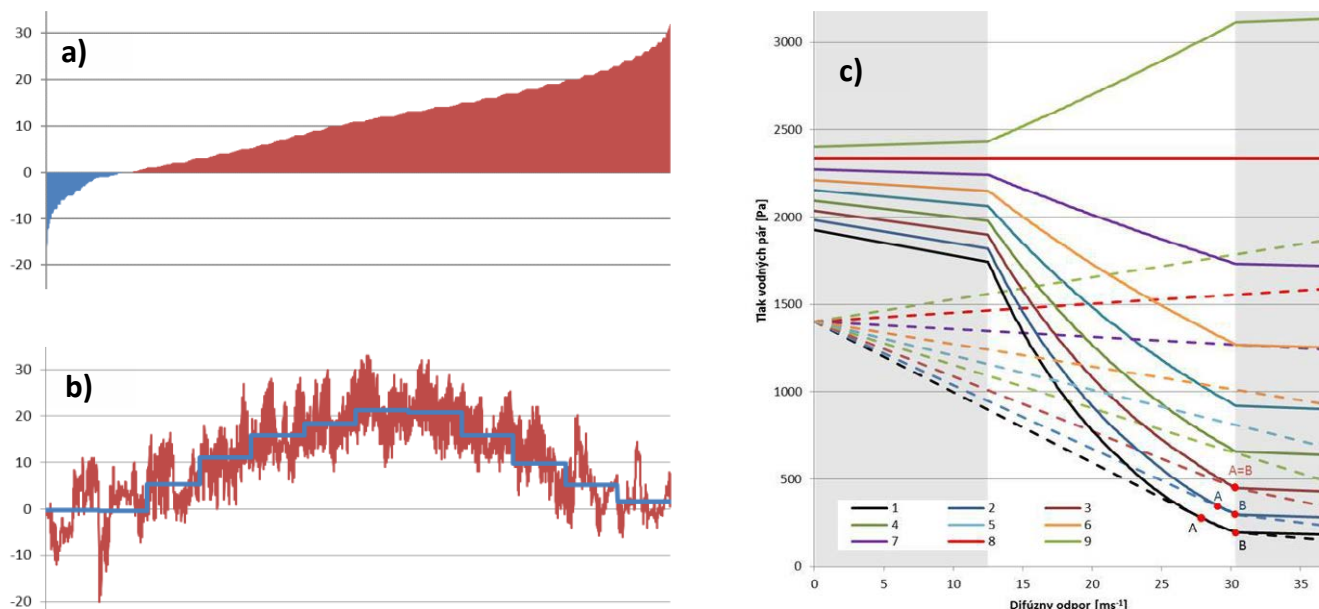
Modely pre overenie rizika kondenzácie vychádzajú z úvahy, ustáleného teplotného a vlhkostného stavu konštrukcie. Predpokladá sa, že rozdiel teploty medzi interiérom a exteriérom vytvorí v konštrukcii teplotný profil, zodpovedajúci pomerom tepelných odporov jednotlivých vrstiev. Podobne, rozdiel parciálneho tlaku medzi interiérom a exteriérom v konštrukcii sa rozdelí v pomere difúzných odporov jednotlivých vrstiev konštrukcie. Takto rozdelený priebeh parciálneho tlaku sa porovná s maximálnym parciálnym tlakom vodných pár, ktorý je funkciou teploty. Postup overovania je znázornený na obr. 39. Z teplotného profilu θ sa určí profil nasýteného tlaku vodných pár ρ_{sat} a na základe gradientu ρ_i a ρ_e a difúzných odporoch sa určí tlak ρ_v . Pokiaľ sa v konštrukcii nachádza miesto, kde tlak ρ_v prevyšuje funkciu ρ_{sat} , predpokladá sa vznik kvapalného kondenzátu a z krajných

bodov ρ_i a ρ_e sa hľadajú dotyčnice k funkcii ρ_{sat} . Nový priebeh tlak ρ_v v konštrukcii musí následne tvoriť spodnú obalovú krivku kde teoretický tlak ρ_v nikde neprevyšuje hodnotu nasýteného tlaku ρ_{sat} . Pokiaľ parciálny tlak vodnej pary ρ_v pri návrhových podmienkach nikde nedosahuje hodnoty nasýteného tlaku vodnej pary ρ_{sat} , kondenzáciu v konštrukcii je možné vylúčiť a tým považujeme riešenie za dostatočne bezpečné pre dané návrhové podmienky. Tento prístup overovania rizika kondenzácie je u nás známy ako Glaserova metóda, ktorá bola publikovaná približne okolo roku 1959 [1]. Uvedený postup sa inžiniersky premietol do metodiky návrhu, ktorá sa snaží aby tepelný odpor vrstiev z interiéru do exteriéru narastal, čím sa dosiahne vyššia teplota v konštrukcii a tým aj pomalší pokles nasýteného tlaku ρ_{sat} . Zároveň sa odporúča aby difúzny odpor vrstiev z interiéru, smerom do exteriéru klesal, čím sa zas dosiahne zvýšeného poklesu parciálneho tlaku ρ_v už na strane interiéru. Takýmto návrhom spravidla vytvoríme predpoklad, že ku kondenzácii vodnej pary vôbec nedôjde. U konštrukcií, kde by skondenzovaná vodná para mohla ohroziť jej požadovanú funkciu, musí byť kondenzácii zabránené. Pojmom ohrozenie požadovanej funkcie, autori aktuálne platnej normy predpokladajú podstatné skrátenie životnosti, zníženie povrchovej teploty, objemové zmeny, zvýšenie hmotnosti konštrukcie nad rámec statickej rezervy, a zvýšenie hmotnostnej vlhkosti materiálu nad úroveň spôsobujúcu degradáciu.



Obr. 39: Ilustrácia Glaserovej metódy a určenia kondenzačnej zóny

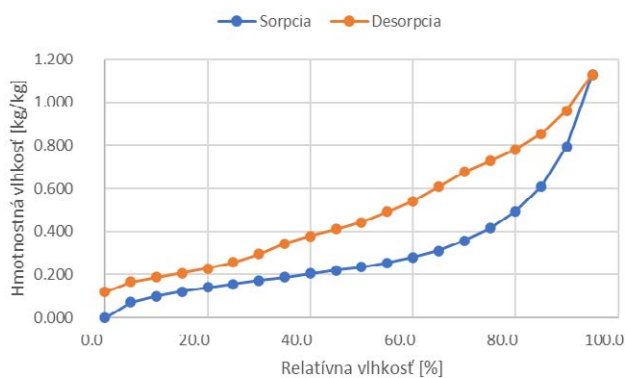
Mnoho konštrukcií ale nedokáže takýto predpoklad dosiahnuť, jedná sa najmä jednoplášťové strešné konštrukcie alebo konštrukcie obklopujúce vnútorný priestor so zvýšenou vlhkosťou. K tomuto účelu sa postupne vytvoril **model pre predikciu ročnej bilancie** kondenzátu, ktoré pokiaľ tomu nebránia použité materiály, tak určité množstvo skondenzovanej vodnej pary v konštrukcii za rok umožňujú pripustiť. Tieto modely uvažujú niekoľko po sebe ustálených teplotných a vlhkosťných stavov konštrukcie, ktoré sú základom tejto bilancie. Česká norma ČSN73 0540 [2] a jej slovenský ekvivalent STN 73 0540 [3] využíva k tomuto početnosť niekoľkých referenčných teplôt v roku. Európsky model založený na EN ISO 13788 [4] využíva pre referenčné teploty mesačné priemerné teploty. V metodike sa postupuje následne tak, že sa tieto referenčné teploty zoradia za sebou od najnižšej teploty, a pre každú referenčnú teplotu sa vyhodnocuje sa vznik kondenzátu v konštrukciu a jeho množstvo. Pokiaľ pri nejakej referenčnej teplote ku kondenzácii dochádza, násobí sa rozdiel hustoty difúzneho toku z a do kondenzačnej zóny časovými trvaním danej referenčnej teploty, čím sa získa predpokladané množstvo vzniknutého kondenzátu. Pri referenčných teplotách kde ku kondenzácii nedochádza sa uvažuje, že dochádza k odparovaniu a vysychaniu kondenzačnej zóny. Rozdiel hustoty difúzných tokov sa v tomto prípade násobí dĺžkou trvania referenčnej teploty a od celkového množstva kondenzátu v zóne sa toto množstvo odpočítava. Uvedený postup a rozdielnosť metodík je uvedená na obrázku 39. Národná metodika obsahuje nižšie referenčné teploty ako je tomu u medzinárodnej normy, ktorá využíva mesačné priemery. Spravidla pokiaľ nedochádza ku kondenzácii podľa národnej metodiky, nemalo by ku nej dochádzať ani u medzinárodnej metodiky. Pokiaľ ale ku kondenzácii dochádza v oboch režimoch, môže sa stať, že dokonca európska metodika bude dávať menej priaznivý výsledok. Výpočet sa tak odporúča realizovať oboma metódami a prevziať menej priaznivý výsledok.



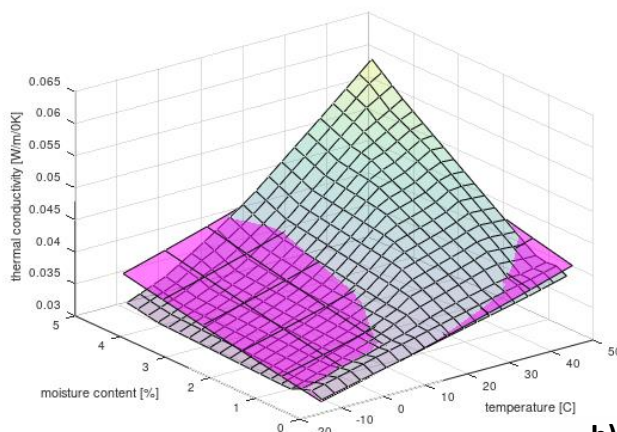
Obr. 40: a) početnosť teploty v rámci roku zoradená od najnižšej po najvyššiu, ktorú využívajú národné metodiky ČSN a STN, b) medzinárodná metodika založená na priemerných mesačných teplotách c) priebeh parciálnych tlakov vodnej pary a nasýtených tlakov vodnej pary pre jednotlivé referenčné teploty

Národná norma požaduje, aby sa v prípade, kde množstvo kondenzátu v konštrukcii neohrozi jeho funkciu z roku na rok nezvyšovalo, čo znamená že množstvo kondenzátu, ktoré sa môže z konštrukcie odpariť musí byť väčšie, ako to ktoré môže v konštrukcii skondenzovať. Zároveň bývajú tieto množstvá limitované maximálnou hodnotou $0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ za rok pre obvodové konštrukcie ako sú jednoplášťové strechy, konštrukcie so zabudovanými drevenými prvkami, konštrukcie s vonkajším zateplovacím systémom, prípadne konštrukcie s difúzne málo priepustnými vonkajšími vrstvami. Mimo tejto hodnoty býva množstvo obmedzované ešte percentami z plošnej hmotnosti, kde pre tento typ konštrukcií sa pripúšťa maximálne 3% z plošnej hmotnosti materiálu v ktorom ku kondenzácii dochádza pokiaľ je jeho objemová hmotnosť vyššia ako $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pre menšie objemové hmotnosti sa uvažuje až 6%. U ostatných typov konštrukcií sa pripúšťa hodnota až $0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ pri obmedzení 5% z plošnej hmotnosti materiálov s objemovou hmotnosťou nad $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a 10% u materiálov s plošnou hmotnosťou menšou. Pre drevené prvky sa vyžaduje, aby pri zabudovaní do konštrukcie nemali hmotnostnú vlhkosť vyššiu ako 16% a zároveň boli náležite ošetrené. Tieto požiadavky sa týkajú iba národnej normy, európska norma požiadavky neuvádza.

Z uvedeného textu vyššie plynie, že obe metodiky sú relatívne jednoduché, a snažia sa o zabránenie kondenzácii vodnej pary v konštrukcii, prípadne jej obmedzenia a zároveň udržania drevených prvkov mimo rizikovú oblasť relatívnej alebo hmotnostnej vlhkosti. Realita šírenia vlhkosti v konštrukcii je však o dosť zložitejšia, a uvedené modely majú niekoľko slabých miest, ktoré môžu výsledky značne skresľovať. Jedným z celkom zásadných je skutočnosť, že konštrukcie podliehajú celkom dynamickým zmenám teploty najmä na vonkajšom povrchu, preto očakávať ustálený teplotný stav v konštrukcii po dobu celého mesiaca nie je úplne správny predpoklad. Zároveň sú vonkajšie povrchy konštrukcie vystavené slnečnému a dlhovlnnému žiareniu, ktoré môže výrazne ovplyvniť priebeh teploty popri atmosférických zrážkach, ktoré zas môžu byť nezanedbateľným zdrojom vlhkosti. Ustálený vlhkosťový stav obvodovej konštrukcie je ešte menej pravdepodobný, lebo veľa materiálov je hygroskopických a kapilárne aktívnych, takže ustálený vlhkosťový stav sa nedosahuje tak rýchlo a dochádza v nich pri kapilárnej kondenzácii k redistribúcii. Hygroskopickosť materiálu, teda schopnosť prijímať vodu, býva najčastejšie vyjadrená závislosťou rovnovážnej vlhkosti od relatívnej vlhkosti, ktorá sa nazýva sorpčná izoterma. Mnohé materiály majú dokonca určitú hysterézu, čo znamená že pri vlhnutí býva závislosť medzi hmotnostnou vlhkosťou a relatívnou vlhkosťou odlišná ako je to pri vysychaní. Preto ich do zjednodušených ustálených modelov nie je možné implementovať. Nemožno opomenúť, že súčiniteľ tepelnej vodivosti je závislý na teplote a vlhkosti materiálu. Tieto súvislosti sú uvedené na obr. 41. Vlhkosť tak ovplyvňuje rozloženie teploty v konštrukcii, spolu s teplom uvoľňovaným alebo pohlcovaným fázovými zmenami.



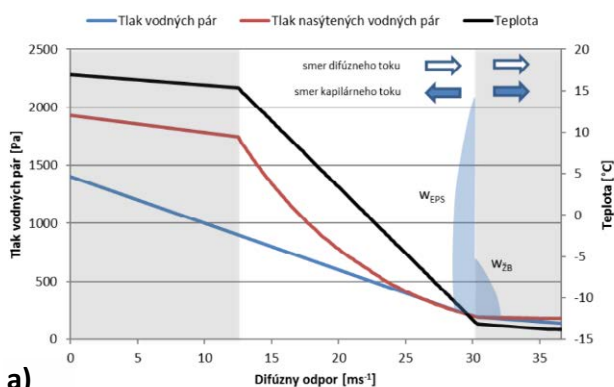
a)



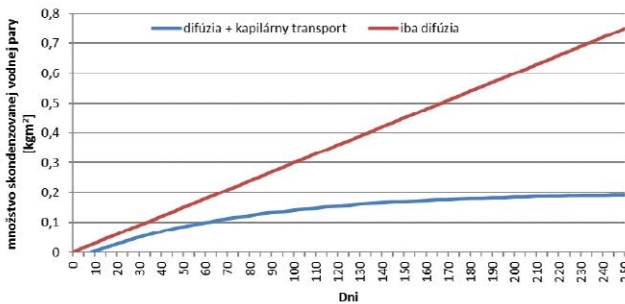
b)

Obr. 41: a) Sorpcia hygroskopického materiálu b) závislosť tepelnej vodivosti na vlhkosti a teplote

Druhým aspektom je šírenie kvapalnej vody v materiáloch. Pokiaľ dôjde ku kondenzácii vodnej pary v konštrukcii, v závislosti od teploty a charakteru materiálu v ktorom sa takto deje, sa tento kondenzát môže prejavovať vo forme ľadu alebo kvapalnej vody. Pokiaľ dôjde ku kondenzácii v kvapalnej forme, mnohé materiály dokážu túto vodu transportovať sieťou kapilár, a hovoríme tak o kapilárnej vodivosti. Snaha zahrnúť tento fenomén do zjednodušených modelov je možné vidieť v odbornej publikácii [5] aj niektorých softwarových riešeniach. Tento model predpokladá, že kvapalný kondenzát bude z kondenzačnej zóny odvádzaný a nebude tak narastať do nekonečna, tak ako to predpokladá zjednodušená metóda.



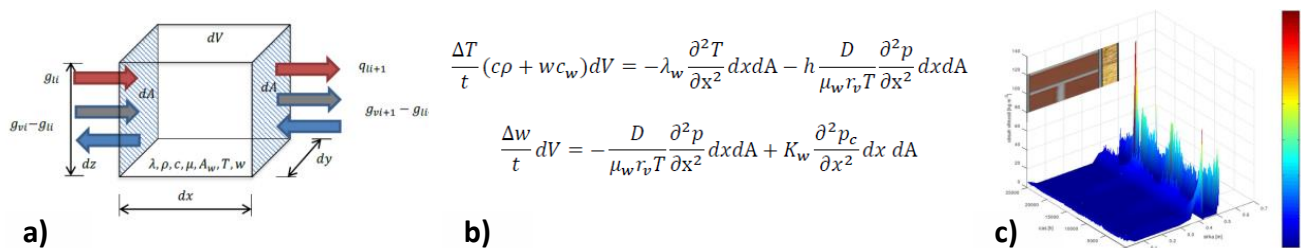
a)



b)

Obr. 42: a) ukážka aktivovanej oblasti vplyvom kapilárneho transportu b) rozdiel nárastu skondenзованej vlhkosti v konštrukcii u zjednodušenej Glaserovej metódy a Glaserovej metódy s integrovaným kapilárnym transportom

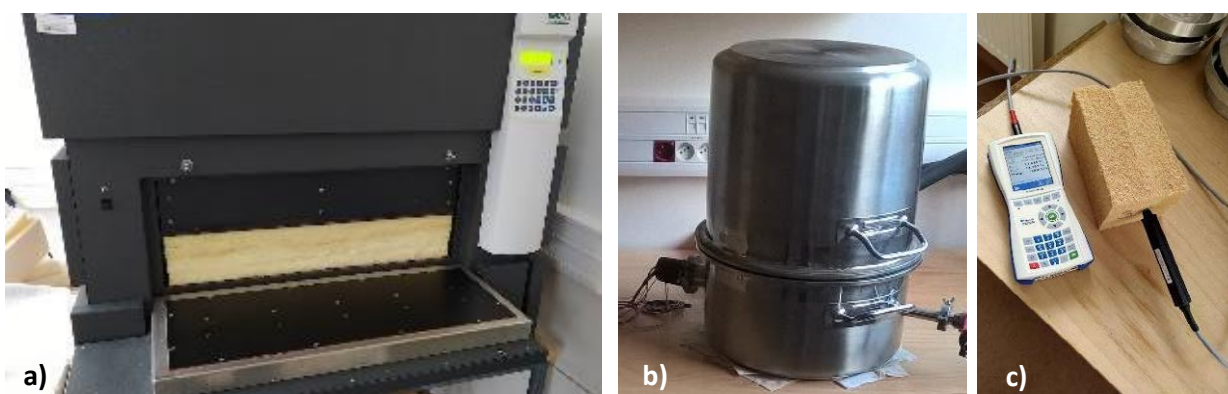
Tieto disproporcie viedli k vývoju ďalších pokročilejších modelov, ktoré sa vďaka rozvoju nových numerických metód a dostupnosti počítačovej techniky v posledných dekádach stali pre nás dostupné. Tieto nám umožnia lepšie a komplexnejšie modelovať tepelnú a vlhkosťnú záťaž konštrukcii, a predikovať rozloženie teploty a vlhkosti v konštrukcii ako aj riziká zabudovaných materiálov. **Numerické modelovanie** predstavuje aktuálne najpokrokovejšiu možnosť hodnotenia vlhkosťného režimu konštrukcií a k dispozícii je už aj ne jeden komerčný software. Táto metóda rozdelí výpočtovú oblasť na niekoľko vzájomne prepojených elementov. Namiesto predpísania teploty a tlakov do jednotlivých bodov na základe analógie ustáleného stavu sa tieto vypočítajú dynamicky v čase podľa meniacich sa okrajových podmienok. Takýto výpočet dokáže veľmi podrobne a vierohodne modelovať teplotný a vlhkosťný režim konštrukcie. Matematických modelov pre túto problematiku je viac, niektoré používajú dokonca rôzne hnacie potenciály pre pole vlhkosti. Najčastejšie býva numerický model zostavený na základe dvoch navzájom prepojených rovníc, ktoré sú uvedené na obr. 43. Prvá rovnica predstavuje rovnicu vedenia tepla, rozšírenú o prírastok tepelných ziskov prípadne strát v diferenciálnom objeme, ktorý je zapríčinený fázovými premenami vody. Druhá rovnica popisuje zmenu obsahu vody v diferenciálnom objeme, ktorá je zapríčinená difúziou vodnej pary zapríčinenou rozdielnymi tlakmi parciálneho tlaku a kapilárneho transportu vzniknutého v nadhygroskopickkej oblasti hnaného kapilárnym tlakom.



Obr. 43: a) diferenciálny objem pre jednorozmerný model spolu, b) transportné rovnice pre jednorozmerný model c) pole vlhkosti ako výsledok numerického výpočtu

Vyššie uvedený model predstavuje základný jednorozmerný príklad sústavy spriahnutých rovníc. Model môže byť rozšírený do viacerých rozmerov, prípadne doplnený o ďalšiu rovnicu, napríklad uvažujúci transport vzduchu alebo solí. Numerické modelovanie vyniká najmä tým, že jeho riešením je získaný priebeh teploty a vlhkosti pre jednotlivé body výpočtovej siete v čase. Mimo informácií o obsahu vody v materiáli, sú dnes už vyvinuté aj metódy predikcie degradácie materiálov podľa rôznych modelov ako sú napríklad VTT [6], WTA [7]. Z komerčných software, ktoré sú dnes bežne dostupné sa dajú sa pre tieto účely využiť sú napríklad Comsol Multiphysics [8], WUFI vyvíjané Fraunhofer inštitútom [9] alebo Delphin vyvíjaný na univerzite v Drážďanoch [10]. Algoritmy vynímané na Mendelovej univerzite sú zatiaľ vo verzii prototypov pre interné použitie a plánuje sa ich zverejnenie až v ďalších rokoch. Nemožno však nespomenúť, že aj pri numerickej metóde narážame na určité problémy, ktoré sú príčinou, že nie je ešte natoľko rozvinutá jej aplikácii v inžinierskej praxi. Prvý problém sú relevantné materiálové parametre, ktoré ešte stále nie sú charakterizované pre všetky materiály. Spravidla určitá oblasť je opísateľná veľmi dobre a jednoducho, ale získanie komplexného modelu pre materiál nie je také jednoduché ako by sa mohlo na prvý pohľad zdať. Niektoré materiály boli už v minulosti popísané a existujú databázy, v ktorých je možné materiál vyhľadať, prípadne každý komerčný software má aj dostupnú svoju knižnicu. V našich krajinách ale používame materiály, ktoré bývajú často odlišné od materiálov uvedených v týchto knižniciach. Nemusíme tak mať k dispozícii dáta pre všetky materiály a hlavne ich podrobnosť, akú simulačný program vyžaduje. Druhou oblasťou s veľkou neistotou sú okrajové podmienky simulácie. Aktuálne nie sú pre naše územie dostupné klimatické dáta, ktoré by bolo možné použiť pre bezpečnú simuláciu. Existujú síce referenčné roky, ale tie majú charakter skôr predikcie energetickej náročnosti ako návrhového klimatického roku.

Aby bolo možné odstrániť nedostatky pokročilejších modelov v našich lokalitách, realizujú sa na Mendelovej univerzite v Brne a vo výskumnom centre Josefa Ressela Mendelovej univerzity niektoré aktivity pre doplnenie chýbajúcich dát. Výskumné centrum disponuje celým radom laboratórií a jedným z nich je aj laboratórium pre výskum tepelných a vlhkosťných vlastností materiálov. Toto laboratórium je plne vybavené pre meranie základných ale aj pokročilých materiálových vlastností.



Obr. 44: a) Heatflow meter Netzsch 436 Lambda, b) zariadenie RTB Transient, c) Isomet 2441

Pre meranie tepelných vlastností materiálov laboratórium disponuje jednou stacionárnou a dvoma dynamickými metódami. Stacionárna metóda využíva meranie tepelného toku „heat flow meter“ zariadením NETZSCH 436 Lambda pre vzorky s rozmerom 600 × 600 mm a hrúbkou do 20 cm. Zariadenie je vhodné hlavne pre meranie izolačných materiálov. Zariadenie má dve

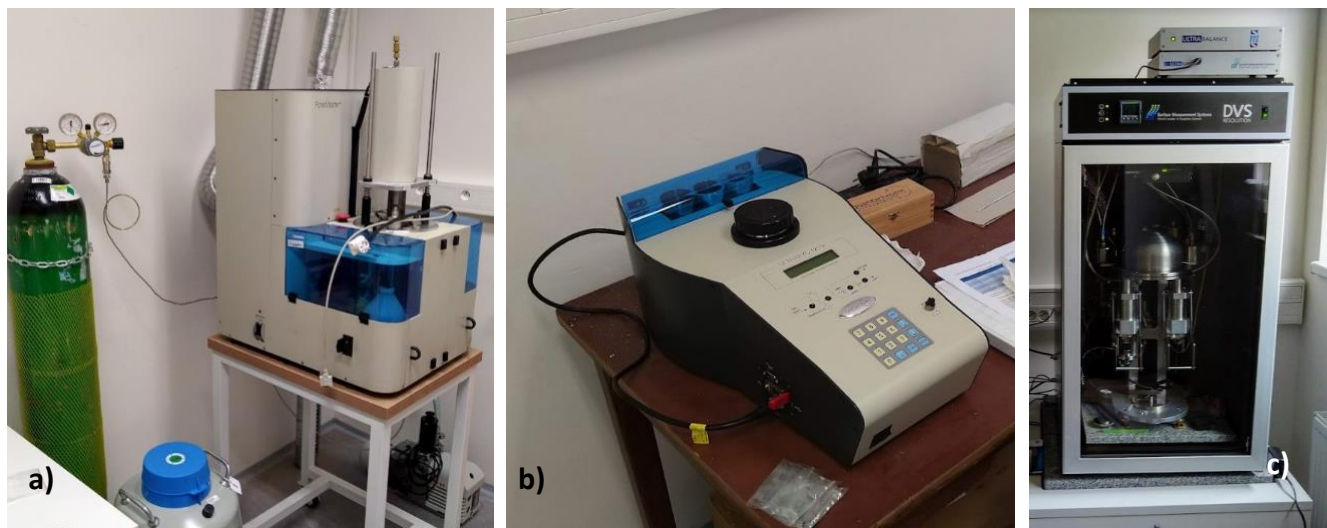
dosky, kde horná je ohrievaná a spodná chladená na určité teploty. Gradient tepla vytvorí tepelný tok, ktorý je meraný snímačmi tepelného toku. Zo známej hrúbky vzorky a výkonu ohrevu sa vypočíta súčiniteľ tepelnej vodivosti. Ďalšie dve zariadenia využívajú dynamickú metódu, každé trochu inak. Kým RTB Transient tester využíva odozvu na teplotný impulz v polo priestore, ISOMET využíva meranie vývoja teploty sondy, ktorá je zároveň teplotným zdrojom v čase pri jej známom výkone. RTB Transient tester je vhodný pre meranie vzoriek s hrúbkou niekoľko milimetrov až centimetrov s rozmerom až do 10×10 cm. Meranie prebieha na troch vrstvách vzorky položených na sebe, kde medzi prvú a druhú rozhranie sa vloží vykurovacia fólia, a medzi druhú a tretie rozhranie sa vloží termočlánok. Podľa predbežného výpočtu sa vykurovacou fóliou vytvorí tepelný impulz, ktorého odozva sa meria termočlánkom v druhom rozhraní. Práve oneskorenie maximálnej hodnoty v meracom bode spolu s jeho veľkosťou determinuje teplotnú vodivosť a mernú tepelnú kapacitu materiálu, z ktorej sa následne určí tepelná vodivosť. Isomet využíva pre meranie dva typy sond. Jedna je príložná s kruhovým priemerom, táto je vhodná najmä pre tuhé materiály s hladkým povrchom. Druhá sonda, ihlová, je vhodná na meranie mäkkých penových alebo vláknitých materiálov. Odozva teploty v čase na sonde lineárne rastie v závislosti od materiálových vlastností až kým sa táto tepelná vlna nedostane na okraj vzorky, takže rozmer vzorky musí byť dostatočne veľký na to, aby meranie bolo dokončené kým sa tak stane.



Obr. 45: a) komora s difúznymi miskami b) difúzne misky pre štúdiu vplyvu perforácií parozábran c) kondicionovanie vzoriek pri meraní sorpcie

Vlhkostné vlastnosti sú v laboratóriu merané štandardnými normovými metódami ako aj novými pokročilejšími metódami. K tradičným štandardizovaným metódam je možné spomenúť klasické postupy na meranie difúzne vlastností materiálov podľa EN 12572. tieto využívajú misky naplnené vysúšadlom alebo roztokom, ktoré sú umiestnené v klimatizovanom prostredí a v čase je zaznamenávaná ich hmotnosť. Difúzne vlastnosti sa prejavujú ako zmena hmotnosti misky. Miskové metódy sú používané aj pre štúdie zaoberajúce sa vplyvom perforácie parozábran na ich difúzne vlastnosti. Pre identifikáciu sorpčných vlastností podľa EN 12571 sú využívané sklenené exikátory ako aj klimatické komory. Vzorky sa kondiciujú a priebežne vážia. Stav kedy sa v po sebe idúcich meraniach nezaznamená výrazná zmena hmotnosti sa považuje za ustálený stav.

Pokročilejšiu metódu pre meranie vlhkostných vlastností v laboratóriu reprezentuje duálny sorpčný analyzátor SMS DVS Resolution. Ten umožňuje popri meraní sorpcie a desorpcie meranie ďalších pokročilých vlastností materiálu ako je merný povrch podľa teórie Langmuira alebo BET, difúzne parametre, amorfný obsah a iné. Metódu dynamickej sorpcie dopĺňa ešte ortuťový porozimeter a héliový pyknometer. Tieto zariadenia majú za účel dopomôcť so stanovením retenčnej krivky, ktorá sa zostaví na základe informácií o sorpčných izotermách z dynamickej sorpcie, distribúcii mezo a makro pórov z pyknometrie a celkového objemu pórov z pyknometra. Zariadenia sú uvedené na obrázku 0.8 a popis princípu jednotlivých prístrojov a meracích metód nie je možné uviesť s ohľadom na rozsah textu. Meranie vlhkostných vlastností zameraných na nasiakavosť a pohyb vody v kapilárnom prostredí zatiaľ nie je k dispozícii, ale malo by byť dostupné spolu diferenčným skenovacím kalorimetrom a termogravimetrickým analyzátorom, ktoré majú rozšíriť laboratórium v priebehu roku 2023. Zariadenia laboratória sú aktuálne využívané pre charakterizáciu materiálov použitých v experimentálnom module woodenHAT a majú ambíciu vytvoriť lokálny materiálový katalóg, ktorý bude dostupný v našom regióne pre širokú odbornú verejnosť.



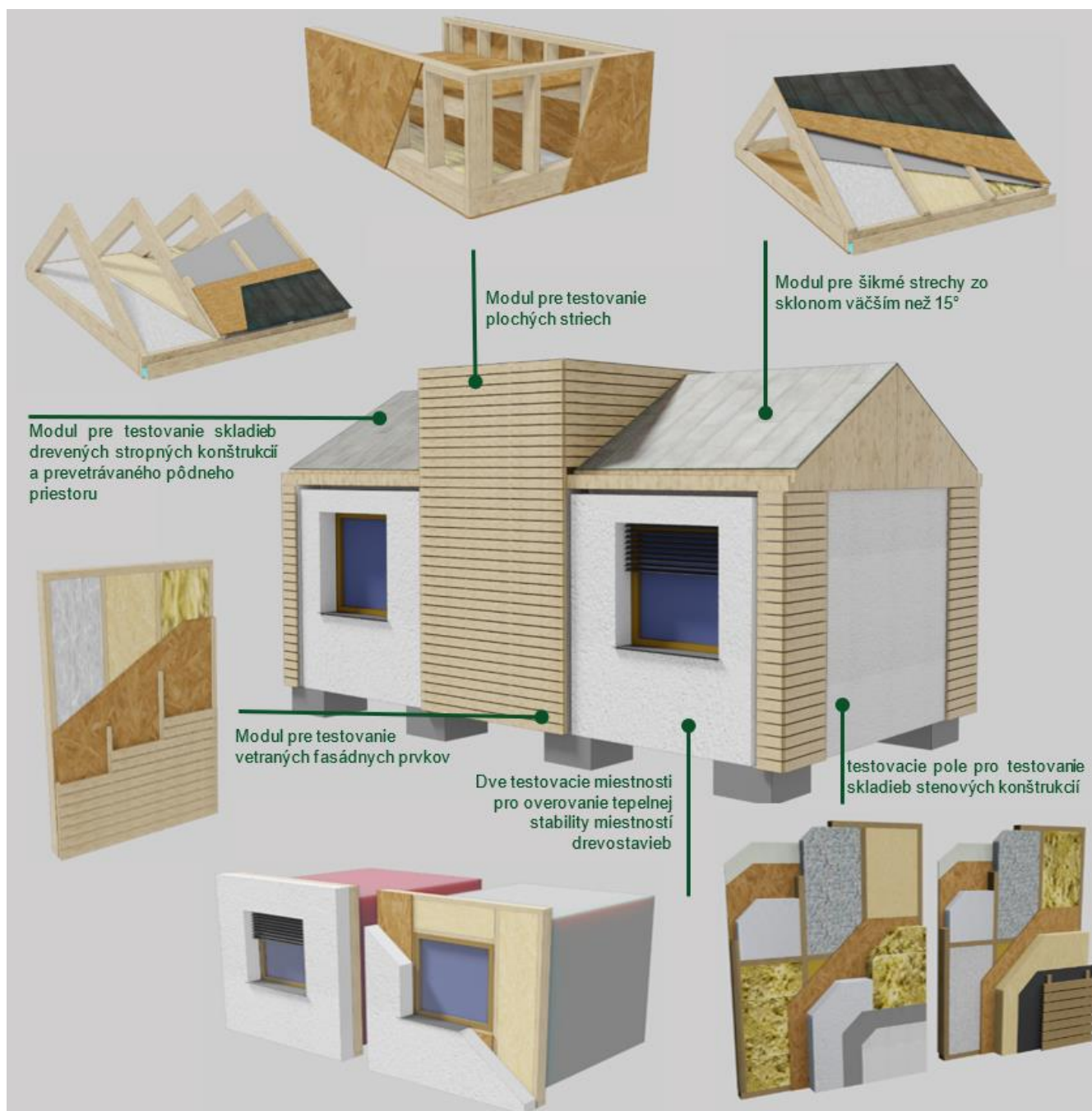
Obr. 46: a) ortuťový porozimeter, b) héliový pyknometer c) duálny sorpční analyzátor

V roku 2020 bola v rámci projektu TP2020009 v areáli Mendelovej univerzity v Brne vybudovaná experimentálna drevostavba. Experimentálny modul „wodenHAT“ vznikol ako testovací objekt pre experimentálny výskum stavebných konštrukcií drevostavieb. Objekt s rozmermi 6,5×3,5 m pozostáva z troch stenových a troch strešných modulov. Tieto umožňujú dlhodobý výskum stenových, stropných a strešných konštrukcií, prípadné čiastočné alebo úplne prestavanie modulu. Experimentálne možnosti a zámery sú uvedené na obr. 48.



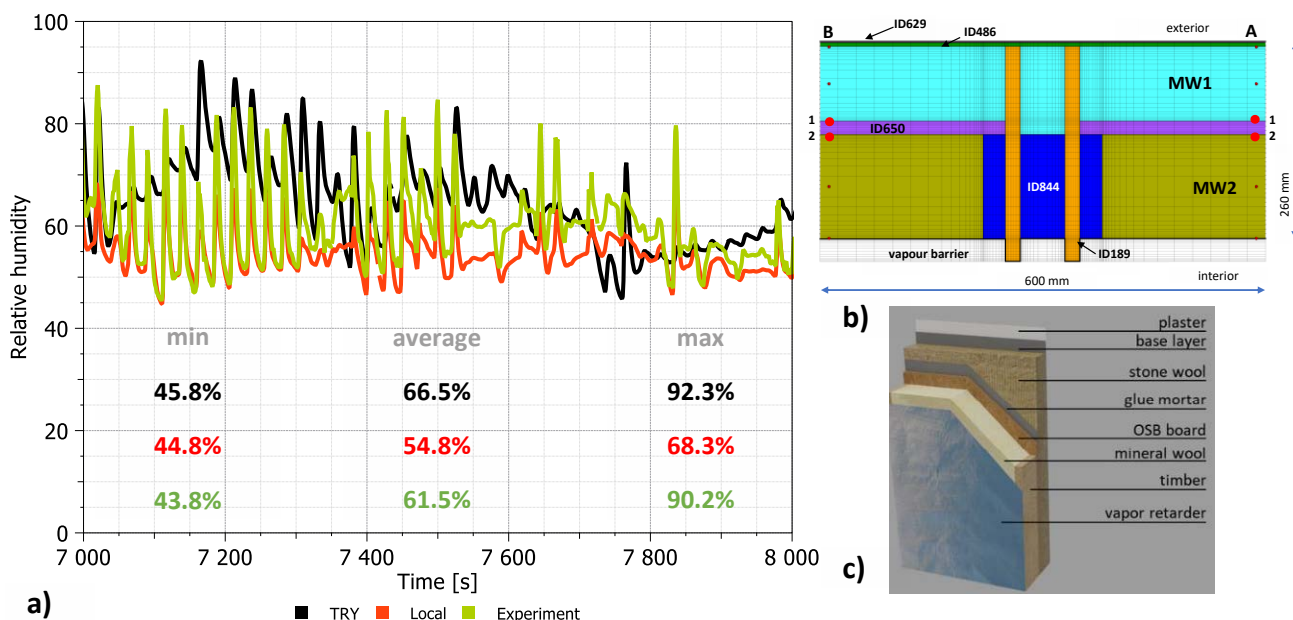
Obr. 47: a) experimentálny modul woodenHAT, b) pohľad na experimentálne steny drevostavieb z interiéru

Od začiatku roku 2021 sú merné experimentálne skladby stien orientované na juhovýchod a severozápad. Na juhovýchode je skladba steny drevostavby zateplená kontaktným zatepľovacím systémom na báze minerálnej vlny. Na severozápadnej strane je použitý kontaktný zatepľovací systém s izolantom z drevo vlákna. Nosnú časť stien tvorí stĺpiková konštrukcia s hrúbkou 140 mm izolovaná izoláciou z minerálnej vlny s nízkou objemovou hmotnosťou. Z interiéru sú jednotlivé steny ukončené rôznymi vrstvami, čo sleduje predmet výskumu, ktorým je porovnanie vlhkostných režimov konštrukcií. Skladby sú osadené senzormi, ktoré zberajú dáta približne v dvoj minútových intervaloch. Vnútorne prostredie má upravovanú klímu vzduchotechnickou jednotkou a vonkajšie prostredie je monitorované komplexnou meteorologickou stanicou.



Obr. 48: Skladba experimentálneho modulu „woodenHAT“

Popri výskume reálnej odozvy konštrukcií drevostavieb sú v mieste merané aj podrobné klimatické dáta lokálnou meteorologickou stanicou. Mimo bežných parametrov vonkajšieho prostredia, meriame aj intenzitu slnečného žiarenia a dlhovlnnú radiáciu. ambíciou je na základe meraných dát vytvoriť návrhové parametre pre hygrotermálne simulácie v danej lokalite. Dáta z experimentálnych skladiieb boli priebežne vyhodnotené a obr. 49 uvádza priebežné výsledky, kde je vidieť dobrú zhodu medzi numerickým modelom s materiálovými parametrami charakterizovanými v rámci laboratórií VJRC doplnenými o lokálne klimatické dáta v porovnaní s experimentálnym meraním.



Obr. 49: a) výsledok numerického výpočtu v konfrontácii s experimentálnymi dátami b) 2D model pre numerický výpočet c) skladba steny experimentálneho modulu

Cieľom príspevku bolo naznačiť problematiku posudzovania drevených konštrukcií z pohľadu fyziky a poukázať na nové možnosti. Tieto nástroje ešte stále nie sú v inžinierskej praxi etablované, práve pre niektoré problémy, ktoré sťažujú ich nasadenie. K tomuto na Mendelovej univerzite prebiehajú niektoré výskumné aktivity, ktoré majú za cieľ postupne doplniť chýbajúce dáta a sprístupniť tak numerické modeli širšej odbornej verejnosti.

Použitá literatúra:

- [1] GLASER, Helmut. 1958. *Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis*. Kältetechnik.
- [2] ČSN 73 0540. 2011. *Tepelná ochrana budov*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [3] STN 73 0540. 2012. *Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov*. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo.
- [4] EN ISO 13788. 2012. *Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods*. Brussels: Comité Européen de Normalisation.
- [5] HÄUPL, Peter. 2008. *Bauphysik*. Berlin: Ernst und Sohn. ISBN 978-3-433-01842-2
- [6] HUKKA, A.; VIITANEN, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, 33(6), 475–485.
- [7] KEHL, D. 2013. *Humidity-related dimensioning of timber constructions according to WTA - Hygrothermal evaluation of the other kind*. HOLZBAU - die neue quadriga. Issue 06-2013. Wolnzach: Kastner Verlag.
- [8] COMSOL. 2022. *COMSOL Multiphysics® v. 6.1*. [software]. Stockholm, Sweden: COMSOL AB. Dostupné na: www.comsol.com
- [9] KÜNZEL, Hartwig. 2018. *WUFI* [online]. Dostupné na: <http://www.wufi.de/> [cit. 20. 1. 2018].
- [10] GRUNEWALD, John. 1996. *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. Dizertačná práca. Dresden: TU Dresden.

Kontakty

Ing. Richard Slávik, Ph.D.: richard.slavik@mendelu.cz

POČÍTAČOVÁ PODPORA PROJEKTOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Ing. Pavla Mocová, Ph.D.

¹ Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

Pro projektování dřevostaveb se využívají speciální softwary. Tyto softwary jsou často využívány převážně na výrobní dokumentaci. Při správném použití mohou uživateli usnadnit práci na výrobní dokumentaci, mají automatizované výpisy a výstupy jsou vhodné také pro obráběcí centra např. pro CNC stroje. V celé části jsou popsány možnosti různých SW a to nejen specializovaných na dřevostavby, ale také další možnosti jiných SW, které jsou na trhu a jsou široce používány v praxi.

Rozdělení softwaru pro projektování

Rozdělení softwaru (dále jen SW) pro projektování může být provedeno z několika úhlů pohledu. Nejdůležitější je si uvědomit, k jakému účelu bude výstup z programu sloužit. Rozdíl bude, pokud budeme potřebovat výstup např. jen pro stavební povolení nebo naopak výrobní nebo dílenskou dokumentaci.

a) Rozdělení dle účelu PD:

- studie;
- pro územní souhlas;
- pro územní řízení;
- pro stavební povolení/ohlášení stavby;
- pro provádění stavby;
- tendrová dokumentace = pro výběr zhotovitele;
- výrobní dokumentace;
- dílenská dokumentace.

Z tohoto rozdělení vyplývá, že jiné požadavky na SW bude mít projektant pozemních staveb, jiné architekt a jiné přípravitel staveb případně projektant výrobní a dílenské dokumentace.

a) Rozdělení dle názvů SW:

- REVIT Autodesk
 - Nástavba např. AGACAD
- AutoCAD
- Archicad
- SEMA SW
- Dietrich's
- CADWORK

Ve výčtu výše jsou uvedeny nejvíce používané SW při projekčních pracích. Každý uživatel má tedy poměrně širokou škálu možností při výběru. Je jen na uživateli, který program si vybere. Při výběru často záleží na osobních preferencích, uživatelském rozhraní, na možnosti individualizace a v neposlední řadě také na dostupnosti školení, výukových videí a na dostupnosti odborné literatury.



Z nynějších poznatků je evidentní, že mladší generace studentů si vybírá takový software, se kterým se setká za svých studií, a to ať už na střední škole, na vysoké škole, nebo v praxi.

V praxi je výběr SW velmi úzce vázán na další faktory a to je pořizovací cena, cena při nutném upgrade SW, možnost individualizace SW, tzn. zakoupení jen několika modulů, které jsou pro projektanta důležité, možnost sdílení dat s ostatními specialisty. Možnost výstupu do 3D pro případnou prezentaci zákazníkům. Nástavbou 3D se v dnešní praxi čím dál častěji využívá tzv. virtuální realita. Zákazník si projde svůj budoucí objekt pomocí speciálních brýlí a SW, které jsou k tomuto účelu určeny.

V neposlední řadě je dalším důležitým faktorem pro výběr možnost pracovat v tzv. BIM. BIM (Building information model) se pomalu, ale jistě, stává součástí denní práce projektantů. Program, který BIM podporovat nebude, nebude v budoucnu tak často využíván. Ne všechny SW jsou ale na BIM vhodné a ne všechny SW, které se chlubí tím, že jsou BIM, jím skutečně jsou.

Často SW, které mají výstupy do *.ifc, se chlubí tím, že jsou BIM, nebo také ty, které mají možnost 3D zobrazení. Jenže je zde otázka, co to vlastně je BIM a k čemu má sloužit. Je 3D BIM nebo je to něco úplně jiného?

BIM = Building Information Model

Pojem BIM je znám poměrně dlouho, ale až v posledních letech je kladen důraz na to, aby se odborná stavební veřejnost s tímto pojmem a využitím ve stavebnictví pomalu, ale jistě začala sžívat. A nejen pojmem, ale aby začali přemýšlet nad tím, jak si usnadnit práci, jak sdílet své informace a jak zefektivnit projekci, výstavbu a správu budov. Jedním z nástrojů, jak usnadnění dosáhnout, zdá se být právě SW využívající skutečných výhod BIM.

BIM je databáze informací o budově, která by měla zahrnovat vše od prvních studií, přes projektovou dokumentaci pro stavební povolení, pro provádění resp. pro výběr zhotovitele, dále v průběhu výstavby, pro správu budovy tzn. pro tzv. facility management, pro rekonstrukce, po životnosti pro demolici, pro ekologickou likvidaci až do uvedení prostoru výstavby do výchozího stavu. V plánu tedy je to, že do BIM všichni účastníci celého procesu vloží svoje vědomosti, myšlenky a vize tak, aby vytvořili informaci a sdíleli ji s ostatními uživateli a autory dalších profesí. Z této definice tedy vyplývá, že **3D model není BIM** a ani nemůže být, vždyť přeci 3D výstup je pouze prezentací tvaru a základního výrazu prvku nebo budovy. Pro každý prvek ve 3D přeci existuje určitá škála informací, ze které je prvek tvořen a teprve tyto informace nám tvoří BIM.

Příklad z praxe:

Představme si situaci, že máme venkovní obložení fasády.

Ve 3D by se jednalo pouze o v podstatě přibližný vzhled, ale my potřebujeme mnohem více informací o tomto prvku a to například:

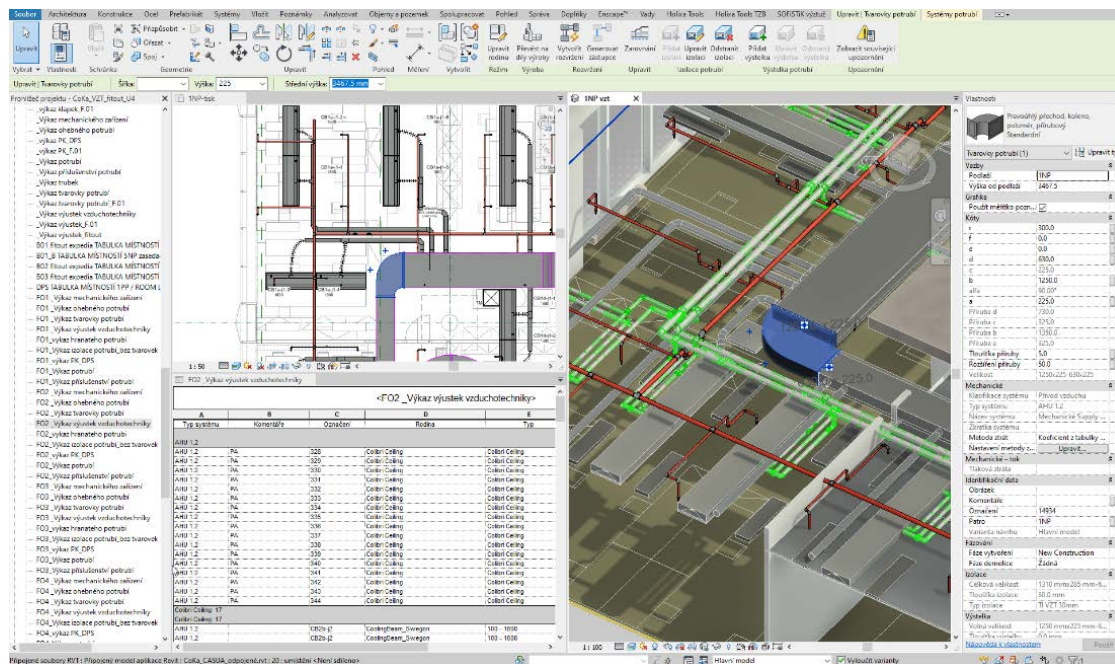
- rozměry prvků, uložení prvků, styl kotvení apod.
- dále je potřeba vědět, kdy jej na stavbu přivést, jak skladovat a jak do stavby zabudovat.
- před zabudováním, jak upravit vlastnosti, například vzhled, případně ochranu dřeva, má být prvek modifikován a jaká dřevina bude použita?
- poté je vhodné vědět, kolik tento obklad bude stát v rámci pořizovací ceny a ceny za D+M (dodávku a montáž).
- po předání stavby do užívání je nutné navázat na projekci a výstavbu a tuto informaci pro správce budovy sdílet, např. jak často má obnovovat nátěr, případně jaký nátěr zvolit, jak dřevo správně ošetřovat v průběhu let tak, aby splnilo svou navrženou délku životnosti, provozní náklady na tuto údržbu.
- po dožití prvku, jak jej ze stavby šetrně odstranit, jak zlikvidovat ekologicky, možnosti dalšího použití tzn. recyklace a informaci o tom, jaké prvky musím zdemontovat s tímto obkladem, případně, co zkontrolovat (podklad, vruty apod.) a čím obklad nahradit, požadované vlastnosti.

Základem pro BIM je tedy společné datové rozhraní a tím je CDE = Common Data Environment. Toto prostředí v sobě zahrnuje všechny informace od 3D modelu, přes vlastnosti jednotlivých prvků, dokumenty k těmto prvkům a v neposlední řadě komunikační mosty s uživateli z různých profesí.

Odpověď na otázku, který z níže zmíněných SW je nebo není ve skutečnosti BIM, nechť si každý zkusí zodpovědět dle následujících definic jednotlivých SW a popisu, co každý SW umí.

a) REVIT Autodesk

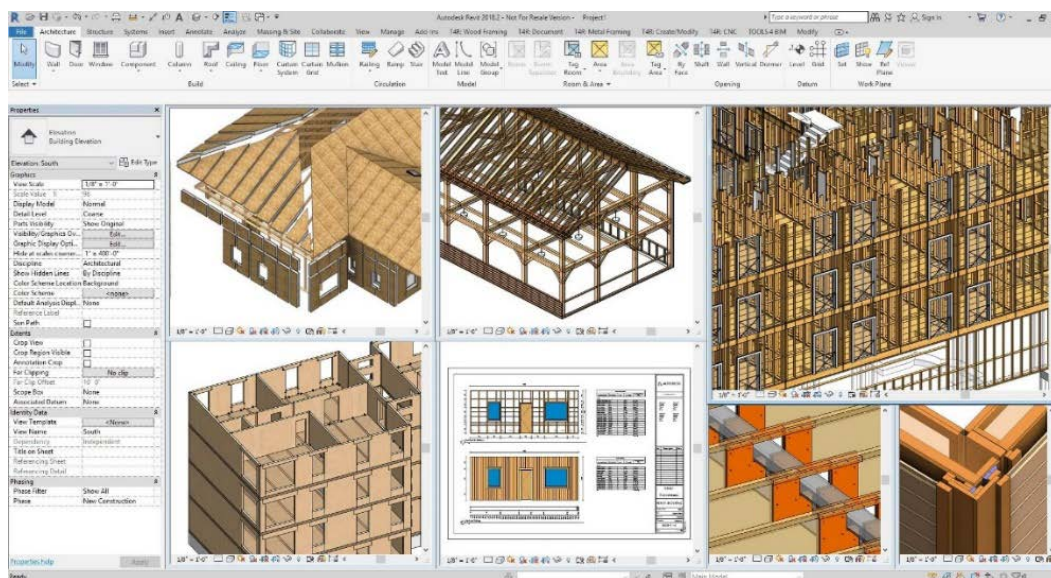
Revit od firmy Autodesk je software, který pomáhá projektantům tedy celým týmům v oblasti architektury, projektování, stavebnictví, facility managementu vytvářet vysoce kvalitní budovy a infrastrukturu těchto budov. Práce je vytvářena tak, že je možné ji sdílet s ostatními kolegy jiných profesí. Je možné velmi rychle optimalizovat, upravit či jen revidovat veškeré půdorysy, řezy a pohledy. Pomocí programu se velice snadno modelují tvary, při změnách je velice rychle provedena úprava výkazů, tabulek apod. Různým objektům a jejich tvarům je možné přiřadit informace, jak rozměrové s 3D parametrickou přesností, tak veškeré informace typu materiál, vlastnosti, tvar, cena, harmonogram, opravy a údržby.



Obr. 50: Ukázka REVIT BIM, 3D, 2D a informace o prvcích

- AGACAD Wood Framing Suite

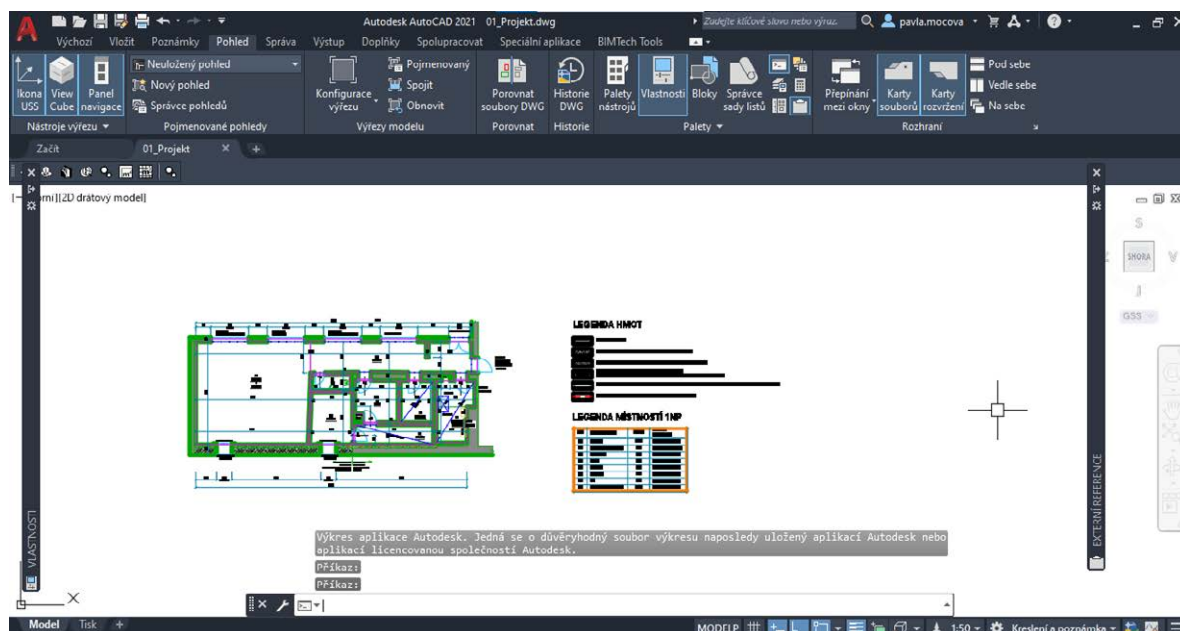
Jedná se o nástavbu REVIT SW pro návrh, optimalizaci výroby a pro výrobní dokumentaci. Jedná se tedy o automatizaci poměrně složitého „skládání“ vícevrstevných konstrukcí dřevostaveb, optimalizaci výroby s důrazem na hospodárnost a s možnostmi okamžitě zobrazovat konstrukční řešení. Sestavování rámu je automatizováno na vysoké úrovni a stává se proto pro dřevostavby dalším SW, který bude vhodným i pro výrobní dokumentaci.



Obr. 51: Ukázka AGACAD, nástavba REVIT SW

b) AutoCAD Autodesk

Jedná se primárně o 2D software s tím, že je jedním z nejrozšířenějších SW na světě. Jeho 3D řešení není z nejjednodušších, proto se primárně využívá hlavně jako 2D. Některé opakující se konstrukce se dají provést dynamicky, avšak nenahradí to 3D zobrazování. Pro objekty není možné přidávat informace typu vlastnosti, harmonogram, nebo pořizovací cena, tzn. není možná automatizace jako je možná například u REVIT nebo jeho nástavby. AutoCAD má možnosti různých nástaveb např. Architecture, Mechanical, Map 3D, MEP nástroje, Electrical, Plant 3D a Raster design. I ty jsou ovšem spíše doplňkem a jejich využíváním nedojde ke zlepšení 3D a už vůbec ne k doplnění o BIM.



Obr. 52: Projekt a uživatelské rozhraní v AutoCAD

c) Archicad

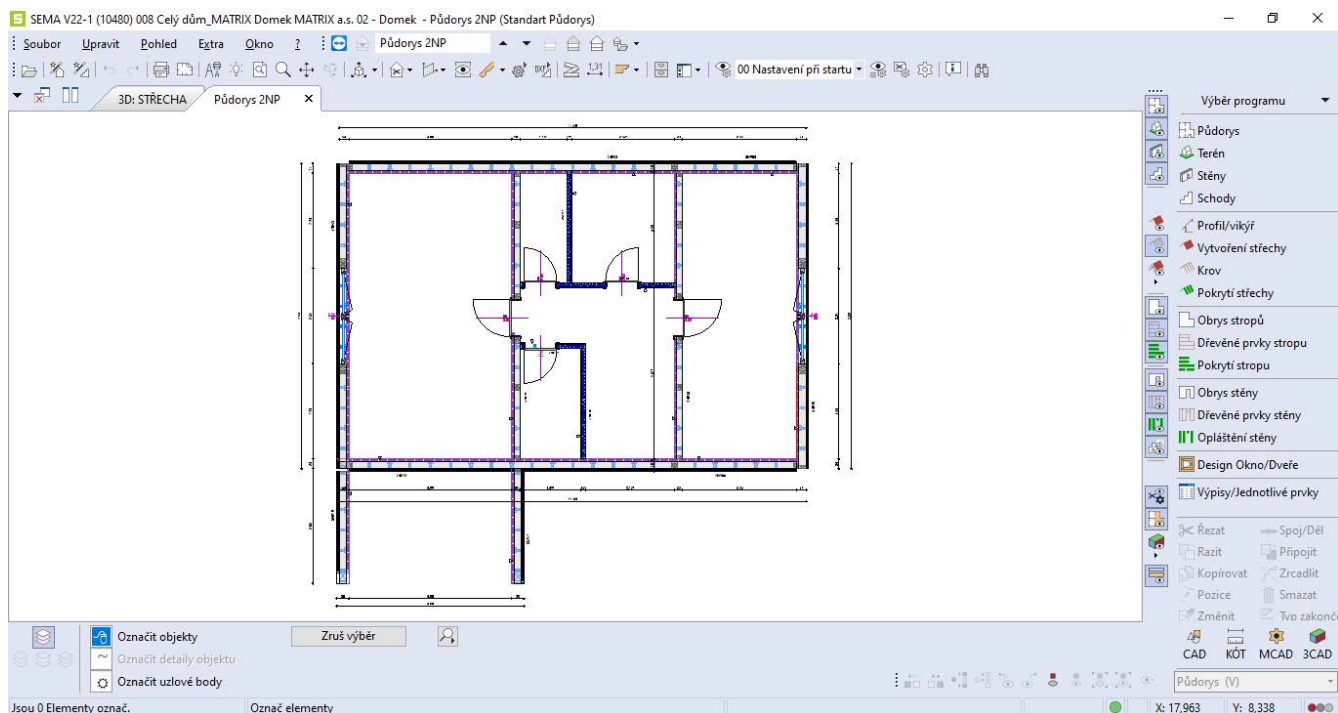
Archicad byl jeden z prvních SW, který se pyšnil 3D, a jeden z prvních, který začal rozšiřovat BIM. Archicad vznikl jako hlavní konkurence AutoCADu a vyvinuli ho v prvopočátcích architekti. Až po architektonických začátcích jej začali využívat i stavební projektanti ke svým projektům. Archicad je BIM, uživatelsky přívětivý, má 3D a možnosti renderovat do různých 3D programů. Kompatibilita s REVITem, nebo s AutoCADem ale není na vysoké úrovni, i tak se jedná o jeden z velmi rozšířených SW a navíc má možnosti zpracovávat i dřevostavby, ovšem výstupy nejsou vhodné jako výrobní.



Obr. 53: ArchiCAD – zobrazení krovu

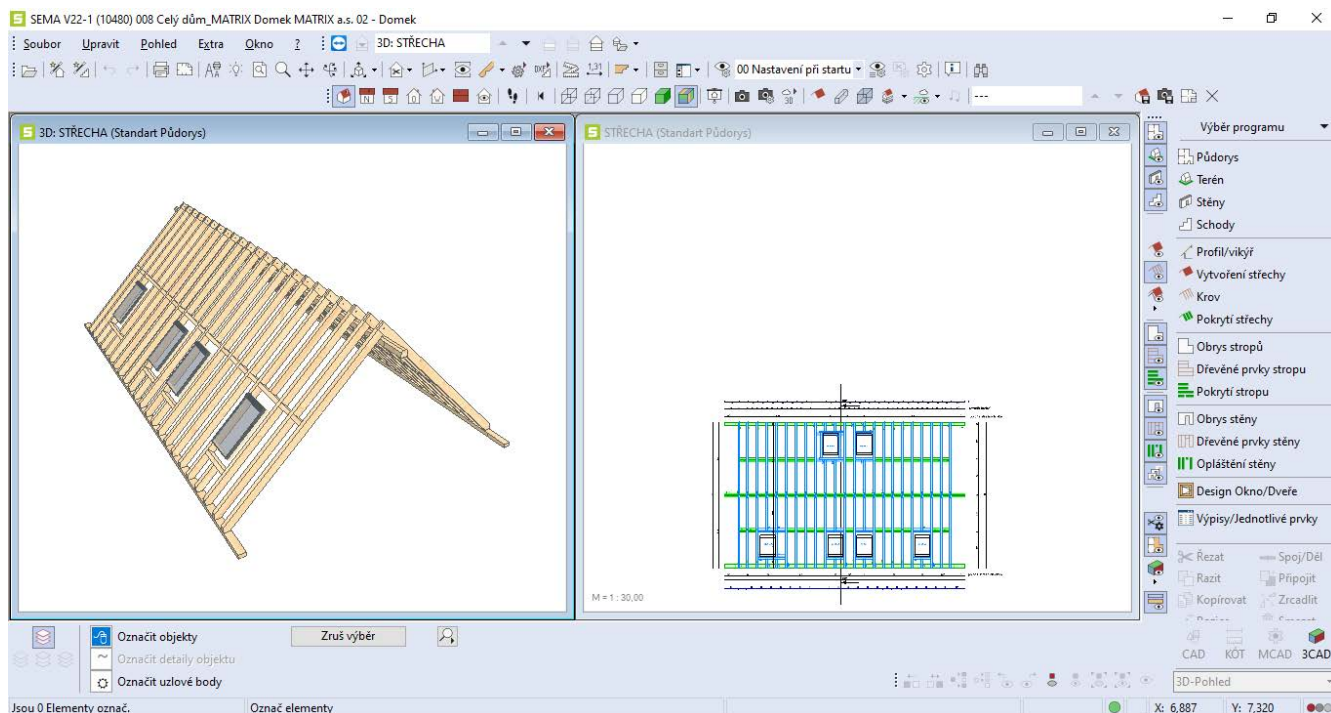
d) SEMA SW

SEMA SW je v podstatě výrobní program. Při vzniku SW se postupovalo opačně, než-li u ostatních programů. SEMA a její vývoj šel od detailu po celý dům. Ostatní SW mají proces obrácen, nejdříve uměly celý dům a nyní se zaměřují na detaily. Program je výborný pro tesařské konstrukce, spoje, dřevostavby, CLT, srubové stavby, schody a klempířské systémy. Je tedy špičkou právě pro dřevařské společnosti, pro výrobu i pro projekci.



Obr. 54: Půdorys 1NP v SEMA SW

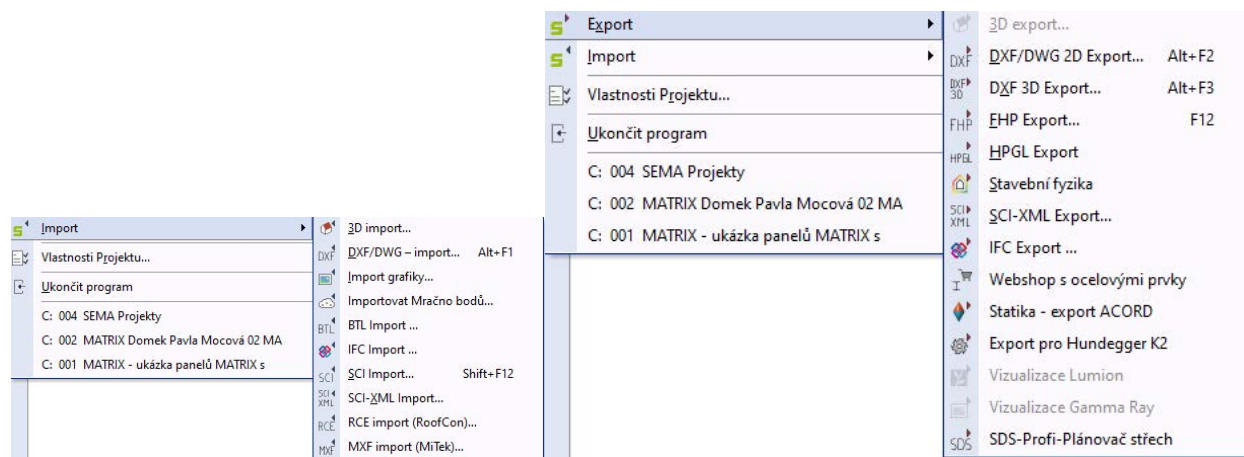
Uživatelské rozhraní je na první pohled trochu nedoladěné, je potřeba při přechodu např. z REVITu, nebo z AutoCADu chvilku trpělivosti, také názvosloví není dokonale přeloženo z německého jazyka, ale všechny tyto nedostatky jsou při využívání SW prominuty, neboť rychlost práce v SW a jeho výhody převažují nevýhody. SEMA SW jako taková je, spíše určena pro výpisy prvků, detaily napojení, konstrukční řešení, výrobní dokumentaci apod. V tomto směru je SEMA SW na špičce, avšak co se týká stavebních výkresů a jejich náležitostí, tam už je to poněkud horší. Z hlediska kreslení v SEMA prakticky můžeme zapomenout na zakreslování dle ČSN 01 3420. Tloušťky čar zde (prakticky) nefungují, a pokud je přeci jen chce někdo dodržet, je nutné pracovat ve 2D a linie a hotové výkresy ručně upravit. Dále také kótování a zapisování všeobecně rozměrů je nestandardní. Je nutné se zaměřit hned na začátku, před kreslením a orientováním se v různých částech SEMA, na nastavení jak jednotek, tak také dalších důležitých částí pro uživatelský komfort.



Obr. 55: Ukázka výstupu ze SEMA SW

Vzhledem k tomu, že je SEMA SW tolik rozšířená ve výrobních podnicích, je vhodné připomenout několik možností výstupu z tohoto SW.

- Import/Export IFC 2x3, IFC 4, IFC xml, IFC zip
- Import/Export 3D formáty 3DS, OBJ, STL, XML.DAE, X3D, DXF 2D, DXF 3D, DWG
- Import MXF (MITEK), RCE (RoofCon)
- Import/Export SCI, SCI XML
- Import/Export BCF
- a další



Obr. 56: Ukázka import/export ze SEMA SW

Z hlediska statiky je možné napojení:

- export 3D prutového a uzlového modelu pro statiku formát DSTV(STP), DXF, přímý export do DLUBAL
- částečně implementovaný statický software FRILO
- export do statického software ACCORD

e) Dietrich's

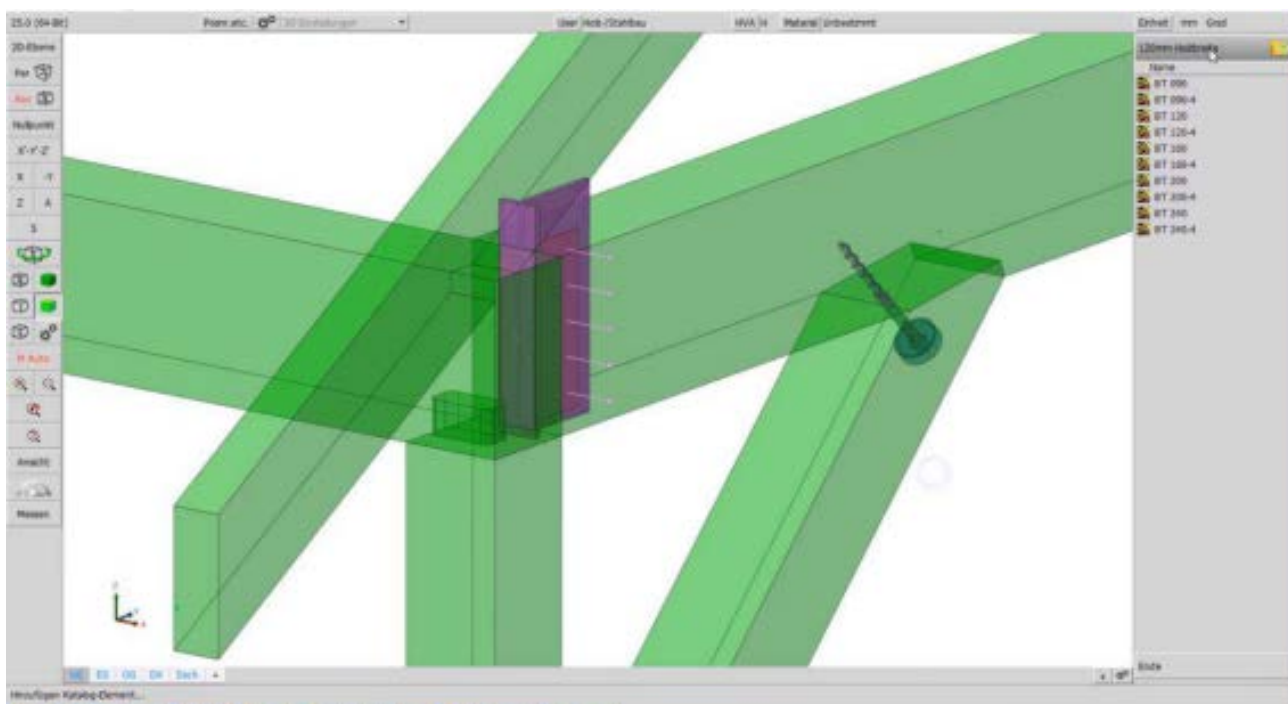
Výrobní programy mají jednu věc společnou, specializují se na výstupy také do CAD/CAM systémů. CAD je v přeneseném smyslu slova počítačem podporovaný návrh, jinými slovy slouží k přenesení myšlenek na papír. Oproti tomu CAM je spíše výstup provedený technologem, programátorem, člověkem, který má zkušenosti jak s programem, tak s výstupem a obsluhou obráběcího stroje. Tento SW je svými funkcemi velmi podobný SEMA SW. Jedná se o 3D CAD/CAM SW, jehož prostřednictvím lze také tvořit 2D a 3D dokumentaci. Je možné automaticky kótovat, případně provádět automatické výpisy prvků. SW je využíván jak projekční sférou, tak výrobci dřevostaveb. Jedná se o méně rozšířený SW v ČR.



Obr. 57: Ukázka výstupu ze SW Dietrich's

f) CADWORK

Velmi intuitivní program, který se staví svým uživatelským rozhraním na úroveň AutoCADu. Při přechodu na 3D dřevostaveb by se tento program mohl jevit jako výhodný, ovšem zdání klame. Složitě zadávání odvádí pozornost od řešení problematiky. Navíc je tento SW soustředěn skutečně jen na výrobní dokumentaci a pro sdílení dat s profesisty je nevhodný.



Obr. 58: 3D zobrazení v cadwork (Youtube kanál Cadwork Holz AG)

Kontakty

Ing. Pavla Mocová, Ph.D.: pavla.mocova@mendelu.cz

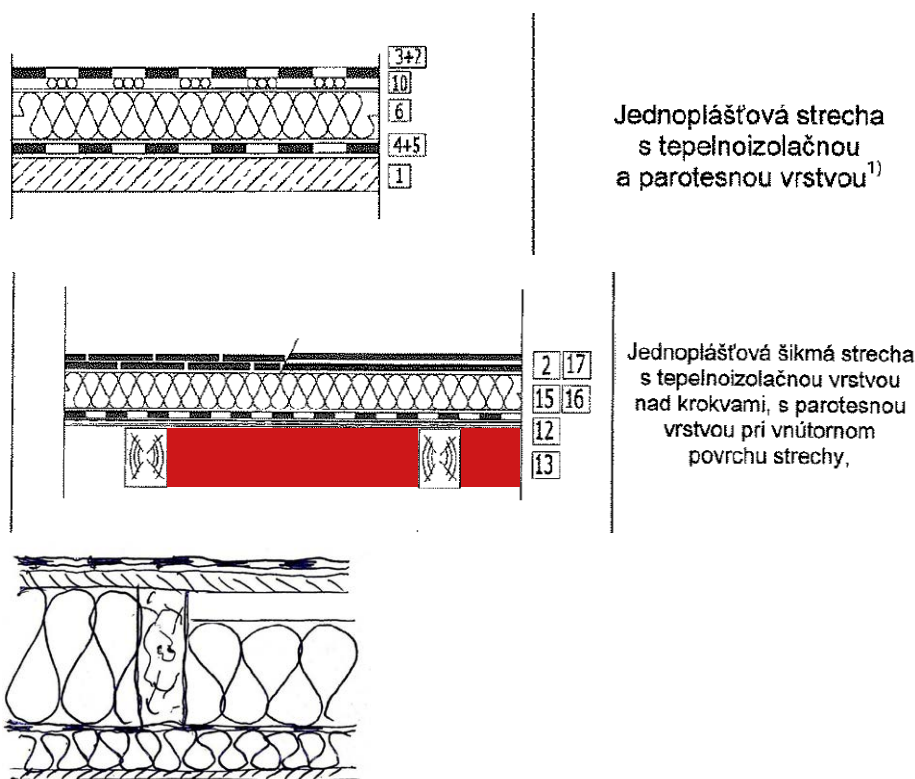
POUŽITIE DREVA V NEVETRANÝCH PLOCHÝCH STRECHÁCH

Ing. Peter Juráš, PhD.¹

¹ Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

V posledných rokoch sa v čoraz väčšej miere stretávame so skladbami plochých striech, ktoré už na prvý pohľad evokujú problém. V rámci ušetrenia času a financií pri realizácii sa dostala do popredia plochá strecha s použitím drevených stropníc ako nosnej konštrukcie strešného plášťa a plné drevené (alternatívne z OSB dosiek) debnenie podľa vzoru striech šikmých. V podstate s jedná o analógiu jednoplášťovej plochej strechy s parozábranou (obr. 59a) s nahradením klasickej ťažkej stropnej konštrukcie drevenými stropnicami. Pokiaľ by sa použila iba nadkrokvový variant (obr. 59b), problém by nevznikol, ale zvyčajne sa použije doplnková tepelná izolácia medzi stropnicami alebo prípadne kompletne iba medzi stropnicami a na debnení je priamo povlaková krytina. (obr. 59c)

Čo si mnohí pri ich návrhu neuvedomujú je, že v plochých strechách sa používa nie skladaná, ale povlaková krytina, ktorá má vysoký difúzny odpor. Keďže ploché strechy bez parozábrany v našich podmienkach nefungujú a neodporúča sa ich navrhovanie, nielen stropnice, ale aj akékoľvek debnenie je prakticky v konštrukcii zabudované medzi dvoma vrstvami s vysokým difúznym odporom, čo znemožňuje prirodzené dýchanie organických materiálov. Často sa v takýchto skladbách nachádzajú parozábrany dokonca dve.



Obr. 59: Jednoplášťové ploché a šikmé strechy z normy [1]. Červenou je znázornená doplnková tepelná izolácia z vnútornej strany. Dole škica nevhodnej skladby bez vetranej vzduchovej medzery

Následkom toho dochádza k degradácii týchto prvkov v pomerne krátkom čase. Na problematiku upozorňovalo viacero autorov, napríklad Krajčovič [2], ktorý sa ako regionálny technik stretol pri obhliadkach striech s reklamáciami zatekajúcich striech, kde ale problém nebol v defekte povlakovej krytiny, ale bol spôsobený kondenzáciou a následným zatekaním do interiéru. Príklad nevhodného použitia drevených prvkov, najmä OSB dosiek je na obr. 60.



Obr. 60: Použitie OSB dosky ako podklad pod povlakovú krytinu a jej degradácia spôsobená kondenzáciou na spodnom povrchu [1]

Použitie záklopu z OSB dosiek je najčastejšie spojené s dvoma umiestneniami:

- ako podklad povlakovej krytiny (obr. 60), kde dochádza k jeho degradácii spôsobenej kondenzáciou vodnej pary na spodnej strane povlakovej krytiny,
- ďalšou používanou skladbou (obr. 59b a 61) je realizácia v dvoch etapách, kde sa na stropnice zhotoví záklop z OSB dosiek a následne parozábrana, tepelná izolácia a povlaková krytina. Neskôr sa z vnútornej strany pridá ďalšia vrstva tepelnej izolácie, ďalšia vrstva parozábrany a zavesený podhľad.



Obr. 61: Použitie OSB dosky ako debnenie a nosný podklad pod parozábranu pri kombinácii tepelnej izolácie nad aj pod parozábranou: hniloba na OSB doske a takisto na hornej strane stropníc (vpravo)

Nevhodnosť použitia takéhoto riešenia bude ukázaná na troch prípadoch, kde sa vykonávalo odborné posúdenie v rámci ktorého boli odoberané vzorky pre gravimetrické meranie a skladby boli posudzované z hľadiska normových požiadaviek. Takéto posúdenie sa najčastejšie robí pre súdnoznalecké dokazovanie a preto nie je možné uviesť jednoznačné podrobnosti pre jednotlivé objekty.

OSB dosky

Používanie OSB dosiek v stavebníctve narastá každým rokom. Jedna z aplikácií je použitie na vnútorné opláštenie obvodových stien drevodomov, kde sa často tieto dosky používajú na vytvorenie vzduchotesnej roviny. Vzhľadom na svoju dostupnosť a cenu sa začali používať aj pri šikmých strechách, kde napríklad nahrádzajú celoplošné debnenia a záklopy, kde nie je požia-

davka na estetiku, resp. kde nie sú viditeľné. Nájdu sa aj výnimky, ako napríklad strecha nového kostola vo Vysokých Tatrách – Novom Smokovci.

V nadväznosti na potrebu rýchlej výstavby (odstránenie mokrého procesu) a ušetrenia finančných prostriedkov sa na Slovensku našlo mnoho „novátorov“, ktorí sa rozhodli implementovať dosku do klasickej plochej strechy s parozábranou, tzn. medzi dve vrstvy s vysokým difúznym odporom. V tomto článku sa zameriame na túto problematiku a ako sa vyhnúť fatálnym následkom.

Názov OSB doska pochádzajúci z angličtiny a skratka znamená Oriented Strand Board, tzn. doska s orientovanými plochými hoblinami. Bola vyvinutá v roku 1963 v Kalifornii Arminom Elmendorffom [3]. Vyrába sa z podlhovastých, obdĺžnikových hoblín, ktoré sú lisované pod vplyvom vysokého tlaku a teploty, pri použití syntetickej živice ako spojiva, valcovaním za tepla. Ako spojivo sa používajú rôzne látky, od formaldehydu, izokyanidu atď. Použité hobliny majú približné rozmery dĺžka 100–120 mm a hrúbka 0,6 mm. Spravidla sú na povrchoch orientované rovnobežne s dlhším okrajom dosky a vo vnútri dosky kolmo. Počet vrstiev a hrúbka závisí od samotnej plánovanej hrúbky dosiek.

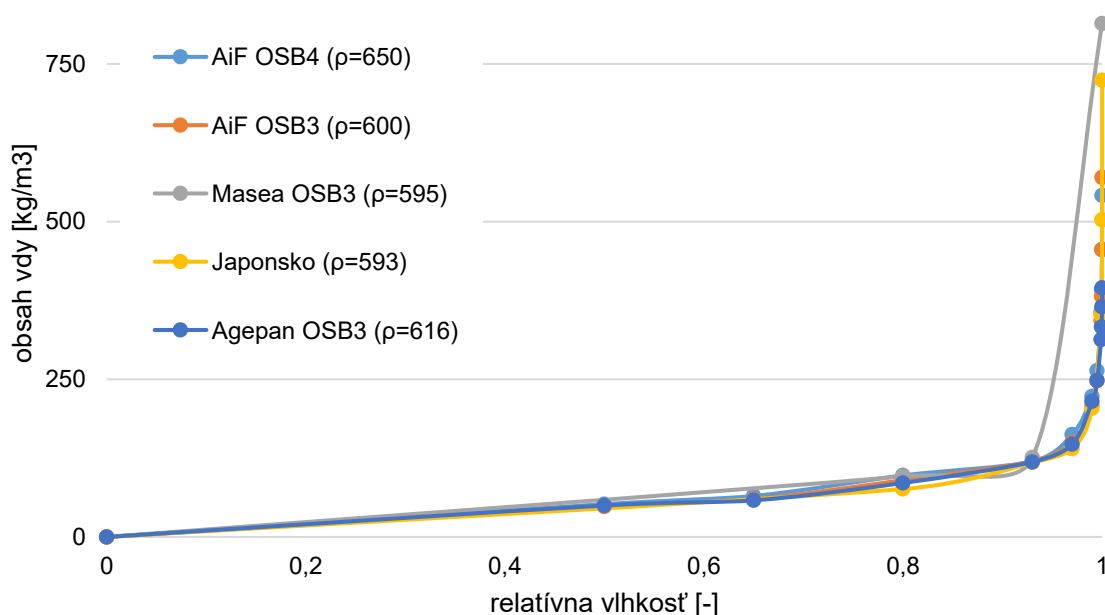
Podľa typov prostredia, v ktorom sa budú dosky používať sa rozdeľujú do piatich tried podľa normy EN 300: OSB 0 až OSB 4. Čím je prostredie, v ktorom majú byť dosky použité náročnejšie, tým je potrebná vyššia trieda. Trieda 4, najvyššia, by mala byť vhodná aj do vlhkých priestorov a prenášať vysoké zaťaženie. Vo všeobecnosti sa ale neodporúča používať dosky v exteriéroch, príklad možno nájsť na obr. 62.



Obr. 62: Príklad použitia OSB dosky v exteriéri s viditeľným účinkom vetrom hnaného dažďa zo západnej strany a počiatočnou degradáciou

Vlhkostné charakteristiky OSB dosiek sa líšia od rôznych výrobcov, nakoľko jej zloženie nie je homogénne, môže byť rozdiel v použitom type dreva, objemovej hmotnosti, lepidlách atď. Ako príklad rôznych sorpčných kriviek je graf na obr. 63. Tento graf ukazuje rozdiely v štyroch typoch OSB dosiek, ktoré sa nachádzajú v simulačnom programe WUFI, vyvinutom na Fraunhoferovom inštitúte pre stavebnú fyziku. Ide sa o najčastejšie používané typy, OSB 3 a 4. Pokiaľ by si človek prečítal popis jednotlivých dosiek, dozvie sa, že v dvoch prípadoch sú ich vlhkostné charakteristiky odvodené od rastlého dreva. Takisto s upozornením, že tieto vlastnosti sa môžu líšiť z dôvodu, že materiály na báze dreva sú prírodné a preto sa môžu ich vlastnosti spôsobené určitou neistotou líšiť $\pm 20\%$, čo je obrovské číslo, pokiaľ chceme analyzovať napríklad tvorbu hniloby v týchto prvkoch.

Sorpčné krivky rôznych OSB dosiek



Obr. 63: Sorpčné krivky pre rôzne druhy OSB dosiek ako sú uvedené v materiálovej databáze programu WUFI

Príklady použitia v už spomínaných plochých strechách sú na obr. 60 a 61, ktoré ukazujú totálnu degradáciu v krátkom čase po realizácii. Najčastejšie sa tieto dosky vyskytujú v plochých strechách vo forme plného záklopu na drevených stropniciach. Následne sa na túto nosnú konštrukciu realizuje tradičná skladba v zložení parozábrana, tepelná izolácia a povlaková krytina. Vzhľadom na momentálne preteky v energetickej hospodárnosti, v snahe dosiahnuť čo najvyšší tepelný odpor sa neskôr, možno v druhej fáze pri dokončovacích prácach realizuje ďalšia vrstva tepelnej izolácie z interiérovej strany medzi tieto stropnice. V tom najideálnejšom prípade sa použije ten v súčasnosti „najlepší“ materiál, striekaná polyuretánová pena [4].

Pridá sa ďalšia parozábrana z interiérovej strany podľa vzoru, z interiérovej strany je vždy potrebná parozábrana. Následne sa realizuje sadrokartónový podhľad a po prvotnom prejave tvorby mokrých miest na podhlade sa ako prvému ozve telefón strechárovi, že strecha, ktorú zhotovil tečie. Pri realizácii kontrolných meraní, či už ihlovou alebo iskrovou skúškou, prípadne impedančnou defektoskopiou zistí, že povlaková krytina je tesná, ale tepelná izolácia je mokrá.

Ďalšou možnosťou využitia OSB dosky je ako podklad pod samotnú povlakovú krytinu. Napríklad pri potrebe pochôdzneho povrchu, alebo v prípade že je ako tepelná izolácia použitá minerálna vlna. Takisto v prípade, že je tepelná izolácia vložená iba medzi stropnice a nie aj nad ne (obr. 64). Výsledok je rovnaký ako v prvom prípade, totálna degradácia OSB dosky v krátkom čase a pri kontrole strechy prichádza k prepadnutiu (obr. 66).



Obr. 64: Striekaná polyuretánová pena medzi stropnicami a nosná konštrukcia SDK podhľadu po demontáži (foto P. Krajčovič)



Obr. 65: Pohľad na OSB dosku ako plný záklop na stropniciach a degradačný proces spôsobený parozábranou medzi vrstvami tepelnej izolácie nad a pod doskou



Obr. 66: OSB doska ako podklad pod povlakovú krytinu a jej degradácia spôsobená tvorbou kondenzátu a orosovaním pod mPVC fóliou (foto P. Krajčovič)

Prípadová štúdia – rodinný dom

Rodinný dom začal vykazovať defekty v krátkom čase po dokončení. Po realizácii povlakovej krytiny bola vykonaná zátopová skúška s výsledkom bez zatekania (obr. 67). Povlaková krytina bola priťažaná kamenivom, tzn. po začatí objavovania defektov sa ako obvyčajne muselo odstrániť kamenivo a hľadať potencionálna perforácia povlakovej krytiny. Keďže sa žiadna nenašla a fľaky v interiéri sa prejavovali stále častejšie, majiteľ sa rozhodol vyriešiť sanáciu strechy odstránením pôvodnej povlakovej krytiny a realizovať zastrešenie pultovými väzníkmi, takže nastal presun od plochej strechy k šikmej. Stavba bola skolaudovaná v roku 6/2017. S realizáciou väzníkov spolu s miestnym zisťovaním sa začalo v novembri toho istého roku keď sa po otvorení plochej strechy zistil havarijný stav OSB dosky (obr. 68). Vzhľadom na zmeny skladby v projekte a realizácii je grafické znázornenie skladieb, ktoré boli posudzované na obr. 69.

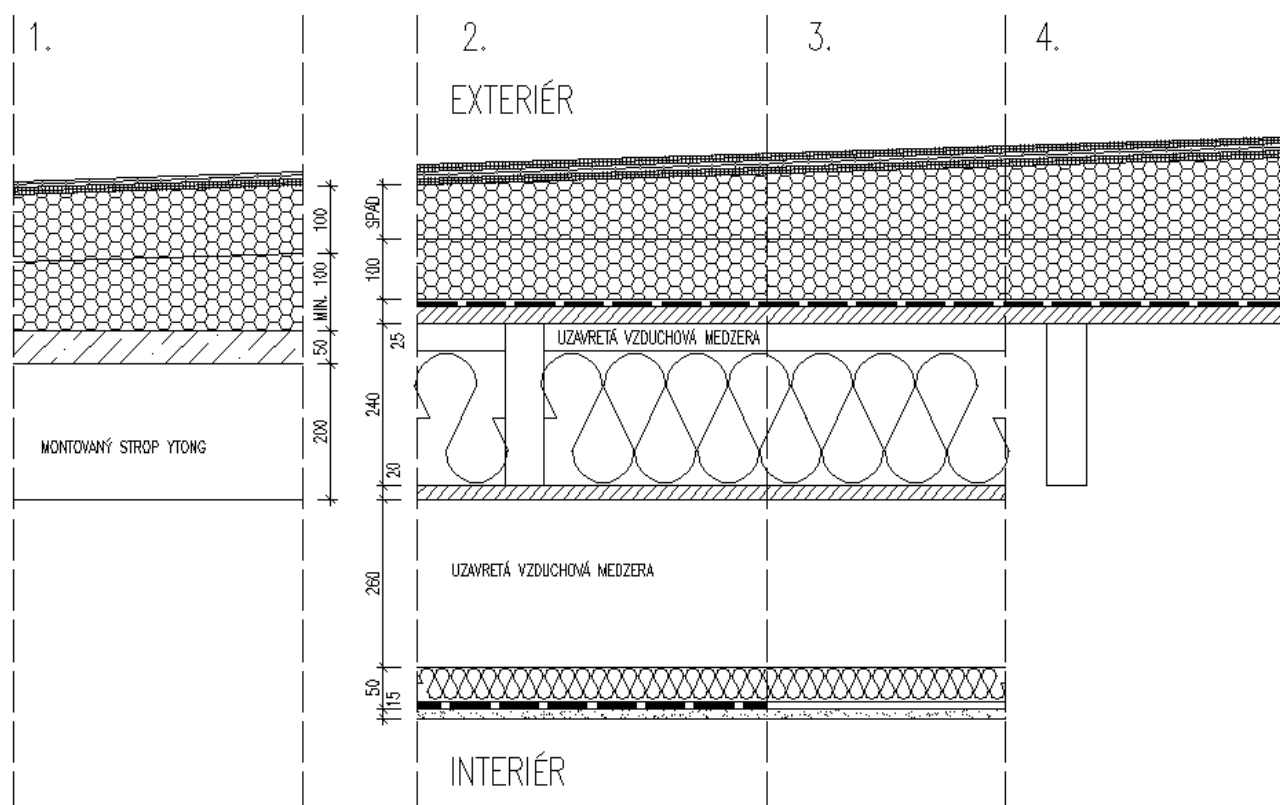


Obr. 67: Strecha pri realizácii zátopovej skúšky. Vpravo spodný záklop pred realizáciou zaveseného SDK podhľadu



Obr. 68: Prejavy kondenzácie v interiéri na podhlade a voľne rozoberateľný záklop z OSB dosiek

Projektová aj realizovaná skladba boli posúdené z hľadiska kondenzácie vodnej pary podľa platnej normy v programe Teplo z balíka Stavebná fyzika od Svoboda software [5]. Výsledky sú na obr. 70 a 71. Z nich je jasné, že pôvodnej projektovanej skladbe chýba parozábrana. V realizovanej skladbe je zase príčinou rozdelenie tepelnej izolácie na dve časti predelené parozbáranou. Tým sa práve spomínaná OSB doska dostala do nevetratej časti strechy, čo spôsobilo jej rýchlu degradáciu.



Obr. 69: Grafické znázornenie rozdielu medzi projektovanou a realizovanou skladbou

Skladba konštrukcie (od interiéru)

č.	Názov materiálu	d(m)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\lambda W/(\text{m.K})$	$cJ/(\text{kg.K})$	μ
1	Stropný systém YTONG Ekonom	0,200	500	0,15	1000	7
2	Betónová zálievka	0.050	2300	1,43	1020	23
3	Tvrdený polystyrén	0,1	25	0.035	1270	30
4	Tvrdený polystyrén v spáde	0,1	25	0.035	1270	30
5	Geotextília					
6	Strešná fólia - mPVC	0.0015	1313	0.35	1470	24000

Ročná bilancia vlhkosti

Veličina			Jednotka
Množstvo skondenzovanej vodnej pary	Mc:	0,2416	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Množstvo vyparenej vodnej pary	Mev:	0,1547	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Maximálne prípustné množstvo	Mc.max:	0.1	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Posúdenie		NEVYHOVUJE	

Obr. 70: Výsledky posúdenia projektovanej skladby sú nevyhovujúce pre absenciu parozábrany v skladbe

Skladba konštrukcie (od interiéru)

č.	Názov materiálu	d(m)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\lambda W/(\text{m.K})$	$cJ/(\text{kg.K})$	μ
1	Sadrokartón	0,0125	750	0,22	1060	9
2	PE Fólia	0.0001	900	0,35	1470	5000
3	Minerálna vlna	0,05	100	0.041	950	2
4	Uzavretá vzduchová medzera	0,26	1.2	1.765	1010	0
5	OSB doska	0.025	650	0.13	1700	50
6	Minerálna vlna	0,05	100	0.041	950	2
7	Uzavretá vzduchová medzera	0,04	1.2	0.294	1010	0.2
8	OSB doska	0.025	650	0.13	1700	50
9	Fóliová parozábrana	0.0001	900	0,35	1470	50000
10	EPS polystyrén	0.2	25	0.035	1270	30
11	Strešná fólia - mPVC	0.0015	1313	0.35	1470	24000

Ročná bilancia vlhkosti

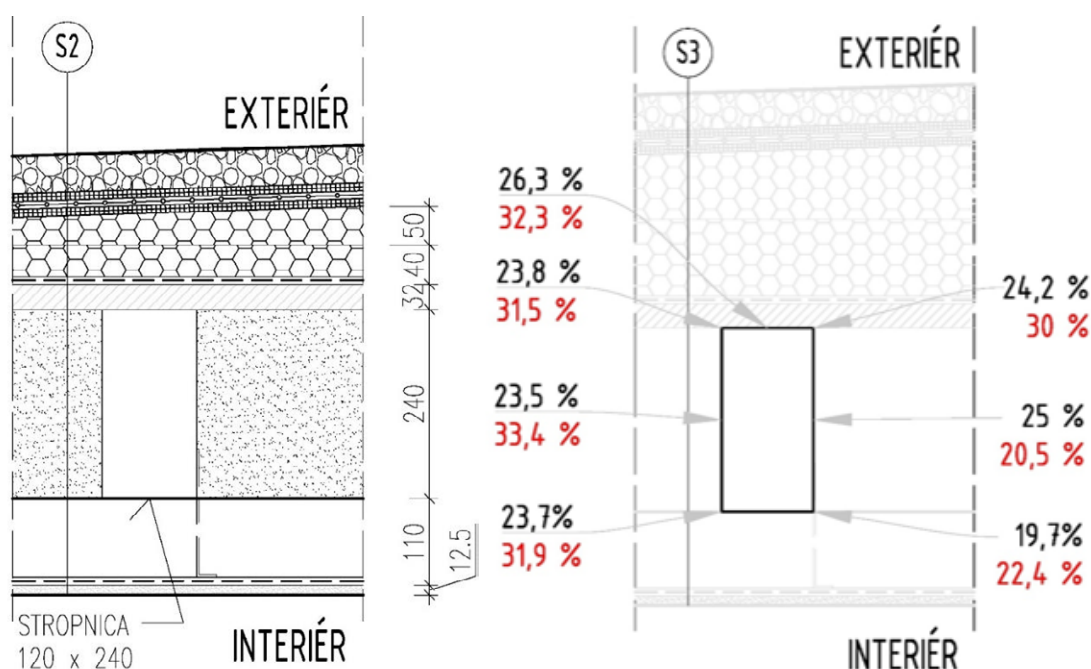
Veličina			Jednotka
Množstvo skondenzovanej vodnej pary	Mc:	0,2293	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Množstvo vyparenej vodnej pary	Mev:	0,0765	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Maximálne prípustné množstvo	Mc.max:	0.1	$\text{kg/m}^2\text{a}$
Posúdenie		NEVYHOVUJE	

Obr. 71: Výsledky posúdenia realizovanej skladby sú nevyhovujúce pre použitie viacerých parozábran, ktoré znemožňujú odparovanie kondenzátu

Výsledkom nesprávneho návrhu aj realizácie sú v tomto prípade rodinného domu jasné a skončili sa zmenou strechy na strechu šikmú pre zamedzenie ďalších prejavov vlhkostných porúch a degradácii dreva.

Prípadová štúdia – bytový dom

Strecha sa nachádza na novostavbách niekoľkých bytov v rámci novej bytovej zóny. Vzhľadom na sťažnosti obyvateľov bytov na zatekanie strechy v krátkej dobe po nastťahovaní sa do bytov, bol realizátorom stavby objednaný súdnoznalecký posudok. Skladba zhotovenej strechy je na obr. 72. Na stavbe bola realizovaná obhliadka, sondy pre zistenie skutočnej skladby a gravimetrické meranie vlhkosti v skladbe. Ako je zrejmé z výsledkov gravimetrického merania (tab. 6), bol zistený veľmi vysoký obsah vody v striekanej tepelnej izolácii, OSB doske a takisto v stropnici (obr. 72). Z tepelnej izolácie odkvapkávala voda a cez preložené spoje spodnej parozábrany pretekala do interiéru a bola chybne považovaná za netesnú strechu. Tento vysoký obsah vody má v tepelných izoláciách degradačný vplyv na ich tepelno-technické vlastnosti a takisto aj na životnosť. Po určitom čase, ktorý je závislý od okrajových podmienok vonkajšieho a vnútorného prostredia, a takisto od podmienok pri zabudovaní do strechy (napríklad mokré drevo nemá možnosť vyschnúť a začne podliehať hnilobe), začne degradačný proces ako je viditeľný na obr. 73 a postupom času nadobúda rozmery totálnej degradácie a rozpadu OSB dosky na obr. 74. Následkom kondenzácie vodnej pary bola OSB doska rôzne degradovaná (boli realizované tri sondy na troch rôznych domoch v rámci súboru).



Obr. 72: Skladba plochej strechy s dvomi parozábranami a zabudovanou OSB doskou v strede skladby slúžila ako podklad pre posúdenie v programe Teplo a vpravo s nameranými hmotnostnými vlhkosťami dvomi prístrojmi v rovnakých miestach



Obr. 73: OSB doska umiestnená pod parozábranou v rámci plochej strechy zachytáva kondenzáciu na spodnom povrchu, v krátkom čase začne zväčšovať svoj objem a degradovať hnilobou



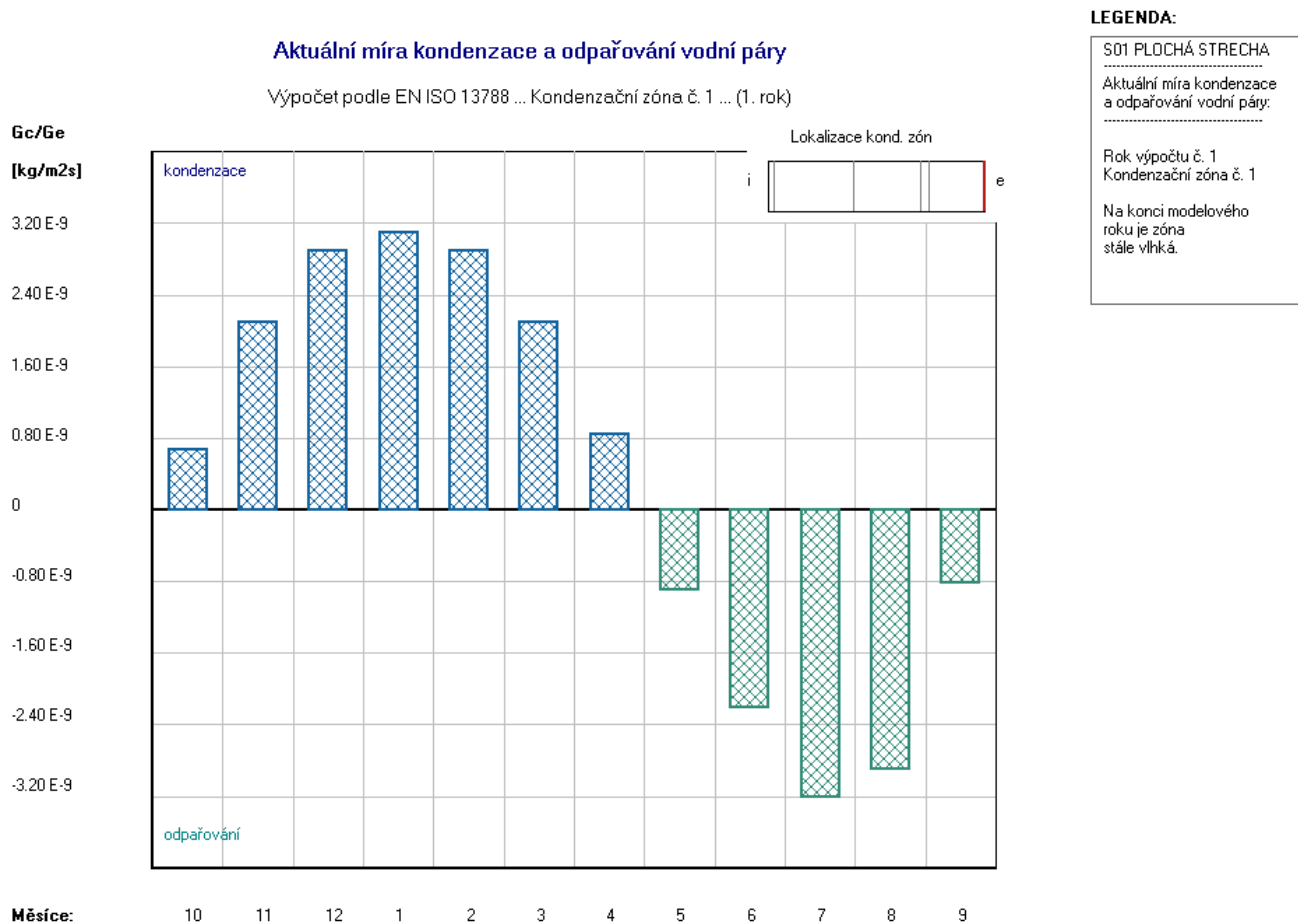
Obr. 74: OSB doska umiestnená pod parozábranou v rámci plochej strechy, konečné štádium jej rozpadu, pri odbere vzorky sa rozpadáva na jednotlivé kusy

Materiál	Hmotnostná vlhkosť [%]
Štrk	-
geotextília	-
mPVC hydroizolácia Fatrafol 810 hr. 1,5 mm	-
geotextília	45,9
tepelná izolácia v spáde, EPS polystyrén hr. 110	18,9
tepelná izolácia, EPS polystyrén hr. 100	1,1
parozábrana, PE fólia	-
OSB doska hr. 32	40,25
tepelná izolácia striekaná PUR pena hr. 240	380
Uzavretá vzduchová medzera hr. 110	-
Parozábrana, fólia s výstužnou sieťkou	-
Protipožiarny SDK hr. 12,5	14,1

Tab. 6: Výsledky merania hmotnostných vlhkostí v predmetnej streche

V rámci platnej Slovenskej technickej normy je potrebné každý fragment obalového plášťa budovy posúdiť nie len z hľadiska súčiniteľa prechodu tepla U , minimálnej povrchovej teploty ale takisto aj na kondenzáciu vodnej pary. Podrobnejšie je to opísané v čl. 6 [6]. Pokiaľ by mohla kondenzácia vodnej pary ohroziť požadovanú funkciu konštrukcie tak je kondenzácia neprípustná ($M_c = 0$), Pokiaľ kondenzácia neohrozuje požadovanú funkciu konštrukcie, je možné uvažovať s obmedzenou kondenzáciou, pre jednoplášťové strechy je to menej ako $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, tzn. 1 deciliter vody na štvorcový meter za rok. Pre ostatné konštrukcie je to päťkrát viac (0,5). Vo všetkých prípadoch musí byť celoročná bilancia skondenzovanej a vyparenej vodnej pary aktívna, tzn. postupom času nemôže dôjsť k akumulácii vody v konštrukciu ale je možná iba praktická amplitúda vlhkosti v rámci ročného chodu. Posúdenie týchto kritérií sa realizuje podľa STN EN ISO 13788 alebo podľa prílohy B normy 730540-2.

Posúdenie podľa normy STN EN ISO 13788 je podrobnejšie, nakoľko sa počíta s mesačnou metodikou pre jednotlivé mesiace, uvažuje však s vyššími teplotami vonkajšieho vzduchu. Takýto výpočet ukazuje, či je v rámci modelového roku možné, že sa akumulovaná vlhkosť dokáže vypariť. Pokiaľ nie, skladba zostáva vlhká a je nevhodná, pretože nespĺňa požiadavku normy, príklad výsledku výpočtu posudzovanej skladby z tohto prípadu je na obr. 75. V rámci porovnania obidvoch výpočtových metodík je možné, že v jednej metodike sa skladba ukazuje ako dobrá a v druhej zlá. Väčšina projektantov robí bilanciu podľa prílohy B, aj keď používané programy umožňujú výber, prípadne zvoliť horšiu možnosť aby bol výpočet na strane bezpečnosti.



Obr. 75: Výsledek výpočtu bilancie vodnej pary mesačnou metódou v programe Teplo 2017. V zimnom období vodná para v skladbe kondenzuje, v letnom sa odparuje. Ročná bilancia je záporná, strecha sa nevysuší

Príklad výpočtu v programe Teplo 2017

Skladba prípadovej štúdie spolu s uvažovanými materiálovými parametrami je v tab. 7 a graficky znázornená na obr. 72. Táto skladba bola výpočtovo overená s rôznymi okrajovými podmienkami a to v ideálnom stave (stav bez zohľadnenia vlhkosti a možnej perforácie parozábran), s perforáciou spodnej parozábrany spôsobenej montážou podhľadu, perforáciou hornej parozábrany v dôsledku mechanického kotvenia, nepoužitia parozábrany (v strede konštrukcie alebo spodnej), použitie účinnejšej spodnej parozábrany ($s_a = 250$ m) a počiatkovej vlhkosti v konštrukcii (program umožňuje počítat s redistribúciou vlhkosti). Posledná možnosť je zjednodušená a nie je presná ako pri simulačných nástrojoch (napríklad spomínaný program WUFI), nakoľko program neobsahuje dostatok materiálových parametrov pre tento výpočet. Keďže ako spádová vrstva je použitý EPS polystyrén, posúdenie bolo realizované pre dve miesta, prvé s výškou spádovej vrstvy v danom mieste 40 mm a druhé miesto s výškou polystyrénu 140 mm.

Výsledky výpočtu jednotlivých variant sú zosumarizované v tab. 7 a 8 (rozdiel v hrúbke hornej tepelnej izolácie). Ako je vidno, väčšina variantov vychádza priaznivo, resp. spĺňajú normové požiadavky. V posúdení podľa prílohy B majú všetky varianty aktívnu (kladnú) ročnú bilanciu. Problémom týchto skladieb však nie je iba možnosť kondenzácie, ale už samotné zabudovanie drevených prvkov do nevetranej skladby. V rámci každej konštrukcie, ktorá tvorí prekážku medzi vonkajším a vnútorným prostredím s rôznymi okrajovými podmienkami (teplota, relatívna vlhkosť vzduchu resp. tlak vodnej pary) dochádza k difúzii vodnej pary. Keďže tieto zjednodušené normové postupy založené na Glaserovej metóde pracujú so stacionárnymi okrajovými podmienkami, neberú do úvahy zmenu týchto podmienok v rámci dňa (denné chody teploty a vlhkosti) na rozdiel do simulačných programov.

Číslo	Názov vrstvy	Hrúbka d [m]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W/mK]	Faktor difúzneho odporu μ [-]
1	Knauf Diamant	0,0125	0,270	17,0
2	Isocell Airstop Vap parozábrana	0,0002	0,350	600000,0
3	Uzavřená vzduch. dutina	0,120	0,750	0,08
4	Striekaný Polyuretan pěnový	0,250	0,025	72,5
5	OSB desky	0,032	0,130	50,0
6	Fatrapar P druh 21	0,0002	0,300	500000,0
7	Isover EPS 150 spádová vrstva	0,040	0,035	50,0
8	Isover EPS 150	0,050	0,035	50,0
9	Fatrafol 810	0,0015	0,350	24000,0

Tab. 7: Skladba posudzovanej plochej strechy s materiálovými parametrami

Variant PUR hr. 250 + EPS hr. 90 U = 0,077 W/(m ² .K)	Kondenzácia vodnej pary v konštrukcií				
	STN 73 0540-2, príloha B			STN EN ISO 13788	
	M,c	M,ev	Záver	M,c	Bilancia
Základná skladba	0,0398	0,1042	vyhovuje	0,0655	vlhká
Zvýšená vlhkosť v interiéri	0,0398	0,1042	vyhovuje	0,1057	vlhká
Bez strednej parozábrany	0,0493	0,1069	vyhovuje	0,0743	vlhká
Bez spodnej parozábrany	0,0448	0,1134	vyhovuje	0,0734	vlhká
Perforovaná spodná parozábrana	0,0441	0,1120	vyhovuje	0,0723	vlhká
Perforovaná stredná parozábrana	0,0488	0,1063	vyhovuje	0,0734	vlhká
Účinnejšia spodná parozábrana	0,0008	0,0245	vyhovuje	0,0006	suchá
Zabudovaná vlhkosť 0,5 kg/m ² v OSB doske	0,0398	0,1042	vyhovuje	0,5654	vlhká

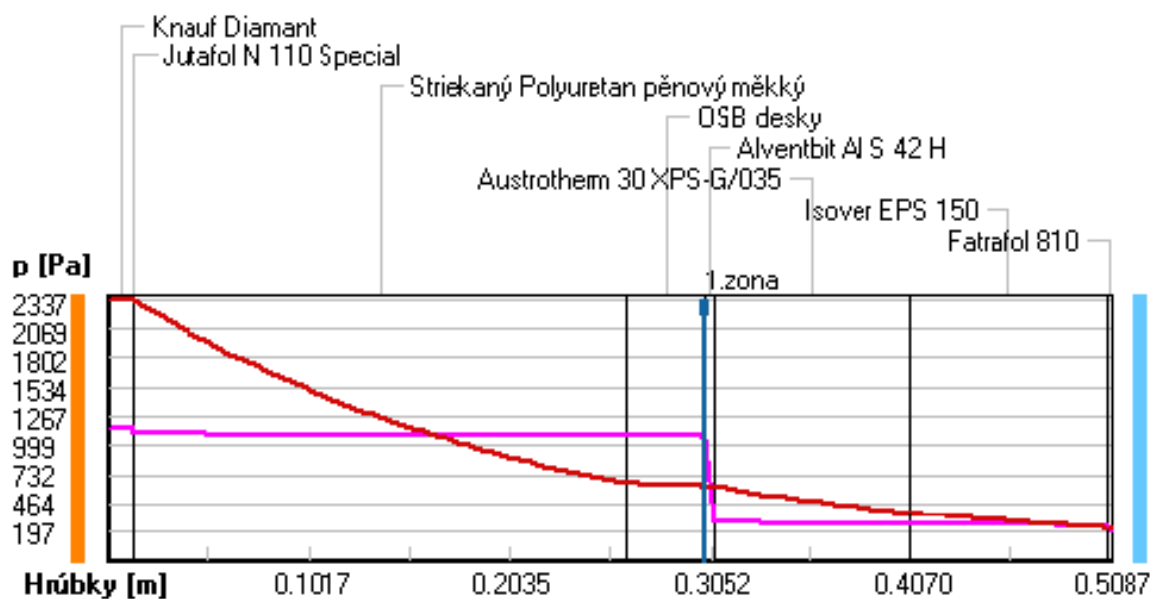
Tab. 8: Výsledky variantného riešenia skladby z hľadiska splnenia normových požiadaviek na kondenzáciu vodnej pary

Pre zjednodušené pochopenie, vzduch obsahuje určité množstvo vodnej pary pri danej teplote a relatívnej vlhkosti. Keďže teplota vo vnútri konštrukcie smerom do exteriéru klesá, v určitom mieste dôjde k prenutiu krivky tlaku vodnej pary a nasýtenej vodnej pary a v tomto mieste dôjde ku kondenzácii. Obyčajne sa takéto posúdenie robí pre vonkajšiu návrhovú teplotu vzduchu. V rámci výuky predmetu stavebná tepelná technika sa takýto príklad rieši ručne už veľmi dávno. Tento príklad je na obr. 76. V rámci toho je možno vidieť vznik dvoch kondenzačných zón, prvá je pod strednou parozábranou, na OSB doske a druhá pod povlakovou krytinou.

Variant PUR hr. 250 + EPS hr. 190 U = 0,063 W/(m².K)	Kondenzácia vodnej pary v konštrukcií				
	STN 73 0540-2, príloha B			STN EN ISO 13788	
	M, c	M, ev	Záver	M, c	Bilancia
Základná skladba	0,0209	0,0592	vyhovuje	0,0344	suchá
Zvýšená vlhkosť v interiéri	0,0209	0,0592	vyhovuje	0,0728	vlhká
Bez strednej parozábrany	0,0396	0,0966	vyhovuje	0,0603	vlhká
Bez spodnej parozábrany	0,0237	0,0600	vyhovuje	0,0389	suchá
Perforovaná spodná parozábrana	0,0233	0,0599	vyhovuje	0,0383	suchá
Perforovaná stredná parozábrana	0,0392	0,0961	vyhovuje	0,0596	vlhká
Účinnejšia spodná parozábrana	0,0006	0,0534	vyhovuje	0,0001	suchá
Zabudovaná vlhkosť 0,5 kg/m² v OSB doske	0,0209	0,0592	vyhovuje	0,5344	vlhká

Tab. 9: Výsledky variantného riešenia skladby z hľadiska splnenia normových požiadaviek na kondenzáciu vodnej pary pri väčšej hrúbke tepelnej izolácie nad OSB doskou

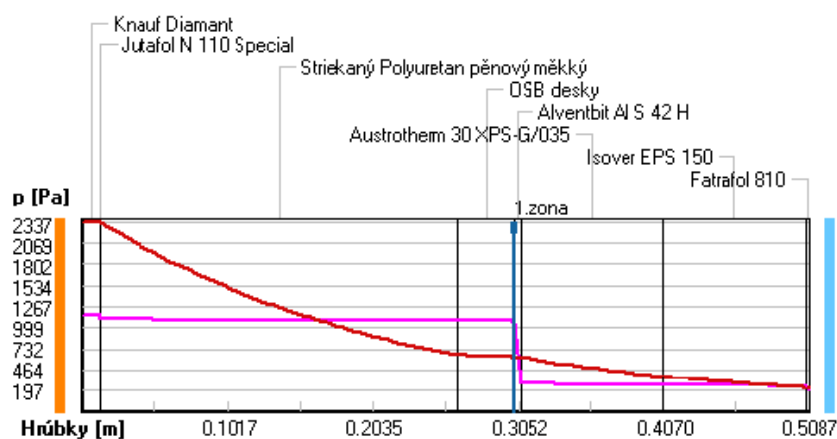
Čiast. tlaky vodnej pary v typickom mieste konštrukcie v ustál. návrh. podmienkach



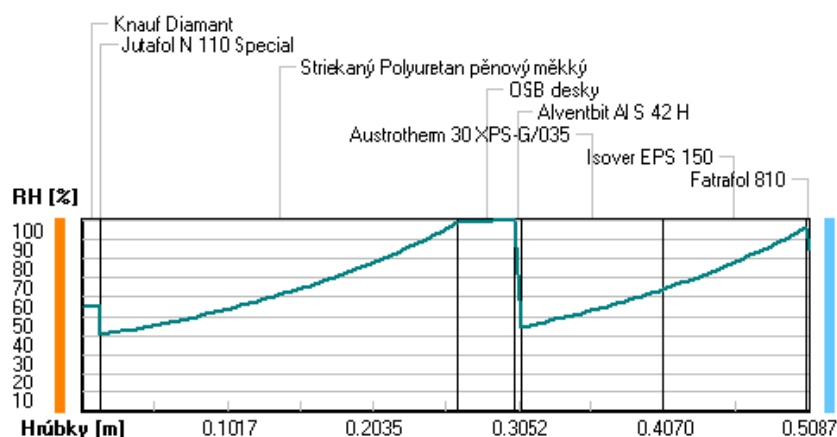
76: Graf znázorňujúci priebeh parciálnych tlakov vodnej pary a nasýtenej vodnej pary v konštrukcii

Problémom je však, že v konštrukcii sa nachádza aj vodná para, ktorá nie je skondezovaná, ale ovplyvňuje jednotlivé materiály podľa ich sorpčnej krivky. To znamená, že ak je napríklad v mieste OSB dosky relatívna vlhkosť 80 %, podľa sorpčnej krivky OSB dosky (obr. 63), zodpovedá tomu obsah vody okolo 90 kg /m³. Pri objemovej hmotnosti 600 kg/m³, je to hmotnostná vlhkosť na úrovni 15 %, čo sa už považuje za nadpriemerne vysoký obsah vody podľa klasifikácie [6]. Samozrejme, dosiahnutie rovnováhy obsahu vody vo vzduchu a v samotnom materiáli je dlhodobější proces, ale napríklad zimné obdobie je na to dostatočne dlhé. Príklad rozloženia relatívnej vlhkosti v tejto skladbe je na obr. 77.

Čiast. tlaky vodnej pary v typickom mieste konštrukcie v ustál. návrh. podmienkach



Rel. vlhkosti v typickom mieste konštrukcie v ustál. návrh. podmienkach



Obr. 77: Graf znázorňujúci priebeh relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukcii v nadväznosti na vrstvy s vysokým difúznym odporom: parozábrana a povlaková krytina

Možno práve z dôvodu, že sa čoraz častejšie začínajú vyskytovať takéto strechy došlo v aktualizácii programu Teplo k pridaniu zaujímavej možnosti, ktorá sa práve týka posúdenia možnosti degradácie drevených materiálov (hniloba) alebo kovových (korózia) vplyvom umiestnenia týchto materiálov do zóny s vysokou relatívnou vlhkosťou. Toto posúdenie je realizované vo forme počtu dní z modelového roka (rovnaký ako vo výpočte podľa STN EN ISO 13 788), počas ktorých sa daný materiál nachádza v určitej zóne. Pre riešený modelový príklad je vyhodnotenie v tab. 10.

Číslo	Názov	pod 60%	60–70%	70–80%	80–90%	nad 90%
1	Knauf Diamant	182	121	62	---	---
2	Isocell Airsto	182	121	62	---	---
3	Vzduchová dutina	273	92	---	---	---
4	Striekaný Poly	---	---	153	31	181
5	OSB desky	---	---	153	31	181
6	Fatrapar P dru	---	---	153	31	181
7	Isover EPS 150	---	92	212	61	---
8	Isover EPS 150	---	62	91	61	151
9	Fatrafol 810	---	62	91	61	151

Tab. 10: Rozmedzie relatívnych vlhkostí v jednotlivých materiáloch pre ročný cyklus a počet príslušných dní

Z tejto tabuľky je jasné napríklad, OSB doska vo svojej polohe v tejto streche je viac ako polovicu roka v zóne nad 90 % relatívnej vlhkosti. Keďže OSB doska pozostáva z hoblín zlepených lepidlom, tieto hobliny ako organický materiál vplyvom vlhkosti zväčšujú svoj objem a neskôr pri vysušovaní ho zase zmenšujú a následne sa začne OSB doska pri takomto cyklickom striedaní, prípadne pri dlhodobej vysokej vlhkosti (ide sa o 20–25 % hmotnostnej vlhkosti) rozpadáť. Navyše, v tejto zóne vysokej relatívnej vlhkosti sa nachádzajú aj samotné stropnice, ktorých minimálne horná časť je rovnako namáhaná.

Preto sa z hľadiska životnosti dá považovať ponúknuté hodnotenie programu aj s odkazom na českú normu ČSN 730540-2/Z1, ktorá predpisuje maximálnu hmotnostnú vlhkosť dreva na úrovni 18 %, za výborné. Z uvedeného posúdenia je teda zrejmé, že navrhnutá skladba fungovať nebude. Pokiaľ sa jedná o variantné riešenia (tab. 8 a 9), počet dní sa v niektorých prípadoch ešte zhoršil, až napríklad na celý rok nad 80% pri OSB doske. Zlepšenie nebolo viditeľné pri žiadnom z variantov, ani pri účinnejšej spodnej parozábrane.

Prípadová štúdia – rodinný dom

Rodinný dom začal vykazovať defekty v krátkom čase po dokončení. Prvý vlhký fľak sa na SDK podhlade objavil tesne pred nasťahovaním majiteľa po kúpe novostavby. Po prieskumnom otvorení skladby a odstránení tepelnej izolácie sa majiteľovi naskytl pohľad na obr. 78.



Obr. 78: Pohľad na OSB dosku záklopu kompletne pokrytú hubami a znateľne mokrú stužujúcu fošňu

Samotný dom bol realizovaný v rokoch 2018–2019, kolaudačné rozhodnutie je z novembra 2019. Následne sa v auguste 2020 počas procesu kupovania domu objavil spomínaný fľak. V tomto prípade teda možno degradačný čas v podstate v neobývanom dome zhodnotiť do jedného roka. Ako býva u nás zvykom a takisto sa stalo aj v predchádzajúcich analyzovaných prípadoch, projektovaná a realizovaná skladba sa odlišujú. Takisto ako v predchádzajúcich prípadoch, obidve skladby sú čo sa týka návrhu chybné. Porovnanie obidvoch skladiel je na obr. 79.

Projektovaná skladba je prevzatá doslovne z realizačného projektu, takže ak niekomu udrie do očí hydroizolácia na OSB doske hr. 12 mm, tak to nie je preklep. Navyše, drevené stropnice sú v osovej vzdialenosti 1000 mm. Realizovaná skladba je čo sa týka nedostatkov na tom podobne, či už použitím paropriepustnej, difúznej fólie pod geotíliou alebo OSB doskou hr. 15 mm. Takáto hrúbka dosky pri osovej vzdialenosti stropníc má samotná priehyb. Počas obhliadky bol nameraný v strede rozpätia cca 20 mm (obr. 80).

S1 a ST1 - Skladba plochej strechy	Realizovaná strecha
- FATRAFOL 810 HR.	- Bauder Thermofol M15
- GEOTEXTÍLIA 500g/m ²	- GEOTEXTÍLIA
- TEPELNÁ IZOLÁCIA EXTR. POLYSTYRÉN, hr. 100 mm	- PAROPRIEPUSTNÁ FÓLIA
- HYDROIZOLÁCIA	- OSB doska, hr. 15 mm
- OSB DOSKA P+D, hr. 12 mm	- VZDUCHOVÁ MEDZERA, hr. 90
KROKVY 200 x 100	- TEPELNÁ IZOLÁCIA, MINERÁLNA VLNA, hr. 150 mm,
- PAROPRIEPUSTNÁ FÓLIA	- VZDUCHOVÁ MEDZERA
- ISOVER UNIROL hr. 250 mm	TEPELNÁ IZOLÁCIA, MINERÁLNA VLNA, hr. 250 mm,
- PAROZÁBRANA	NOSNÁ KONŠTRUKCIA PRE SDK
- VZDUCHOVÁ MEDZERA PRE SDK, hr. 25	- PAROZÁBRANA, FÓLIA S VÝSTUŽNOU SIEŤKOU
SADROKARTON, hr.12,5mm –	- SDK HR. 12,5 mm

Obr. 79: Porovnanie skladby strechy z projektovej dokumentácie (vľavo) a realizovanej (vpravo)



Obr. 80: Trvalý priehyb degradovanej OSB dosky hr. 15 mm bol nameraný max. cca 20 mm. Vďaka tomu bolo zrejmé, kde sú stropnice a znížilo sa riziko prepadnutia počas pohybu po streche.

Pre zistenú skladbu a takisto pre projektové riešenie bolo vykonané jednoduché posúdenie podľa platných požiadaviek u nás v programe Teplo z balíka Svoboda software. Výsledky sú v tab. 11.

Konštrukcia strechy	tepelný odpor	súčiniteľ prechodu tepla	vnútorná povrchová teplota	kondenzácia vodnej pary v konštrukcií		Počet dní v roku s vlhkosťou v dreve nad 80 % rel. vlhkosti
	R_o ((m ² K)/W)	U_{max} (W/(m ² K))	θ_{si} (°C)	STN 73 0540-2	STN EN ISO 13788	
podľa projektu	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje	214 nevyhovuje
realizovaná skladba	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje	365 nevyhovuje
realizovaná skladba – perforácia parozábrany	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje	365 nevyhovuje

Tab. 11: Sumarizácia výsledkov z posúdenia jednotlivých skladieb

Z výsledkov je zrejmé, že pokiaľ sa kondenzácia nepočíta pre stacionárny stav a okrajové podmienky ale robí sa podľa európskej normy, kde sa počíta po jednotlivých mesiacoch ale pre priaznivejšie teploty tak je v rámci súčtovej bilancie záporná, tzn. skladba v rámci modelového roku nevyschne.

Dôležité je aj to čo bolo zdôraznené v štúdiu bytového domu a to je vyhodnotenie pre každú vrstvu, v ktorom pásme relatívnej vlhkosti sa počas roka nachádza najviac. V tomto prípade sa OSB doska nachádza v zóne nad 80 % relatívnej vlhkosti počas celého roka, čo je jasný degradačný ukazovateľ, ktorý nemôže prežiť. Je možno škoda, že takéto hodnotenie je skryté vo výslednom protokole o výpočte a nie je aj v hodnotiacom dialógu kde sa ukazujú iba normové kritériá.

Vzhľadom na stav dosky s výskytom drevokazných húb bola do posúdenia zapojená aj Mendelova univerzita v Brne, ktorá sa zaoberá drevom a drevenými konštrukciami. Výsledkom analýzy, ktorú realizoval Dr. Jan Baar [7], bolo prekvapivé zistenie, že sa jedná o drevokaznú hubu hnojník mrvový. K jej výskytu sa autor vyjadruje nasledovne:

Vzhľadom k druhu identifikovanej houby, ktorá není typickou drevokaznou houbou, není nutně dané, že by byla konstrukce její činností nějak výrazněji poškozena. Tato houba typicky roste na hnoji, kompostech, trávě a jiných rostlinných zbytcích, na místech bohatých na dusík, je tedy schopna poškozovat svou činností polysacharidickou složku rostlin i dřeva. Její růst na OSB deskách mohl být podpořen přítomností močoviny (látkou obsahující dusík) z močovino-formaldehydového lepidla, které se běžně používá pro lepení těchto desek.

Detail dosky s hubou a mikroskopický snímok je na obr. 81.



Obr. 81: Odoberatá vzorka huby pre zisťovanie druhu a výtrusy plodnice zisteného hnojníka, rozmer výtrusov $9,99\text{--}13,1 \times 6,1\text{--}8,1 \mu\text{m}$ [1]

Vzhľadom na stav konštrukcie aj po ôsmich mesiacoch od otvorenia a meraniu vlhkosti v jednotlivých prvkoch (stropnice 16–50 %, OSB dosky 12–20 %) bolo rozhodnutie o sanácii zrejmé a to formou kompletného odstránenie povlakovej krytiny, OSB dosiek a dôkladná kontrola stropníc. Fotky z opravy sú na obr. 82.

Aby sa neopakoval nedostatok zabudovania dreva do nevetranej skladby, nová skladba strešného plášťa bola navrhnutá výhradne nad záklopom, ktorý bol v tomto prípade realizovaný z klasických dosiek. Vhodnejšie riešenie s viditeľnými trámami v interiéri bolo majiteľom zamietnuté, takže sa znovu realizoval podhlád. Takáto výmena prináša dodatočné náklady, ako je napríklad nutnosť zvýšenia atiky, keďže nová skladba je nad záklopom navýšená o hrúbku tepelnej izolácie, ktorá sa dnes bežne pohybuje okolo 300 mm.



Obr. 82: Postupné otváranie strechy a realizácia nového záklopu ako podkladu pre novú skladbu strešného plášťa. Pôvodné stropnice boli dodatočne ohobľované pre odstránenie poškodených a napadnutých povrchov. Vpravo detail hniloby stropnice, ktorá zasiahla drevo do väčšej hĺbky.

Vzhľadom na prítomnosť na stavbe aj počas realizácie opravy, čo nebýva zvykom bolo možné podrobne preskúmať aj časti, kde človek bežne počas realizácie malých sond nemá prístup ako je napríklad riešenie a degradácie atiky, ktorá mala takisto nosnú konštrukciu z dreva a nebola tradične murovaná (obr. 83).



Obr. 83: Výrazná degradácia OSB dosiek a drevených hranolov zasiahla aj atiku, ktorá bola z nich vytvorená a podkladnú dosku pod oplechovanie atiky (doska je už otočená, jedná sa o jej pôvodne spodnú stranu)

Záver

Ako ukazuje táto kapitola, téma je stále živá a ešte sa u nás objaví určite mnoho striech s podobným problémom, či už sa jedná o celé developerské projekty v okolí Bratislavy, Trnavy alebo jednotlivé rodinné domy. Načrtnutý problém je rozšírený a podľa skúsenosti mnohých ľudí pôsobiacich v oblasti striech, narastá. Vzhľadom na nevhodný návrh celej skladby je jeho sanácia problematická a nevyhne sa podstatnej zmene skladby strechy vyžadujúcej komplexnej úpravy.

V rámci troch analyzovaných prípadov bola sanácia razantná rozobratím celých skladieb a buď zmenou strechy na šikmú s vetranou skladbou (prvý prípad) alebo realizovaním skladby iba s nadkrokovou izoláciou (tretí prípad), kedy je možné drevené prvky vetrať cez znížený podhľad od interiéru. V tomto prípade je tepelno-vlhkostný režim v tejto uzavretej vzduchovej dutine otáznym.

V druhom prípade došlo k sanácii strechy na niekoľkých domoch ale konečné riešenie je v ne-dohľadne z dôvodu súdneho sporu a likvidácii podieľajúcich sa firiem na výstavbe.

Takto navrhnutá strecha popiera princípy správneho návrhu z hľadiska stavebnej tepelnej techniky (správne radenie vrstiev z hľadiska difúzneho odporu) a takisto hľadiska použitia organického materiálu v skladbe, kde nemôže „dýchať“. Výsledkom je totálna degradácia materiálu v krátkom čase, ktorú môže ešte urýchliť napríklad realizácia strešného plášťa na mokré/vlhké OSB dosky, čím sa sťažuje ich vyschnutie. Takisto sa môže stav zhoršiť použitím striekaných polyuretánových pien, ktorých materiálové parametre závisia od aplikátora [4]. Aplikácia na vlhké povrchy spôsobuje ďalšie zhoršenie stavu a aj keď je v rozpore s technickými listami výrobcu, často sa tento fakt ignoruje. Posledným problémom býva etapa realizácie vnútorných omietok a následného vysychania. V tejto fáze je realizovaná buď iba skladba strechy nad OSB doskou, to znamená, že vďaka vysokej relatívnej vlhkosti v interiéri OSB doska ešte viac navlhne, alebo je už realizovaná striekaná izolácia, ktorá takisto navlhne.

Z hľadiska posúdenia životnosti, resp. funkčnosti je ponúkané nové vyhodnotenie programu z hľadiska rizika vzniku hniloby aj s odkazom na českú normu ČSN 730540-2/Z1, ktorá predpisuje maximálnu hmotnostnú vlhkosť dreva na úrovni 18 % výborné. Z uvedeného posúdenia je teda zrejmé, že navrhnutá skladba fungovať nebude, čo sa nakoniec ukázalo aj v praxi.

Preto je potrebné zdôrazniť, že navrhovanie takýchto skladieb nie je vhodné a vedie k vzniku defektov, následkom čoho je potrebné neskôr realizovať sanáciu strešného plášťa s kompletnou výmenou, v závislosti od doby exploatácie možno aj s výmenou samotných drevených stropníc.

Použitá literatúra

- [1] STN 73 1901. 2005. *Navrhovanie striech. Základné ustanovenia*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [2] KRAJČOVIČ, P. 2018. *Prednáška na Sympóziu Strechy 2018*. Sympózium Strechy 2018.
- [3] Dokument US000003164511A. *DEPATISnet*. Deutsches Patent- und Markenamt.
- [4] KESZEGH, M. 2019. Čo nevieme o striekaných PUR izoláciách. O čom realizátori striekaných PUR izolácií nehovoria. In: Zborník z 26. Bratislavského sympózia strechy 2019. Bratislava 19.–20. 11. 2019. ISBN 978-80-227-4958-9
- [5] SVOBODA SOFTWARE. 2017. *Teplo 2017.3* [software].
- [6] STN 730540-2 + Z1 + Z2: 2019 Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie
- [7] BAAR, J. 2021. *Znalecký posudek č. 146/2021 ve věci posouzení přítomnosti a identifikace dřevokazné houby ve střešní konstrukci rodinného domu*. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Zemědělská 3, 613 00 Brno

Kontakty

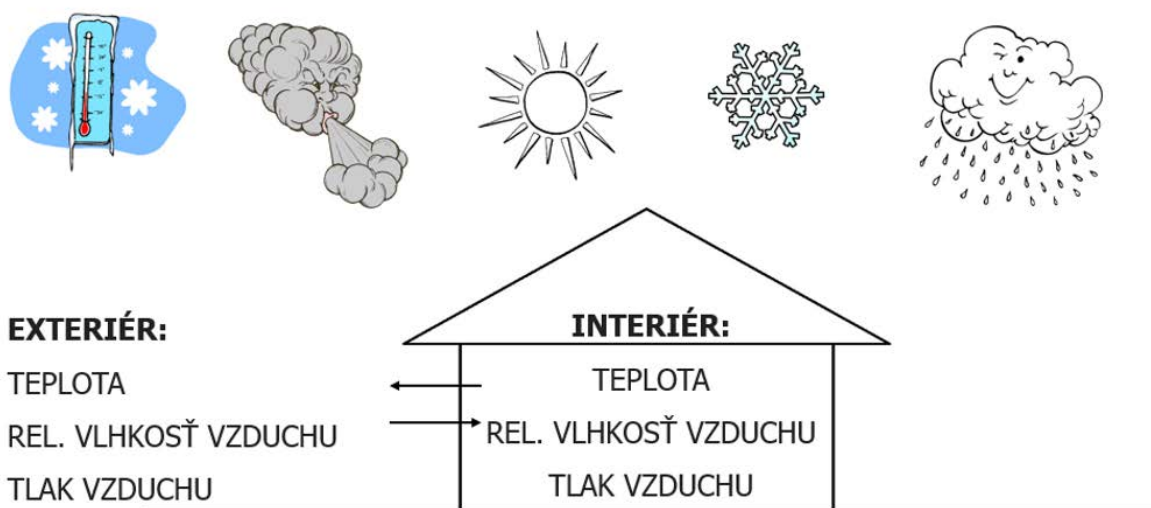
Ing. Peter Juráš, PhD.: peter.juras@uniza.sk

MERANIE VONKAJŠEJ KLÍMY V NADVÄZNOSTI NA POUŽITIE V STAVEBNÍCTVE

Ing. Peter Juráš, PhD.¹

¹ Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

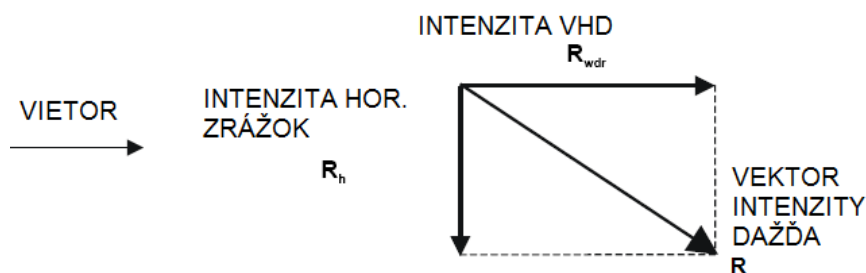
Obvodová stena je jednou z hlavných častí stavieb. Spolu so strešnou konštrukciou vytvára umeľé vnútorné prostredie budovy. Vnútorné prostredie je charakterizované tepelno-vlhkostným stavom, ktorý je rozdielny od tepelno-vlhkostného stavu vonkajšieho prostredia. Tepelno-vlhkostný stav prostredia (vonkajšieho aj vnútorného) je charakterizovaný teplotou, relatívnou vlhkosťou a tlakom vzduchu. Dôsledkom rozdielov medzi vnútorným a vonkajším prostredím je prenos tepla, vzduchu a vody v obalových konštrukciách. Tento prenos sa líši v priebehu rôznych ročných období a prevádzkových režimoch budovy. Charakteristickou vlastnosťou týchto javov je ich vzájomná spriahnutosť.



Obr. 84: Budova vytvárajúca chránené vnútorné prostredie a klimatické činitele, ktoré ho ovplyvňujú

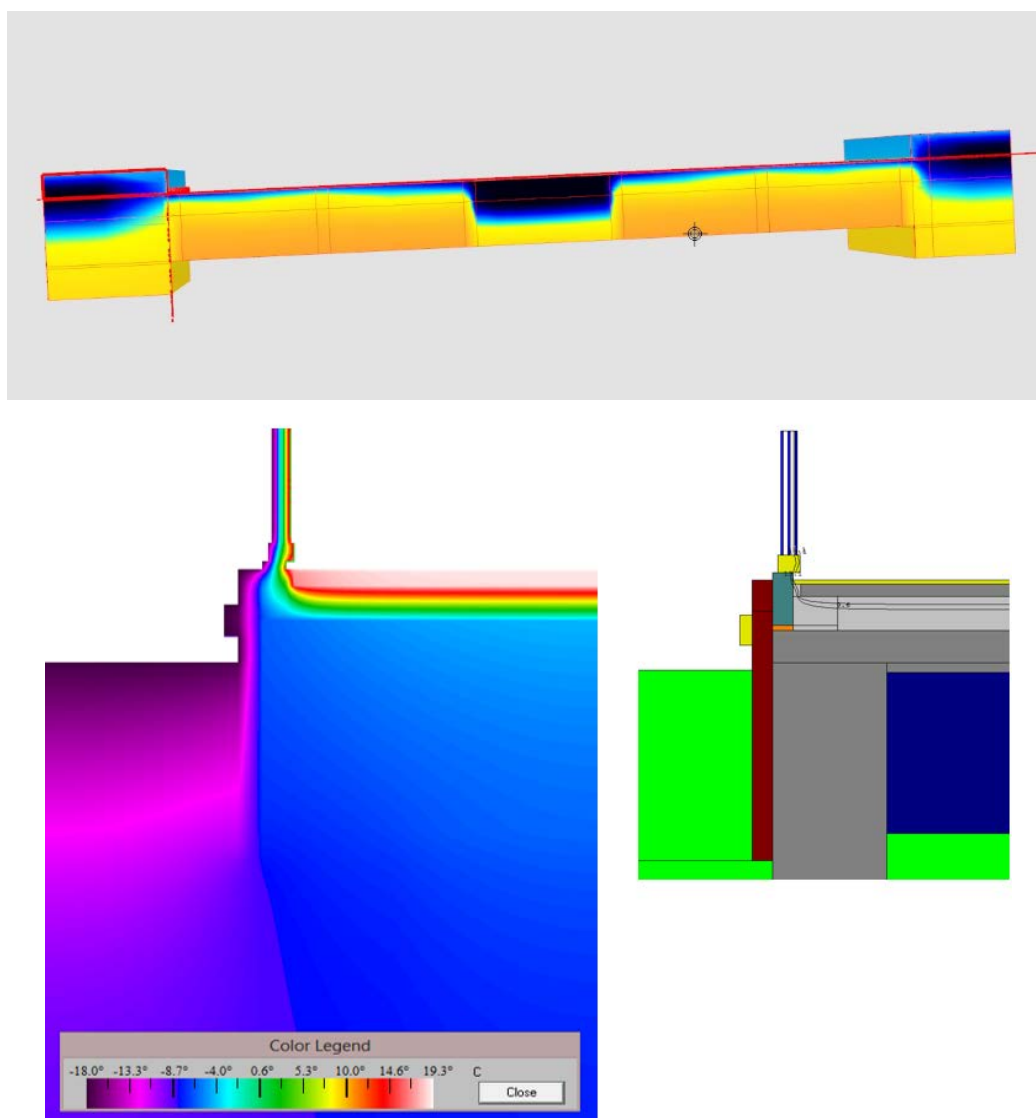
Pri rekonštrukciách a modernizáciách je dnes častým javom zateplovanie obvodových konštrukcií. Vyžaduje si to energetické aj ekologické hľadisko, keďže ceny energií a náklady na vykurovanie rastú každý rok. Spolu s nedostatočnou tepelnoizolačnou schopnosťou obvodových konštrukcií v rekonštruovaných budovách je častým problémom zvýšená vlhkosť v murive, ktorá môže byť spôsobená chýbajúcou, poškodenou alebo nefunkčnou hydroizoláciou, nevhodnou skladbou obvodového plášťa, nevhodne použitými materiálmi prípadne zmenou hydrogeologických pomerov.

Tepelno-vlhkostný režim obvodovej steny je do veľkej miery ovplyvnený vonkajšími poveternostnými podmienkami. Veľký vplyv na tento režim má u nechránených vonkajších konštrukcií vetrom hnaný dážď, ktorý vzniká pri súčasnom pôsobení vetra a dažďa a zaťažuje obvodové konštrukcie (obr. 85). Vetrom hnaný dážď je u nás v súčasnosti dosť zanedbaná problematika aj keď určité experimenty boli realizované už v 80-tych rokoch minulého storočia pre potreby navrhovania stykov panelových stavieb [1].



Obr. 85: Vektor intenzity dažďa a jeho rozklad na horizontálnu a vertikálnu zložku pri kombinovanom pôsobení vetra a dažďa [4].

Už desaťročia sa v oblasti projektovania a navrhovania konštrukcií uvažuje so zjednodušeným šírením tepla a vlhkosti v konštrukcii, ktorého ukážkou je stacionárny stav. To znamená, že okrajové podmienky, ktorým je konštrukcia vystavená sa nemenia (teplota a relatívna vlhkosť, ktorej zodpovedá tlak vodnej pary). Príkladom takéhoto riešenia sú bežné tepelnotechnické posúdenia konštrukcií pre splnenie požadovaných parametrov napr. podľa platnej normy STN 73 0540:2012 [2]. V tejto skupine programov sú napríklad programy z balíka Svodoba software pre jednorozmerné šírenie (Teplo) alebo dvojrozmerné (Area, Therm, KI real). Výsledkom je rozloženie teploty v konštrukcii (obr. 86) a posúdenie kondenzácie, či už pri návrhových teplotách alebo mesačnou metódou pre modelový rok, kedy sa berú do úvahy mesačné priemerné teploty vzduchu.



Obr. 86: Príklad rozloženia v nehomogénnych konštrukciách pri dvojrozmernom šírení tepla, hore program KI real a dole Therm. Stacionárne okrajové podmienky

So zvyšovaním vedeckého poznania sa dostávajú do popredia rôzne simulácie, ktoré dokážu reálnejšie ukázať, čo sa deje v konštrukciách, a tak sa vyhnúť rôznym poruchám na stavebných konštrukciách, pretože spolu s nástupom nových a modernejších materiálov dochádza paradoxne k vzrastaniu problémov na budovách. Tento jav je zapríčinený nasledujúcimi faktormi: používanie nedostatočne overených materiálov, nakoľko používanie materiálov v stavebníctve kladie vysoké nároky na životnosť, čo u nových materiálov ešte nie je overené ako sa budú správať po niekoľkých desaťročiach, druhým je vzájomná nekompatibilita medzi materiálmi ktorá sa môže prejavovať časom a je ťažké ju predpovedať pre prakticky neobmedzenú ponuku materiálov a tretím je celková komplexnosť budov a ich častí spojená s pracovnou disciplínou robotníkov pri zhotovovaní a údržbe počas životnosti.

Tvorbu simulačných programov môžeme zhruba rozdeliť na dva typy: programy na simuláciu spotreby energie a na riešenie prenosu tepla a vlhkosti. Programy na simuláciu spotreby energie v budovách (napr. ESP-r, vyvíjaný od roku 1974 na Glasgowskej univerzite alebo Energy Plus) riešia súčasný prenos tepla a vzduchu v rámci celej budovy, neskoršie verzie aj prenos vodnej pary cez konštrukcie. Väčšina simulačných programov umožňuje zahrnúť komplexné vonkajšie okrajové podmienky až na úrovni prúdenia vzduchu okolo budovy. Výsledkom týchto simulácií je ročný priebeh spotreby energie a parametrov vnútorného prostredia. Tieto programy sa však nedajú použiť na riešenie rôznych detailov a prenos vodnej pary a vzduchu v konštrukciách berú veľmi zjednodušene.

Na riešenie detailov a 1-rozmerného, prípadne 2-rozmerného prenosu tepla a vody cez konštrukcie (HAM) bolo vyvinutých tiež viacero simulačných programov (napr. WUFI, Delphin). Tieto programy dokážu zohľadniť okrem prenosu tepla a vody vo forme difúzie vodnej pary aj prenos vody vo forme kapilárneho transportu cez pórový systém. Vďaka tomu dokážu zohľadniť počiatočnú vlhkosť a následné vysychanie s priebehom času, prípadne navlhčenie pri nevhodnom návrhu skladby, okrajových podmienkach alebo vlastnostiach materiálov. Veľmi dôležitá vlastnosť je, že tieto programy sú schopné brať do úvahy vplyv vetrom hnaného dažďa.

V ďalšom období bolo cieľom vytvoriť komplexný simulačný nástroj na celú budovu (Annex 41), čo bolo možné dosiahnuť rozšírením programov na simuláciu spotreby energie o podrobnejší model tepelno-vlhkostného transportu v obvodovom plášti, rozšírením programov na simuláciu detailov alebo ich kombináciou. Výsledkom sú napríklad programy WUFI Plus, BSim alebo NPI.

Výsledkom Annexu 24 [3] bol koncept, ktorý by mal byť využívaný pri tepelno-vlhkostných simuláciách obvodového plášťa, pri stanovení vnútorných a vonkajších okrajových podmienok vo forme referenčných rokov. Podmienky na programy pre tepelno-vlhkostné simulácie a použité okrajové podmienky vo forme referenčných rokov vrátane vetrom hnaného dažďa udáva norma STN EN 15026:2007.

Rozvoj vedeckého poznania v oblasti stavebnej fyziky, aerodynamiky, osvetlenia a ďalších vedných odborov v teórii konštrukcií pozemných stavieb, spolu s presnejšími a zložitejšími simulačnými modelmi, prináša potrebu väčšieho rozsahu a častejších meraní vonkajšej klímy. V minulosti meteorologické služby merali vybrané klimatické veličiny jedenkrát denne, neskôr trikrát denne, využívané aj dnes pri mnohých stanicích (7:00, 14:00, 21:00). S nástupom automatických staníc sa zaviedol kratší interval a v súčasnosti teoreticky zapisujú všetky merané veličiny v minútových intervaloch, ktoré sa následne priemerujú podľa potreby. Napriek tomu je rozsah meraných veličín týchto meteorologických staníc patriacich Slovenskému hydrometeorologickému ústavu obmedzený. V základe merajú úhrn zrážok, teplotu a relatívnu vlhkosť vzduchu, rýchlosť a smer vetra.

Simulačné programy, zaoberajúce sa prenosom tepla a hmoty v stavebných konštrukciách a budovách používajú ako vonkajšie okrajové podmienky súbory klimatických dát vo forme referenčných rokov (v angličtine TRY- test reference year). Pre jednu lokalitu môže existovať viacero referenčných rokov, výber veličín závisí od účelu zostrojenia referenčného roku. Týmto účelom môže byť simulácia celoročnej spotreby energie, simulácie tepelno-vlhkostného režimu obvodových stien atď. V našich podmienkach sa slovom referenčný zvykne označovať rok, ktorý je priemerný, resp. sa na jeho vytvorenie používali rôzne korelačné a syntetické metódy, kedy sa vlastne extrémny vylučovali zo súboru a takto zhotovený rok vlastne nebol ani reálny, lebo napríklad každý mesiac, ktorý ho tvoril bol prevzatý z iného kalendárneho roku.

Táto metodika sa v súčasnosti už neaplikuje, resp. v menšej miere a napríklad práve pre simulácie transportu tepla a vlhkosti v konštrukcii je žiadúce použiť extrémny rok, tzv. návrhový (z angličtiny DRY – design reference year).

Pre praktické použitie by mal byť tento rok modifikovaný, tak aby štatisticky zohľadňoval všetky podstatné záťažové situácie, tzn. mal by to byť štatisticky najchladnejší a najteplejší rok z 10-ročného obdobia. Z bezpečnostných dôvodov by sa mali v budúcnosti v rámci tepelno-vlhkostných simulácií používať dva hygrotermické referenčné roky (HRY). Najteplejší rok slúži na posúdenie možnosti letnej kondenzácie a najnepriaznivejší na kondenzáciu v zime a určenie ďalších problémov ako navlhčenie atď. Percentuálne vyjadrené, HRY – 10 % je najchladnejší resp. najnepriaznivejší rok s 10 % pravdepodobnosťou (najchladnejší rok z obdobia desať rokov) a HRY – 90 % je najteplejší za 10-ročné obdobie (90 % rokov je chladnejších). Zároveň by mal tento referenčný rok obsahovať čo najviac reálne nameraných klimatických údajov [4].

Na Slovensku boli takéto klimatické referenčné roky (najchladnejšie za posledných 10 rokov) spracované len na báze denných hodnôt pre Bratislavu – Koliba a Žilinu – Dolný Hričov. V doterajšej inžinierskej praxi na Slovensku absentuje používanie dynamických simulačných metód. Referenčný (návrhový) rok by mal zodpovedať požiadavkám Európskej normy STN EN 15026:2009 [5].

Keďže simulačné metódy pracujú s nestacionárnym tepelným stavom, potrebujú mať nestacionárne vyjadrenú i vonkajšiu klímu s krátkym časovým krokom (zvyčajne 1 hodina) ako súčasť okrajových podmienok. Referenčný rok (ďalej len RR) v plnom rozsahu 365 dní (neskrátený) je tvorený 8760 údajmi pre každý klimatický činiteľ. Referenčný rok predstavuje súbor celoročných hodinových chodov uvažovaných veličín, zohľadňujúce náhodný charakter jednotlivých prvkov, osobitosti ale aj vzájomné vzťahy medzi jednotlivými veličinami.

Orograficky veľmi členitá prevažná časť územia Slovenska sa prejavuje v charaktere jeho podnebia, pre ktoré je typická veľká zmena v závislosti od nadmorskej výšky, šírková pásmovitosť a charakteristický denný a ročný režim meteorologických prvkov. Karpaty sa vyznačujú veľkou morfológickou diverzitou a pásmovitým usporiadaním. Zložité orografické podmienky ovplyvňujú bezprostredne výskyt a rozloženie jednotlivých meteorologických prvkov.

Výber meteorologických staníc, ktorých údaje sú využité pre vytvorenie RR musí spĺňať určité predpoklady. Medzi kritériá výberu patria: hodinové údaje, minimálny počet rokov 10 (podľa [3] treba uvažovať s periódou opakovania 10 rokov), dostatočne reprezentatívna poloha pre určitú oblasť a samozrejme meranie požadovaných klimatických činiteľov. Príklad údajov zo širšieho obdobia je v tab. 12.

Je potrebné zdôrazniť, že nie všetky meteorologické stanice majú rovnako rozsiahly pozorovací program. Preto sa napríklad súbor klimatických údajov dopĺňa medzi relevantnými stanicami, napr. pre meteorologickú stanicu Bratislava – Letisko sa dopĺňa globálne a difúzne žiarenia zo stanice Bratislava – Koliba. Medzi meranými údajmi chýbajú hodnoty vetrom hnaného dažďa, ktorý sa u nás štandardne nemeria na žiadnej meteorologickej stanici.

		1996	1997	1998	1999	2000	2004	2005	2008	2009	2010	2011	2012
Teplota vzduchu (°C)	priem.	8.6	10.0	10.9	10.8	11.8	10.5	10.3	11.7	11.2	9.5	10.6	10.9
	max.	32.1	32.7	35.2	33.9	37.4	32.3	35.0	32.8	34.4	34.6	34.8	36.2
	min.	-19.9	-13.6	-11.7	-10.2	-10.9	-14.1	-13.7	-7.9	-16.7	-13.8	-11.2	-16.7
Rel. vlhkosť vzduchu (%)	priem.	77	74	73	74	69	73	73	71	72	76	72	69
	max.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	min.	16	22	22	22	15	24	22	23	18	17	18	17
Úhrn zrážok (mm/m²)		513	477	520	558	521	528	534	582	587	1012	674	599

Tab. 12: Základné údaje o jednotlivých klimatických rokoch pre meteorologickú stanicu Bratislava - Letisko

Úplný referenčný rok pozostáva z hodinových klimatických údajov (pre každý klimatický prvok 8 760 hodinových údajov) pre dvanásť mesiacov, minimálne požiadavky na rozsah napr. pre simulačný program WUFI tvoria:

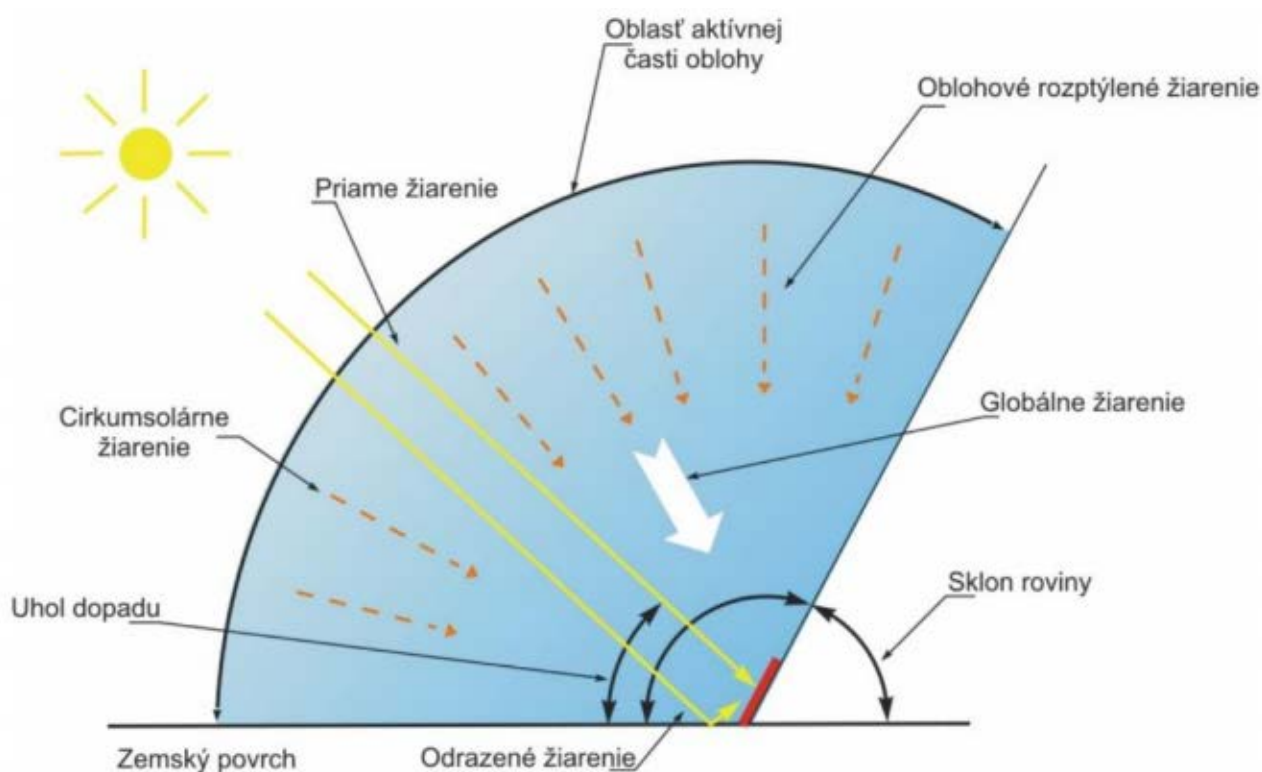
- teplota vonkajšieho vzduchu,
- relatívna vlhkosť vonkajšieho vzduchu,
- tlak vzduchu,
- globálne solárne žiarenie,
- difúzne solárne žiarenie,
- úhrn zrážok,
- rýchlosť a smer vetra.

Vplyv dôležitosti merania difúzneho žiarenia a vetrom hnaného dažďa bude zhodnotený v osobitných podkapitolách.

Slnčné žiarenie

Všetky vyššie uvedené parametre sú u nás merané štandardne Slovenským hydrometeorologickým ústavom s výnimkou difúzneho solárneho žiarenia, ktoré sa meria iba na niekoľkých staniách a jeho spracovanie má na starosti špecializované pracovisko SHMÚ v Poprade – Gánovciach – Aerologické a radiačné centrum (ARC), ktoré robí súčasne aj výskum spodných vrstiev atmosféry pomocou meteorologických balónov s rádiovými sondami.

Slnčné žiarenie môžeme rozdeliť na krátko a dlhovlnné. Pokiaľ sa jedná o krátkovlnné, delí sa z celkového globálneho na priame a potom difúzne, ktoré je odrážané rôznymi povrchmi a takisto z oblohy (obr. 87).



Obr. 87. Rozdelenie globálneho krátkovlnného slnečného žiarenia

Zvyčajné hodnoty globálneho žiarenia pre jednotlivé dni v závislosti od oblačnosti a ročného obdobia (mení sa výška slnka nad horizontom) sú na obr. 88). Takisto sa mení pomer medzi priamym a difúznym žiarením. Počas slnečného dňa je podiel difúzneho žiarenia asi 10% z globálneho, pri zamračenom alebo polooblačnom počasí je to výrazne nad 50%.



Obr. 88: Hodnoty globálneho slnečného žiarenia v závislosti od počasia

Na meranie krátkovlnného žiarenia sa používa pyranometer. Pre meranie obidvoch zložiek (globálne a difúzne) potrebujeme pyranometre dva, pričom jeden je tienení, zvyčajne manuálne ovládaným prstencom. Tento prstenec sa prestavuje v závislosti od blízkosti slnovratov zvyčajne každé dva až tri dni a počas celého dňa zakrýva dennú dráhu slnka na oblohe (obr. 89). Vzhľadom nato, že zakrýva aj časť oblohy, nielen samotné slnko tak je potrebné robiť následnú korekciu zvyšného tienenia.



Obr. 89. Pyranometer tienený prstencom pre meranie difúzneho slnečného žiarenia vyžaduje každodennú údržbu, najmä v zimnom období

Druhá možnosť pre meranie je použiť takzvaný pyrhelimeter, ktorý meria priame slnečné žiarenia, tzn. musí byť vždy natočený priamo na slnko. Často je súčasťou tzv. Solar trackeru (obr. 90), čo je zariadenie, ktoré na základe svojej presnej polohy sleduje pohyb slnka po oblohe a je plne automatizované. Difúzne žiarenia sa v tomto prípade meria taktiež pyranometrom, ten však nie je tienený prstencom ale guľou na ramene, ktorá vždy zakrýva priamo iba slnečný kotúč. Práve takéto zariadenie používajú v ARC v Gánovciach.

Prečo je práve difúzna zložka žiarenia dôležitá a nestačí iba globálne žiarenie je ukázané na nasledujúcom príklade v simulačnom programe WUFI Pro.



Obr. 90: Solar tracker používaný v ARC Gánovce. Pozostáva z pyrhelimetra (vpravo) a pyranometra (hore), ktorý je tienený guľou

Simulácia priebehu povrchovej teploty v programe WUFI Pro v závislosti od použitých okrajových podmienok

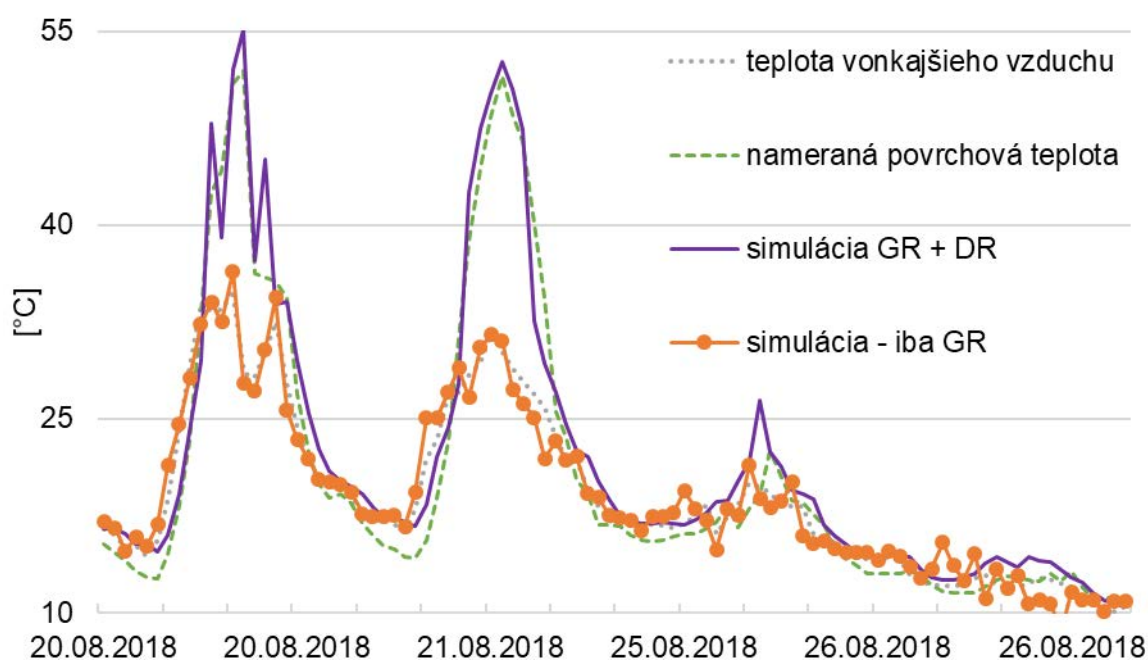
Pre zistenie vplyvu rôznych klimatických činiteľov zahrnutých do súboru vonkajších klimatických činiteľov bola realizovaná jednoduchá simulácia v programe WUFI Pro s použitím experimentálnej steny drevostavby v rámci výskumu realizovaného na Katedre pozemného staviteľstva a urbanizmu SvF UNIZA. Pohľad na túto stenu spolu s použitou skladbou je na obr. 91.



Obr. 91: Výskumná stena s južnou orientáciou a skladba použitého fragmentu pre simuláciu povrchovej teploty

Výsledky tejto simulácie sú na obr. 92. Vďaka dostupnosti reálne meraných povrchových teplôt a takisto vonkajšej klímy pomocou vlastnej meteostanice je možné exaktné porovnanie. Simulované varianty sú:

- iba globálne slnečné žiarenie,
- globálne aj difúzne slnečné žiarenie.



Obr. 92: Porovnanie meraných a simulovaných priebehov povrchových teplôt ukazuje výbornú zhodu pri použití difúzneho žiarenia a výrazne nižšie teploty počas prvých dvoch slnečných dní iba s použitím globálneho žiarenia

Výsledok ukazuje, že s použitím oboch zložiek sa výsledky simulácie podobajú veľmi dobre reálne nameranému priebehu na rozdiel od iba použitého globálneho žiarenia. Dôvod je v tomto prípade jednoduchý. Pomer medzi globálnym a difúznym žiarením určuje charakter oblačnosti. Pokiaľ je slnečný deň, priame žiarenie výrazne zohrieva povrchy stavebných konštrukcií. V tomto prípade nehrá celkom rolu absolútna hodnota ale pomer. Pokiaľ je nízky, deň je

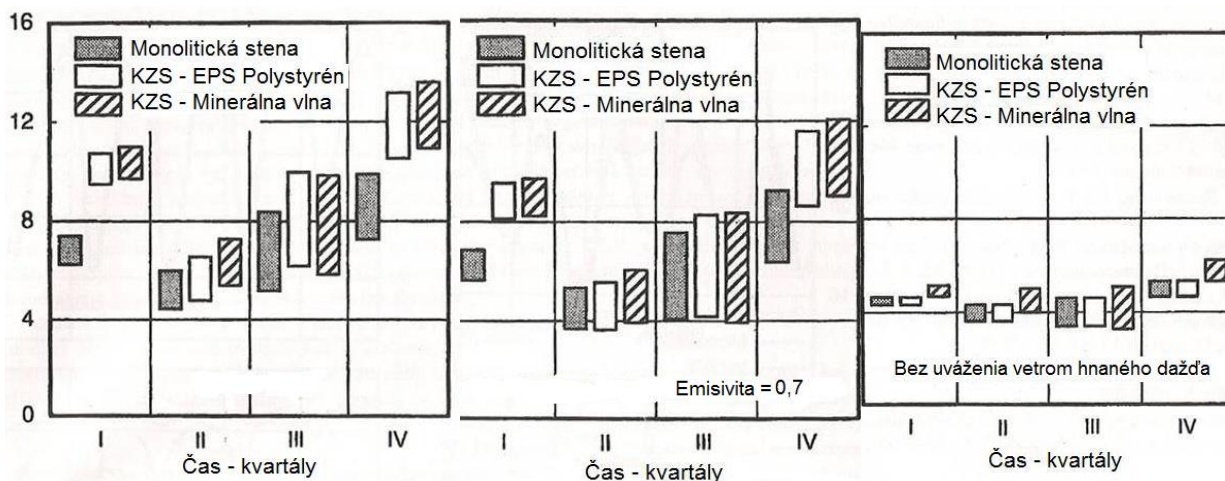
slnečný, naopak pokiaľ je vysoký tak teplota povrchov bude podobná vonkajšiemu vzduchu. To je zrejmé z porovnania, kde prvé dva dni sú slnečné a dva sú zamračené.

Výsledkom je, že pokiaľ nie je k dispozícii difúzne žiarenie, program funguje ale jeho výsledky sú výrazne podhodnotené. Vďaka tomu zostávame na strane bezpečnosti, pretože vyššia povrchová teplota zrýchľuje difúzny tok a možné odparovanie vody z konštrukcie.

Vplyv vetrom hnaného dažďa na obvodový plášť

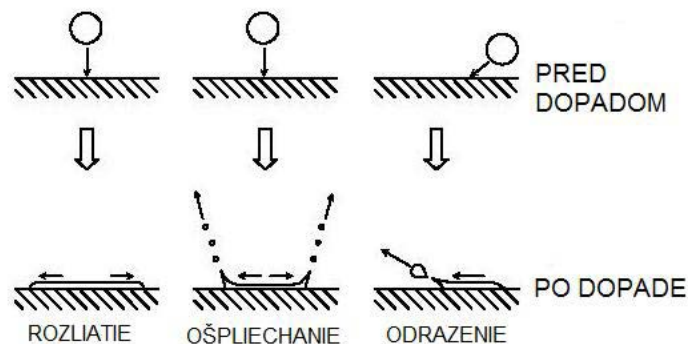
Pokiaľ skúmame tepelno-vlhkostné správanie obvodového plášťa alebo iných stavebných konštrukcií ktoré sú vystavené vplyvom poveternosti je nutné brať do úvahy vplyv vetrom hnaného dažďa, pretože ako je znázornené na obrázku (obr. 93) má hlavný vplyv na obsah vody v konštrukcii a tým ovplyvňuje nielen tepelný tok ale aj životnosť konštrukcie. Preto sú v norme STN EN 15 026, ktorá udáva požiadavky na simulačné programy požadované aj hodnoty vetrom hnaného dažďa pri tepelno-vlhkostných simuláciách. Okrajové podmienky sú nutné vo forme referenčných rokov. V súčasnosti existuje množstvo simulačných programov, ktoré tento vplyv dokážu zahrnúť, spomeňme napríklad WUFI (Fraunhoferov Inštitút pre stavebnú fyziku, Nemecko) alebo DELPHIN (TU v Drážďanoch, Nemecko). Možnosti získania intenzity vetrom hnaného dažďa sú nasledujúce:

- namerané hodnoty (u nás sa intenzita vetrom hnaného dažďa nemeria)
- konverzia nameraných hodnôt zrážok dopadajúcich na vodorovnú plochu (hodinové alebo denné úhrny)
- CFD simulácie



Obr. 93: Porovnanie obsahov vody v hmot.% pre rôzne druhy obvodových stien. Vľavo pohltivosť povrchu 0,3, v strede 0,7. Na obrázku vpravo sú obsahy vody bez uvažovania vplyvu vetrom hnaného dažďa [6]

Určenie zaťaženia vetrom hnaným dažďom na vertikálnych, alebo naklonených povrchoch stavebných prvkov je veľmi komplexná úloha pretože ak aj poznáme zaťaženie vetrom hnaným dažďom, nie je známe skutočné množstvo absorbovaného dažďa. Toto množstvo sa môže líšiť v závislosti na materiálových vlastnostiach povrchu a a type dažďa, pokiaľ používame hodinové hodnoty miesto skutočných dochádza buď k zvýšeniu alebo zníženiu zaťaženia vetrom hnaným dažďom a následnej absorpcii dažďovej vody do obvodovej konštrukcie a takisto po počiatočnom nasýtení povrchovej vrstvy často dochádza k stekaniu prebytočnej vody po povrchu steny. V závislosti od rýchlosti vetra kvapky dopadajú na fasádu pod rôznym uhlom a môže dochádzať k javom, ktoré sú znázornené na obrázku (obr. 94). Z tohto je zrejmé, že samotné zaťaženie konštrukcie vetrom hnaným dažďom nie je rovnaké ako je množstvo vody, ktorá penetruje do konštrukcie. Pri odraze dažďovej kvapky od fasády sa veľká časť vody odrazí a iba malá časť penetruje do konštrukcie.



Obr. 94: Znázornenie troch javov, ku ktorým môže dôjsť pri dopade dažďovej kvapky na konštrukciu [7]

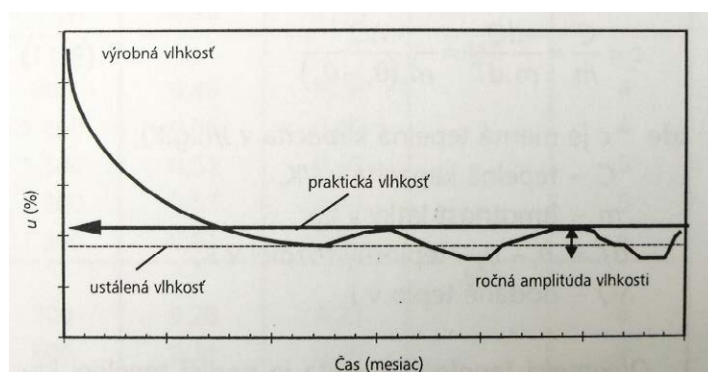
Pokiaľ je známe zaťaženie povrchu obvodovej konštrukcie vetrom hnaným dažďom, hustota povrchového toku je počítaná ako súčin normálneho zaťaženia dažďom a pohltivosti dažďa. Použitie pohltivosti dažďovej vody umožňuje brať do úvahy fakt, že časť vetrom hnaného dažďa sa pri dopade odráža od konštrukcie späť. Hodnoty tohto faktora závisia od drsnosti povrchu a typu dažďa. Pohltivosť dažďovej vody je priamo úmerná pórovitosti povrchu materiálov [8]. Po počiatocnom nasýtení povrchu konštrukcie sa však okrajová podmienka druhého druhu mení na okrajovú podmienku prvého druhu, pri ktorej uvažujeme relatívnu vlhkosť povrchu rovnú jednej [8].

Pokiaľ na obalovú konštrukciu pôsobí súčasne dážď a súčasne sila spôsobujúca pohyb vody po povrchu, sú vytvorené podmienky na prenikanie vody v obalovej konštrukcii. Toto prenikanie vody sa môže vyskytnúť medzi stykmi prvkov obalových konštrukcií, medzi škárami a stykmi transparentných konštrukcií s netransparentnými atď. Sily, ktoré spôsobujú penetráciu dažďovej vody sú nasledujúce:

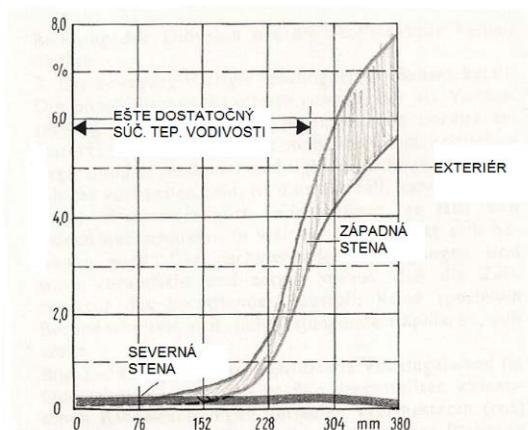
- kapilárne nasávanie trhlínami (šírka trhliny $\leq 0,5$ mm),
- tlak vetra v trhlínach ($0,01 < \check{s} < 5$ mm),
- vzduchové prúdy v trhlínach (so šírkou $> 0,5$ mm),
- gravitačná sila v trhlínach (so šírkou $< 0,5$ mm),
- kinetická energia (so šírkou $> 4\sim 5$ mm) |.

Z hľadiska hydrodynamiky je kritickým zaťažením budov vetrom hnaný dážď, t.j. spoločné pôsobenie vetra a dažďa [1].

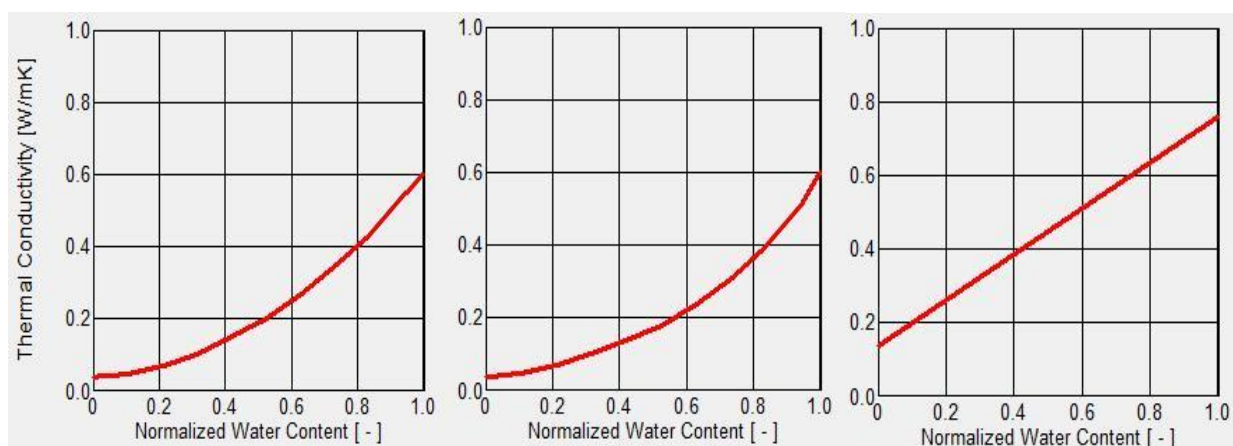
Väčšina obvodových plášťov je zhotovených tradičnou technológiou z kusových tvaroviek (keramické alebo pórobetónové). Pri výstavbe sa preto do konštrukcie zabudováva technologická vlhkosť. Postupom času dochádza k vysušovaniu muriva a zlepšovaniu tepelnoizolačných vlastností jednotlivých materiálov (obr. 95). Pri zlom návrhu skladby konštrukcie môže dôjsť aj k opačnému javu. Príčinou problémov môže byť prenikanie vetrom hnaného dažďa do konštrukcie (obr. 96) alebo kondenzácia na povrchu alebo vo vnútri konštrukcie, vztlánanie vody pri poškodenej hydroizolácii atď. Pórovité materiály sú nasiakavé a voda, ktorá je v ich póroch ovplyvňuje súčiniteľ tepelnej vodivosti. Takisto tepelnoizolačné materiály je nutné chrániť pred vodou a vlhkosťou (obr. 97).



Obr. 95: Priebeh vlhkosti v čase od výroby konštrukcie do ustálenia vlhkosti [10]



Obr. 96: Porovnanie obsahu vody v murovanej stene hrúbky 380 mm v závislosti od orientácie k svetovým stranám [11]



Obr. 97: Hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti λ v závislosti od obsahu vody v materiály. Vľavo minerálna vlna, v strede expandovaný polystyrén, vpravo pórobetón. Grafy pochádzajú zo simulačného programu WUFI

So zvýšením tepelnej vodivosti k dochádza k zníženiu tepelného odporu obvodovej konštrukcie, čo môže mať za následok napríklad zníženie povrchovej teploty, zvýšený tepelný tok cez konštrukciu a zvýšenie tepelných strát objektu, vznik plesní na vnútornom povrchu, mechanické poškodenie povrchovej úpravy v dôsledku mrazu a estetické poruchy. Na obr. 98 je zobrazená stena panelového bytového domu dlhodobo vystavená účinku vetrom hnaného dažďa.

Vetrom hnanému dažďu je v najväčšej miere vystavená náveterná strana objektu. Zaťaženie vetrom hnaným dažďom narastá so vzrastajúcou výškou objektu. Aby sme zabránili penetrácii vody do konštrukcie je potrebné venovať zvýšenú pozornosť povrchovej úprave náveternej strany. Môže byť napríklad chránená vodonepriepustným obkladom, ktorý sa používal už v minulosti na základe empirických skúseností (obr. 99), presahom odkvapu alebo geometriou fasády, použitím vhodného materiálu na vonkajšiu povrchovú úpravu alebo hydrofobizáciou povrchu.



Obr. 98: Fasáda panelového bytového domu vystavená účinkom vetrom hnaného dažďa

Pre zistenie vplyvu vetrom hnaného dažďa na referenčné skladby stien sa zohľadnili nasledujúce faktory:

- orientácia k svetovým stranám (S, J, V, Z, SZ)
- bez dažďa
- rozdielna výška budovy (pozícia fragmentu na fasáde)
- faktor absorpcie dažďovej vody (rain reduction factor r.r.f.: 0,2; 0,5; 0,7)
- pohltivosť povrchu (0,2; 0,4; 0,7)
- polymérna omietka (mikrotrhliny)

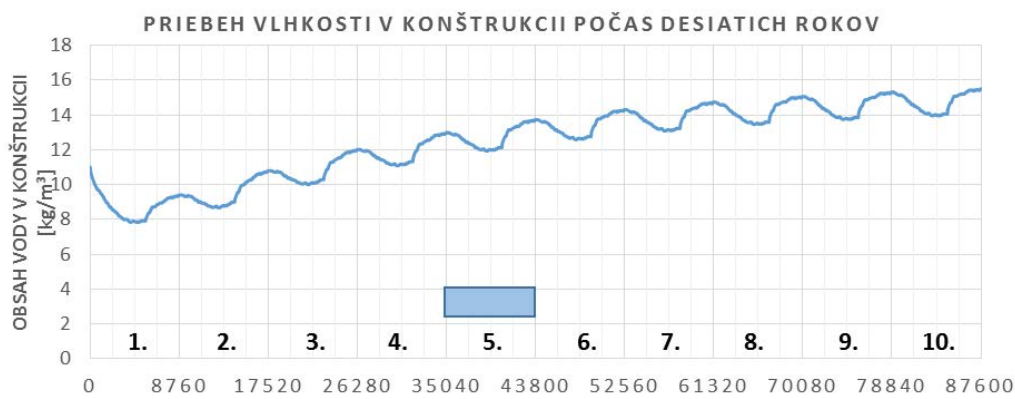
Samotné simulácie začínali dátumom 1.10. Počiatočné podmienky v konštrukcii boli teplota 20 °C a relatívna vlhkosť 80 %. Dĺžka simulácie bola nastavená na obdobie piatich rokov (5 krát za sebou rovnaký vybraný klimatický rok), kedy už bolo jasné, že ročný priebeh vlhkosti v konštrukcii je prakticky rovnaký (ročná amplitúda vlhkosti) a nedochádza už k akumulácii ďalšej vlhkosti alebo vysychaniu (obr. 100). Samozrejme, že takáto simulácia vyjadruje viac-menej najhorší priebeh, pretože sa väčšinou v skutočnosti pravidelne striedajú lepšie (priaznivejšie) a horšie roky.



Obr. 99: Azbestocementové šablóny na drevenom rošte ako ochrana náveternej strany fasády proti vetrom hnanému dažďu



Obr. 100: Znáznornenie priebehu vlhkosti v konštrukcii počas piatich rokov. Pre podrobné porovnanie jednotlivých rokov bol uvažovaný práve piaty rok, kedy už bola ročná amplitúda vlhkosti ustálená (nedochádza k ďalšej akumulácii vlhkosti ani k výraznému vysychaniu)

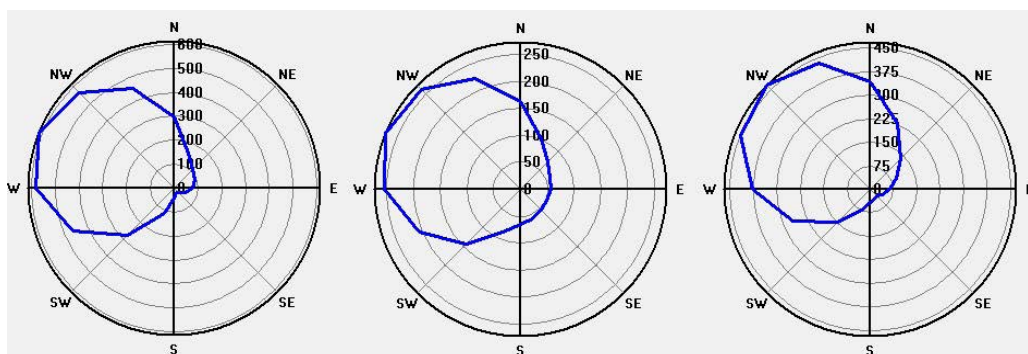


Obr. 101: Znáznornenie priebehu vlhkosti v konštrukcii zateplenej KZS počas desiatich rokov s uvažovaním penetrácie 1 % vetrom hnaného dažďa za rovinu tepelnej izolácie. Pre podrobné porovnanie jednotlivých rokov bol uvažovaný piaty rok aj keď sa nejednalo ešte o celkom ustálenú ročnú amplitúdu vlhkosti

Pre vnútorné okrajové podmienky bol použitý rok odvodený pomocou modelu zodpovedajúceho norme STN EN 15026:2007 z klimatického referenčného roku (podľa použitého ref. roku – 2010, 2008,...) Produkcia vodnej pary bola zvolená normálna.

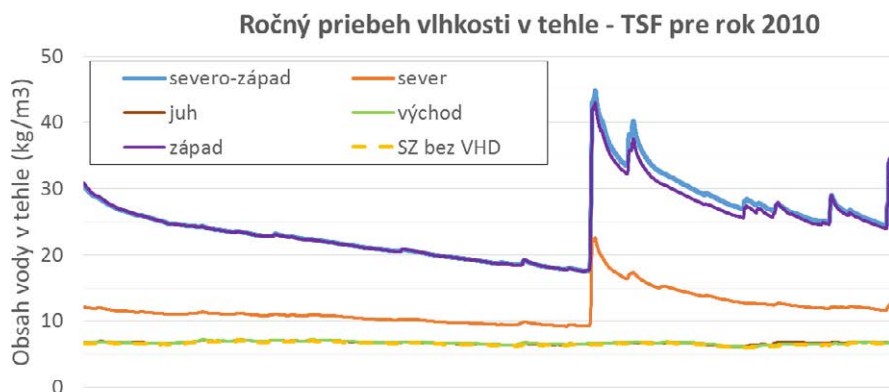
Podrobnejší opis jednotlivých faktorov a výsledkov je nasledujúcich obrázkoch.

- 1) orientácia k svetovým stranám zohráva dôležitú úlohu, pretože zatiaľ čo náveterná strana je zaťažená VHD, ostatné strany sú prevažne suché. Porovnanie jednotlivých strán je vhodné na zistenie vplyvu VHD na tepelno-vlhkostný režim. Obr. 97 znázorňuje veternú ružicu vetrom hnaného dažďa – z ktorej svetovej strany koľko prichádza vetrom hnaného dažďa.



Obr. 102: Veterná ružica vetrom hnaného dažďa pre lokalitu BA – Letisko. Vľavo rok 2010 (najvlhkejší), v strede 1997 (najsuchší), vpravo 2008 (najteplejší)

- 2) Porovnanie simulácie náveternej strany s pôsobením vetrom hnaného dažďa a bez neho za účelom znázornenia vplyvu.



Obr. 103: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny s orientáciami k rôznym svetovým stranám ukazujú výrazne vyšší obsah vody pri náveternej orientácii.

- 3) Zataženie budovy VHD vzrastá s výškou od terénu. Odporúčané hodnoty faktora úmernosti, ktorý program používa pri konverzii dažďa dopadajúceho na horizontálny povrch na vetrom hnaný dážď sú od 0,05 do 0,2. Na obr. 104 je uvažovaná hodnota 0,2, čo znamená výrazne vyššie zataženie a obsah vody ako na obr. 103.



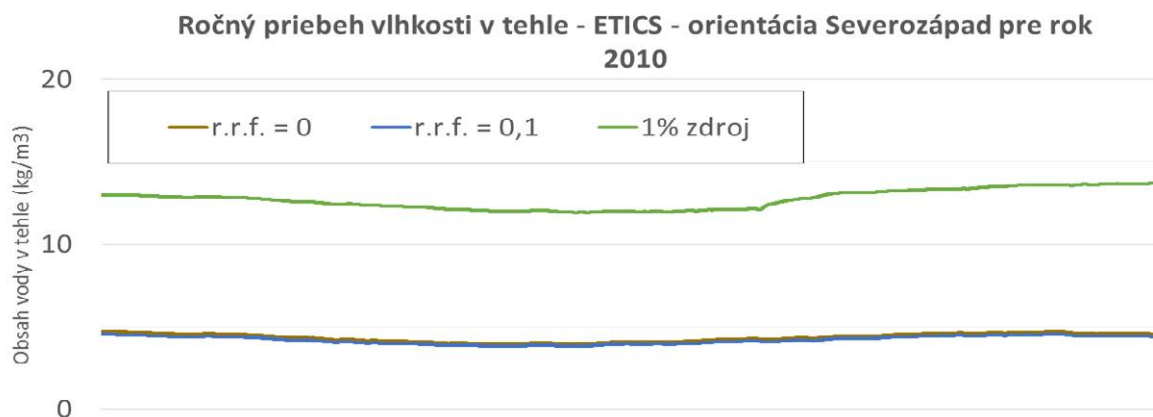
Obr. 104: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny pre miesto vo výška do 20 m nad terénom s uvažovaním vetrom hnaného dažďa a bez.

- 4) Faktor absorpcie dažďovej vody (r.r.f.) je dôležitým parametrom, ktorý určuje koľko vody sa dostane do konštrukcie kapilárnym transportom z povrchu a koľko sa jej odrazí. Je závislý od intenzity VHD, dĺžke trvania dažďa (saturácia povrchovej vrstvy). Štandardne je v simulačnom programe predvolená hodnota 0,7, nakoľko jeho hodnota nie je bežne udávaná pre stavebné materiály.



Obr. 105: Výsledky simulácie nezateplenej tehlovej steny pri použití rôznych faktorov absorpcie dažďovej vody. Každá omietka má vlastnú hodnotu.

- 5) Pohltivosť povrchu ovplyvňuje vysychanie konštrukcie pokiaľ na ňu pôsobí priame slnečné žiarenie, nakoľko má vplyv na povrchovú teplotu. Tmavší povrch (vyššia pohltivosť) dosahuje vyššiu teplotu povrchu a tým rýchlejšie vysychanie konštrukcie (obr. 93).
- 6) Riešenie zateplených konštrukcií pomocou vonkajšieho kontaktného zateplovacieho systému (ETICS) je v dvoch variantoch: priepustnosť dažďa povrchovou úpravou na úrovni 10 %, čo zodpovedá napr. mikrotrhlinám a simulácia s použitím vnútorného zdroja vlhkosti na úrovni 1 % množstva VHD za rovinou tepelnej izolácie ako príklad nesprávneho izolácie ostenia okna a penetrácia dažďa do konštrukcie prasklinami (WUFI Tutorial 2012).



Obr. 106: Výsledky simulácie steny zateplenej ETICSom s polymérnou omietkou a uvažovaním penetrácie vody trhlinami.

Ako ukazujú výsledky simulácie či už povrchových teplôt alebo vplyv vetrom hnaného dažďa, jedná sa o dôležité činitele, ktoré ovplyvňujú reálnosť výsledkov simulácií. Z tohto dôvodu a takisto z dôvodu absencie, dostupnosti a kvality klimatických údajov od SHMÚ disponuje katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu vlastnými meteostanicami a takisto komplexným systémom pre monitorovanie vonkajšej klímy okolo budovy Výskumného centra.

Samostatne stojaca meteorologická stanica umiestnená na streche budovy stojacej severne od budovy Výskumného centra (obr. 107) umožňuje meranie rozšíreného súboru klimatických veličín. Oproti pôvodnej meteorologickej stanici, ktorá je v súčasnosti umiestnená v meteozáhradke na voľnom priestranstve, prináša meranie difúzneho žiarenia, ktorého absencia vnáša veľkú neistotu pri simuláciách počas zamračených jesenných dní najmä pri programoch, ktoré majú prepracované modelovanie slnka, ako napríklad Esp-r. Takisto bude možné merať dlhovlnné žiarenie oblohy pomocou pyrgeometra, ktoré nájde uplatnenie takisto pri simuláciách napríklad v programe WUFI. Ďalším benefitom je porovnanie výsledkov v rámci areálu Žilinskej univerzity, ktorý je pomerne rozľahlý a ponúka možnosť porovnania mestských teplotných ostrovov.

Pokus o odstránenie problémov zmeny klímy v okolí budovy oproti voľnému priestranstvu bola vybudovaná unikátna pozorovacia meteorologická základňa, ktorá je tvorená 36-timi fasádovými meteostanicami (obr. 108). Táto unikátna základňa, nielen na slovenské pomery, ale zrejme aj svetové, umožňuje dôkladnú analýzu vonkajšej klímy v lokalite sídla komplexu Žilinskej Univerzity na Veľkom Dieli v Žiline. Merania sa dajú rozdeliť na meranie klímy a vlastností v kvázi voľnom prúde (vietor) a meranie na 5. podlažnej budove Výskumného centra ŽUŽ. Práve meranie na fasáde budovy je do veľkej miery unikátne, pretože merania v reálnej mierke v takomto rozsahu sú zriedkavé aj vo svete pre svoju finančnú náročnosť.



Obr. 107: Samostatne stojaca meteorologická stanica, umiestnená na streche budovy laboratórií, severne od budovy Výskumného centra

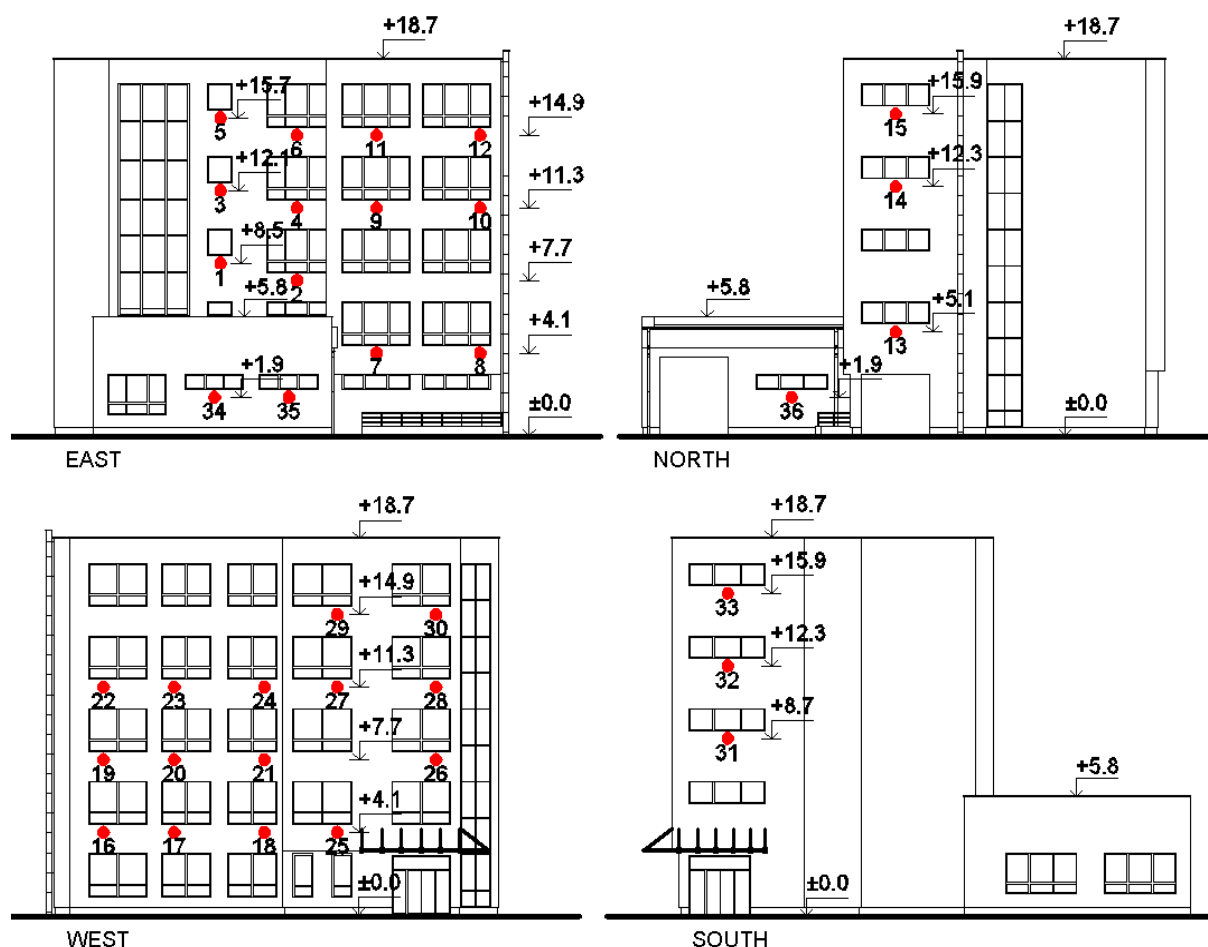
Meranie množstva klimatických veličín vo vysokom rozlíšení (krátky časový interval) prináša možnosť dôkladnej analýzy vonkajšej klímy a vplyvu budovy na jednotlivé veličiny. V tomto článku sú prezentované počiatkové merania teploty v okolí budovy a účinkov vetra. Prvá fasádna meteostanica (obr. 108) bola osadená na budovu v auguste 2016. Schéma umiestnenia jednotlivých staníc je na obr. 109.



Obr. 108: Pohľad na fasádnu meteostanicu pozostávajúcu z ultrasonického anemometra, pyranometra, pyrgeometra a integrovaného snímača teploty, relatívnej vlhkosti a tlaku vzduchu

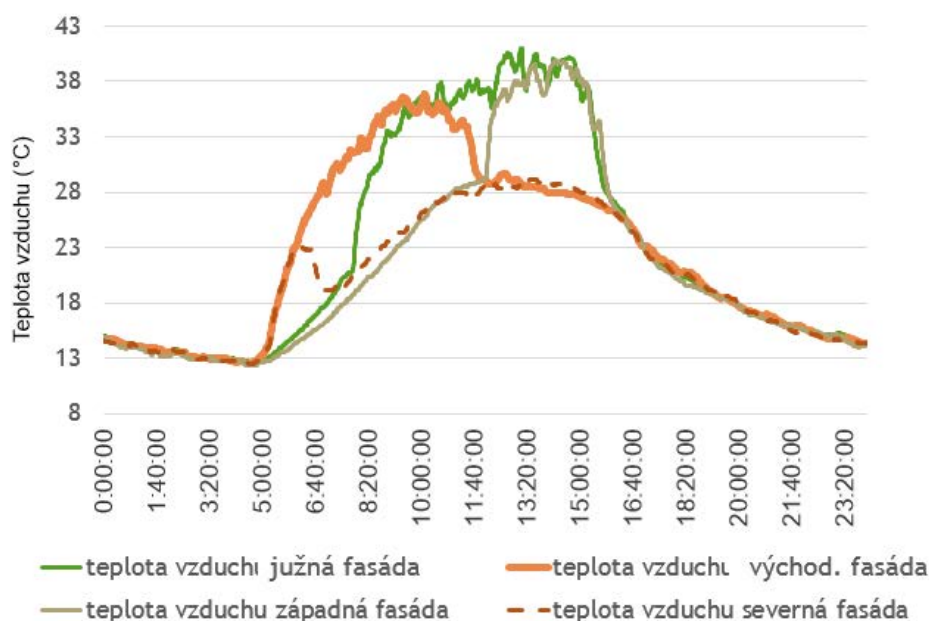
Fasádna meteostanica (ďalej FMS) pozostáva z ocelového rámu, na ktorom sú namontované jednotlivé snímače. Základom je snímač teploty, relatívnej vlhkosti a atmosférického tlaku vzduchu, umiestnený pod protidažďovým a protislnečným krytom, pyranometer pre meranie krátkovlnného slnečného žiarenia a pyrgometer pre meranie dlhovlnného slnečného žiarenia a nočného sálania oblohy. Na krátkom ramene je osadený ultrasonický anemometer (jeho os je 270 mm pred fasádou). FMS je napájaná káblom a samotný zber dát je bezdrôtový. Každá stena fasády má na streche budovy umiestnený prijímač. Následne sú dáta v minútovom intervale zapisované do databázy na centrálné dátové úložisko.

Na obr. 109 je znázornené umiestnenie jednotlivých FMS. Pre severnú hemisféru prevláda severozápadné prúdenie preto je najviac staníc umiestnených na západnej strane. Pre analýzu vplyvu a intenzity slnečného žiarenia je zase dôležité porovnanie východ – juh – západ, s vplyvom pohybu slnka po oblohe na teplotu v okolí fasády. Rozmery hlavnej časti budovy Výskumného centra sú približne $16 \times 20,6$ m, výška bez technologického vybavenia je približne 18,7 m nad upraveným terénom. K budove patrí nízka prístavba laboratórnej haly. Najvyšší rad FMS je vo výške 15,9 m. Kvôli umiestneniu staníc spravidla pod parapetmi okien sú stanice v rovnakej výške na východnej a západnej strane a zase na južnej a severnej strane (úzke pásové okná).



Obr. 109: Pohľady budovy Výskumného centra so zaznačením polohy jednotlivých FMS

Výsledky merania počas slnečného dňa sú zobrazené na obr. 110. Z obrázku je zrejmý nárast, maximum a pokles teploty pre východnú, južnú a nakoniec západnú fasádu. Priebeh teplôt je sínusový, sleduje pohyb slnka po oblohe a pôsobenie priameho slnečného žiarenia na jednotlivé strany fasády. Keď sa fasáda dostane do tieňa tak jej teplota postupne klesá na úroveň teploty vzduchu (zhodná približne s teplotou nameranou na severnej fasáde). Lokálne maximá teplôt boli porovnateľné na východnej a západnej fasáde okolo 42 °C o 15:00. Teplota vzduchu sa pohybovala okolo 28 °C.



Obr. 110: Denný priebeh teplôt vzduchu pre jednotlivé svetové strany na meranej budove pre 12. september 2016

Záver

S klimatickými zmenami v posledných rokoch a existenciou mestských tepelných ostrovov dochádza stále častejšie k otázke adekvátnosti použitých okrajových podmienok. Čo platí pre jednu lokalitu už neplatí pre druhú, dokonca niektoré klimatické veličiny sa menia signifikantne v rámci jednotlivých mestských častí.

Pre takmer všetky simulácie používané v oblasti stavebníctva sú dôležité správne okrajové podmienky (vnútorné a vonkajšie) a materiálové parametre. Práve získanie správnych, použiteľných a dostatočne presných vonkajších okrajových podmienok (klimatických údajov) je stále problematické pre obmedzený rozsah meteorologickej siete, jej rozsahu meraných parametrov, intervalu merania a takisto dostupnosti údajov (financie, voľný prístup).

Použitá literatúra

- [1] BIELEK, M. et al. 1984. *Konštrukcie pozemných stavieb IV: Problémy aerodynamiky a hydrodynamiky v teórii konštrukčnej tvorby budov – návody na cvičenia*. Bratislava: Alfa.
- [2] STN 730540-2 + Z1 + Z2. 2019. *Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [3] SANDERS, C. 1996. *IEA ANNEX 24, Final report, Vol. 2, Task 2: Environmental conditions*. Leuven. ISBN 90-75741-03-0
- [4] KÜNZEL, H. M.; SCHMIDT, T. 2000. Wetterdatum für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen. *IPB-Mitteilung*, 27: 364.
- [5] STN EN 15026:2009. 2009. *Tepelno-vlhkostné vlastnosti stavebných konštrukcií a ich častí. Stanovenie šírenia vlhkosti numerickou simuláciou*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [6] KÜNZEL, H.M. 2004. Energetische Altbausanierung durch Innendämmung. *WTA-Journal*, 2(4), 361–374.
- [7] ABUKU, M. et al. 2009. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades. *Building and Environment*, 44(1), 113–124.
- [8] MATIAŠOVSKÝ, P. et al. 2007. *Komplexný prenos tepla, vzduchu a vody v konštrukciách budov*. Bratislava: STU. 123s. ISBN 978-80-227-2794-5
- [9] CHMÚRNY, I. 2003. *Tepelná ochrana budov*. Bratislava: JAGA.
- [10] EICHLER, F.; ARNDT, H. 1981. *Bauphysikalische Entwurfslehre*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.

Kontakty

Ing. Peter Juráš, PhD.: peter.juras@uniza.sk

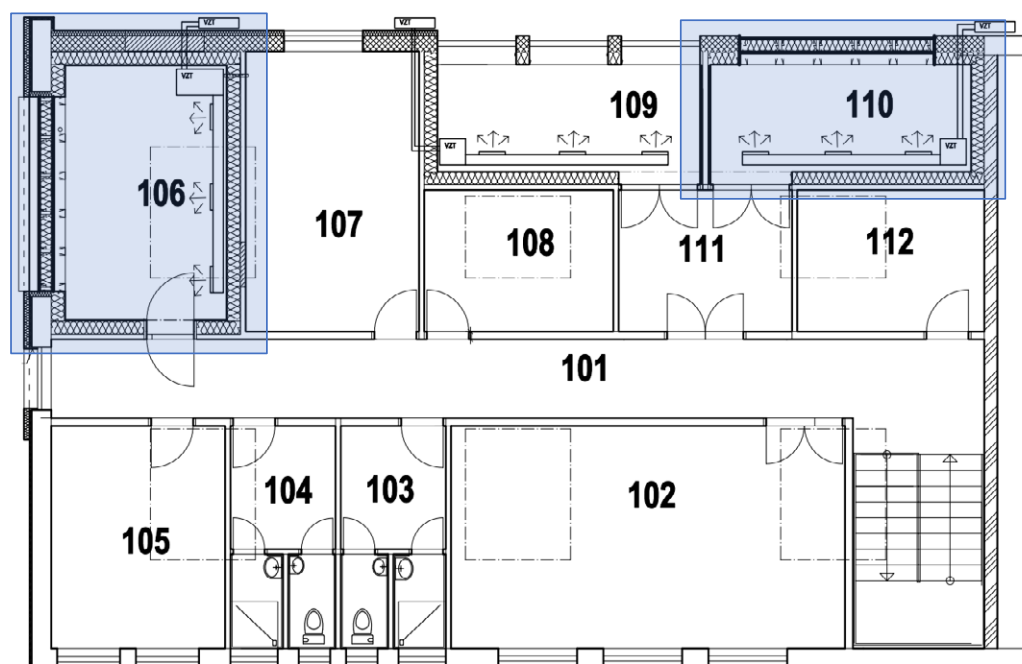
PRIAMY VÝSKUM OBALOVÝCH KONŠTRUKCIÍ DREVOSTAVIEB

Ing. Daniela Micháľková, PhD.

¹ Katedra pozemného stavitelstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

Výskum obalových konštrukcií drevostavieb zaznamenal svoj počiatok v roku 2011 [1], kedy bol prvýkrát vybudovaný takzvaný pavilónový výskum. Pozostával z dvoch susediacich miestností, patrične tepelne odizolovaných od okolitých priestorov aby bolo možné dosiahnuť ustálenú vnútornú klímu bez nadbytočného vplyvu susediacich prevádzok a kancelárií. V jednej miestnosti sa nachádzalo päť vzoriek obalových stien drevostavieb s rôznymi skladbami, zatiaľ čo druhá miestnosť bola venovaná výskumu troch rôznych okenných výplní.

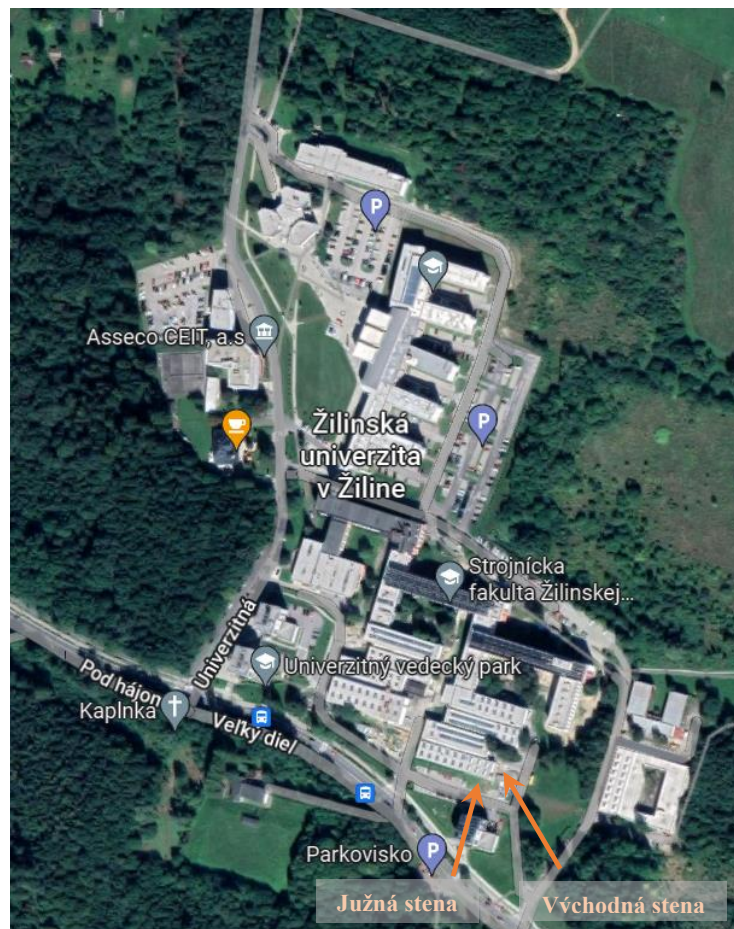
Tento výskum bol od svojho počiatku doplnený a momentálne je tvorený troma miestnosťami. V jednej sa nachádzajú okenné výplne ako to bolo pôvodne naplánované. Originálnu miestnosť so stenami na báze dreva ale doplnila jej dvojica, tentokrát ale s odlišnou orientáciou voči svetovým stranám. Obr. 111 znázorňuje pôdorys oboch spomínaných miestností označených farebným rámom.



Obr. 111: Pôdorys laboratória s pavilónovým výskumom obalových konštrukcií drevostavieb – miestnosť 106 a 110
[zdroj: Juráš, P.]

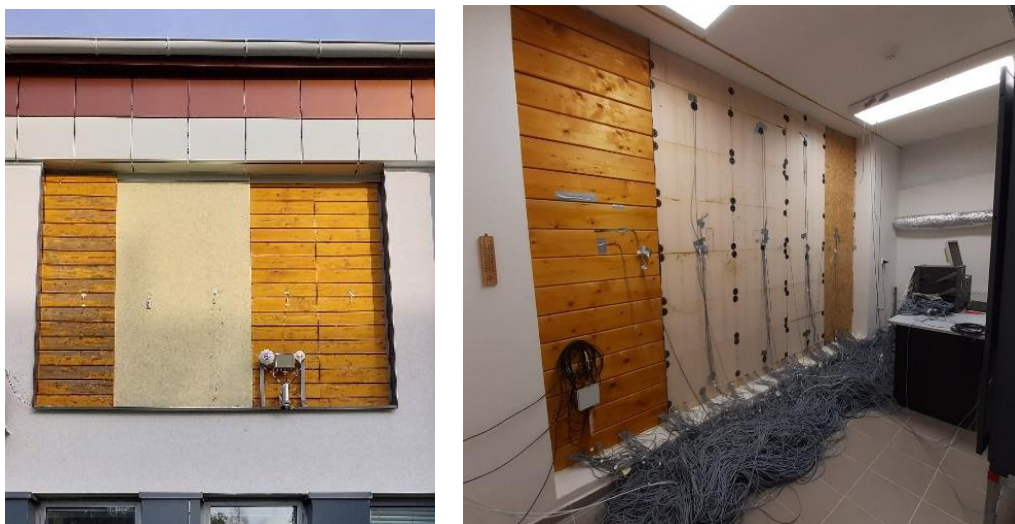
Steny týchto priestorov sú od okolitých miestností a komunikácií oddelené tepelnou izoláciou hrúbky 250 mm. Táto izolácia sa nachádza aj pod stropom a na podlahe, aby bolo zamedzené tepelným stratám alebo nadbytočným tepelným ziskom. Obe miestnosti sú vybavené klimatickými jednotkami, ktoré sú navrhnuté tak aby počas celého roka vytvárali a udržiavali stacionárne podmienky, konkrétne teplotu vnútorného vzduchu 20 °C a relatívnu vlhkosť 50 %.

Satelitný snímok na obr. 112 znázorňuje umiestnenie týchto stien v rámci areálu Žilinskej univerzity v Žiline, deklarujúc popri tom orientáciu voči svetovým stranám. Pôvodná miestnosť 110 je pritom orientovaná na juhozápad, presnejšie s 15° inklináciou k západu. Novšia miestnosť, s označením 106, čelí juhovýchodu, s 15° inklináciou k juhu. Pre zjednodušenie označujeme tieto orientácie ako juh a východ.

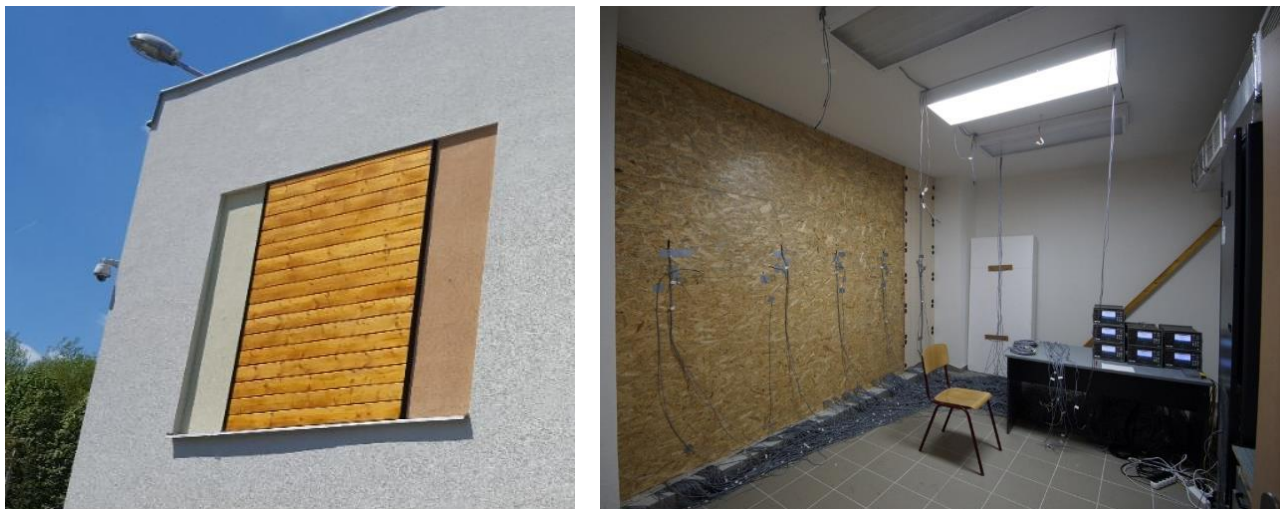


Obr. 112: Umiestnenie experimentálnych stien [zdroj maps.google.com]

Experimentálne steny na báze dreva sú osadené do exteriérových stien aby bola umožnená ich exploatácia voči prirodzeným vonkajším podmienkam. Ich vonkajší povrch je z exteriérovej strany plne priznaný, z vnútornej strany sú viditeľné snímače a nevyhnutné laboratórne vybavenie. Južná stena je vyobrazená na obr. 113, východná na obr. 114.



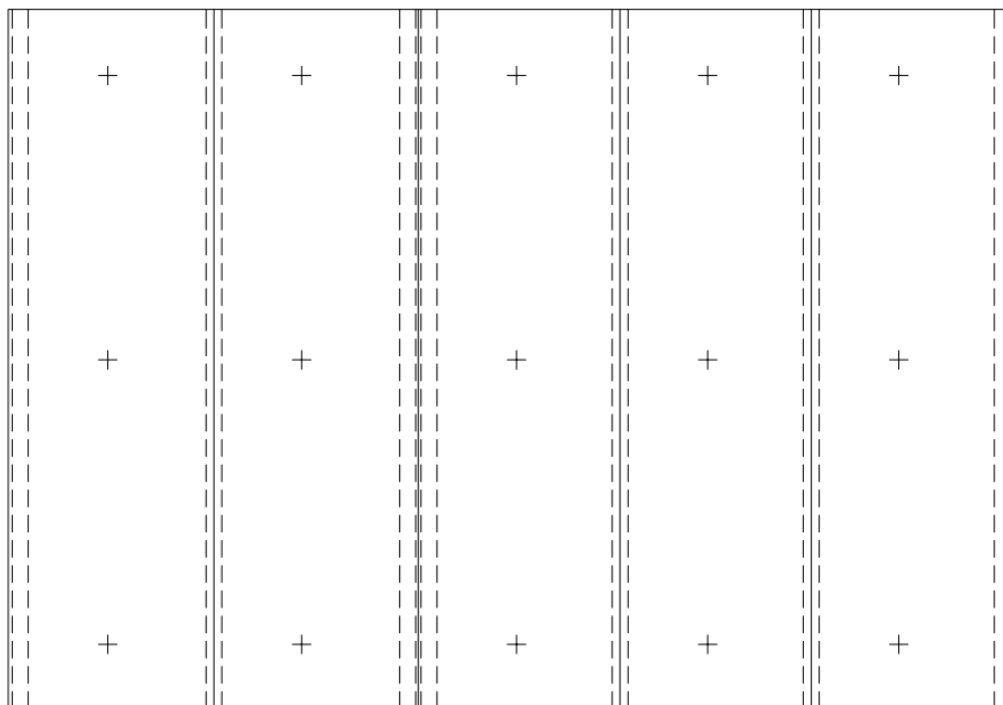
Obr. 113: Južná experimentálna stena – vľavo exteriér, vpravo interiér



Obr. 114: Východná experimentálna stena – vľavo exteriér, vpravo interiér

Výskum je zameraný na dlhodobé sledovanie teploty a relatívnej vlhkosti v týchto skladbách vystavených reálnym exteriérovým podmienkam. Tieto podmienky sú zaznamenávané meteorostanicou na streche budovy laboratória, aby bolo možné zdokumentované údaje vyhodnotiť. Dáta zahŕňajú vonkajšiu teplotu, relatívnu vlhkosť, tlak vonkajšieho vzduchu, intenzitu slnečného žiarenia, vietor a úhrn dažďa.

V stenách je umiestnených viac ako 600 snímačov teploty a relatívnej vlhkosti a to nielen na rozhraniach jednotlivých tepelných izolácií, ale aj na stĺpikoch. V oboch prípadoch sú snímače umiestnené v troch výškových úrovniach – približne 200 mm od horného okraja steny, 200 mm od spodného okraja steny a v strede jej výšky (obr. 115). To umožňuje posudzovať distribúciu týchto faktorov v rámci celej skladby.

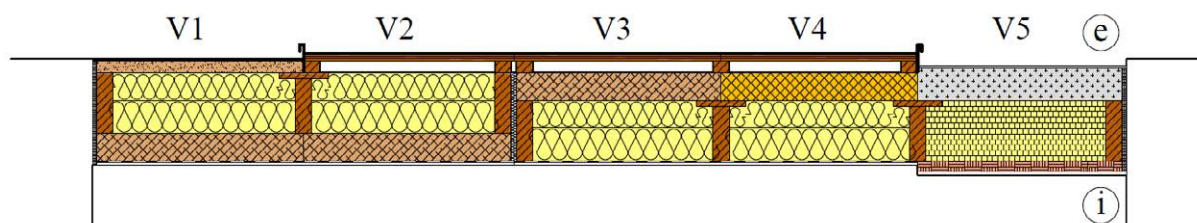


Obr. 115: Interiérový pohľad na východnú stenu s vertikálnym rozmiestnením snímačov

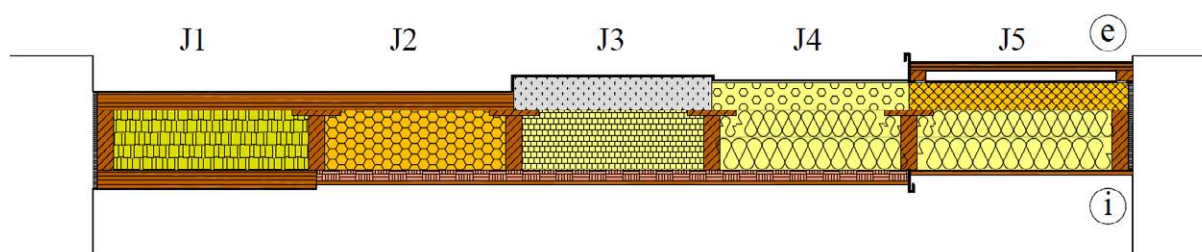
Na meranie teploty sú použité NTC termistory s presnosťou merania $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatiaľ čo relatívna vlhkosť je snímaná kapacitnými sondami s presnosťou $\pm 2\%$. Zozbierané údaje sú následne ukladané na multimeter Fluke Hydra III.

Tieto steny boli skonštruované tak, aby umožnili rozobratie jednotlivých skladieb pre prípady kontroly alebo obnovy, prípadne obmeny niektorej skladby. Ich nosnú konštrukciu tvoria KVH profily v pomere strán 1:3 (two by six) v osovej vzdialenosti 720–770 mm. Najdôležitejším a zároveň najsledovanejším prvkom sú použité tepelné izolácie, aplikované v rôznom poradí a v rôznych kombináciách aby pokryli širšiu škálu vyhotovení, vo viacerých prípadoch doteraz nie typických pre súčasnú prax.

Obr. 116 a obr. 117 zobrazujú horizontálny rez oboma stenami, pričom zároveň obsahujú ich označenia pre jednoduchšiu orientáciu. Každá stena obsahuje 5 rôznych skladieb. Pre umožnenie porovnania vplyvu orientácie voči rôznym svetovým stranám boli vytvorené dve dvojice rovnakej skladby – V4 a J5, V5 a J3.



Obr. 116: Horizontálny rez východnou stenou

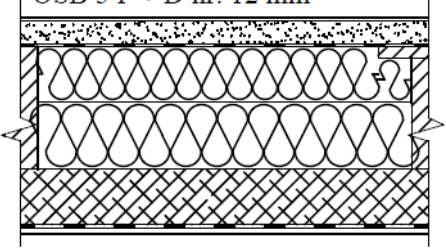
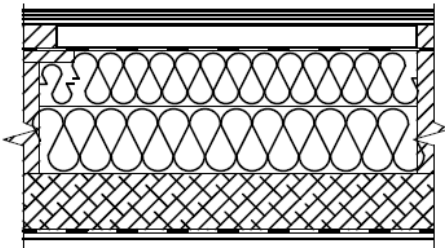
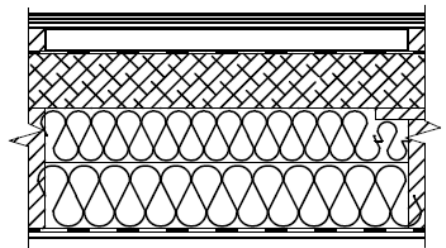
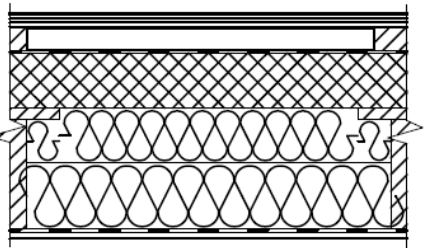
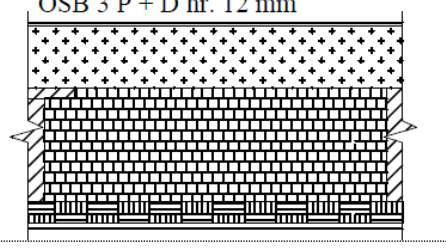
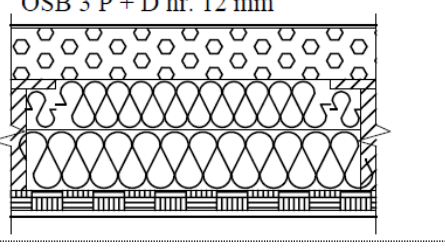
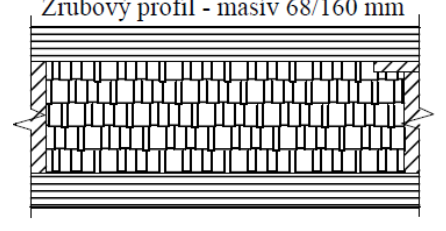
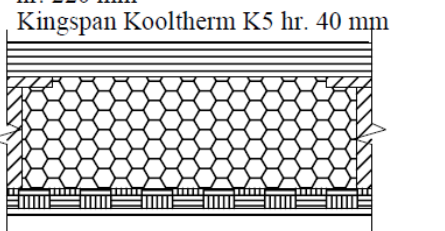


Obr. 117: Horizontálny rez južnou stenou

Jednotlivé vzorky sa odlišujú predovšetkým druhom alebo poradím vrstiev tepelnej izolácie. Štyri konštrukcie sú z vonkajšej strany ukončené kontaktným zatepľovacím systémom (V1, V5, J3 a J4), zatiaľ čo štyri využívajú ako bariéru voči vonkajšiemu prostrediu prevetrávanú vzduchovú dutinu ukončenú dreveným obkladom (V2–V4 a J5). Ostatné dve sú ukončené masívnym zrubovým profilom (J1 a J2).

Z hľadiska ochrany voči účinkom vodných pár sa v tomto výskume nachádzajú dva systémy. Prvým je difúzne otvorený systém, aplikovaný pri piatich vzorkách (V5, J1–J4). Druhý systém zahŕňa inteligentnú klimamembránu s premenlivým difúznym odporom (V1–V4 a J5), meniacim sa v závislosti na rozdieloch tlakov vodných pár v interiéri a exteriéri. V tab. 13 sú graficky znázornené horizontálne prierezy všetkých skladieb s individuálnymi poradiami vrstiev. Exteriér sa nachádza na hornej strane, interiér v spodnej časti.

Použité tepelné izolácie (TI) sa odlišujú v materiálovej báze, hrúbke, ale aj poradí ich aplikácie. Najpočetnejšiu skupinu tvoria izolácie na báze minerálnych vlákien, či už ide o sklené vlákna (Isover Multimax, Isover Clima alebo fúkaná TI Isover Insulfit) alebo čadičové vlákna (Isover TF Profi a fúkaná izolácia Isover Ganulate). Druhou najčastejšie použitou je drevovláknitá izolácia Steico Protect v hrúbke 40 alebo 100 mm. Pri viacerých skladbách je základná TI medzi stĺpikmi doplnená z vnútornej strany doskami s jadrom z fenolovej peny Kingspan Kooltherm K5, ktoré sa v tomto výskume vyznačujú najnižším súčiniteľom tepelnej vodivosti spomedzi všetkých TI. V dvoch skladbách je použitá aj vrstvená tepelná izolácia, z 90 mm zložená zo šedého polystyrénu, doplneného 30 mm izoláciou z čadičových vlákien. Pre výskum a porovnanie prírodnej tepelnej izolácie bola vytvorená skladba, ktorá pozostáva výhradne zo zrubových profilov z vonkajšej a vnútornej strany, vyplnená tepelnou izoláciou z ovčej vlny.

<p>V1: Silikónová omietka Weber HN8C hr. 2 mm Lep. stierka + sklotextilná mriežka hr. 5 mm Steico Protect hr. 40 mm Isover Vario KM Duplex UV Isover Multimax 030 hr. 220 mm Steico Protect hr. 100 mm Isover Vario KM Duplex UV OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 	<p>V2: Drev. obklad - zrub. profil 28/160 mm Vzduchová dutina - laty 60/40 mm Isover Vario KM Duplex UV Isover Multimax 030 hr. 220 mm Steico Protect hr. 100 mm Isover Vario KM Duplex UV OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 
<p>V3: Drev. obklad - zrub. profil 28/160 mm Vzduchová dutina - laty 60/40 mm Isover Vario KM Duplex UV Steico Protect hr. 100 mm Isover Multimax 030 hr. 220 mm Isover Vario KM Duplex UV OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 	<p>V4: Drev. obklad - zrub. profil 28/160 mm Vzduchová dutina - laty 60/40 mm Isover Vario KM Duplex UV Isover TF Profi hr. 100 mm Isover Multimax 030 hr. 220 mm Isover Vario KM Duplex UV OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 
<p>V5: Silikónová omietka Weber OR1E hr. 2 mm Lep. stierka + sklotextilná mriežka hr. 5 mm Isover Twinner hr. 120 mm Isover Insulfit - skl. vlákna hr. 220 mm Kingspan Kooltherm K5 hr. 40 mm OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 	<p>J4: Silikónová omietka Weber OR1E hr. 2 mm Lep. stierka + sklotextilná mriežka hr. 5 mm Isover Clima 34 hr. 100 mm Isover Multimax 030 hr. 220 mm Kingspan Kooltherm K5 hr. 40 mm OSB 3 P + D hr. 12 mm</p> 
<p>J1: Zrubový profil - masív 68/160 mm Ovčia vlna hr. 220 mm Zrubový profil - masív 68/160 mm</p> 	<p>J2: Zrubový profil - masív 68/160 mm Isover Granulate čadičové vlákna hr. 220 mm Kingspan Kooltherm K5 hr. 40 mm</p> 

Tab. 13: Experimentálne skladby výskumu drevostavieb KPSU Uniza

Základné fyzikálne parametre jednotlivých materiálov pre ich stacionárny stav sú zhrnuté v tab. 14, pričom predstavujú návrhové hodnoty. Patria medzi ne objemová hmotnosť ρ , súčiniteľ tepelnej vodivosti λ , faktor difúzneho odporu μ a merná tepelná kapacita c .

Materiál	ρ [kg/m ³]	λ [W/ (m ² .K)]	μ [-]	c [J/ (kg.K)]
Drevený obklad	400	0,180	157	2510
Silikónová omietka Weber	1600	0,860	130	920
Lepiaci stierka so sklotextilnou siečkou	1660	0,900	20	900
Zrubový profil	400	0,180	157	2510
Inteligentná klimamembrána Isover Vario KM Duplex UV	364	0,350	100000	1470
Drevovláknitá tepelná izolácia Steico Protect	265	0,048	5	2100
Isover Multimax 030 - TI na báze sklených vlákien	64	0,030	1	940
Isover Clima 034 - TI na báze sklených vlákien	148	0,034	1	1030
Isover TF Profi - TI na báze čadičových vlákien	100	0,036	1	1020
Isover Insulfit - fúkaná TI na báze sklených vlákien	35	0,043	1	940
Isover Granulate - fúkaná TI na báze čadičových vlákien	50	0,040	1	1020
Isover Twinner - vrstvená TI z 30 mm Isover TF Profi a 90 mm Isover Greywall	25	0,033	30	1100
Kingspan Kooltherm K5 - TI s jadrom z tuhej fenolovej peny	35	0,021	35	1400
Ovčia vlna	16	0,042	1,5	1720
OSB 3 P+D	650	0,130	50	1700

Tab. 14: Základné fyzikálne parametre použitých materiálov

Tieto skladby boli navrhované pre budovy s takmer nulovou potrebou energie, čomu odpovedá aj ich výsledný tepelný odpor R_T a súčiniteľ prechodu tepla U (tab. 15), vypočítané pre nehomogénne konštrukcie v súlade s [2]. V rámci sledovania skutočného správania sa jednotlivých konštrukcií je nevyhnutné poznať aj ich dynamické charakteristiky. Dve z nich – teplotný útlm konštrukcie ν a fázový posun teplotných kmitov ψ – sú zhrnuté v tab. 15 [3].

Skladba	R_T [(m ² .K)/W]	U [W/(m ² .K)]	ν [-]	ψ [h]
V1	9,06	0,110	329,9	12,9
V2	7,99	0,125	248,8	10,3
V3	7,99	0,125	247,5	10,3
V4	8,58	0,117	115,6	6,5
V5	9,98	0,100	131,5	6,2
J1	5,11	0,196	112,3	9,6
J2	6,92	0,145	141,9	9,2
J4	10,75	0,093	206,2	9,1

Tab. 15: Základné fyzikálne charakteristiky sledovaných skladieb

Ako môžeme vidieť, tieto charakteristiky nie sú plne závislé na samotnom tepelnom odpore skladby. Napríklad, konštrukcia V5 sa vyznačuje najvyšším tepelným odporom a teda najnižším súčiniteľom prechodu tepla, avšak hodnoty teplotného útlmu a fázového posunu teplotných kmitov sú medzi sledovanými konštrukciami priemerné. Na rozdiel od tejto konštrukcie, skladba V1 dosiahla najlepšie výsledky čo sa týka dynamických charakteristík. Tieto sú zrejme spôsobené najvyšším množstvom drevovláknitej izolácie spomedzi všetkých skladieb. Tento predpoklad podporujú aj výsledky konštrukcií V2 a V3, taktiež obsahujúcich drevovláknitú izoláciu, ktoré sú z hľadiska teplotného útlmu a fázového posunu teplotných kmitov na druhom mieste.

Prekvapivým výsledkom bola skladba s označením J1. Z hľadiska prechodu tepla má táto skladba najhoršie výsledky, v prípade fázového posunu teplotných kmitov ale dosahuje nadpriemernú hodnotu. Toto nás viedlo k bližšiemu skúmaniu tejto konštrukcie. Doterajšie výsledky toho výskumu sú zverejnené v [4] a pre porovnanie zahŕňajú posúdenie tejto konštrukcie – J1 – a jej najpodobnejšej – J2.

Posúdenie je z hľadiska environmentálneho, kde je porovnaný ekoindex, primárna energia, potenciál globálneho otepľovania a acidifikácie. Z tohto pohľadu je prírodnejšia konštrukcia J1 vo vedúcom postavení.

Otázkou ale bolo či je možné aby táto skladba bola výhodnejšia nielen z hľadiska udržateľnosti životného prostredia, ale aj z hľadiska stavebnej tepelnej techniky. Pre tieto potreby boli porovnané teploty a relatívne vlhkosti v oboch konštrukciách v priebehu celého roka, bližšie analyzované v troch samostatných týždňoch vybraných na reprezentáciu zimného, jarného a letného obdobia.

V zimnom období bola teplota najbližšie k interiéru vyššia pri konštrukcii J1, napriek tomu, že pod vonkajším obkladom bola jej teplota nižšia ako v prípade J2. Rovnaký fenomén sa objavil aj v jarnom období. Naopak, v lete sa tento trend otočil a napriek tomu, že z vonkajšej strany dosiahla vyššie teploty J1, vnútorné teploty tu boli nižšie. V prípade relatívnej vlhkosti (Rh) sú výsledky podobného charakteru. Skladba J1, ktorá z exteriérovej strany dosahovala v zime a lete vyššie hodnoty, dokázala dosiahnuť pokles až o 50 % Rh, zatiaľ čo v prípade J2 bola táto hodnota 20 % Rh. V letnom období sa tento trend podobne ako pri teplote obrátil.

Tieto zistenia jednoznačne poukazujú na nevyhnutnosť dynamického sledovania navrhovaných skladieb. V takýchto prípadoch totiž vyššia hodnota súčiniteľa prechodu tepla nemusí vždy znamenať priaznivejší vývoj teploty a relatívnej vlhkosti.

V roku 2019 sme pristúpili ku kontrole stavu týchto experimentálnych konštrukcií. V rámci tohto procesu sme boli nútení rozobrať všetky skladby, pričom sme kontrolovali ich stav prvotne z vizuálneho hľadiska, následne z hľadiska potenciálneho zhoršenia fyzikálnych vlastností. Merania boli zamerané predovšetkým na zistenie hmotnostnej vlhkosti tepelných izolácií a drevených prvkov, ale tiež overenie súčiniteľa tepelnej vodivosti rôznych TI. Zistenia tohto snaženia sú podrobne rozoberané v [3] a [5].

Už vizuálna obhliadka poukázala na prvé problémy. Prvým bola presakujúca voda z exteriérového prostredia do drevovláknitej izolácie v prípade skladby V3 (obr. 118). K priesaku došlo vplyvom nevyhnutného prestupu káblov snímačov do exteriéru. Po meraní bola v tomto mieste zistená zvýšená hmotnostná vlhkosť – 18,6 %. Tento prípad nie je síce charakteristický pre všetky stavby, avšak prestupy cez obvodové steny ako také nie sú výnimkou a preto je aj na základe tohto zistenia nevyhnutné dbať na precízne vyhotovenie a utesnenie detailov okolo drevovláknitých izolácií, ktoré majú schopnosť regulovať vlhkosť vo svojom okolí. Táto vlastnosť je bežných prípadoch prínosná, avšak v prípade podobnej poruchy môže dôjsť k závažnej degradácii tohto materiálu. Výsledkom môže byť stena, ktorá neplní svoju primárnu funkciu a v konečnom dôsledku negatívne ovplyvní energetickú bilanciu celej stavby.

Ďalším, nemenej závažným nedostatkom zisteným vizuálnou prehliadkou, bolo objavenie vzduchových dutín, vytvorených v skladbách s fúkanou minerálnou TI. Tento problém bol objavený vo všetkých troch skladbách, pričom výraznejšie dutiny boli vytvorené v prípade sklenených vlákien.



Obr. 118: Priesak vody z exteriérového prostredia v prípade skladby V3

Najrozsiahlejšie dutiny boli v prípade všetkých troch skladieb lokalizované v hlave steny, dosahujúc pri konštrukcii V5 až 80 mm. Táto dutina bola priebežná po celej hrúbke TI vrstvy, pričom túto maximálnu výšku dosahovala v strede konštrukcie. Druhým miestom tvorby dutín bol stred výšky týchto skladieb. Pre potreby merania priebehov teploty a relatívnej vlhkosti bol do tohto miesta umiestnený drôt, na ktorom boli osadené snímače. Napriek jeho minimálnej hrúbke ale dokázal spôsobiť nerovnomerné naplnenie tepelnou izoláciou. Dutina, ktorej vytvorenie spôsobil neprebíhala po celej hrúbke konštrukcie a dosiahla výšku maximálne 30 mm. Obe sú vyznačené na obr. 119.

Tieto dutiny boli v procese kompletizácie obhliadky doplnené rovnakou tepelnou izoláciou, aby boli odstránené tieto tepelné mosty. Na vyhodnotenie vplyvu tejto zmeny bolo potrebné počkať dlhšie časové obdobie, aby sa stav konštrukcie dostatočne ustálil. Pri výslednom porovnaní teploty a relatívnej vlhkosti pred a po tejto oprave boli zistené výrazné zmeny. Vzhľadom na charakter poruchy v podobe tepelného mosta boli tieto veličiny porovnávané v zimnom období. Oprava a doplnenie hornej dutiny spôsobili vzrast teploty v konštrukcii takmer o 8 °C už na začiatku vrstvy fúkanej TI. Z hľadiska relatívnej vlhkosti bol zaznamenaný pokles o 45 %. V strednej pozícii boli tieto zmeny o niečo menej výrazné, kde nárast teploty predstavoval 4 °C a pokles Rh o 7 %. Pre overenie relevantnosti bola vyhodnotená aj najnižšia pozícia snímačov, kde nebol objavený žiaden nedostatok. V rámci tejto časti skladby bola teplota aj relatívna vlhkosť rovnaká v oboch porovnávaných rokoch.

Po vizuálnej prehliadke nasledovala kontrola hmotnostnej vlhkosti a hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti použitých materiálov. Proces zisťovania hmotnostnej vlhkosti TI začal odoberaním vzoriek v charakteristických miestach, spravidla v troch výškových úrovniach aby bolo možné výsledky relevantne zhodnotiť. Tieto vzorky boli následne hermeticky uzavreté aby bolo možné ich preniesť do laboratória, kde sa nachádzala sušička materiálov. Boli odvážené a postupne sušené, pričom sme počas celého sušenia priebežne monitorovali ich hmotnosť až kým nedosiahli ustálený stav. Na základe počiatkovej a konečnej hmotnosti bolo potom možné pristúpiť k výpočtu a následnému vyhodnoteniu z hľadiska hmotnostnej vlhkosti. Drevené prvky ako nosné stĺpiky a drevovláknité izolácie boli merané priamo in-situ pomocou zariadení pre meranie hmotnostnej vlhkosti – Merlin EVO25, Testo a Greisinger so zabodávajúcimi a zatlákačmi hrotmi. Okrem toho bol meraný súčiniteľ tepelnej vodivosti prístrojom Isomet 2114.



Obr. 119: Skladba V5 s objavenými vzduchovými dutinami

V prípade nosných drevených prvkov bola maximálna nameraná vlhkosť 11,8 %, čo je hlboko pod úrovňou vlhkosti predstavujúcej nebezpečenstvo degradácie dreva 18 %.

Najvyššia hmotnostná vlhkosť v rámci tepelných izolácií bola nameraná v drevovláknitej izolácii a to nie len v prípade skladby V3, ale aj skladby V1, pričom v oboch bola vlhkosť zhodne 7,8 %. Za nimi nasledoval tento istý materiál v skladbe V2 spoločne s ovčou vlnou z konštrukcie J1, ktoré mierne presiahli hodnotu 5 %. Ostatné tepelné izolácie dosiahli hmotnostnú vlhkosť nepresahujúcu 3 %.

Pre vyhodnotenie zmeny súčiniteľa tepelnej vodivosti boli porovnávané pôvodné návrhové hodnoty s aktuálne nameranými hodnotami. Následne bola vypočítaná percentuálna zmena. Najväčšia zmena spomedzi tepelných izolácií bola nameraná v prípade drevovláknitých izolácií, predovšetkým v prípade spomínanej konštrukcie V3 s objaveným priesakom, ktorá dosiahla hodnotu 90,2 %. Tento materiál vykázal vysoký posun aj v prípade skladby V1 – 79,1 %. Za týmito nasledovala vrstvená TI, kde v časti šedého polystyrénu zmena súčiniteľa tepelnej vodivosti dosiahla 67,3 %. V prípade ostatných izolácií táto zmena nepresiahla 20 %.

Ďalšími časťami výskumu je sledovanie a porovnávanie vplyvu orientácie voči svetovým stranám a prevetrávaných vzduchových dutín. Skladby V2 a V3 nám umožňujú sledovanie zmeny poradia vrstiev tepelných izolácií a ich následné porovnávanie.

Významná časť výskumu je sústredená na simulácie týchto skladieb, či už v rámci 1D šírenia tepla a vlhkosti v programe Wufi Pro alebo 3D šírenia v programoch Wufi Plus alebo DesignBuilder.

V programe DesignBuilder bola vytvorená parametrická štúdia rodinného domu zameraná predovšetkým na sledovanie využitia jednotlivých skladieb v rámci ročného hodnotenia nákladov na vykurovanie. Okrem toho bol ale sledovaný aj vplyv rôznych faktorov tvaru budovy, percento presklených plôch obalových konštrukcií a variantné vykurovacie systémy. Všetky výsledky sú zhrnuté v [3].

Množstvo dát získavaných z tohto výskumu nám neustále poskytuje ďalšie možnosti napredovania. Neustále sledovanie a vyhodnocovanie údajov umožňuje zachytiť a analyzovať výkyvy v rámci teploty a relatívnej vlhkosti každej skladby. Ďalšou možnosťou vývoja je aj výmena jednej alebo viacerých skladieb a využitie progresívnych materiálov, používaných v súčasnosti alebo perspektívnych pre budúcnosť. Tento výskum je preto prínosný nielen z vedeckého hľadiska, ale aj pre využitie v pedagogickej praxi, kde vďaka nemu dokážeme študentom poskytovať stále nové informácie.

Použitá literatúra

- [1] ĎURICA, P. a kol. 2017. *Energetické a environmentálne navrhovanie a hodnotenie budov*. Žilina: EDIS.
- [2] STN EN ISO 6946. 2008. *Stavebné konštrukcie. Tepelný odpor a súčiniteľ prechodu tepla. Výpočtová metóda*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- [3] MICHÁLKOVÁ, D. 2020. *Teoreticko-experimentálna analýza a vývoj ľahkých obvodových plášťov pasívnych drevodomov*. Dizertačná práca. Žilinská univerzita v Žiline.
- [4] MICHÁLKOVÁ, D.; ĎURICA, P. 2022a. Natural materials in building construction - annual evaluation. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 38, 222–227.
- [5] MICHÁLKOVÁ, D.; ĎURICA, P. 2022b. Experimental Verification of Thermal Insulation in Timber Framed Walls. *Materials*, 15(6), 2040.

Kontakty

Ing. Daniela Micháľková, PhD.: daniela.michalkova@uniza.sk

VZDUCHOTESNOSŤ MODERNÝCH DREVOSTAVIEB

Ing. Peter Kysela, PhD.¹

¹ Katedra pozemného stavitelstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

Vzduchotesnosť budov je problematikou ktorej sa venuje už dlhoročný výskum. Motivácie vychádzali predovšetkým zo snahy o znižovanie energetickej náročnosti budov a dlhšej životnosti konštrukcií. Nezanedbateľný vplyv vzduchotesnosti na životnosť konštrukcií je dôležitý najmä u drevostavieb, kde prúdenie vlhkého vzduchu môže výrazne ohroziť konštrukčné prvky zvýšením hmotnostnej vlhkosti.

Vzduchotesnosť

Vzduchotesnosťou sa rozumie schopnosť určitého prvku (obálky budovy alebo iných dielčích častí) prepúšťať vzduch. Čím menej vzduchu prvok za určitých podmienok prepustí, tým je tesnejší. K tomu aby prvok prepúšťal vzduch, je potrebné splniť dve základné podmienky:

- prvok musí obsahovať netesnosti – miesta, kde môže vzduch prúdiť,
- prvok musí byť vystavený tlakovému rozdielu (rozdielny tlak vzduchu v prostrediach ktoré prvok oddeľuje [1].

História merania tesnosti:

- 1974 – norma DIN 4108-7 stanovuje vzduchovú priepustnosť okien,
- 1989 – uskutočňuje sa prvé meranie tesnosti metódou „blower door“,
- 1990 – vzniká návrh normy ISO/DIS 9972 na meranie tesnosti,
- 1991 – prvá budova dosahuje úroveň tesnosti n_{50} ,
- 2001 – do platnosti vstupuje norma STN 13829 Tepelno-technické vlastnosti budov. Stanovenie vzduchovej priepustnosti budov. Metóda pretlaku pomocou ventilátora,
- 2002 – smernicou 2002/97/ES sa stanovujú požiadavky na jednotlivé triedy celkovej spotreby energie budov vrátane strát infiltráciou,
- 2002 – do platnosti vstupuje norma STN EN 12114 Tepelno-technické vlastnosti budov. Vzduchová priepustnosť budov stavebných prvkov a konštrukcií Laboratórna skúšobná metóda.
- 2015 – do platnosti vstupuje norma STN EN ISO 9972 Tepelno-technické vlastnosti budov. Stanovenie vzduchovej priepustnosti budov. Metóda pretlaku pomocou ventilátora.

Netesnosti v obálke budovy

Netesnosti v obálke budovy, ktoré vznikajú v dôsledku chýb a nedôslednosti pri návrhu a výstavbe, sú jednoznačné miesta, kde vzduch opúšťa vetrací systém. Vznikajú neplánovane a viac-menej náhodne. Ich rozmiestnenie a veľkosť sa nedá dopredu úplne odhadnúť, preto sa nedajú ani spoľahlivo započítať do návrhu vetracieho systému. Na rozdiel od otvorov navrhnutých zámerne za účelom vetrania, neumožňujú žiadnu reguláciu prietoku vetracieho systému zo strany užívateľa. Nie je teda vhodné považovať netesnosti v obálke budovy za súčasť vetracieho systému [2]. Ich výskyt je parazitným javom, ktorému je potrebné počas návrhu a výstavby systematicky predchádzať [1].

Pre dosiahnutie čo najlepšej úrovne vzduchotesnosti stavby, je potrebné vytvoriť vzduchotesnú obálku budovy. U murovaných a betónových nosných konštrukcií sa vzduchotesná vrstva vytvorí zmonolitnením daných konštrukcií, prípadne súvislou vrstvou omietky. Netesnosti pri daných konštrukciách sa objavujú najčastejšie pri styku vodorovných a zvislých konštrukcií, ktoré býva riešené pretmelením daných spojov trvalo pružným tmelom, prípadne prelepením spojov izolačnými fóliami.

Ďaleko rizikovejšou skupinou pre výskyt netesností bývajú stavby na báze dreva. U týchto stavieb tvorí vzduchotesnú vrstvu, práve izolačná fólia alebo iné vzduchotesné materiály ako niektoré druhy OSB dosiek s povrchovou úpravou. Kvalita vyhotovenia vzduchotesnej vrstvy ako hlavne druh a prelepenie spoja izolácií a napojenie zvislých vzduchotesných vrstiev na vodorovné sa priamo odrazí na celkovej vzduchotesnosti budovy [3].

Vhodné materiály

Základným prvkom je vzduchotesná vrstva, ktorej materiál je volený podľa druhu stavby. Pri betónových a murovaných stavbách je vzduchotesná vrstva tvorená spojitou vrstvou omietky a materiálmi s uzavretou štruktúrou. Pri drevostavbách je vzduchotesná vrstva najčastejšie tvorená záklopom z OSB dosiek alebo parotesnou fóliou. Spojie materiálov sa utesnia preložením, pretmelením alebo prelepením pomocou pásky [4].

Prestupy cez vzduchotesnú vrstvu musia byť utesnené pomocou pásky alebo špeciálnych výrobkov na to určených ako prestupné manžety, prechodky, vzduchotesné časti elektroinštalácie [5] [6].

Kvalita okien a jeho tesnení býva veľmi dôležitým faktorom pri hodnotení vzduchotesnosti. Je to nielen kvôli kvalite samotného okna ale hlavne aj vytvoreniu vzduchotesného spoja medzi okenným rámom a vzduchotesnou vrstvou. Najčastejšie lokalizované úniky sú práve v rohoch okien a spojení so vzduchotesnou vrstvou. Samotná kvalita okien môže výrazne zvýšiť vzduchotesnosť stavby a znížiť tak úsporu energie na vykurovaní až o cca. 70% [7].

Hodnotenie vzduchotesnosti

V Slovenskej a Českej republike sa vzduchotesnosť hodnotí ako intenzita výmeny vzduchu pri tlakovom rozdieli 50 Pa medzi interiérom a exteriérom – hodnota označovaná ako n_{50} [1/h]. Pri hodnote n_{50} je vzťažnou veličinou celkový objem meraného priestoru. Pri prievzdušnosti je vzťažnou veličinou plocha obálky meraného priestoru a vypočíta sa podľa STN EN 13829 podľa nasledujúceho vzťahu:

$$q_{50} = V_{50}/A_E \quad [\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)] \quad (3.1)$$

kde V_{50} je objemový tok vzduchu pre udržanie tlakového rozdielu 50 Pa [m^3],
 A_E plocha obálky meraného priestoru [m^2].

Hodnota q_{50} uvádza, koľko m^3 priemerne prejde 1 m^2 obálky budovy za 1 h pri tlakovom rozdieli 50 Pa.

Vzduchotesnosť stavieb v SR

Na Slovensku odporúčané hodnoty intenzity výmeny vzduchu nie sú dané predpisom v norme, ale používajú sa prevzaté hodnoty z noriem platných v Českej republike ČSN 73 0540-2 (2011), Rakúska ÖNORM B 8110-5 (2011) a Nemecka DIN 4108-7 (2011). Dosiahnutie požadovanej hodnoty $n_{50} < 1,5$ [1/h] pre nízkoenergetické domy a $n_{50} < 0,6$ [1/h] pre energeticky pasívne domy z hľadiska potreby energie na vykurovanie je kľúčové. V porovnaní s budovami, ktoré sú zhotovené štandardnými stavebnými postupmi bez zvýšených nárokov na vzduchotesnosť sa teoretická hodnota intenzity výmeny vzduchu pohybuje na úrovni hodnoty $n_{50} > 4,5$ [1/h] alebo aj niekoľko násobne viac [8] [9].

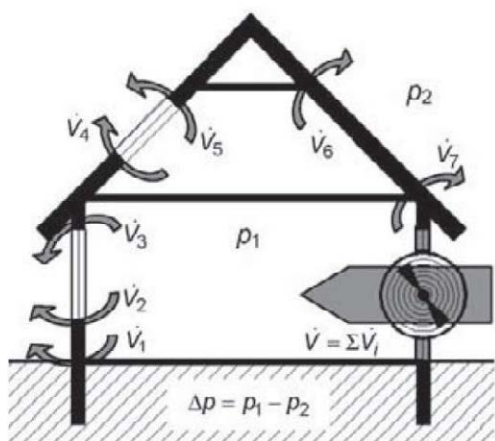
Metódy merania vzduchotesnosti budov

Blower door metóda - metóda tlakového spádu s externým ventilátorom

Najčastejšie používanou metódou pre meranie vzduchotesnosti budov je blower door test. Je to vlastne metóda tlakového spádu s externým ventilátorom. Názov metódy je odvodený z anglického prekladu blower-ventilátor, door-dvere. Spočíva v umiestnení ventilátora do vstupných dverí alebo iného otvoru v obvodovom plášti.

Metoda tlakového spádu spočíva v meraní objemového toku vzduchu cez obálku budovy pri známom merateľnom tlakovom rozdieli, pričom sa volí tlakový rozdiel v rozmedzí 20 až 80 Pa, tak aby tlakový rozdiel bol vyšší než rozdiel tlaku vzduchu v interiéri a exteriéri budovy vyvolaný klimatickými vplyvmi. Tlakového rozdielu sa dosiahne pomocou ventilátora s regulovateľnými otáčkami, ktorý sa osadí do výplne otvoru (spravidla dverí) v obvodovom plášti. Pričom pre každý ustálený tlakový rozdiel sa zmeria objemový tok vzduchu.

Výsledky merania zahrňujú dvojice hodnôt – závislosť meraného tlakového rozdielu vzduchu a odpovedajúceho toku vzduchu. Tieto hodnoty sa vo výsledku vynášajú do grafu. Obvykle sa uskutočňujú dve hodnoty merania, a to pri vyvolaní podtlaku v budove a v druhom prípade pri vyvolaní pretlaku v budove [10].



Obr. 120: Princíp metódy tlakového spádu s externým ventilátorom [1]

Pri vykreslení grafu v logaritmickom merítke má závislosť objemového toku vzduchu na tlakovom rozdieli tvar priamky, ktorej rovnica sa získa zlogaritmovaním empirickej rovnice prúdenia:

$$\log(V) = \log(C) + n \cdot \log(\Delta p)$$

Hodnoty n a $\log(C)$ je potom možné jednoducho vypočítať z nameraných hodnôt vhodnou metódou lineárnej regresie [1].

Štandardná zostava sa skladá z externého ventilátora s regulovateľnými otáčkami pre vyvolanie tlakového rozdielu, prístroja pre zmeranie tlakového rozdielu medzi vnútorným a vonkajším prostredím, regulátora otáčok, teleskopického rámu a vzduchotesnej plachty

pre osadenie a utesnenie ventilátora do otvoru, prístroja na meranie objemového toku vzduchu (zvyčajne súčasťou ventilátora) a vybavenia pre záznam dát a údajov, zvyčajne laptop. Metódy merania

Pretlak a podtlak

Testovanie vzduchotesnosti budovy sa zvyčajne zrealizuje pre podtlak aj pretlak. Je to nielen z dôvodu pre dosiahnutie väčšej presnosti merania, ale aj pretože niektoré chyby, ktoré mohli nastať pri realizácii sa nemusia preukázať pro oboch skúškach. Typickým príkladom je použitie vzduchotesných fólií pri drevostavbách, kde sa môže netesnosť prejaviť len pri určitom smere prúdenia vzduchu (prekrývanie spojov izolácií).

Laboratórne metódy merania vzduchovej priepustnosti

Merania vzduchotesnosti stavebných prvkov je možné vykonávať v kontrolovaných laboratórnych podmienkach alebo na mieste podľa STN EN 12114. V oboch prípadoch to spočíva v umiestnení pretlakovej komory na vnútornej strane stavebného skúmaného dielu. V oboch prípadoch je vzduch privádzaný do komory rýchlosťou potrebnou na udržanie špecifického rozdielu tlaku naprieč vzorkou a je meraný výsledný privádzaný prietok [11]. Výsledky takýchto skúšok sa zvyčajne uvádzajú ako úniky vzduchu na jednotku plochy ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) alebo únik vzduchu na jednotku dĺžky trhliny ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$), obe sú špecifikované pre tlakový rozdiel 1 Pa alebo pri inom špecifikovanom tlakovom rozdieli. Charakteristiky prúdenia vzduchu stavebných prvkov je možné presne určiť za laboratórnych skúšobných podmienok. Výhodou laboratórnych testov je, že je možné skúmať veľké množstvo vzoriek za podobných podmienok, ktoré nie sú ovplyvnené zmenami klimatických podmienok. Nevýhodou laboratórnych testov však je, že získané výsledky sa môžu výrazne líšiť od výsledkov získaných na mieste pri zdanlivo identických komponentoch. Je to nevyhnutné kvôli rozdielom v kontrole kvality medzi laboratóriom a staveniskom. V prípade skúšok na mieste sa zvyčajne vyskytuje rozdiel medzi tlakom v budove a vonkajším, ktorý by mohol spôsobiť únik vzduchu cez samotnú pretlakovú komoru, a pri použití skúšobnej komory sa potom zavedú chyby v nameraných prietokoch vzduchu. Tieto chyby je možné výrazne znížiť vyrovnaním tlaku v zbernej komore na tlak v miestnosti obsahujúcej stavebný diel.

To sa dá dosiahnuť použitím pomocného ventilátora v miestnosti spojenej so zbernou komorou, aby sa udržal nulový tlakový rozdiel medzi komorou a miestnosťou [12].

Metóda tlakového spádu

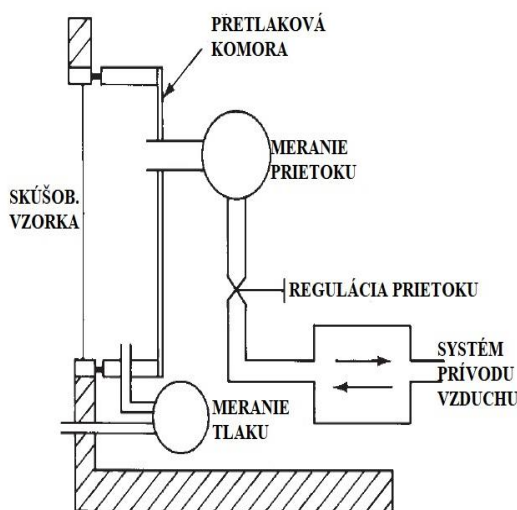
Princíp tejto metódy je podobný princípu merania celkovej vzduchotesnosti budov metódou tlakového spádu s pomocou externého ventilátora. Meraná laboratórna vzorka sa vystaví sérii odstupňovaných tlakových rozdielov známej hodnoty. Tlakový rozdiel je vyvolaný ventilátorom s plynule regulovateľnými otáčkami. Na každej úrovni tlakového rozdielu sa zmeria objemový tok vzduchu prechádzajúci vzorkou. Výsledky merania sa vynesú ako body do grafu v závislosti na objemovom toku vzduchu a tlakovom rozdieli. Obe osi grafu sú v logaritmickom merítke. Vhodnou metódou lineárnej regresie sa určia parametre rovnice prúdenia C a n [1].

Požiadavky na meracie zariadenie a postup merania sa môžu líšiť podľa typu skúmaného prvku. Potreba prívodu vzduchu pre dosiahnutie určitého tlakového rozdielu môže byť značne odlišná. Je to priamoúmerné vzduchotesnosti skúmaného prvku. Pre prvky s vysokou úrovňou vzduchotesnosti nie je potrebný prívod veľkého množstva vzduchu, ale je potrebná veľmi citlivá regulácia objemového prietoku privádzaného vzduchu. Naopak pre prvky s nízkou úrovňou vzduchotesnosti je potrebné priviesť väčšie množstvo vzduchu pre vytvorenie tlakového rozdielu [13].

Hlavnú časť laboratórneho zariadenia tvorí tlaková skúšobná komora. Jej prednú stranu tvorí osadzovací rám kde sa upevňuje meraná skúšobná vzorka vzduchotesnými páskami a prostredníctvom kovového prítlačného rámu s kovovými svorkami. Na zadnej strane je pripevnená príruha prívodného potrubia vzduchu, na ktorom sú rozmiestnené prietokomery s reguláciou prietoku vzduchu. Prívodné potrubie ukončuje namontovaný ventilátor, ktorý zabezpečuje potrebný objemový prietok vzduchu a jeho tlak.

Pre presné ukazovanie tlakového rozdielu slúži tlakomer prepojený silikónovou hadičkou so skúšobnou tlakovou komorou. Monitorovanie teploty a vlhkosti vonkajšieho a vnútorného prostredia laboratórneho zariadenia počas merania zabezpečuje termo/hygro snímač [14].

Túto metódu je možné využiť aj na meranie vzduchotesnosti výsekov obvodových konštrukcií, ich spojov a ďalších konštrukčných detailov obvodového plášťa. Výsledky týchto meraní majú veľký význam pre podrobné výpočtové modelovanie výmeny vzduchu infiltráciou netesnosťami v obvodovom plášti.



Obr. 121: Schéma laboratórneho zariadenia pre meranie vzduchotesnosti stavebných prvkov [12]

Vplyv sezónnosti a vlhkosti na vzduchotesnosť budovy

O význame relatívnej vlhkosti na výslednú vzduchotesnosť stavieb, je možné uvažovať pri drevestavbách alebo pri stavbách ktorých obalové konštrukcie ako obvodový plášť alebo strešné konštrukcie sú vyhotovené z drevených prvkov. Dôvodom sú zmeny v rozmeroch drevených konštrukčných častí vystavených vysušeniu alebo zvlhčeniu. Zmrašťovanie a napučiavanie drevených prvkov ovplyvňuje vzduchotesnosť niektorých spojov, respektíve vytváranie škár a netesností vplyvom zmrašťovania konštrukčných prvkov.

Sezónnosť meraní a vplyv na výsledok vzduchotesnosti skúmali Kim a Shaw už v roku 1983, kedy na dvoch drevostavbách z rámovej konštrukcie s fóliou, kde vykonali merania každé dva týždne od mája 1982 do júla 1983. Hodnoty ktoré namerali v dvoch neobsadených domoch vykazovali značné sezónne výkyvy, ktoré boli najnižšie koncom leta a jesene a najvyššie v zime a skoro na jar [15].

Vplyvmi sezónnosti a relatívnej vlhkosti na výsledok testov a úrovne vzduchotesnosti budovy sa zaoberala Paula Wahlgren. Testovaním dvoch obytných budov na báze dreva, postavených v roku 2004 a 1993 vo Švédsku. Vyhodnocovala 5 až 6 testov na vzduchotesnosť stavby v priebehu 10tich mesiacov, ktoré potvrdili vyššiu vzduchotesnosť budov počas letného obdobia, oproti chladnejším zimným mesiacom, približne o 10% [16].

Pri stavbe drevených budov je často spoločným odporúčaním chrániť drevené prvky počas výstavby a zabezpečiť, aby bolo stavebné drevo pred začatím stavebných prác správne vysušené. Hlavným dôvodom je vyhnúť sa vysokej úrovni zabudovanej vlhkosti a zvýšenému riziku problémov súvisiacich s vlhkosťou.

Ďalším problémom vyvolaným skutočnosťou, že vzduchotesnosť budovy sa môže určitý čas po jej dokončení zvýšiť, je sezónne obdobie, kedy sa majú vykonať merania vzduchotesnosti. Ak majú predpisy alebo klienti určité požiadavky na vzduchotesnosť budovy, ako je možné zabezpečiť ich splnenie. Je zrejmé, že iba meranie vzduchotesnosti budovy bezprostredne po dokončení stavby nie je dôveryhodným spôsobom hodnotenia skutočnej vzduchotesnosti budovy. Aj skutočnosť, že sa vzduchotesnosť v priebehu roka líši, robí merania problematickejšími, pretože to prakticky znamená, že vzduchotesnosť sa musí merať pri viacerých príležitostiach, aby sa získal úplný obraz [17].

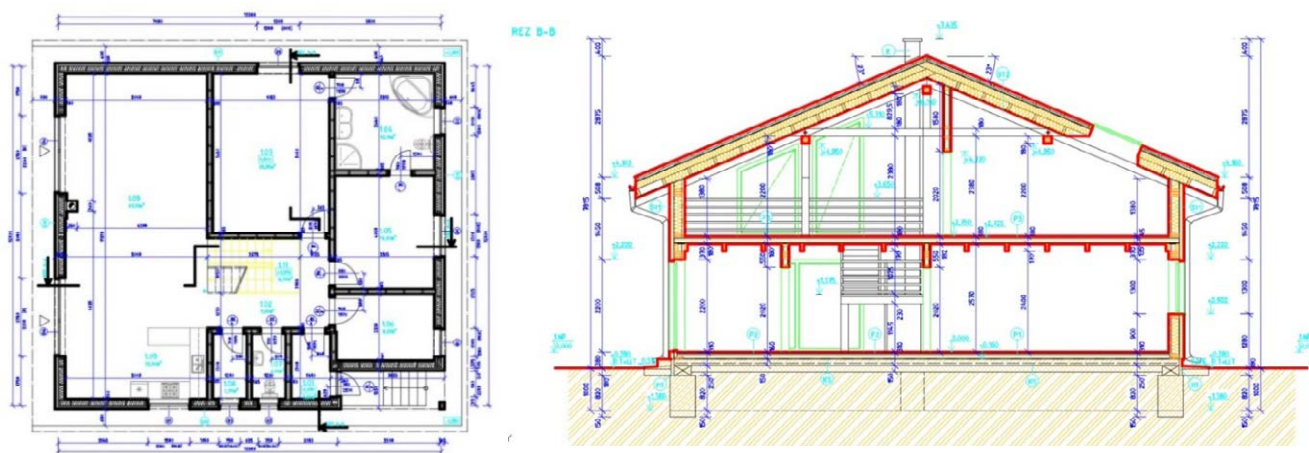
Meranie vzduchotesnosti na KPSU SvF UNIZA

Experimentálne meranie metódou Blower Door v rámovej drevostavbe

Pomocou prístrojového vybavenia Katedry pozemného stavitelstva a urbanizmu, súpravy na meranie blower door Minneapolis Model 4.1, sa vykonalo viacero meraní vzduchotesnosti počas rôznych klimatických období, na modernej drevostavbe.

Opis meranej budovy

Samostatne stojaci rodinný dom, dvojpodlažný, nepodpivničený so sedlovou strechou. Nosná konštrukcia je vytvorená zo stĺpikovej nosnej sústavy s osovou vzdialenosťou stĺpikov 650 mm, z KVH profilu 180 × 60 mm. Vzduchotesná vrstva je vytvorená pomocou parotesnej fólie v konštrukcii stien aj strechy. Obvodový plášť tvorí drevená rámová konštrukcia opláštená DHF doskou, tepelnou izoláciou Frontrock a omietkou Baumit z exteriérovej strany a vzduchotesnou fóliou, OSB doskou, a sadrokartónovým záklopom z interiérovej strany. Strecha objektu je drevená sedlová zaklopená parotesnou fóliou, OSB doskou a sadrokartónom Rigips z interiérovej strany. Strešná krytina je falcovaný plech na plnom debnení. Vnútorný objem vzduchu zistený na základe projektovej dokumentácie dodanej objednávateľom je 783 m³.



Obr. 122: Pôdorys objektu, 1.N.P. vľavo, rez objektu [projektová dokumentácia [18]] Príprava budovy pred vykonaním meraní

V rodinnom dome boli uzatvorené všetky okná a dvere v obvodovom plášti. Všetky vnútorné dvere boli v otvorenej polohe. Vývod komína a digestoru bol opatrený vzduchotesnou spätnou klapkou. Meracie zariadenie bolo umiestnené vo vchodových dverách zo severnej strany. Pred vykonaním meraní bola zistená teplota vnútorného aj vonkajšieho vzduchu a približná rýchlosť vetra pomocou vrtuľkového anemometra [19].

Inštalácia ventilátora a meracej jednotky

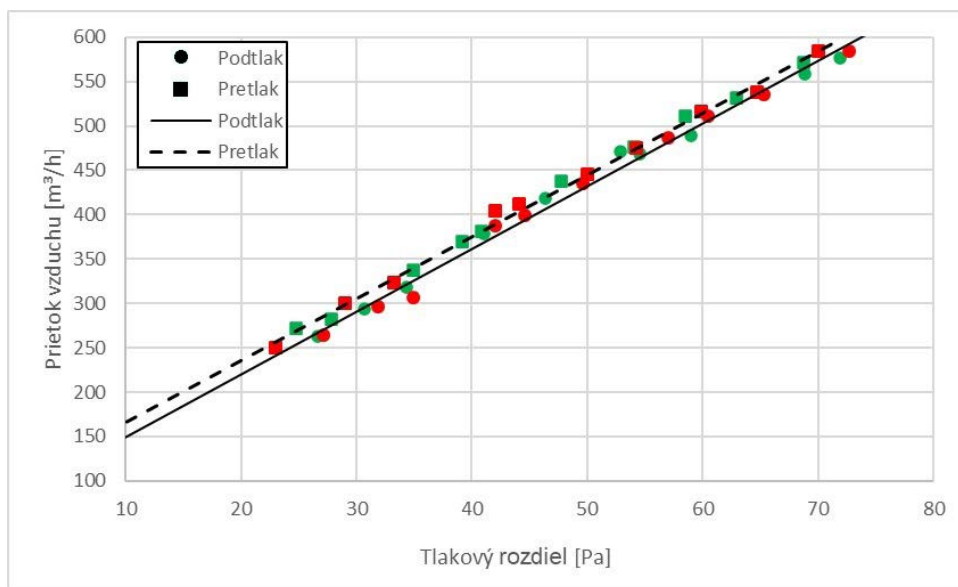
Umiestnenie ventilátora a osadenie vzduchotesnej plachty pomocou nastaviteľného hliníkového rámu bolo zvolené do vstupných dverí objektu. Na presné určenie rozdielov tlaku a meranie prietoku vzduchu bola využitá meracia jednotka DG 700, prepojená s prenosným počítačom s nainštalovaným softvérom TECTITE Express pre meranie vzduchotesnosti budov.



Obr. 123: Osadenie ventilátora do vstupných dverí rodinného domu

Meranie vzduchotesnosti rodinného domu

Prvé meranie sa uskutočnilo 7. októbra 2020. Teplota vonkajšieho vzduchu 13 °C. Polooblačno. Bezvetrie, slabý vietor 1–8 m/s prevažne od severu. Relatívna vlhkosť vonkajšieho vzduchu 71%. Meranie vzduchotesnosti bolo zrealizované 2-krát pre pretlak a 2-krát pre podtlak.



Obr. 124: Grafický priebeh tlakovej skúšky

Po vykonanej tlakovej skúške metódou blower – door, bola určená celková priemerná výmena vzduchu v budove pri pretlaku a podtlaku 50,0 Pa, je $n_{50} = 0,57 [1/h]$.

Opakované meranie v rôznych sezónnych obdobiach

Pre vyhodnotenie vplyvu sezónnosti na výsledok merania vzduchotesnosti budovy, bolo potrebné zopakovať meranie rovnakým postupom ako v predchádzajúcom meraní. Pri tom sa pozorovali klimatické podmienky ako údaje o teplote vnútorného a vonkajšieho vzduchu, rýchlosť prúdenia vetra, a údaje o vlhkosti vzduchu v danom období. Merania boli vykonané rovnakým postupom ako v prvom prípade.

Dátum merania	7. 10. 2020	16. 6. 2021	31. 1. 2022	11. 3. 2022
Priemerná teplota interiér [°C]	23	23	24	23
Priemerná teplota exteriér [°C]	13	26	2	-5
Rýchlosť vetra [m/s]	1,0–8,0	0,0–1,5	1,2–3,0	1,0–3,0
Priemerná vlhkosť vzduchu [%]	71	39	75	52
n_{50} (výmena vzduchu - priemer) [1/h]	0,57	0,58	0,59	0,62
n_{50} percentuálny rozdiel od „x“ [%]	x	+1,75	+3,51	+8,77
q_{50} (vzduch. priep.-priemer) [m ³ /(h.m ²)]	0,97	1,01	1,01	1,07
q_{50} percentuálny rozdiel od „x“ [%]	x	+4,12	+4,12	+10,31
w_{50} (merný obj. tok-priemer) [m ³ /(h.m ²)]	1,86	1,93	1,93	2,05
w_{50} percentuálny rozdiel od „x“ [%]	x	+3,76	+3,76	+10,22

Tab. 16: Percentuálny rozdiel v nameraných výsledkoch

Záver

Meranie vzduchotesnosti rodinného domu potvrdilo že vplyv klimatických podmienok má len minimálny vplyv na výsledok testu vzduchotesnosti. Vplyv klimatických podmienok je zahrnutý vo fyzikálnych vzťahoch, v ktorých je vplyv teploty vzduchu, respektíve jeho entalpia zahrnutá vo výslednej hodnote. Výraznejší vplyv teploty a pôsobenia klimatických zmien na vzduchotesnosť budovy je vyvolaný netesnosťou okenných otvorov, ktoré môžu byť zmenou teploty ovplyvňované výraznejšie ako nosná konštrukcia. Vzduchotesnosť budovy sa pri meraniach počas teplejších období výrazne nemenila. Podstatná zmena bola počas chladných zimných období kedy bola vonkajšia teplota pod bodom mrazu. Výsledné hodnoty vzduchotesnosti boli zhoršené o 8 až 10% v závislosti, od spôsobu hodnotenia. Dôkladná analýza výsledkov však preukázala, že k zhoršeniu vzduchotesnosti dochádzalo 3-násobne viac pri skúškach na pretlak ako podtlak. Z toho je zjavné že k zhoršeniu dochádzalo pravdepodobne skrz objemové zmeny vyplní otvorov a stykov ich tesnení, akoby za túto zmenu mohli byť zodpovedné objemové zmeny nosnej konštrukcie budovy alebo jej vzduchotesnej vrstvy. Poloha tesnení vo výplni otvorov je ďaleko viac ovplyvniteľná smerom prúdenia vzduchu, respektíve záporným alebo kladným tlakovým rozdielom.

Laboratórne meranie v klimatickej komore

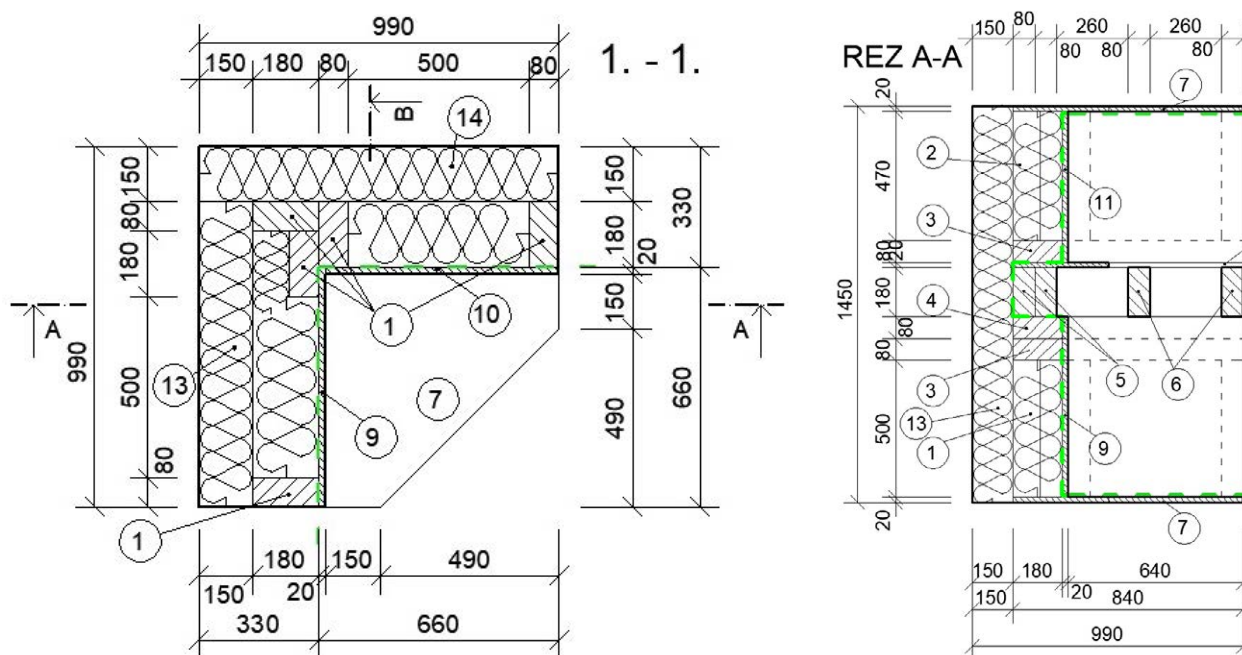
S využitím prístrojového vybavenia Katedry pozemného staviteľstva a urbanizmu SvF UNIZA, sa uskutočnilo laboratórne meranie fragmentu kritického detailu – spoja v skúmanej modernej stavbe. Na základe meraní pri rôznych tlakových úrovniach sa vyhodnotil vplyv klimatických podmienok na vzduchotesnosť fragmentu, respektíve vzduchotesnosť skúmaného spoja, úroveň rýchlosti vzduchu prepúšťaného spojom pri rôznych hodnotách tlaku. Z nameraných údajov vyhodnotil vplyv klimatických faktorov na objemové zmeny konštrukčných prvkov, ktoré sa prejavili na vzduchotesnosti fragmentu.



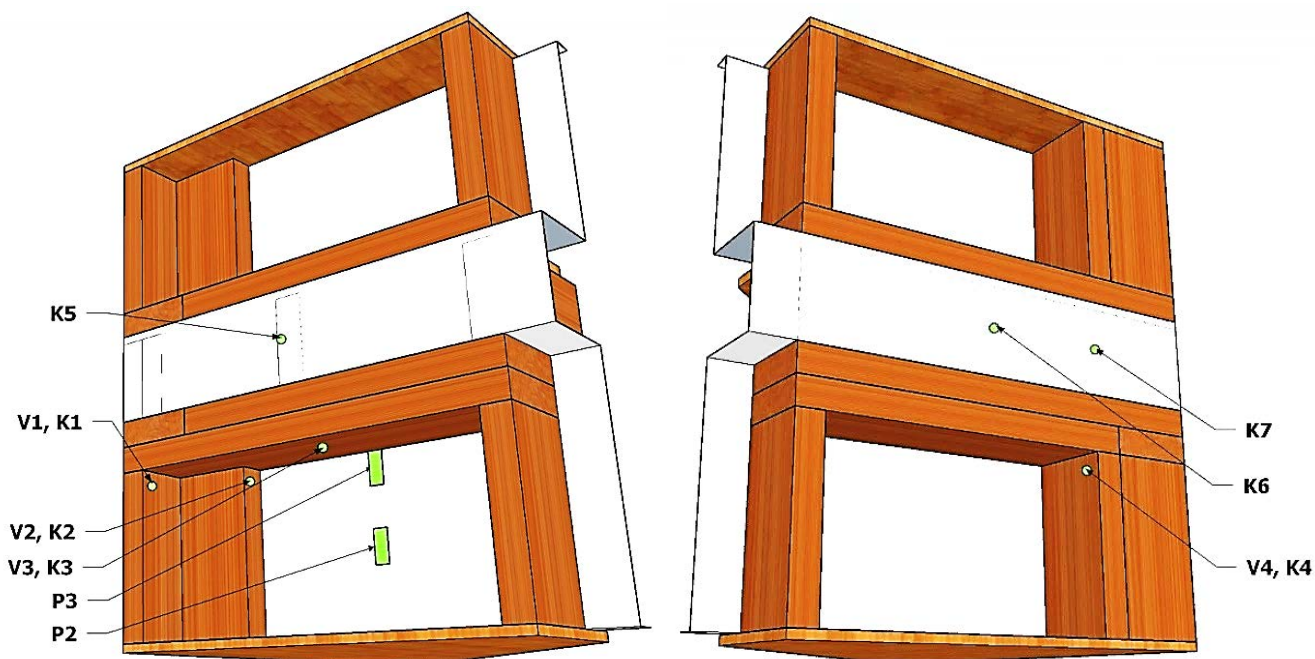
Obr. 125: Umiestnenie fragmentu do klimatickej komory

Fragment modernej drevostavby

Fragment predstavuje kritický detail rámovej modernej drevostavby. Fragment je spojom obvodových stien v rohu objektu a v rovine stropnej konštrukcie. Konštrukcia fragmentu so stĺpkovým nosným systémom zodpovedá najčastejšie používanému usporiadaniu stĺpikov v rohu. Tepelnoizolačná výplň je z minerálnej vlny a opláštenie z drevovláknitých fasádnych dosiek Steico. Vzduchotesná vrstva je tvorená parotesnou fóliou, ktorá súvisle prechádza cez rovinu stropu. Spôsoby uloženia stropných nosníkov sa v literatúre uvádzajú rôzne [20] [21].



Obr. 126: Schematický pôdorys a rez fragmentu



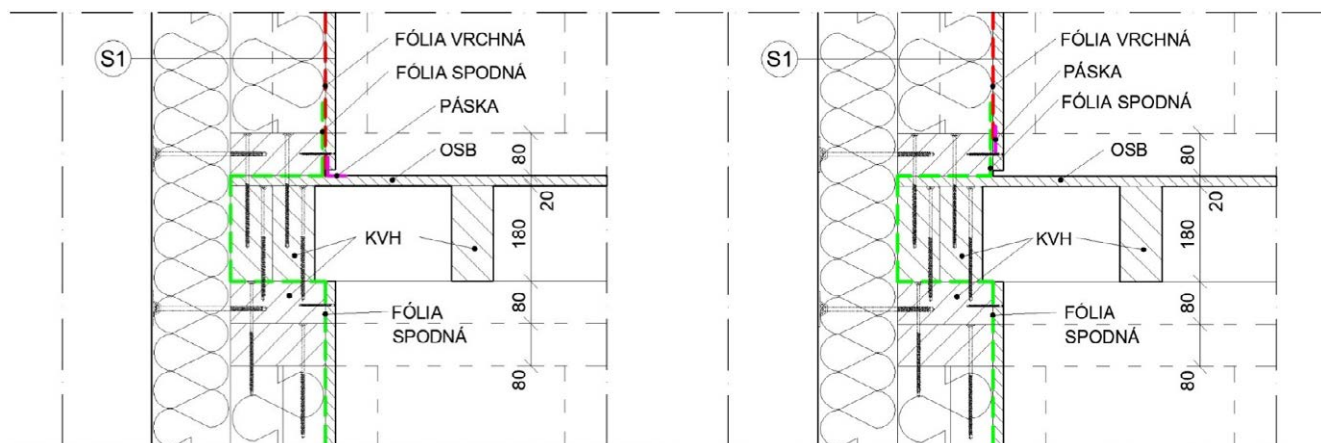
Obr. 127: Schematické označenie a umiestnenie snímačov

Snímače na meranie vlhkosti v materiáli sú na modeli označené V1–V4. Pri každom z nich sú osadené snímače teploty a relatívnej vlhkosti K1–K4. V rovine stropu sú osadené ešte tri snímače K5–K7, viď.. Na parotesnej fólii sú osadené dve platničky P2 a P3 na snímanie teploty a tepelného toku.

Možnosti prepojenia vzduchotesnej vrstvy

Aby bola zaistená vzduchotesnosť budovy, musí byť vzduchotesná vrstva riešená ako celistvá. Pri použití fólií ako vzduchotesnej vrstvy majú výrazný vplyv prestupy prvkov cez vzduchotesnú vrstvu, ale aj spôsob vyhotovenia jednotlivých spojov. Spôsob napojenia fólie práve v kritických detailoch môže byť rôzny. Existujú pravidlá a zásady pre správne preloženie fólie. Spoj fólie sa môžu zovrieť, prelepiť páskou alebo zabezpečiť obojstranným lepiacim materiálom, napríklad tmelom [22]. Riešenie napojenia fólií môže byť v niektorých miestach konštrukčne náročné, obzvlášť v miestach styku viacerých konštrukčných prvkov. Je vhodné aby sa tieto spôsoby napojenia riešili už v úrovni projektu. Takýmto spôsobom je možné určiť aj kedy počas výstavby je potrebné vloženie vzduchotesnej vrstvy, konkrétne fólie. Typickým príkladom je práve vyhotovenie stropnej konštrukcie, kde v mnohých prípadoch musí byť fólia vložená ešte pred, respektíve pri uložení stropných nosníkov. To znamená že je potrebné realizovať vzduchotesnú vrstvu v rovine stropu už počas výstavby nosnej konštrukcie budovy. Spôsob ukončenia a napojenia vzduchotesnej vrstvy sa môže líšiť vzhľadom od konkrétneho konštrukčného riešenia [23]. V rámci riešeného fragmentu je teda potrebné prepojenie vzduchotesnej vrstvy nie len v rohu budovy ale súčasne prepojenie v rovine stropu, respektíve medzi podlažiami.

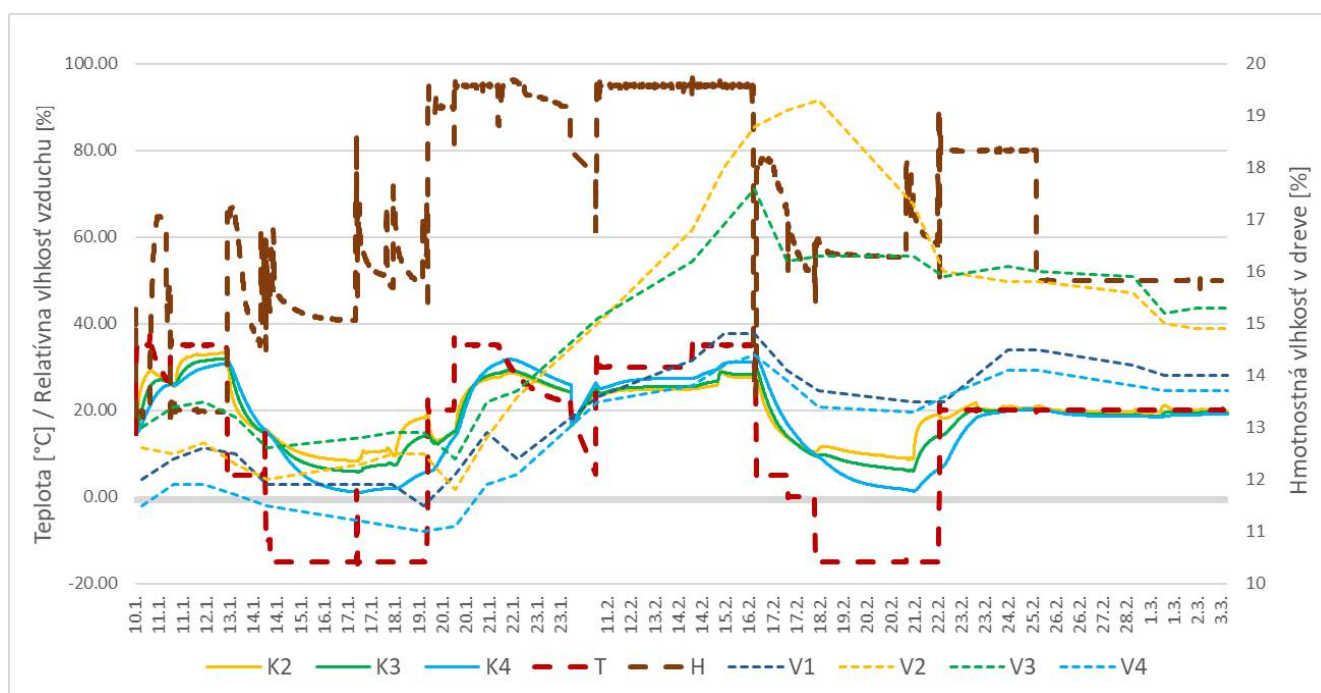
V pôvodnom vyhotovení fragmentu (variant 1) bola fólia zo spodného podlažia vyvedená po medzi podlahovú OSB dosku a spodnú pásnicu vrchného podlažia. Spodná pásnica pevne stiahnutá s OSB doskou priskrutkovaním do stropných trámov. Fólia vrchného podlažia je pripojená k podlahovej OSB doske pomocou pásky, viď. obr. 128.



Obr. 128: Prepojenie parotesnej fólie – variant 1 (vľavo) variant 2 (vpravo)

V novom vyhotovení fragmentu (variant 2) bolo rovnaké riešenie ako v pôvodnom vyhotovení, ale doplnené o prepojenie spodnej a vrchnej fólie pomocou pásky. Dôkladné prelepenie bolo riešené v rohu, nakoľko vyvedenie a preloženie spodnej fólie je veľmi komplikované vzhľadom na viacero zalomení a nie je možné ho riešiť ako súvislé z jedného neprerušeného kusu.

Namerané hodnoty a závery



Obr. 129: Graf priebehov teploty a hmotnostnej vlhkosti v dreve

Graf nám znázorňuje opäť priebeh teploty a relatívnej vlhkosti v priestore komory krivkami T a H. Plnou čiarou sú znázornené teploty na snímačoch K2, K3, K4, ktoré boli v tesnej blízkosti sond V2, V3, V4. Sondy V1 až V4 na snímanie materiállovej vlhkosti dreva sú znázornené čiarkovanou čiarou. Pri sonde V1 bol tiež umiestnený snímač K1, ale vzhľadom na jeho poruchu sa vo výsledkoch ani v grafoch neuvádza.

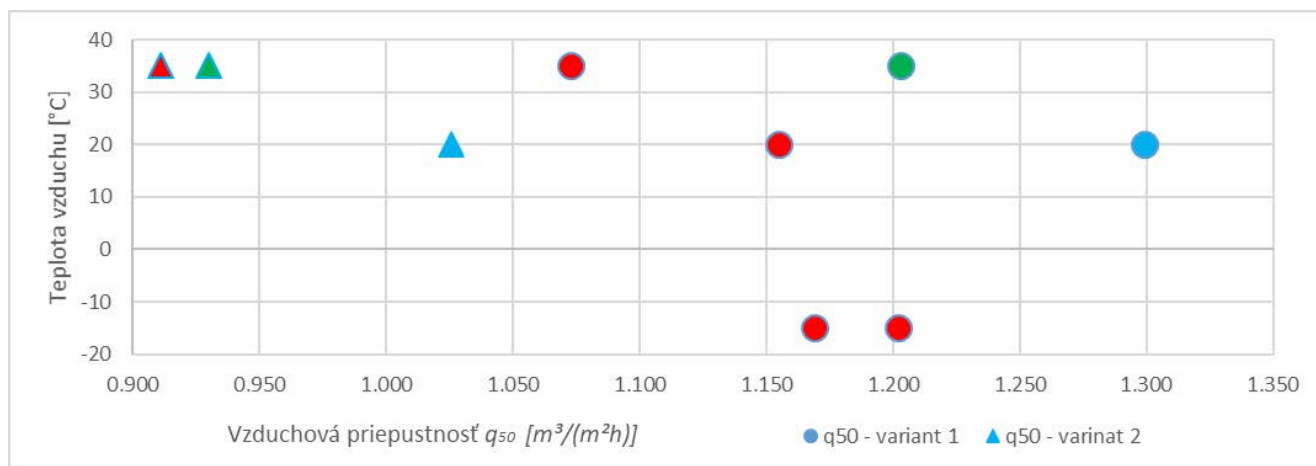
Počiatočná materiállová vlhkosť bola približne okolo 12%. Pri prvých meraniach so zvýšenou relatívnou vlhkosťou sa materiállová vlhkosť zvýšila na snímačoch maximálne o 0,5%. Nasledovnými procesmi, ktoré mali napomáhať sušeniu materiálu fragmentu sa podarilo znížiť vlhkosť ale maximálne o 1% a nie pod úroveň 11%. Táto vlhkosť je typická pre drevo ktoré sa používa na stavebné účely, no po zabudovaní by malo ešte čiastočne klesať [24]. Za vysušené drevo pre stavebné účely je možné pokladať drevo s materiállovou vlhkosťou od 10 až 14%. Nasledovnými procesmi

bolo simulované extrémne vlhké prostredie, ktoré malo simulovať tropické obdobie dažďov. Pri tomto období sa materiálová vlhkosť dreva rapídne zvyšovala. Najväčšie maximum dosiahla materiálová vlhkosť na sonde V2, kde dosiahla maximum 19,3%. Zvýšenie vlhkosti dreva nad 18% je v stavebných konštrukciách neprípustné nakoľko tu vzniká riziko jeho degradácie [25]. Treba ale pamätať, že fragment bol vystavený extrémnym podmienkam, ktoré simulovali obdobie s vysokým výskytom dažďa a teda s vysokou relatívnou vlhkosťou vzduchu. Maximá na ostatných sondách dosahovali len úroveň 15 až 16% hmotnostnej vlhkosti. Na sonde V2 a V3 je viditeľná aj zotrvačnosť reakcie na zmenu podmienok prostredia po procese sušenia a na sonde V2 aj po procese vlhčenia. Táto zotrvačnosť je pravdepodobne spôsobená tým, že drevené prvky sú chránené fasádnyimi obkladovými doskami a vyžaduje si to určitý čas kým sa zmena prostredia prejaví aj na konštrukčnom prvku.

Dátum	Ozn.	Teplota [°C]	Vlhkosť [%]	Prietok V_{50} [m³/h]	Hodnotenie q_{50} [m³/(m².h)]	Korekcia V_{50} [m³/h]	Hodnotenie +kor. q_{50} [m³/(m².h)]
7. 3.	Variant1	20	80	2,843	1,165	2,818	1,155
16. 3.	Variant1	20	50	3,171	1,300	3,171	1,300
17. 3.	Variant1	35	25	3,035	1,244	2,936	1,203
17. 3.	Variant1	35	90	2,732	1,120	2,618	1,073
18. 3.	Variant1	-15	68	2,765	1,133	2,933	1,202
18. 3.	Variant1	-15	68	2,690	1,102	2,853	1,169
21. 3.	Variant2	20	50	2,503	1,026	2,503	1,026
22. 3.	Variant2	35	90	2,322	0,952	2,224	0,911
22. 3.	Variant2	35	25	2,346	0,961	2,270	0,930

Tab. 17: Hodnoty meraní vzduchotesnosti, objemový prietok a q_{50}

Výsledky sú uvedené pre hodnotenie objemového toku pred aj po korekcii na laboratórne klimatické podmienky. Namerané hodnoty pri laboratórnych podmienkach zostali ako najvyššie pre uvedené varianty, ale ich odchýlka je pomerne malá. Korekcia výsledkov spôsobila zmenu nameraných hodnôt. Po korekcii sa odchýlka pri vysokých teplotách zvýšila a pri nízkych teplotách znížila, respektíve sa hodnota viac priblížila k hodnote nameranej pri klimatických podmienkach. Prehľad výsledkov po korekcii o klimatické podmienky je zobrazený v grafe na obr. 130.



Obr. 130: Graf výsledných hodnôt nameranej vzduchotesnosti

Graf zobrazuje hodnoty nameranej vzduchovej priepustnosti fragmentu. Kruhovú značku zobrazujú hodnoty namerané pri variante 1 a trojuholníkovú pri variante 2. Červenou farbou sú zobrazené hodnoty s vyššou relatívnou vlhkosťou vzduchu ako 50%. Zelenou farbou sú zob-

razené hodnoty s nižšou relatívnou vlhkosťou vzduchu ako 50%. Modrou farbou sú zobrazené hodnoty namerané pri laboratórnych klimatických podmienkach. Rozdiel vo vzduchotesnosti fragmentu medzi variantmi 1 a 2 je viditeľný, dosiahlo sa zlepšenie o 21 %. Namerané hodnoty pri iných ako laboratórnych podmienkach naznačujú pomerne veľkú chybu merania, ale podobný posun hodnôt pri iných podmienkach je badateľný pri variante 1 aj pri variante 2.

Namerané hodnoty vzduchovej priepustnosti riešeného fragmentu preukázali, že prepojenie jednotlivých vrstiev fragmentu pomocou tesniacej pásky, by malo byť vykonané vždy pokiaľ to technologický proces dovolí. Prepojenie týchto vrstiev viedlo k zvýšeniu celkovej vzduchotesnosti o viac ako 20%. Klimatické podmienky pri meraní vykazujú že ovplyvňujú výsledok merania, aj napriek normatívnej korekcii výsledkov, ktorý by mala zahŕňať rozdiel v teplote a relatívnej vlhkosti pri meraní. Hodnoty pri nízkych teplotách sa priblížili smerom k tejto hodnote ale hodnoty pri vysokých teplotách sa naopak od tejto hodnoty po korekcii ešte viac oddialili.

Použitá literatúra

- [1] NOVÁK, J. 2008. *Vzduchotesnosť obvodových plášťu budov*. Grada publishing, a.s.
- [2] SHERMAN, M. H.; D. T. GRIMSRUD, D. T. 1980. Infiltration-pressurization correlation: Simplified physical modeling. *ASHRAE Transactions*, 86(2), .
- [3] HRUBÁ, B.; ORAVEC, P.; LABUDEK, J. 2014. Diagnostics and optimalization off airtighness in experimental wooden structures. *Advanced Materials Research*, 1020, 540–544.
- [4] KRAUS, M.; ČERNÁ, M.; HRUBÁ, B.; SOUČKOVÁ, B.; KUBEČKOVÁ, D. 2013. Influence of Building Materials on Building Airtightness. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 195–198.
- [5] RUŽIČKA, M. 2014. *Moderní dřevostavba*. Praha: Grada Publishing, a.s. ISBN 978-80-247-3298-5
- [6] JI, Y.; DUANMU, L. 2017. Airtightness field tests of residential buildings in Dalian, China. *Building and Environment*, 119, 20–30.
- [7] KRSTIĆ, H.; KOŠKI, Ž.; TOMLJANOVIĆ, M. 2014. Influence of Window Type on the Airtightness of Residential Units. *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek - e-GFOS*, 5(9), 34–40.
- [8] BEDNÁR, J.; SEDLÁK, P. 2014. Analýza výsledkov merania vzduchotesnosti drevostavieb. Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta, Slovensko.
- [9] ZWIENER, V. 2010. *Změna ČSN 73 0540-2 z pohledu vzduchotesnosti*. TZBinfo, DEKPROJEKT s.r.o.
- [10] LOKAJ, A.; GOCÁL, J.; ĎURICA, P.; KORENKOVÁ, R.; SKOTNICOVÁ, I.; ORAVEC, P.; KUBENKOVÁ, K.; RYBÁRIK, J.; SKULINOVÁ, D.; VLČEK, P.; PEŘINA, Z. 2010. *Dřevostavby a dřevěné konstrukce*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN 978-80-7204-732-1
- [11] PRIGNON, M. 2020. *Airtightness of building components: Assessment of the direct component testing for in-situ measurement of building component airtightness*. Belgian Building Research Institute.
- [12] AWBI, H. 2003. *Ventilation of Buildings*. Spon Press. ISBN 0-203-63447-0
- [13] LANGMANS, J.; KLEIN, R.; MICHEL, D.; ROELS, S. 2010. Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions. *Energy and Buildings*, 42, 2376–2385.
- [14] BEDNÁR, J. 2013. Laboratórne meranie vzduchovej priepustnosti veľkoplošných materiálov na báze dreva. TU Zvolen, Drevárska fakulta, TZB-info, 06/2013.
- [15] KIM, A. K.; SHAW, C. Y. 1986. Seasonal Variation in Airtightness of Two Detached Houses. Measured Air Leakage of Buildings. *ASTM STP*, 904, 17–32.
- [16] WAHLGREN, P. 2014. *Seasonal variation in Airtightness*. Rev. SE-41296, Goteborg. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- [17] DOMHAGEN, F.; WAHLGREN, P. 2017. Consequences of Varying Airtightness in Wooden Buildings. In: rev. 11 *Nordic Symposium on Building Physics*. Norway.
- [18] JANČO, O.; LAMPEL, M. 2017. *Novostavba rodinného domu Podhorský – projektová dokumentácia*. Rosina, p.č. 294/2, Do majera, 2017.

- [19] ATTMA. 2010. *Technical Standard L1 – Measuring Air Permeability of Building Envelopes*. The Air Tightness Testing & Measurement Association, 2010 Issue. Dostupné na: www.attma.org
- [20] J. ŠTEFKO, J.; REINPRECHT, L.; KUKLÍK, P. 2009. *Dřevěné stavby, konstrukce, ochrana a údržba*. Bratislava: JAGA GROUP, ISBN 978-80-8076-080-9
- [21] HAZUCHA, J. 2016. *Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy*. Praha: Grada Publishing. a.s. ISBN 978-80-247-4551-0
- [22] WAHLGREN, P.; SIKANDER, E. 2010. *Methods and Materials for Airtight Building*. Buildings XI.
- [23] KALAMEES, T.; ALEV, Ü.; PARNALAAS, M. 2017. Air leakage levels in timber frame building envelope joints. *Building and Environment*, 116, 121–129.
- [24] KORENKOVA, R.; JAKUBČÍK, M.; KRUSHINSKÝ, P.; BABJAKOVÁ, Z.; CANGÁR, M. 2009. *Konstrukcie budov IV. - Drevostavby*. EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity. ISBN 978-80-554-0078-5, 2009.
- [25] E. NAGY, E. 2009. *Nízkoenergetický a energeticky pasívny dom*. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o. ISBN 978-80-8076-073-1.

Kontakty

Ing. Peter Kysela, PhD.: peter.kysela@uniza.sk

PROBLEMATIKA OTVOROVÝCH KONŠTRUKCIÍ A VONKAJŠIEHO TIENENIA V SÚČASNOSTI

Ing. Marek Bartko¹

¹ Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

Stručná história otvorových konštrukcií

Otvorové konštrukcie siahajú ďaleko do histórie, v podstate do doby kedy si človek začal hľadať strechu nad hlavou v podobe jaskýň alebo staval jednoduché domy a prístrešky. Jediným otvorom v takomto type prístreškov bol vstupný otvor. Postupne s vývojom obydľí pribúdali v nich aj rôzne typy otvorov v stenách a strechách, ktoré plnili určitú funkciu v podobe presvetlenia a vetrania, v niektorých typoch stavieb sa otvory vyskytovali ako spôsob ochrany pred možným nebezpečenstvom. Neustálym vývojom sa otvory približovali a zdokonaľovali do podoby v akej poznáme dnešné okenné konštrukcie. Značný vplyv na vývoj okenných konštrukcií malo niekoľko faktorov a to najmä: materiálová dostupnosť, civilizačné a klimatické prostredie a v neposlednom rade majetkové pomery. Z historických prameňov vieme, že otvory neboli spočiatku vyplnené.

Postupne ich ľudia uzatvárali dostupnými materiálmi ako napríklad opracovanou zvieracou kožou, tkaninou, rákosom, bambusom, perforovanými kamennými doskami, drevenými doskami, či papierom. Tieto výplne im okrem svetla, chladu, tepla, či ochrany proti hmyzu dodávali aj pocit bezpečia. Sklo ako výplň začali prvý používať Rimania, pričom ešte nepoznali techniku na výrobu plochého skla. Pomocou píšťal vyfukovali sklenené gule, ktoré následne stláčali a vytvárali ploché tabule. Toto sklo bolo spočiatku „slepé“, pretože na jednej strane bolo hladké ale na druhej strane drsné [1]. Rám okien tvorilo drevo. Sklo ako architektonický materiál sa výrazne začal používať v gotickom období. Na Slovensku to bolo približne v 14. storočí. Okenné konštrukcie boli v priebehu histórie ovplyvňované jednotlivými architektonickými slohmi. V klasicizme nastáva výrazná premena vzhľadu konštrukcie použitím žalúziových okeníc, ktoré sa neskôr nahrádzali vonkajšími zasklenými krídlami. Z počiatku sa dvojité okná vyrábali ako dve samostatné okenné krídla. Neskôr sa používali tzv. skrinkové okná vytvorené naraz z dvoch krídiel. Vnútorne krídla sa otvárali dovnútra a vonkajšie smerom von. Sklenená výplň sa vkladala do poldrážky priečky okenného krídla a potom sa vytmelila. Zasklenie s použitím tmelu znamenalo veľký prelom najmä odstránením prachnosti a vytvoril sa určitý plastický efekt. V období približne v druhej polovici 19. storočia sú všetky okná už dvojité a otvárajú sa dovnútra. Neskôr vyskúšali dvojité okná, okná zdvojené otvárané dovnútra. Postupne sa zmenil aj spôsob otvárania krídiel. Z pôvodného spôsobu otvárania okolo zvislej osi sa prešlo na otváranie spôsobom výsuvným a vyklápacím. Zasklenie pomocou tmelu a lišty už bolo samozrejmosťou. V tomto období sa ale objavuje používanie väčších sklenených tabúl s pomerne malou hrúbkou [2].

Súčasná okenná konštrukcia

Okenné konštrukcie ovplyvňujú vzhľad fasády, samotný stavebný objekt ako aj interiér najmä svojím tvarom, veľkosťou, členením, polohou, umiestnením na fasáde a v neposlednom rade materiálovým riešením. Výroba okien je úzko ovplyvnená niekoľkými faktormi a to najmä z hľadiska konštrukcie, estetického riešenia a hospodárnosti výrobných zariadení. Z tohto dôvodu je potrebné pre každú stavbu hľadať vhodné riešenie. Popri osvetlení priestorov denným svetlom

je dôležitý aj vplyv denného svetla na psychiku človeka a na pohodu ľudí v obytnom alebo pracovnom prostredí. Taktiež je potrebné vnímať pravidelné striedanie dňa a noci, počasie a v neposlednom rade kontakt s exteriérom.

V dnešnej dobe sa na výrobu okenných konštrukcií používa niekoľko typov materiálov. Ide o drevo, plast, kovy – hliník a oceľ a ich kombinácia. V našej oblasti sa najviac používajú plastové a drevené okná, v menšom rozsahu hliníkové.

Výplň tvorí najčastejšie zasklenie v podobe bežného plochého plaveného skla, či liateho skla, alebo iný priehľadný materiál napr. polykarbonát.

Drevené okenné konštrukcie

Drevo sa radí medzi najstaršie stavebné materiály, ktoré bolo používané aj pri výrobe okenných konštrukcií. Drevo je pomerne ľahko dostupný materiál, ľahko sa s ním pracuje, je šetrný k životnému prostrediu a je to dobrý tepelnoizolačný materiál. Drevo v sfére okenných konštrukcií má hlbokú históriu, čo môžeme pozorovať na dlhodobom vývoji geometrie prierezu okenného profilu až do dnešnej podoby lamelových profilov – tzv. eurohranolov. Dnešné lamelové profily preukazujú vyššie tepelno-technické parametre, primeranú infiltráciu vzduchu, vodotesnosť a zlepšenie akustických vlastností [2].

Eurohranol tvorí niekoľko vrstiev lamiel. Počet lamiel je 3 až 5, ktoré sa navzájom lepia. Pri eurohranoloch by mali byť dodržané tieto požiadavky:

- lepené škáry nesmú byť vystavené priamym poveternostným vplyvom,
- prierezy musia byť symetrické,
- pri spracovaní je potrebné dodržať vlhkosťnú toleranciu pre lepené drevo $12\% \pm 2\%$.

Druh dreva používaný na výrobu lamelových profilov:

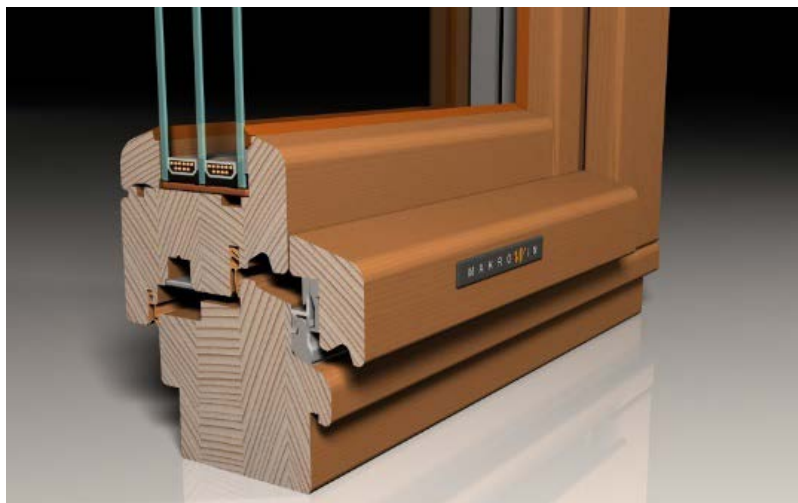
Smrek (najpoužívanejšia drevina), borovica, dub, mahagón, meranti, tík, oregonská pínia.

Výhody drevených okenných konštrukcií:

- dobré tepelno-technické vlastnosti,
- dobré mechanické vlastnosti,
- dlhodobá životnosť (pri pravidelnej údržbe),
- jednoduchá oprava prípadných porúch povrchu,
- prírodný materiál,
- variabilita vzhľadu konštrukcie a architektonického riešenia,
- vytvára pocitovo príjemnejšie prostredie pre človeka,
- ekologický, plne recyklovateľný materiál.

Nevýhody drevených okenných konštrukcií:

- častejšia údržba (5–10 rokov – podľa intenzity pôsobenia poveternostných vplyvov),
- citlivosť na ultra-fialové spektrum slnečného žiarenia – starnutie laku, postupná degradácia,
- pri zanedbanej údržbe vznik plesní, húb, napadnutie červotočom,
- vyššie obstarávacie náklady v porovnaní s plastovými oknami [4].



Obr. 131: Profil dreveného okna [3]

Plastové okenné konštrukcie

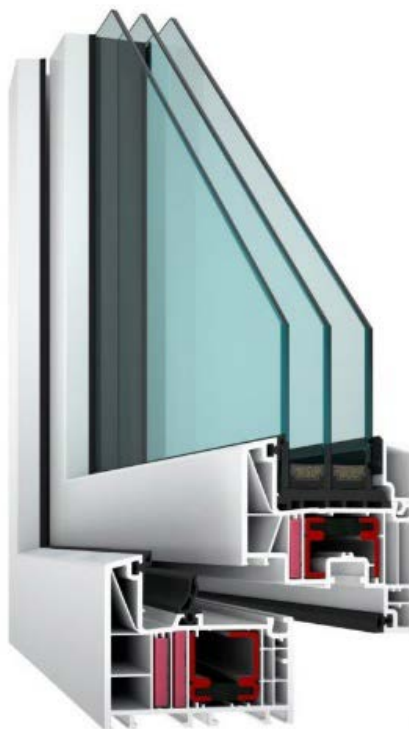
Výroba plastových okien siaha približne do 60-tych rokov 20. storočia, do západnej Európy, kde sa začal používať materiál na báze polymérov (PVC). PVC je typickým termoplastom, čo znamená že pri zvyšujúcej sa teplote mäkne a napokon sa taví. Zo začiatku sa vyrábali profily z mäkkého PVC, ktoré však nespĺňali všetky požiadavky a tak sa začal používať materiál PVC bez zmäkčovadiel. Prvé systémy okenných konštrukcií boli jednokomorové a dvojkomorové, neskôr sa vyvinuli trojkomorové, až sa začali vyrábať dnes používané päť a viac komorové systémy. Plastové okná zastávajú podiel na trhu viac ako 50%, čo spôsobila hlavne dlhá životnosť a takmer žiadna údržba plastových okenných profilov. Plastové okná sa často využívajú aj pri sanácii a obnove historických budov, predovšetkým tam kde sú kladené požiadavky na hospodárnosť, funkčnosť a tepelnú ochranu. A však pri veľkých plochách okenných konštrukcií je nutné dodatočné vystuženie profilov. Homogénne sfarbené profily sa ukazujú ako problematické, preto sa vyrábajú len v niekoľkých základných odtieňoch. Ovplyvňuje to najmä odolnosť voči UV žiareniu, ktorá sa za posledné roky výrazne zlepšila. Farebnosť profilov sa teda dosahuje kaširovaním, buď použitím granulátu alebo úpravou z fólie [2]. Dnešný trend tepelno-technických požiadaviek na stavebné konštrukcie požaduje vysoké nároky na tepelnoizolačné vlastnosti, ktoré je možné dosiahnuť pridaním tepelnej izolácie do jednotlivých komôr plastových profilov.

Výhody plastových okenných konštrukcií:

- výborné tepelno-technické vlastnosti,
- vysoká odolnosť voči poveternostným vplyvom a korózii,
- takmer žiadna údržba,
- veľká škála tvarov a usporiadania rámov,
- vysoká životnosť,
- nižšia hmotnosť,
- ochranná fólia pred zabudovaním,
- nízke obstarávacie náklady na rozdiel od ostatných typov okenných konštrukcií.

Nevýhody plastových okenných konštrukcií:

- menšia statická únosnosť v porovnaní s ostatnými okennými konštrukciami,
- nižšia odolnosť voči UV žiareniu v porovnaní s ostatnými okennými konštrukciami,
- vysoká tesnosť – potreba vetracích štrbín,
- pri nesprávnom používaní, možný vznik plesní [4].



Obr. 132: Profil plastového okna [5]

Hliníkové okenné konštrukcie

Okenné konštrukcie zo zliatin hliníka sú vhodné na použitie do stavieb občianskeho charakteru. Sú vhodné najmä na vyplnenie otvorov s väčšou plochou zasklenia. Profily vlysov sa vyrábajú pretláčaním hliníka cez matricu, čo umožňuje výrobu presných profilov s rôznymi tvarmi prierezov. Z týchto profilov možno vytvoriť okenné konštrukcie rôzneho tvaru (oblúkové, so šikmými hranami,...). Prvotné profily nespĺňali stanovené požiadavky z hľadiska tepelnej ochrany. Dnes vyrábané a používané profily s prerušeným tepelným mostom pozostávajú z dvoch častí, ktoré sú spolu spojené tepelným izolantom. Ten spĺňa tepelnoizolačnú aj statickú funkciu. Pri hliníkových okenných konštrukciách sa na ochranu a estetickú ochranu povrchu používa eloxovanie a farebné povrchové vrstvy [2].

Výhody hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoká odolnosť voči poveternostným vplyvom,
- vysoká statická odolnosť a únosnosť,
- štíhlosť, elegantnosť vzhľadu oproti plastovým a dreveným oknám,
- dlhodobá životnosť,
- nehorľavosť,
- dobré tepelno-technické vlastnosti pri prerušení tepelného mostu,
- vhodné pre veľké plochy zasklenia,
- vhodné pre budovy, kde je nutné navrhnuť bezpečnostné a nepriestrelné konštrukcie,
- v porovnaní s plastovými a drevenými oknami sú ľahšie.

Nevýhody hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti,
- potreba prerušenia tepelného mostu v konštrukcii rámu alebo krídla,
- vysoké obstarávacie náklady [4].



Obr. 133: Profil hliníkového okna [6]

Oceľové okenné konštrukcie

Okenné konštrukcie z ocele sa donedávna používali pre miestnosti druhoradého významu, či priemyselných a skladových objektov. Zapríčiňoval to hlavne fakt, že oceľ má vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti. S postupným rozvojom technológií sa začali vyrábať okenné konštrukcie s prerušeným tepelným mostom, ktoré je možné použiť už aj v bežných stavbách. Prerušenie tepelného mostu zabezpečuje tepelný izolant na základe polyamidu [2].



Obr. 134: Profil ocelového okna [7]

Výhody ocelových okenných konštrukcií:

- vysoká statická odolnosť a únosnosť,
- vhodné pre veľké plochy zasklenia,
- dobré tepelno-technické vlastnosti pri prerušení tepelného mostu.

Nevýhody ocelových okenných konštrukcií:

- vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti,
- nutnosť prerušenia tepelného mostu v konštrukcii rámu alebo krídla,
- nutná dodatočná ochrana profilov voči korózii.

Kombinované okenné konštrukcie

Drevo-hliníkové okenné konštrukcie

Pri kombinovaných okenných konštrukciách na báze dreva a hliníka sa dopĺňajú vlastnosti drevených a hliníkových okien. Nosnú konštrukciu tvorí drevo, ktoré je dobrým tepelným izolantom a z exteriérovej strany je osadený hliníkový profil, ktorý zase zabezpečuje ochranu voči poveternostným vplyvom. Používajú sa najmä na stavbách, ktoré pri vysokých tepelnoizolačných vlastnostiach požadujú bezúdržbový obvodový plášť.

Výhody drevo-hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoká odolnosť voči poveternostným vplyvom,
- dobré mechanické vlastnosti,
- dobré tepelno-technické vlastnosti,
- dlhodobá životnosť (pri pravidelnej údržbe),
- variabilita vzhľadu konštrukcie a architektonického riešenia,
- moderný dizajn,
- vytvára pocitovo príjemnejšie prostredie pre človeka,
- ekologický, plne recyklovateľný materiál.

Nevýhody drevo-hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoké obstarávacie náklady.



Obr. 135: Profil drevo-hliníkového okna [8]

Plast-hliníkové okenné konštrukcie

Pri kombinovaných okenných konštrukciách na báze plastu a hliníka sa dopĺňajú vlastnosti plastových a hliníkových okien. Nosnú konštrukciu tvorí plast, ktorý je dobrým tepelným izolantom a z exteriérovej strany je osadený hliníkový profil, ktorý zlepšuje odolnosť plastových profilov voči UV žiareniu.

Výhody plast-hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoká odolnosť voči poveternostným vplyvom,
- dobré tepelno-technické vlastnosti,
- dlhodobá životnosť (pri pravidelnej údržbe),
- variabilita vzhľadu konštrukcie a architektonického riešenia,
- moderný dizajn.

Nevýhody drevo-hliníkových okenných konštrukcií:

- vysoké obstarávacie náklady.



Obr. 136: Profil plast-hliníkového okna [9]

Zasklenie okenných konštrukcií

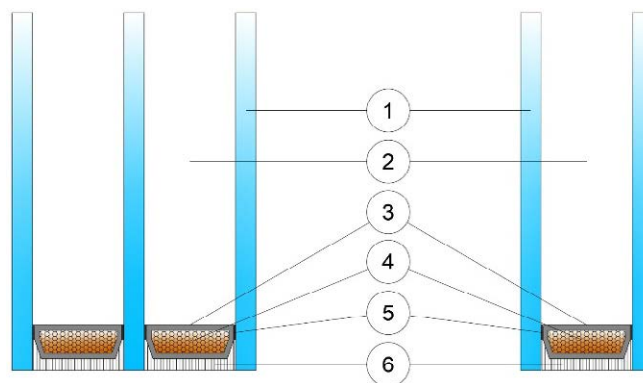
Sklo je veľmi starý stavebný materiál. Prešlo dlhým vývojom až do podoby skiel používaných v súčasnosti. Sklo je základný prvkom transparentných systémov obalových konštrukcií budov. Zasklenie okenných konštrukcií musí okrem základných stavebno fyzikálnych požiadaviek spĺňať aj ďalšie funkcie ako napríklad z hľadiska požiarnej bezpečnosti či ochrany osôb a majetku – bezpečnostné zasklenia. Zasklenie môže tvoriť jednoduchý alebo viacnásobný systém zasklenia [10].

Jednoduchý systém zasklenia

Jednoduchý systém zasklenia tvorí jedna sklenená tabuľa. Tá môže byť z plochého skla (FLOAT), plochého ťahaného skla, liateho skla, bezpečnostného skla, absorpčného či reflexného skla ale aj zo skla so zvýšenou požiarnou odolnosťou a z ohýbaného skla. Z hľadiska tepelnej ochrany sa jednoduchý systém zasklenia neodporúča používať do otvorových konštrukcií budov s trvalým pobytom osôb. A však môže sa použiť v prípade použitia napr. dvojitého okna [2].

Viacnásobný systém zasklenia

Viacnásobný systém zasklenia predstavujú min. dve a viac tabúľ skla (s rovnakými alebo rozdielnymi vlastnosťami) s viac alebo menej dokonale uzatvoreným priestorom medzi tabuľami, ktorý je vyplnený vzduchom alebo vzácnymi plynmi. Šírku medzier medzi tabuľami určuje dištančný profil, ktorý je vyplnený absorpčným materiálom pre kontrolu a reguláciu vlhkosti v uzavretej dutine. Obvodové spojenie tabúľ skla a dištančných profilov je zabezpečené trvalo plastickým tmelom. Vonkajší okraj izolačného skla je po celom obvode utesnený trvalo pružným tmelom, ktorý zabraňuje prenikaniu vlhkosti do dutiny [2].



Obr. 137: Rezy štandardných izolačných skiel s dištančným rámikom (1 – sklo, 2 – priestor medzi sklami (vzduch, vzácny plyn), 3 – dištančný profil, 4 – absorpčný materiál, 5 – trvalo plastický tmel, 6 – trvalo pružný tmel) [2]

Nízkoemisný systém zasklenia

Nízko emisný systém zasklenia tvoria izolačné sklá s tepelnou ochranou. Tento systém vzniká povlakovaním vonkajšieho povrchu (tj. zo strany vzduchovej vrstvy) vnútorného skla. Vzniknutá nízkoemisná vrstva odráža dlhovlnné infračervené žiarenie, čím zabraňuje úniku tepla z priestoru miestnosti. Čo znamená, že znižuje tepelné straty a výrazne znižuje spotrebu energie potrebnej na vykurovanie [10].

Izolačné sklá s protislnečnou ochranou (reflexné a absorpčné)

Použitím izolačného skla s protislnečnou ochranou nastáva zníženie tepelných ziskov zo slnečného žiarenia. Nahradením vonkajšej tabule izolačného skla sklom s reflexnými alebo absorpčnými vlastnosťami sa znižujú nepriaznivé vplyvy nadmerného slnečného žiarenia. Sklá s protislnečnou ochranou môžeme rozdeliť do dvoch skupín:

- systémy zasklenia s protislnečnou ochranou s aplikáciou vonkajšieho skla farebného v hmote s absorpčnou charakteristikou,
- systémy zasklenia s protislnečnou ochranou s aplikáciou číreho vonkajšieho skla farebného v hmote s absorpčnou aj reflexnou charakteristikou.

Vyšší účinok protislnečnej ochrany sa dá dosiahnuť aplikáciou skla aj s absorpčnou aj s reflexnou charakteristikou [2].

Izolačné sklá s tepelnou a protisnečnou ochranou

Selektívne mikrovrstvy na jednej alebo na viacerých stranách sklenených tabúl sú jedným zo spôsobov na dosiahnutie ekonomického systému zasklenia tohto typu. Selektívne mikrovrstvy znižujú účinok slnečnej radiácie na vnútornú klímu, ale aj radiačnú zložku transferu tepla z budov. Systémy zasklenia s tepelnou aj protisnečnou ochranou môžeme koncipovať v troch princípoch:

- s dvoma selektívnymi mikrovrstvami orientovanými do vnútorného prostredia,
- s jednou selektívnou mikrovrstvou situovanou zvyčajne na vnútornom povrchu vonkajšieho skla,
- s jednou selektívnou mikrovrstvou situovanou v ojedinelých prípadoch na vonkajšom povrchu vnútorného skla [2].

Izolačné sklá s ochranou proti hluku

Zvukovoizolačné sklo je charakteristické tým, že má vynikajúce vlastnosti zabraňujúce šíreniu hluku vzduchom z prostredia do prostredia. Používa sa v prípadoch, kde sa očakáva zvýšená hladina hluku, napr. v blízkosti frekventovaných ciest, železníc, letísk a pod. Hodnota indexu vzduchovej nepriezvučnosti závisí od konštrukčného riešenia systému zasklenia. Od vzdialenosti medzi tabuľami skla, od hrúbky skiel a od uzavretého prostredia medzi tabuľami skla.

Bezpečnostné sklá

Izolačné sklá používané pre bezpečnostné systémy sa navrhujú v závislosti od úrovne bezpečnosti a stupňa rizika ohrozenia. Požiadavky na odolnosť systému zasklenia sú veľmi rozdielne a zodpovedá im veľké množstvo bezpečnostných systémov. Úroveň ochrany proti nárazom je daná dvoma faktormi: energetickou hladinou nárazu a maximálnou veľkosťou dotykovej plochy nárazu. Často je používaná kombinácia bezpečnostného systému s poplachovým systémom. Poplachové bezpečnostné systémy zasklení sú koncipované na báze dvoch poplachových zariadení, a to: na báze vizuálne prístupového poplachového drôtu s momentom odstrašujúceho dojmu a na báze vizuálne neprístupného poplachového pavúka s momentom prekvapenia [2].

Požiarné izolačné sklá

Požiadavky požiarnej odolnosti pre požiarné izolačné sklá si vyžadujú, aby systém zasklenia transparentnej konštrukcie budovy, ktorá je súčasťou požiarnej ochrany, bol do určitej miery ohňovzdorný, teda odolával požiaru. Najnovšie požiarné systémy zasklenia využívajú dvojnásobný systém zasklenia, ktorý aplikuje vrstvené požiarné sklá založené na lepení dvoch alebo viacerých sklenených tabúl bezpečnostnými vrstvami [2].

Systémy zasklenia so špeciálnymi zaskleniami

Tepelné zrkadlo (Heat Mirror)

Jedná sa o systém zasklenia, ktorý môžeme označiť aj ako izolačné sklo novej generácie, ktoré bolo pôvodne vyvinuté pre kozmický priemysel a pre extrémne podmienky v kozme. Tepelné zrkadlo tvorí polyesterová fólia pokrytá špeciálnymi vrstvami oxidov kovov v šiestich až dvanástich vrstvách, ktorá selektívne prepúšťa slnečné žiarenie. Najčastejšie sa aplikuje ako stredná vrstva medzi dvoma transparentnými sklami v izolačnom dvojskle. Použitím technológie tepelného zrkadla (heat mirror) vieme dosiahnuť súčiniteľ prechodu tepla od 1,6 až do 0,3 W/(m².K).

Elektrický vykurovací systém zasklenia

V dnešnej modernej architektúre sa čoraz viac využívajú veľké presklené plochy na fasádach budov. Tie však majú tendenciu v lete vytvárať skleníkový efekt a v zime zase spôsobujú rýchlejšie ochladenie priestoru. Vykurovaním, či klimatizačným systémom sa tieto problémy nedajú dostatočne vyriešiť. Preto sa vyvinul nový systém zasklenia IQ Glass. Ide o vyhrievací inteligentný systém z dvoch tepelne tvrdených bezpečnostných skiel. Vnútorná strana skla zo strany interiéru izolačného dvojskla je pokrytá neviditeľným vodivým povlakom, ktorý rovnomerne vyžaruje teplo do vnútorného prostredia. Vonkajšie sklo má na vnútornej strane izolačného dvojskla povlak, ktorý odráža teplo smerom dovnútra a chlad smerom von.

Elektrochromické zasklenie

Jedná sa o zasklenie, v ktorom sa využíva zmena optických a čiastočne tepelnotechnických vlastností zasklenia elektrickou alebo neelektrickou aktiváciou. Zmena optických vlastností môže

nastať ako reakcia na teplotu (termochromické a termotropické materiály), slnečné žiarenie (fotochromické materiály a fotochromické plyny), či elektrické napätie (tekuté kryštály, disperzné častice v priestore medzi sklami a elektrochromické materiály). Optické vlastnosti môžu prechádzať z číreho do sfarbeného stavu a opačne skokom, alebo regulovane tj. postupne. Všeobecne je možné vyvolať zmenu optických vlastností pohltením, odrazením, rozptýlením svetla alebo ich kombináciou [2].

Vákuové zasklenie

Vákuové zasklenie je jednou z technológií, ktorá je v súčasnosti vo vývoji. Vytvorením vákua medzi sklami možno tepelné straty izolačného systému zasklenia redukovať výrazným spôsobom. Na základe teoretických úvah je možné povedať, že hodnoty súčiniteľa prechodu tepla sa pri izolačnom dvojskle môžu pohybovať okolo $0,15 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, dokonca pri izolačnom trojskle s použitím štyroch nízkoemisných vrstiev hodnota U_g pod $0,1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ [11].

Samočistiace zasklenie

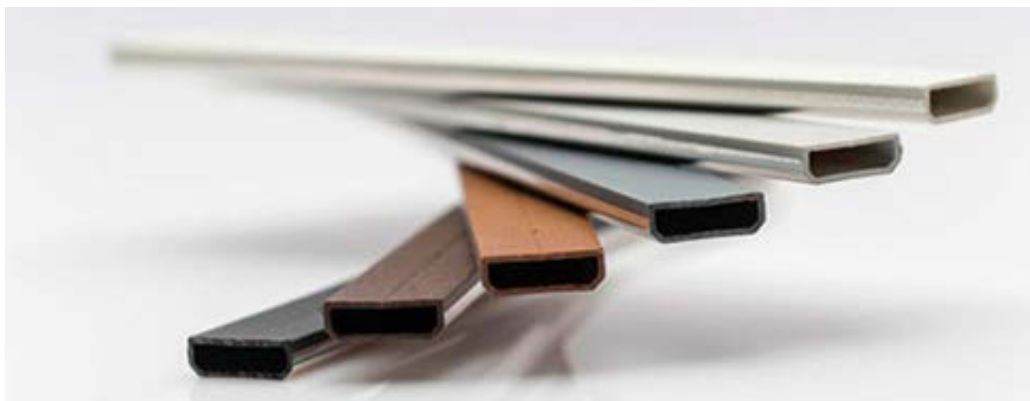
Samočistiace sklo sa skladá z číreho skla, na ktorom je nanesený transparentný povlak fotokatalytického minerálneho a hydrofilného materiálu. Tento povlak sa nanáša postupne počas výroby skla. Povlak využíva dvojité účinky UV lúčov denného svetla a vody na odstránenie nečistôt nahromadených na vonkajšej strane zasklenia. Samočistenie sa prejavuje napríklad počas dažďa, kedy voda zmýva organické nečistoty rozložené pôsobením UV lúčov na zasklenie [12].

Plynová výplň zasklenia

Výplň medzi tabuľami skla v systémoch zasklenia tvorí nejaký plyn alebo vzduch (najhoršie vlastnosti). Použitím vzácnych plynov ako argón (dobré tepelnotechnické vlastnosti), xenón (dobré tepelnoizolačné vlastnosti - príliš vysoká cena), kryptón (dobré tepelnoizolačné vlastnosti - vysoká cena) a podobne sa zlepšujú tepelnoizolačné vlastnosti a zvukovoizolačné vlastnosti okennej konštrukcie. Ich pozitívny vplyv na vzduchovú nepriezvučnosť sa prejaví najmä nad rezonančným kmitočtom. Použitím inertných plynov sa nedosahujú také dobré zvukovoizolačné vlastnosti. Najčastejšie používaným inertným plynom do zvukovoizolačných zasklení bol fluorid sírový (SF_6), ktorý však bol nariadením Európskeho parlamentu a komisie v podobne európskej smernice 842/2006 zakázaný [4].

Dištančné rámičky

Dištančné rámičky určujú šírku medzery medzi tabuľami zasklenia. Vyrábajú sa z rôznych materiálov. Prvé profily sa vyrábali z hliníku, a však ten má vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti a preto dochádzalo k orosovaniu zasklenia po obvode. Dnes sa hliníkové dištančné profily používajú len tam kde nie sú kladené nároky na tepelnú ochranu. Najpoužívanejšie sú dnes termo-plastické rámičky. Plastové dištančné rámičky je možné používať len v prípade keď sú opatrené kovovou fóliou aby nedochádzalo k difúzii plynu do exteriéru. Dištančné rámičky reprezentujú tepelný tok v dôsledku interakcie medzi rámom, zasklením a výplňou zasklenia vo forme lineárneho stratového súčiniteľa Ψ_g . Úlohou dištančných rámičiek je zabrániť úniku vzácneho plynu zo systému zasklenia a zabrániť úniku vodných pár [13].



Obr. 138: Prehľad dištančných rámičiek [14]

Tieniace zariadenia

Základným princípom tienenia je zamedzenie prenikaniu slnečného žiarenia do interiéru budov, čím sa zabráňuje prehrievaniu a oslneniu obyvateľov. Avšak použitie tienenia má vplyv na viacero faktorov a to:

- tepelnú pohodu – zamedzuje úniku tepla v zime a prehrievaniu interiéru v lete,
- svetelnú pohodu – reguluje svetlo v miestnosti, zamedzuje oslneniu,
- zvukovú pohodu – znižuje hluk prenikajúci z exteriéru,
- dobrú kvalitu vzduchu – umožňuje udržanie sviežeho a zdravého ovzdušia (vetranie a tienenie súčasne) [15].



Obr. 139: Vonkajšie tieniace zariadenia [16]

Vonkajšie tieniace zariadenia

K vonkajším tieniacim zariadeniam radíme všetky tieniace prvky, ktoré sa nachádzajú na vonkajšom povrchu budovy. V osobitných prípadoch majú aj vlastnú nosnú konštrukciu. Najčastejšie sa používajú vonkajšie žalúzie, rolety, markízy, slnolamy, tienenie tkaninami, okenice, tieniace panely a pergoly [16].

Vonkajšie žalúzie

Vonkajšie žalúzie sú umiestnené z vonkajšej strany budovy a sú tvorené jednotlivými lamelami vzájomne spojenými tzv. rebríkom. Žalúzie sú pri pohybe vedené buď vo vodiacich lištách alebo prostredníctvom vodiacich laniek, čo zabráňuje ich pohybu do nevyžiadaného smeru. Pokiaľ nie sú žalúzie používané je možnosť ich uložiť do boxu nad okenným otvorom. Výhodou žalúzií je možnosť plynulého nastavenia sklonu lamiel, čo umožňuje reguláciu osvetlenia interiéru. Vonkajšie žalúzie môžu byť ovládané kľúčkou, šnúrou alebo motoricky. Okrem hlavnej funkcie ochrany proti slnečnému žiareniu, plnia vonkajšie žalúzie ďalšie funkcie ako: ochrana súkromia obyvateľov, zníženie hluku, zníženie tepelných strát a tiež sú výrazným architektonickým prvkom [15].



Obr. 140: Vonkajšia žalúzia [17]

Vonkajšie rolety

Vonkajšie rolety sú taktiež umiestnené z vonkajšej strany budovy. Sú charakterizované závesom z profilovaných lamiel, ktoré sa pohybujú v postranných vodiacich lištách a na hornej strane sa navíjajú do boxu. Slnečné žiarenie sa dá regulovať postupným dvíhaním a spúšťaním roliet. Vonkajšie rolety sa môžu ovládať pomocou popruhov, šnúry, kľúčky alebo motoricky. Samotná roleta plní okrem hlavnej funkcie ochrany proti slnečnému žiareniu, aj ďalšie funkcie ako: zvuková izolácia, tepelná izolácia, ochrana súkromia obyvateľov, výrazný architektonický prvok, ochrana proti hmyzu a v prípade bezpečnostných roliet aj zabezpečenie objektu [15, 16].



Obr. 141: Vonkajšia roleta [18]

Markízy

Markízy slúžia k tieneniu balkónov, terás, záhradných posedí, zimných záhrad, či obchodných výkladov. Vďaka svojej konštrukcii a použitému materiálu predstavujú výrazný dizajnový prvok. Veľká časť markíz je riadená motorom a je napojená na slnečné, veterné a časové senzory [15].



Obr. 142: Vonkajšia markíza [19]

Slnolamy

Slnolamy sú pomerne nové tieniace zariadenia, ktoré sa v našej oblasti najviac používajú pri administratívnych budovách, či obytných domoch aj keď pomaly sa stále viac používajú aj pri rodinných domoch. Slnolamy svojou konštrukciou výrazne dotvárajú architektonický tvar budovy. Primárnym cieľom slnolamov je redukovať prienik priameho slnečného žiarenia do interiéru a zabrániť nadmernému prehrievaniu. Nebránia však nepriamemu slnečnému žiareniu, teda do interiéru preniká dostatok denného svetla. Sú veľmi odolné voči poveternostným vplyvom (slnko, dážď, vietor, mráz, sneh) [15].



Obr. 143: Slnolam [20]

Látkové fasádne tienenie

Látkové fasádne tienenie predstavuje alternatívu k vonkajším žalúziám alebo roletám. Zachytáva slnečné žiarenie pred budovou a zabráňuje tak prehrievaniu interiéru. Dostupné je veľké množstvo technických variantov. Napríklad tyč s navinutou látkou môže byť uložená v hornej kazete alebo boxe, látka môže byť po stranách fixovaná vo vodiacich lištách. Niektoré typy zase môžu obsahovať výklopnú konštrukciu podobnú markízam. Fasádne látkové tienenie môže byť riadené motorom a napojené na slnečné, veterné, či časové senzory. Okrem základnej funkcie ochrany voči slnečnému žiareniu, je výrazným doplnkom na fasáde najmä vďaka farebným variáciám. Výhodou týchto zariadení je možná voľba intenzity prechodu svetla do interiéru [15].



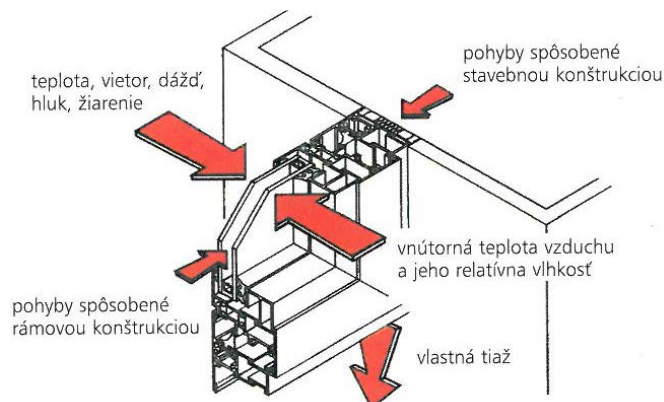
Obr. 144: Látkové exteriérové tienenie [21]

Detail osadenia okien

Funkčnosť a životnosť okenných konštrukcií úzko súvisí so správnym zabudovaním do vopred pripraveného stavebného otvoru. Pri nesprávnom zabudovaní nastáva riziko vzniku rôznych porúch. Po osadení okna do stavebného otvoru sledujeme pôsobenie rôznych vplyvov na detail osadenia.

Na správne riešenie detailu osadenia okien nadväzujú aj súčasné nároky na funkciu detailu, ktorými sú:

- univerzálnosť, teda možnosť osadzovania okna do rozličných konštrukčných sústav budov, aj v procese rekonštrukcie, či modernizácie,
- možnosť osadzovania okna po vyhotovení omietok obvodových stien budov,
- možnosť osadzovania okna z interiéru budovy, teda nie je potrebné exteriérové lešenie,
- jednoduchá montáž, nízka stavenisková prácnosť spojená s osadením okna na stavbe, jednoduchá demontáž pri výmene okna,
- možnosť vyrovnávať výrobné tolerancie hrubej stavby,
- schopnosť preniesť požiadavky na mechanické vlastnosti okna do obvodovej steny,
- fyzikálna celistvosť obvodovej steny v detaile osadenia [22].



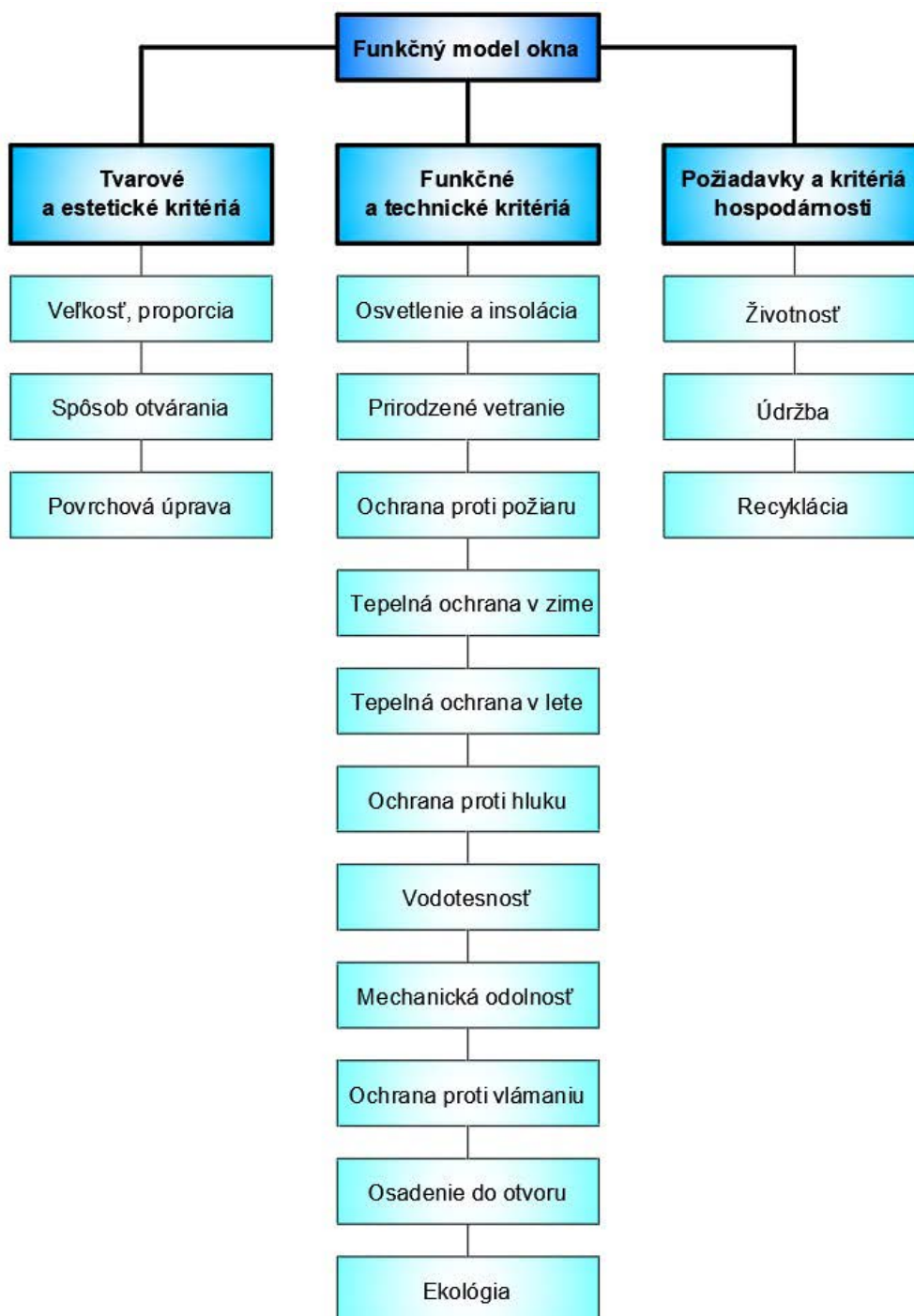
Obr. 145: Detail osadenia okna [22]

Funkčné požiadavky na otvorové konštrukcie

Požiadavky kladené na okno ako súčasť obalovej konštrukcie budovy vo forme požiadaviek a kritérií uvádza funkčný model okna.

Funkčný model musí spĺňať tieto kritériá:

- tvarové a estetické,
- funkčné a technické,
- požiadavky a kritériá hospodárnosti [2].



Obr. 146: Funkčný model okna [2]

Tepelno-technické vlastnosti otvorových konštrukcií

Okenné konštrukcie predstavujú z hľadiska tepelnej techniky nehomogénne konštrukcie v dôsledku rozdielnych tepelno-technických vlastností rámovej konštrukcie a zasklenia. Z tepelno-technického hľadiska sú pri okenných konštrukciách rozhodujúce dve veličiny a to: vnútorná povrchová teplota okennej konštrukcie (hygienické kritérium) a súčiniteľ prechodu tepla (kritérium minimálnych tepelnoizolačných vlastností stavebnej konštrukcie).

Vnútorná povrchová teplota okennej konštrukcie (Hygienické kritérium) – STN 730540-2 [23]
Najnižšia vnútorná povrchová teplota výplní otvorov

$$\theta_{si,w} > \theta_{si,w,N} = \theta_{dp}.$$

Pre normalizované podmienky vnútorného vzduchu $\theta_i = 20\text{ °C}$ a $\varphi_i = 50\%$ je teplota rosného bodu $\theta_{dp} = 9,26\text{ °C}$

Najnižšia vnútorná povrchová teplota stavebnej konštrukcie vrátane ostení a nadpraží

$$\theta_{si} \geq \theta_{si,N} = \theta_{si,80} + \Delta\theta_{si}.$$

Pre normalizované podmienky vnútorného vzduchu podľa STN 73 0540-3 pri teplote vnútorného vzduchu $\theta_{ai} = 20^\circ\text{C}$ a relatívnej vlhkosti vnútorného vzduchu $\varphi_{si} = 50\%$ je $\theta_{si,80} = 12,6^\circ\text{C}$

Súčiniteľ prechodu tepla otvorových konštrukcií (kritérium minimálnych tepelnoizolačných vlastností stavebných konštrukcií) – STN 730540-2 [23]

Vonkajšie okná a dvere bytových a nebytových budov musia mať súčiniteľ prechodu tepla konštrukcie:

$$U_W \leq U_{W,N}.$$

Konštrukcia / komponent	Súčiniteľ prechodu tepla [W/(m².K)]		
	Odporúčaná hodnota $U_{W,r1}$ normalizovaná (požadovaná) od 1. 1. 2016	Cieľová hodnota od 1.1. 2021	
		$U_{W,r2}$ normalizovaná (požadovaná)	$U_{W,r3}$ odporúčaná
Okná, dvere v obvodovej stene	1,00	0,85	0,65
Okná v šikmej strešnej konštrukcii	1,40	1,20	1,00
Dvere do ostatných priestorov			
– bez zádveria	2,50	≤ 2,00	
– so zádverím	3,00	≤ 2,00	

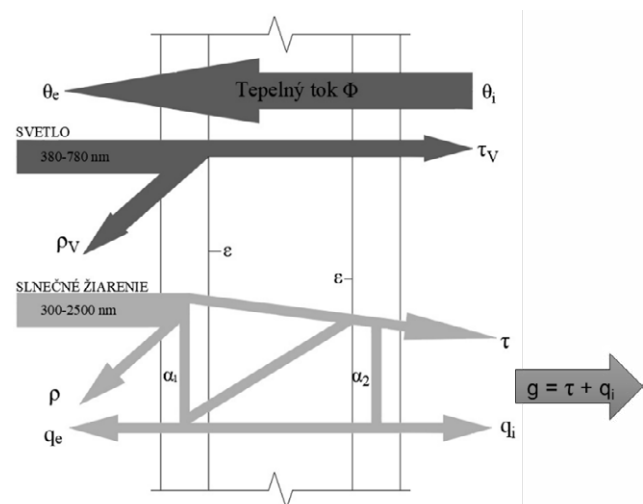
Tab. 18: Prehľad normových požiadaviek na súčiniteľ prechodu tepla

Svetelné a solárne vlastnosti otvorových konštrukcií

Solárne vlastnosti zasklenia sú charakterizované pohltivosťou žiarenia α , odrazivosťou žiarenia ρ a priepustnosťou žiarenia τ .

Celková priepustnosť slnečnej energie g je výsledkom pôsobenia dvoch tokov:

- toku spôsobeného priamym prechodom cez zasklenie τ ,
- sekundárne vyžiareného toku do interiéru q_i , ktorý odovzdá zasklenie v dôsledku svojho zohriatia [13].



Obr. 147: Distribúcia tokov a žiarenia cez zasklenie [13]

Výskum otvorových konštrukcií na KPSU SvF UNIZA

V roku 2011 bolo vybudované pavilónové laboratórium na katedre pozemného staviteľstva a urbanizmu, ktoré v súčasnosti pozostáva z troch miestností so zameraním na obvodové plášte pre budovy s takmer nulovou potrebou energie. V laboratóriu boli zabudované tri okenné konštrukcie, konkrétne: plastové, plastové s termomodulmi a drevené okno. Všetky okná boli zasklené izolačným trojsklom s plynovou výplňou. Okná už v dobe inštalácie spĺňali kritériá pre domy s takmer nulovou potrebou energie. Okenná stena v ktorej sú zabudované okná je orientovaná na juh s miernym natočením na západ (cca 15°). Vnútornú klímu laboratória zabezpečuje klimatizačná jednotka, ktorá udržiava teplotu vzduchu na 20°C a vlhkosť vzduchu na 50%, teda podľa štandardných

okrajových podmienok určených normou STN 730540:2019. Z exteriérovej strany pôsobia na okná reálne klimatické podmienky, ktoré sú zaznamenávané experimentálnou meteorologickou stanicou umiestnenou na streche budovy laboratória. Od spustenia laboratória boli zaznamenávané, okrem teplôt vzduchu aj povrchové teploty z exteriérovej a interiérovej strany 36 termočlánkami v 5 minútovom časovom kroku. Monitorované miesta boli na ráme, krídle a zasklení. V roku 2015 boli doplnené meracie zariadenia vo forme teplovodivých platničiek na meranie hustoty tepelného toku. V roku 2017 bolo doplnených ďalších 21 termočlánkov.

V roku 2020 prešiel obvodový plášť laboratória rekonštrukciou, v rámci ktorej bolo vybudované zateplenie z minerálnej vlny v hrúbke 160 mm a plastové okno bolo nahradené hliníkovým oknom. Plastové okno bolo neskôr použité na meranie v klimatickej komore. Po rekonštrukcii obvodového plášťa, boli nanovo nainštalované termočlánky v počte 60. Na každé okno sa osadilo 20 termočlánkov, desať zo strany interiéru desať zo strany exteriéru. Ďalej boli osadené teplovodivé platničky na meranie hustoty tepelného toku do stredu zasklenia každého okna. Monitorované miesta ostali pôvodné, rám, krídlo a zasklenie. Interval záznamu sa zmenil na jednu minútu.

V roku 2022 bolo v rámci laboratória dobudované tienenie vo forme exteriérových žalúzií. Z hľadiska meraní boli doinštalované pyranometre za meranie intenzity slnečného žiarenia, pred každé okno z interiérovej strany. Intenzitu slnečného žiarenia zo strany exteriéru zachytáva pyranometer, ktorý je súčasťou mobilnej meteorologickej stanice osadenej na fasáde laboratória.



Obr. 148: Pavilónové laboratórium – 2011



Obr. 149: Pavilónové laboratórium – 2020



Obr. 150: Pavilónové laboratórium – 2022

Ďalej bol osadený jeden luxmeter na meranie intenzity osvetlenia zo strany interiéru a druhý luxmeter zo strany exteriéru. Interval záznamu údajov z týchto zariadení je jedna minúta.

Meranie plastového okna, ktoré bolo odstránené z pavilónového laboratória

Hodnoty súčiniteľa prechodu tepla zasklením vypočítané na základe nameraných tepelných tokov v pavilónovom laboratóriu a v klimatickej komore preukazujú podobné hodnoty, avšak výrazne sa líšia od hodnôt udávaných výrobcu. Súčiniteľ prechodu tepla zasklením ukazuje rozdiel v porovnaní s hodnotami od výrobcu cca 90%. Hodnoty celkovej priepustnosti slnečnej energie v porovnaní s hodnotou od výrobcu sú dosť podobné. Hodnoty namerané v pavilónovom laboratóriu v porovnaní s hodnotou od výrobcu ukazujú zhoršenie len o cca 5,5%. Pri hodnotách nameraných v klimatickej komore nastáva zhoršenie približne o 14%. Na základe týchto zistení môžeme povedať, že tepelno-technické vlastnosti plastového okna po 10-ročnej eksploatacii vykazujú zhoršenie. Toto zhoršenie parametrov ovplyvňuje: možný únik výplňového plynu zo systému zasklenia, nestacionárny stav, najmä z exteriérovej strany (slnečné žiarenie, vietor, dážď) a taktiež prúdenie vzduchu v blízkosti konštrukcie.

Súčiniteľ prechodu tepla [W/(m ² .K)]	Uvedené výrobcom	Zasklenie pavilón	Zasklenie klim. komora s hotboxom	Zasklenie klim. komora bez hotboxu
U_g	0,5	0,92	0,94	0,96

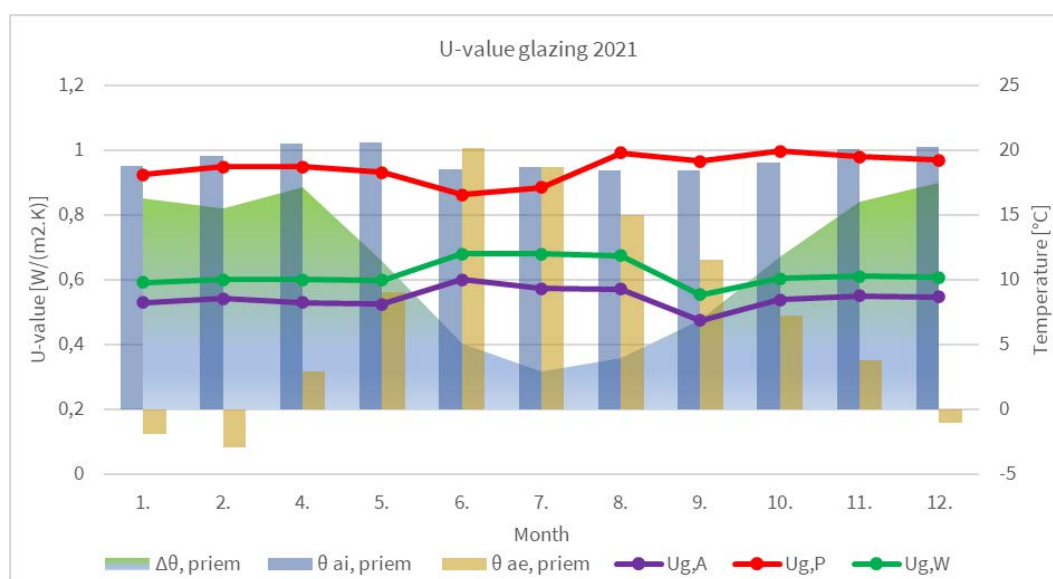
Tab. 19: Porovnanie súčiniteľa prechodu tepla zasklením z nameraných údajov

Priemerný súčiniteľ prechodu tepla zasklením za rok 2021 a 2022

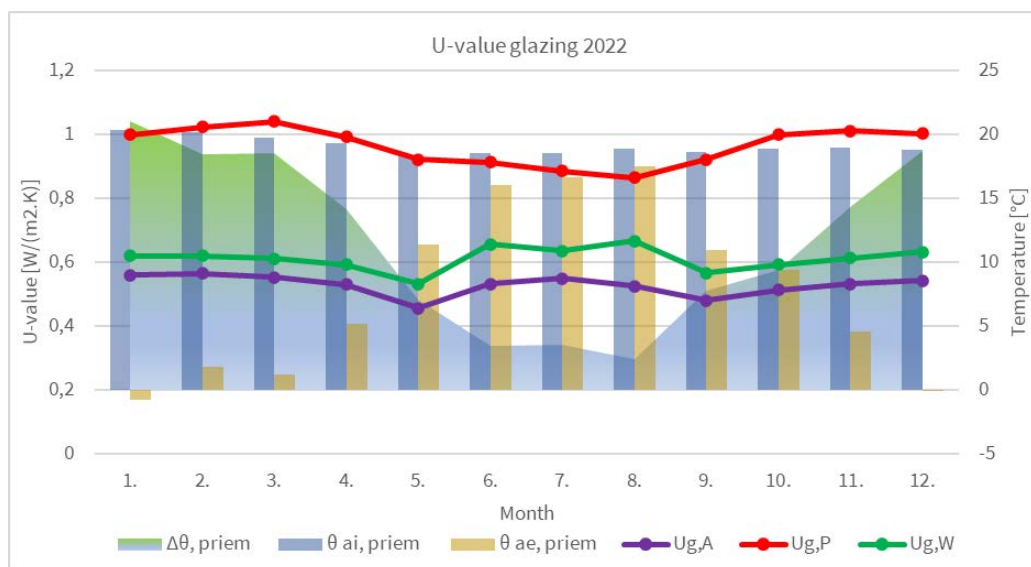
	$U_{g,priem}$ [W/(m ² .K)] 2021	$U_{g,priem}$ [W/(m ² .K)] 2022
Hliníkové okno	0,5449	0,5257
Plastové okno	0,9467	0,9606
Drevené okno	0,6193	0,6087

Tab. 20: Priemerný súčiniteľ prechodu tepla zasklením nameraný v roku 2021 a 2022

Keď sa pozrieme na celoročný priebeh U-value zasklenia vidíme, že v zimných a jesenných mesiacoch majú podobný, resp. zhodný priebeh. V letom období, kedy sú okná vystavované nadmerným teplotám a slnečnému žiareniu, namerané hodnoty kolíšu a sú nestabilné.



Obr. 151: Súčiniteľ prechodu tepla zasklením – 2021



Obr. 152: Súčiniteľ prechodu tepla zasklením – 2022

Intenzita slnečného žiarenia

Z výsledkov zobrazených v tabuľkách vieme povedať, že pri lamelách žalúzií, ktoré boli v horizontálnej polohe došlo k zníženiu solárnych ziskov o 70%. Pri lamelách žalúzií v polohe naklonenej o 45° došlo k zníženiu o 77% a pri vertikálnej polohe lamiel žalúzií došlo k zníženiu solárnych ziskov až o 99%.

Poloha žalúzií	Priemerná vnútorná povrchová teplota T_{si} [°C] (stred zasklenia)	Priemerná celková priepustnosť slnečnej energie g [-]	U_g [W/(m².K)]
Unshaded window	24	0,36	0,55

Tab. 21: Prehľad nameraných údajov pri netienenom okne

Poloha žalúzií	Priemerná vnútorná povrchová teplota T_{si} [°C] (stred zasklenia)	Priemerná celková priepustnosť slnečnej energie g [-]	Faktor tienenia F_c [-]	U_g [W/(m².K)]
Horizontal	20,20	0,11	0,30	0,58
45°	23,10	0,08	0,23	0,57
Vertical	20,20	0,01	0,01	0,54

Tab. 22: Prehľad nameraných údajov pri tienenom okne

Použitá literatúra

- [1] SOME WINDOW HISTORY. *Bella Vista Windows & Doors* [online]. Dostupné na: <https://www.bellavistawindowsanddoors.com/blog/some-window-history>
- [2] PUŠKÁR, A.; SZOMOLÁNYIOVÁ, K.; FUČILA, J.; VAVROVIČ, B. 2008. *Okná, zasklené steny, dvere, brány*. Bratislava : JAGA GROUP, s.r.o.
- [3] Profil dreveného okna. 2023. *MAKROWIN* [online]. Detva: MAKROWIN Dostupné na: <https://makrowin.sk/produkty/drevene-okna/> [cit. 2023-03-06].
- [4] PETRYL, Z.; ŠUBRT, R. 2012. *Moderní okna*. Praha: Grada Publishing, a.s.
- [5] Profil plastového okna. 2023. *Vekra* [online]. Lázně Toušeň: Vekra. Dostupné na: <https://www.vekra.cz/produkt/vekra-premium-evo/> [cit. 2023-03-06].
- [6] Profil hliníkového okna. 2023. *Slovaktual* [online]. Pravenec: Slovaktual. Dostupné na: <https://www.slovaktual.sk/produkty/hlinikove-okna/w-77hi/> [cit. 2023-03-06].

- [7] Profil oceľového okna. 2023. *Marpol* [online]. Sered': Marpol. Dostupné na: <https://marpol.info/sk/vchodove-brany/vchodove-brany-do-bytovych-domov/kovove-brany/systemy-economy/> [cit. 2023-03-06].
- [8] Profil drevo-hliníkového okna. 2023. *MAKROWIN* [online]. Detva: MAKROWIN. Dostupné na: https://makrowin.sk/en/products/wood-aluminium-windows/makrowin-retro/04_retro-fix-2/ [cit. 2023-03-06].
- [9] Profil plast-hliníkového okna. 2023. *Slovaktual* [online]. Pravenec: Slovaktual. Dostupné na: <https://www.slovaktual.sk/produkty/plastove-okna/optim/> [cit. 2023-03-06].
- [10] BIELEK, B. 1999. *Sklo a sklenené systémy transparentných konštrukcií budov, ich základná klasifikácia a miesto v modernej architektúre na prahu tretieho tisícročia. Zborník prednášok z medzinárodného sympózia*. Bratislava : Vyd. STU.
- [11] SACK, N. 1999. *Fenster der zukunft wird Teil der Haustechnik sein. Bauelemente BAU: Marketingmagazin fur Bauausstatter*. Stuttgart: s.n.
- [12] SAINT-GOBAIN GLASS: MEMENTO. 2005. *Príručka o sklách a klených systémoch*.
- [13] CHMÚRNY, I.; TOMAŠOVIČ, P.; HRAŠKA, J. 2013. *Fyzika vnútorného prostredia*. Bratislava: Vyd. STU.
- [14] Prehľad dištančných rámkov. 2023. *Amokna* [online]. Gorzów Wielkopolski: Amokna. Dostupné na: <https://www.amokna.net/tips/warm-frame-what-it-and-what-it-used> [cit. 2023-03-06].
- [15] LUBINOVÁ, Š. a kol. 2013. *Stínění oken*. Praha: Grada Publishing, a.s.
- [16] HRAŠKA, J. 2020. *Tieniaca technika budov. Typológia, navrhovanie a hodnotenie*. Bratislava: SPEKTRUM STU.
- [17] Vonkajšia žalúzia. 2023. *Netokna* [online]. Nitra-Mlynárce: Netokna. Dostupné na: <https://www.netokna.sk/produkty/vonkajsie-zaluzie/> [cit. 2023-03-06].
- [18] Vonkajšia roleta. 2023. *SUŠA* [online]. Skalica. Dostupné na: <https://susa-okna.sk/2023/01/30/vonkajsie-hlinikove-rolety/> [cit. 2023-03-06].
- [19] Vonkajšia markíza. 2023. *Visor* [online]. Bratislava: Visor. Dostupné na: <https://visor.sk/markizy/> [cit. 2023-03-06].
- [20] Slnolam. 2023. *HORIZONT-žalúzie* [online]. Košice: HORIZONT-žalúzie. Dostupné na: <https://horizont-zaluzie.sk/en/node/323> [cit. 2023-03-06].
- [21] Látkové exteriérové tienenie. 2023. *Sun System SR* [online]. Skalica: Sun System SR. Dostupné na: <https://www.sunsystem.sk/clony/detail/najpredavanesie-screenove-rolety-zipscreen/> [cit. 2023-03-06].
- [22] PUŠKÁR, A.; ŽÚDEL, R.; SNOPOKO, P. 2007. *Smernica pre montáž okien*. Bratislava: s.n.
- [23] STN EN 73 0540-2+Z1+Z2. 2019. *Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Časť 2: Funkčné požiadavky. Konsolidované znenie*. Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR.

Kontakty

Ing. Marek Bartko: marek.bartko@uniza.sk

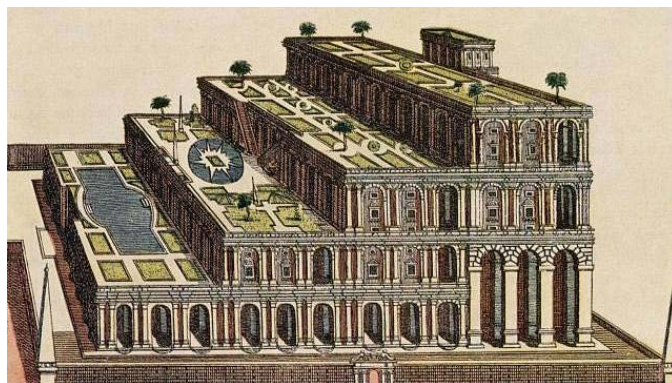
AKTUÁLNY STAV PROBLEMATIKY VEGETAČNÝCH KONŠTRUKCIÍ

Ing. Marek Chabada¹

¹ Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika

Klimatické zmeny a nedostatok prírodných zdrojov energie sú v súčasnosti témami, ktoré sú predmetom záujmu v mnohých krajinách [1]. Mestá na celom svete sa rozrastajú. Aby bolo možné vytvoriť obytný priestor pre budúcich obyvateľov, zelené plochy v meste sa znižujú a nahrádzajú budovami. Úbytok zelených plôch má negatívny vplyv na kvalitu života. Efekt mestského tepelného ostrova sa zosilňuje v dôsledku úbytku zelených plôch [2].

Ako sa ukazuje, zakomponovanie vegetačných častí do konštrukcií budov nie je vôbec nová téma. Začiatok tejto ideí siaha do dávnej minulosti. Prvé ľudské obydliá boli zhotovené práve zo surovín, ktoré boli ľahko získateľné a spracovateľné. Vegetačná vrstva, ale predovšetkým vrstva zeminy prevažne na streche sa pri budovaní ľudských sídiel objavuje už v staroveku [3], [4]. V škandinávskych krajinách, krajinách severnej Európy a Ameriky boli dôvodom využívania týchto vrstiev drsné klimatické podmienky, kedy vrstva zeminy a vegetácia chránila obydlie pred vonkajšími poveternostnými podmienkami. V severných krajinách chránila vegetačná vrstva pred nízkymi teplotami a v krajinách s teplým a suchým podnebím zas chránila pred horúcami a vytvárala vo vnútri stavieb príjemne prostredie [4]. Jedna z najznámejších stavieb, kde bola použitá konštrukcia s vegetáciou, sú Semiramidine visuté záhrady v Babylone, ktoré boli postavené v 6. storočí pred našim letopočtom. Vegetačné strechy sa využívali aj v zikkuratoch, v starovekej Mezopotámii. Podobne ako Babylon, aj rímske a grécke architektúry využívali tieto systémy vo svojich obdobiach. Po mnohých storočiach zriedkavého využívania v európskych mestách opäť prinavrátil život vegetačným konštrukciám známy architekt Le Corbusier, ktorý považoval vegetáciu ako estetický prvok budovy. Približne v tom istom čase navrhli americkí architekti vegetačné strechy ako metódu integrácie budov a prírody [1], [3].



Obr. 153: Historické obydliá a konštrukcie s vegetačnou vrstvou [26]

Významné zakomponovanie vegetácie do konštrukcií budov poväčšine nasledovalo s významnými politickými alebo historickými udalosťami ako boli rôzne summity ohľadom ekológie a environmentálnych aspektov:

- Brutlandova správa (1987)
- Summit Zeme, Rio (1992)
- Svetový summit o trvalo udržateľnom rozvoji, Johannesburg (2002)
- Konferencia, Kodaň (2009)

Až vtedy sa začala aplikácia vegetácie do konštrukcií budov sledovať najmä z hľadiska benefitov na vonkajšie prostredie a budovu ako takú [5]. Jedným z hlavných svetových centier zelenej architektúry je Nemecko. Odhaduje sa, že v Nemecku sa každý rok zazelená približne 10 miliónov km² strešnej plochy, z čoho je približne 80% extenzívne strechy a 20% intenzívne strechy. Lídrom v oblasti vegetačných konštrukcií v Nemecku je mesto Hamburg. Hamburg bol prvým veľkým nemeckým mestom, ktoré zaviedlo komplexnú stratégiu zelených striech s cieľom zazeleniť najmenej 70% nových budov ale aj striech, ktoré potrebujú zrekonštruovať [6].

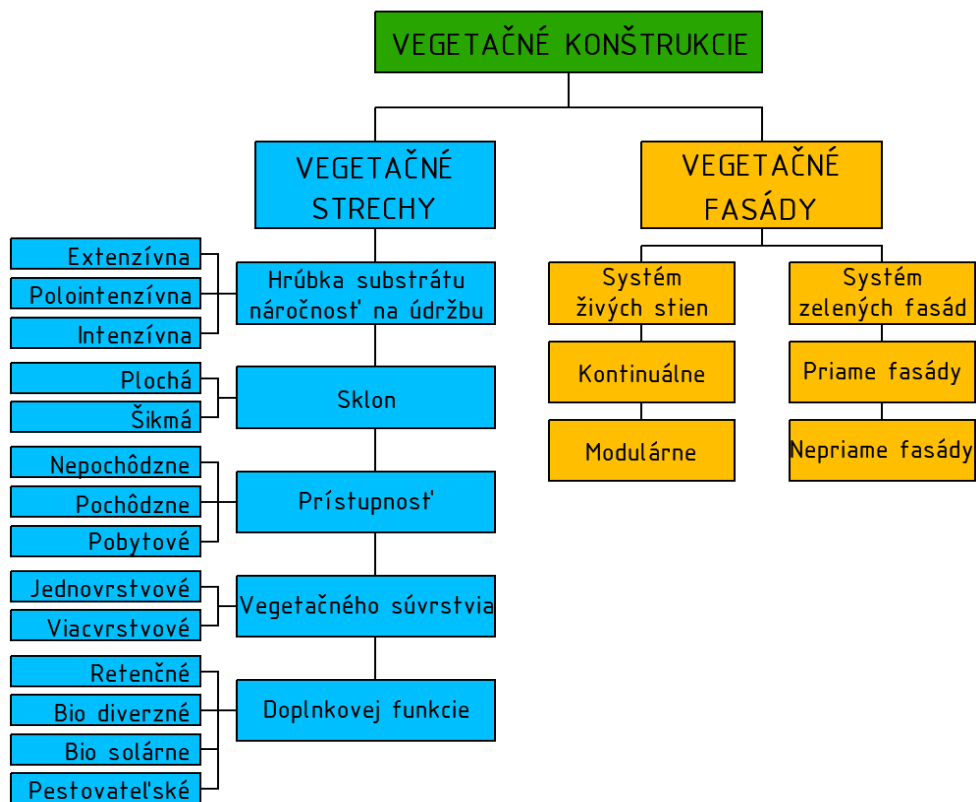
Vegetačné konštrukcie sú konštrukcie so zámerne vypestovanou vegetáciou, teda nie konštrukcie, kde sa vegetácia objavuje vplyvom zanedbanej údržby. Masívna výstavba budov najmä v centrách miest vytláča prírodnú zeleň, čo má za následok množstvo negatívnych vplyvov na človeka a mestskú klímu. Zakomponovanie vegetácie do konštrukčného riešenia budov sa ukazuje ako veľmi inovatívne riešenie na elimináciu absencie prírodnej zelene. Takýmto spôsobom sa môže „betónová džugla“ premeniť na „prírodne klimatizované“ miesto a priamy styk s prírodou [7].



Obr. 154: Možnosť aplikácie vegetácie do konštrukcií budov [27], [28]

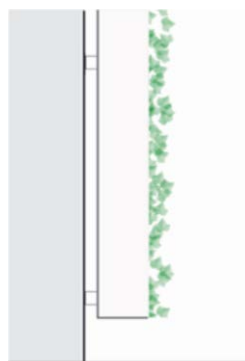
Na trhu existuje niekoľko systémov ozelenenia, najmä vo forme vegetačných striech a vegetačných fasád. Tieto konštrukcie sú čím ďalej viac používané aj v tých najväčších metropolách v Európe, ale aj severnej Amerike či Ázii. Dominantnými lídrami v oblasti využívania vegetačných konštrukcií sú najmä Nemecko, konkrétne mesto Hamburg, Švajčiarsko ale aj Singapore, Čína, či Japonsko. Systémy ozelenenia, ako sú vegetačné strechy a vegetačné steny, sa často používajú ako estetický prvok budov. Súčasná technológia zapojená do týchto systémov však môže maximalizovať funkčné prínosy rastlín pre výkon budov. Systémy ozelenenia môžu tvoriť aj súčasť udržateľnej stratégie, obnovy miest a modernizácie budov. V mestskom meradle zelené strechy a zelené steny prispievajú k začleneniu vegetácie do mestského kontextu bez toho, aby zaberali akýkoľvek priestor na úrovni ulice [8]. Tieto systémy podporujú vytváranie vhodných mestských oblastí, majú terapeutický účinok navodením psychologickéj pohody prostredníctvom prítomnosti vegetácie.

Vegetačné konštrukcie ako také sú istou formou doplnkovými vrstvami budovy. Musia mať vytvorený vhodný podklad, aby mohli ďalej prosperovať a prirodzene sa vyvíjať. Pri vegetačných fasádach ide najmä o druh podpornej konštrukcie. Základné rozdelenie vegetačných fasád je: Systém živých stien a systém zelených fasád. Toto rozdelenie a ďalšie varianty môžeme vidieť na obrázkoch nižšie. V niektorých prípadoch vegetácia nepotrebuje žiadne doplnkové riešenie, a keď tak sú to formy lán alebo drôtov [9]. Rozdelenie vegetačných striech závisí od viacerých faktorov akými sú napríklad: konštrukčné riešenie, hrúbka pestovateľského média, spôsobu využívania vegetačnej strechy ale aj ďalších doplnkových funkcií. Pri vegetačných strechách, je skladba vegetačného súvrstvia pri viacerých druhoch striech totožná. Tvoria ju vrstvy ako: vegetačná vrstva, pestovateľské médium, hydroakumulačná vrstva, filtračná, drenážna a ochranná vrstva. Niektoré vrstvy môžu plniť viacero funkcií a niektoré vrstvy sa môžu v odôvodnených prípadoch vynechať [10]. Vhodný výber samotnej vegetácie potom závisí od mocnosti vegetačného substrátu, resp. rastového média.

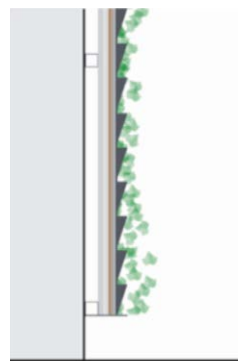


Obr. 155: Rozdelenie vegetačných konštrukcií

Vegetačné fasády – Systém živých stien [9]

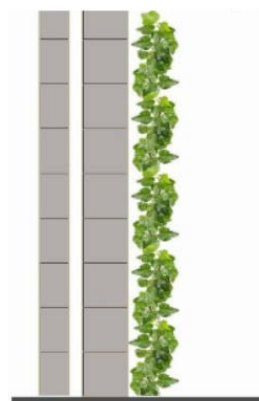


Modulárny systém



Kontinuálny systém

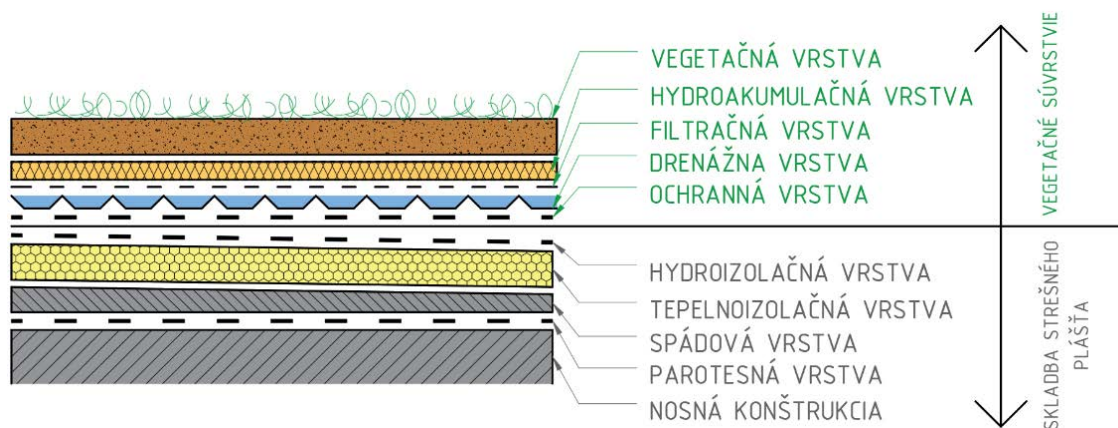
Vegetačné fasády – Systém zelených fasád [9]



Priama fasáda



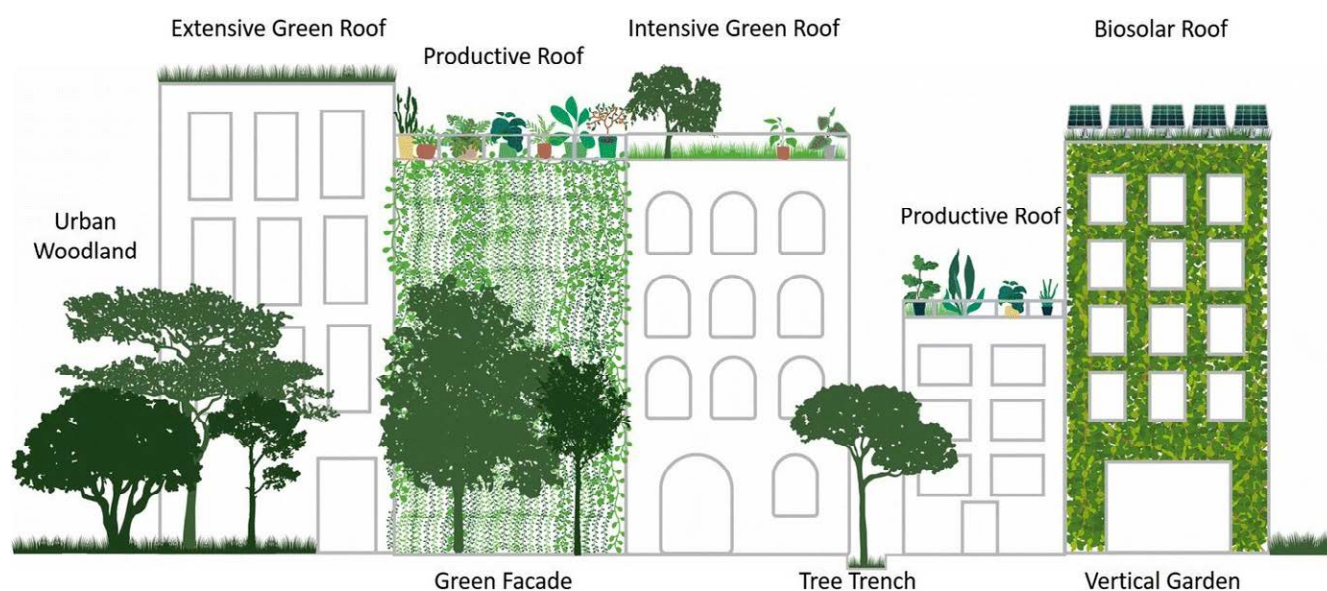
Nepriama fasáda



Obr. 156: Skladba vegetačného súvrstvia

Používajú sa rôzne formy aplikácie vegetácie do budov. Panuje silný súvzťah vegetačných fasád a vegetačných striech. Takýmto spôsobom ide o prinavrátenie prírodnej vegetácie do centier miest, kde je vplyvom masívnej zástavby tvrdo vytláčaná a to ma za následok množstvo negatívnych dopadov na ľudí ale aj životné prostredie.

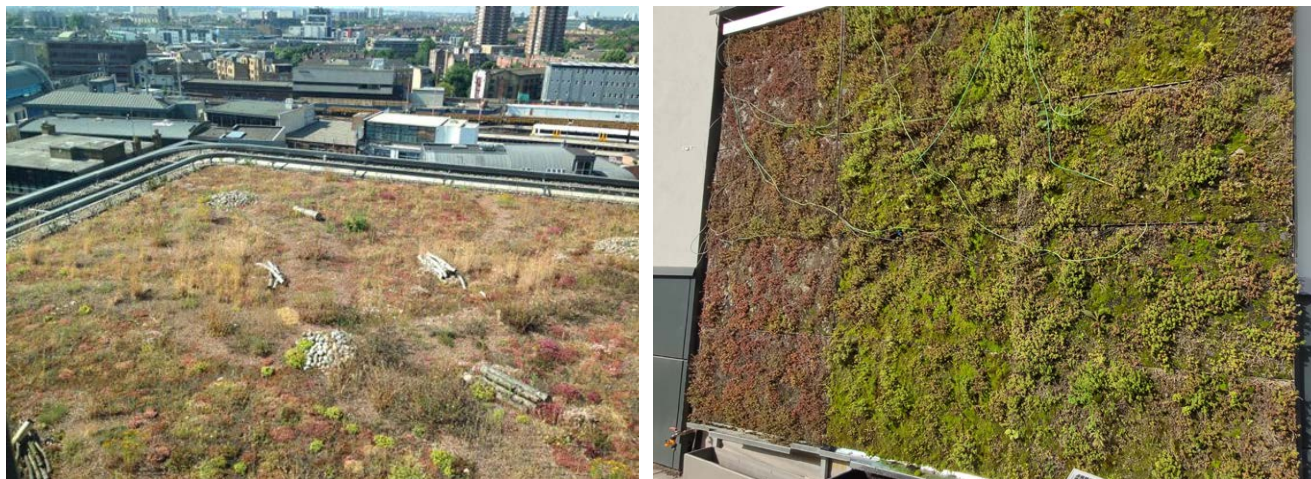
Pred samotným návrhom vegetačnej konštrukcie sa treba rozhodnúť, o aký typ konštrukcie by malo byť, čiže akú bude mať primárnu funkciu a na čo bude využívaná. Tomuto spôsobu treba prispôbiť celkovú konštrukciu a samotnú skladbu. Vegetačné strechy majú podstatne väčší rozsah využitia. Môže ísť buď o priestor na oddych a relaxáciu, najmä v centrách miest, na čo je vhodné použiť intenzívne strechy. Ďalej môže ísť o pestovanie zeleniny na takýchto strechách, využitie vegetačnej strechy v spojení s fotovoltikou kedy nám zlepšuje výkon fotovoltických panelov alebo môže ísť o zväčšenie priestoru pre prírodnú biodiverzitu [11]. To sa týka prinavrátenia živočíchov do miest ako je rôzny hmyz – včely, motýle. Tu treba zakomponovať najmä širokú škálu rôznych typov rastlín. Pri návrhu najmä takýchto typov striech, alebo pobytových striech či rôznych tvaroch vegetačných fasád je potrebná úzka spolupráca s botanikom či záhradkárom [12].



Obr. 157: Rozmanitosť vegetačných konštrukcií [29]

Pre správne fungovanie a najmä životnosť vegetačných konštrukcií je dôležitá správna realizácia, manipulácia a údržba. K riešeniu každej vegetačnej konštrukcii, či už steny alebo strechy, treba pristupovať individuálne. Treba zohľadniť viacero vstupných aspektov akými sú najmä: lokalita, funkcia, prístup, orientácia a v neposlednom rade myslieť na údržbu, ktorú bude potreba. Netreba zabúdať, že vegetácia je živý organizmus a potrebuje mať prísun živín na prežitie, správne fungovanie a rast.

Nevyhnutnou súčasťou vegetačných konštrukcií je zavlažovanie. Správny spôsob zavlažovania a najmä množstvo závisí od viacerých faktorov ako napríklad typ konštrukcie, hrúbka vegetačného substrátu, náročnosť použitých rastlín a v neposlednom rade umiestnenie – orientácia na SV strany. Vegetačné fasády musia byť zavlažované nakoľko nemajú také dostatočné hydroakumulačné schopnosti ako strechy – zvislá orientácia. Z vegetačných striech nemusia byť zavlažované extenzívne strechy [12]. Tento typ strechy však stráca svoje benefity najmä počas teplých letných dlhotrvajúcich dní. Nakoľko nie je zabezpečená prítomnosť vody, nie je možnosť výparu, čo by ochladzovalo okolie. Takáto nezavlažovaná vegetačná strecha sa prehrieva podobne ako klasické tmavé materiály.



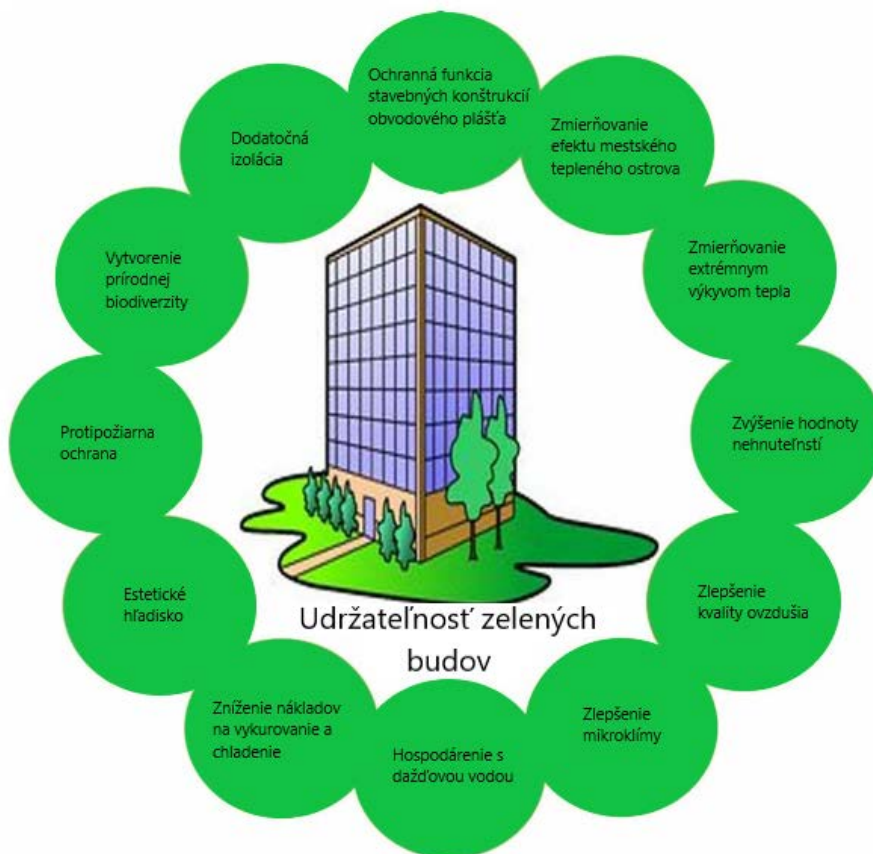
Obr. 158: Vplyv zavlažovania na životaschopnosť prežitia vegetácie [30]

Vplyv vegetačných konštrukcií na budovu a jej okolie

Najčastejšie benefity konštrukcií s vegetačnou vrstvou uvádzané v literatúre a odborných článkoch, sú úzko spojené s elimináciou prejavov masívnej mestskej zástavby realizovanej na úkor zmenšovania zelených plôch. Pokrývanie budov vegetáciou, ak sa uplatňuje vo významnej mestskej mierke, môže v skutočnosti zlepšiť mestské prostredie tým, že prispieva k mestskej biodiverzite [8], hospodáreniu s dažďovou vodou [13], kvalite ovzdušia [14], znižovaniu teploty a zmierňovaniu efektu tepelného ostrova [15], [16]. Uplatňovanie systémov zelene môže mať okrem environmentálnych aspektov aj sociálne a ekonomické prínosy [9]. Tieto systémy podporujú vytváranie vhodných mestských oblastí, majú terapeutický účinok navodením psychologickéh pohody prostredníctvom prítomnosti vegetácie. Zlepšujú imidž miest, zvyšujú hodnotu nehnuteľností a fungujú ako doplnková tepelná a akustická ochrana. Vegetácia má potenciál zlepšiť mikroklimu v zime, keď funguje ako doplnková izolačná vrstva, a v lete, keď poskytuje tieň a výparný chladiaci účinok. Vegetácia pohlcuje veľké množstvo slnečného žiarenia, zatiaľ čo účinok evapotranspirácie rastlín môže ďalej znížiť povrchové teploty v porovnaní s tvrdými povrchmi a zvýšiť relatívnu vlhkosť v jej okolí [17], [18].

Výhody vegetačných konštrukcií sa dajú v zásade zhrnúť do 4 základných skupín a to: **ochranný potenciál, skvalitnenie a zväčšenie pobytových priestorov v mestách, zníženie energetických nákladov a elimináciu prejavov mestskej zástavby** [4]. V týchto skupinách je zahrnutá celá rada benefitov, ktoré vegetačné konštrukcie ponúkajú. Spomínané výhody vegetačných konštrukcií vychádzajú z ich schopnosti reagovať na vonkajšie podnety v inej miere, ako tradičné, bežne používané „tvrdé“ materiály.

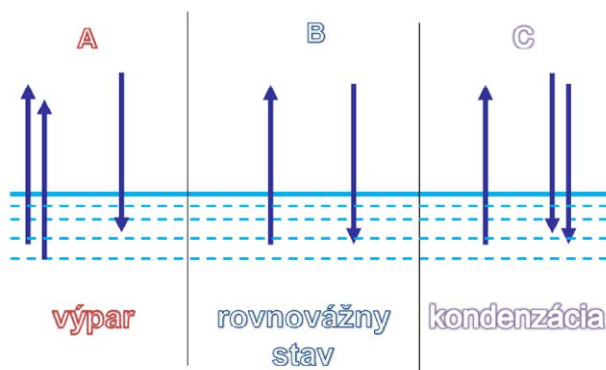
Absencia vegetácie a nadmerné používanie tmavých tvrdých materiálov s vyššou tepelnou kapacitou ako má vegetácia spôsobuje najmä v mestách, zvýšenie teploty vzduchu, čo je známe ako efekt mestského tepelného ostrova. Prejavuje sa zvýšením teploty, v priemere o 1–3 °C s maximálnymi rozdielmi až do 10 °C. Spôsobuje to absorpcia slnečného žiarenia počas dňa, akumulácia tepla a následné sálanie tepla vo večerných hodinách. Najvýraznejšie faktory, ktoré ovplyvňujú tento efekt sú albedo, index listovej plochy a evapotranspirácia [15].



Obr. 159: Benefity vegetačných konštrukcií

Evapotranspirácia

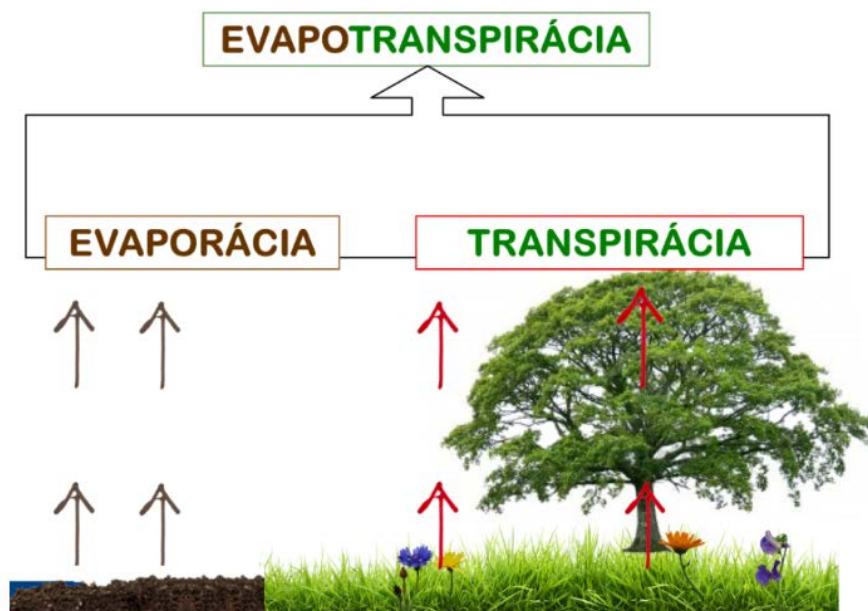
Evapotranspiračný efekt sa ukazuje ako veľmi účinný nástroj na zmierňovanie horúčav a znižovanie zvýšenej teploty v mestách. Experimentálne štúdie ukázali, že vegetačné konštrukcie zvyšujú pasívne chladenie. Pod pojmom evapotranspirácia sa rozumie výpar. Ide o fyzikálny proces transformácie kvapalného alebo plynného skupenstva vody do skupenstva plynného. Výpar je komplexným procesom, ktorý zahŕňa javy prenosu hmoty (vody) a prenosu tepla. Dochádza pri ňom k vyparovaniu vody a zároveň k spotrebe energie (tepla). Závisí od fyzikálnych a chemických vlastností povrchov, z ktorých výpar prebieha a rovnako od vlastností vzduchu, ktorý vodnú paru prijíma. Môžu nastať tri prípady transformácie: výpar, rovnovážny stav a kondenzácia [17].



Obr. 160: Fyzikálna podstata výparu [31]

Evapotranspirácia je celkový výpar z rastlín a pôdy, teda transpirácia rastlín spolu s výparom z pôdy a intercepčným výparom (výpar vody zadržanej vegetačnými povrchmi). Rozlišujeme evapotranspiráciu aktuálnu (ET) a potenciálnu (ET₀). Evapotranspirácia je ovplyvňovaná

mnohými vnútornými (druh rastliny, anatomická stavba, zalistenie, vek a iné) a vonkajšími činiteľmi (počasie, vlhkosť pôdy, veľkosť vyparujúceho povrchu, atď.) [19]. Ak je zásoba vody dostatočná, je ovplyvňovaná predovšetkým vonkajšími činiteľmi a v období s deficitom vody, je limitovaná skôr vnútornými činiteľmi. Ku transpirácii 1l vody je potreba 0,69 kWh energie, pričom toto množstvo energie sa neprejavuje zvýšením teploty ale mení vodu na výpar, čím zvlhčuje a ochladzuje okolitý vzduch [11].



Obr. 161: Evapotranspirácia [31]

Albedo

Hodnota albeda udáva pomer medzi intenzitou dopadajúceho slnečného žiarenia a intenzitou slnečného žiarenia odrazeného späť do atmosféry. Z toho vyplýva, že bledé povrchy majú vyššie albedo ako tmavšie povrchy, ktoré sa v čoraz väčšej frekvencii objavujú v mestách. Absorpcia slnečnej energie konštrukciami cez deň a následné uvoľňovanie tepla späť do ovzdušia vo večerných hodinách spôsobuje nárast teploty. Naopak čoraz väčšia plocha presklených častí najmä vysokých budov spôsobuje vzájomné odrážanie slnečnej energie a udržiavanie tepla medzi budovami [16]. Vegetačné plochy majú relatívne nízku hodnotu albeda, čo znamená, že väčšinu slnečného žiarenia absorbujú - pohltené slnečné žiarenie nie je spätne uvoľňované do prostredia ale je využité na tvorbu výparu vody a vlhkosti z vegetačných konštrukcií.

Index listovej plochy – LAI

Index listovej plochy (LAI) sa ukazuje ako dominantný faktor tieniacej techniky obvodového plášťa. LAI je životne dôležitým faktorom na zabezpečenie úspory energie prostredníctvom evapotranspirácie a slnečného tienenia. Pomer pokrytia a hrúbka listov vedú k regulácii vnútorného tepelného komfortu v období chladenia [20]. Kľúčovú úlohu zohráva najmä pri priamych vegetačných fasádach, nakoľko v tomto systéme nie je použité žiadne pestovateľské médium ani podporná konštrukcia. Pokrytie listami v tomto prípade má rozhodujúci charakter obmedzenia prestupu množstva tepelnej energie do budovy. Viaceré experimentálne merania dokazujú, že vegetačné konštrukcie majú výrazne nižšie povrchové tepoty ako bežne používané materiály. V horúcich letných dňoch má priame slnečné žiarenie dominantný vplyv na zohriatie povrchu obvodového plášťa. Teplota na povrchu vo väčšine prípadov dokonca presahuje teplotu okolitého vzduchu. Čím vyššiu teplotu má povrch konštrukcie, tým viac tepelného toku prechádza do interiéru [21].

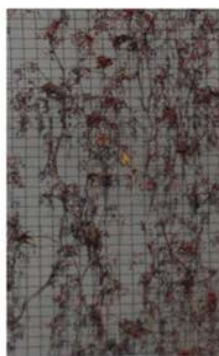
Začiatok leta



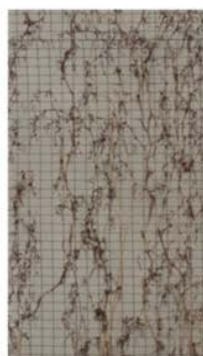
Pribeh leta



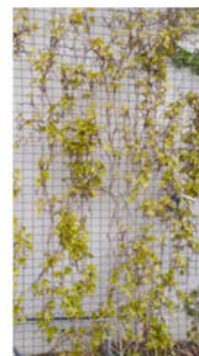
Jeseň



Zima



Jar



Obr. 162: Vplyv obdobia na LAI



Obr. 163: Snímok z infračervenej kamery [32]

Mnohé štúdie dokazujú výrazne zníženie prestupujúceho tepla do budovy v letných mesiacoch, najmä pri aktívnych zavlažovacích systémoch. Vďaka prítomnosti vody dochádza k evapotranspiračnému chladeniu, ktoré spotrebúva značnú časť slnečnej energie. V zime sa naopak ukazuje, že je vhodné prerušiť dodávku vody, aby ostala zemina resp. rastové médium nezvlhčované. Znižovanie prestupu tepla cez obalové konštrukcie nám šetrí energie na vykurovanie a chladenie, čím zlepšujú energetickú hospodárnosť budovy. Vegetačné konštrukcie ako také vytvárajú doplnkové vrstvy, ktoré majú jednak tepelnoizolačný charakter, ale i zvukovoizolačný charakter. Sú to konštrukcie, ktoré majú ochranný potenciál. Chránia nám konštrukciu obvodového plášťa pred priamymi nepriaznivými účinkami vonkajšieho prostredia. Pri fasádach to je najmä ochrana muriva pred vetrom hnaným dažďom a extrémnym kolísaním povrchových teplôt a pri streche nám to výrazným spôsobom ochraňuje hydroizolačnú vrstvu pred UV žiarením a rapidným teplotným výkyvom v priebehu dňa. V neposlednom rade ide o hospodárenie s dažďovou vodou. Ukazuje sa, že približne 10% ročného úhrnu zrážok padne počas prívalových dažďov, ktoré sú spôsobené dlhotrvajúcim suchom počas letných mesiacov. Takýto nárazový prísun vody spôsobuje zahltenie kanalizačných sietí. Vegetačné konštrukcie majú hydroakumulačné vlastnosti a dokážu zadržiavať vysoké percento dopadajúcej vody. Množstvo vody samozrejme závisí od konkrétnej skladby a typu vegetačnej konštrukcie. Takisto však posúva časovú amplitúdu špičkového odtoku, čím dosiahneme odtečenie prebytočnej vody oneskorom termíne. Vegetačné konštrukcie nám vďaka vegetácii zlepšujú kvalitu ovzdušia. Rastliny pri fotosyntéze premieňajú oxid uhličitý na kyslík a rovnako zachytávajú prachové časti, najmä PM_{2,5} a PM₁₀. Zlepšenie kvality ovzdušia však závisí najmä od druhu rastlín a indexu listovej plochy. Vegetačné konštrukcie sa radia do kategórie nehorľavé [20], [22]–[24].

Medzi hlavné nevýhody vegetačných konštrukcií patria najmä zvýšené investičné náklady a náklady spojené s údržbou, ďalej sa nám zvyšuje hmotnosť stavby a je potreba rátať so zvýšeným zaťažením. Pri výbere rastlín je veľmi dôležité brať ohľad na rôzne typy alergií spôsobené niektorými druhmi kvetov a rastlín [12].

Výskum vegetačných konštrukcií

Pri analýze vplyvu vegetačných konštrukcií na budovu sa používajú tri základné typy získania informácií:

Experimentálne meranie IN-SITU

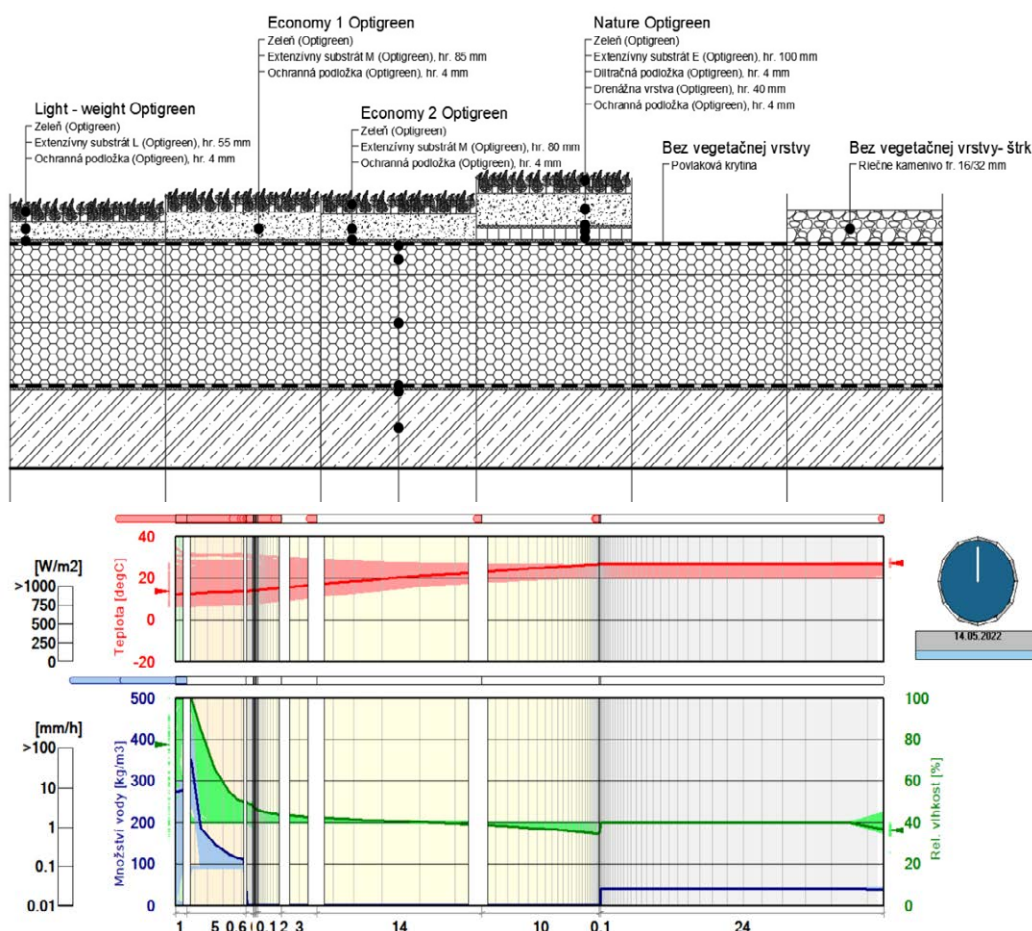
V tomto prípade sú vegetačné konštrukcie vystavené priamo poveternostným podmienkam danej lokality. In situ merania sa realizujú na experimentálnych domoch, čo predstavuje zmenšenú konštrukciu zodpovedajúcu reálnej budove, alebo výskum prebieha na reálne postavenej a využívanej budove. Tento spôsob umožňuje zapojenie väčšej plochy do experimentálneho merania a vykazuje tak relevantnejšie výsledky. Počas experimentov, či už laboratórnych alebo in situ, sú konštrukcie monitorované rôznou prístrojovou technikou, ktorá zachytáva odozvu konštrukcie na vyvolané vonkajšie a vnútorné podmienky. Meracia technika je umiestnená pred konštrukciou, na rozhraní jednotlivých vrstiev či v samotnej vrstve. Týmto spôsobom je možné pozorovať zmeny v správaní sa konštrukcie a určiť mieru efektívnosti vegetačných konštrukcií.

Laboratórne meranie

Vo výskumných centrách sú realizované rozsiahle laboratórne experimenty so stavebnými konštrukciami pri stálych, kontrolovaných laboratórnych podmienkach. Pri testovaní v laboratórnych podmienkach hovoríme o laboratórnych experimentoch. Tieto experimenty umožňujú meranie tepelno-vlhkostnej odozvy vegetačnej konštrukcie v rôznych vrstvách.

Výsledky zo simulačných modelov

Simuláciami dokážeme predpovedať správanie a určiť vplyv vegetačných konštrukcií na budovu ešte pred jej realizáciou. Na takúto simuláciu však musíme mať správne odladený simulačný model, ktorý si vyžaduje vhodnú validáciu. Je nutné poznať správanie sa vegetačnej konštrukcie na rôzne zmeny vonkajšieho prostredia. Vegetácia je systém živého organizmu a treba správne



Obr. 164: Simulácia fragmentu

predpovedať najmä transport vody a vlhkosti v skladbe konštrukcie. Kľúčovým parametrom sa stáva správne zadefinovanie nestacionárnych okrajových podmienok. Na toto môžeme použiť údaje z typického referenčného roka alebo typického meteorologického roka. Pre validáciu simulačného modelu je vhodné použiť klimatické údaje z reálne nameraných údajov a výsledky simulácie porovnávať s hodnotami získanými z meraní „in-situ“ alebo laboratórnym meraním, aby sme čo najpresnejšie zadefinovali a nasimulovali správanie sa vegetačnej konštrukcie. Takto odladený simulačný model môžeme následne používať v rôznych podmienkach so zmenou okrajových podmienok. Simulácie sa môžu realizovať v úrovni 1D, 2D alebo 3D. Takto sa môžu získať relevantné údaje buď z fragmentu, alebo z budovy ako celku.

Problematike vegetačných konštrukcií sa v dnešnej dobe venuje už množstvo renovovaných výskumníkov, vedeckých ústavov, laboratórií či vysokých škôl s cieľom bližšieho porozumenia správania sa vegetačných konštrukcií. Výskumy týkajúce sa týchto konštrukcií majú za cieľ najmä kvalifikovať a kvantifikovať jednotlivé vplyvy na budovu ako takú ale aj na vonkajšie prostredie. Z výskumov je dokázané, že dominantný vplyv na výsledky jednotlivých meraní má najmä lokalita skúmanej vzorky, a typ konštrukcie. Výsledkom je optimálny konštrukčný návrh technického a technologického zhotovenia s čo najväčšou mierou uplatnenia výhod [4].

Smerovanie výskumu vegetačných konštrukcií na Katedre pozemného stavitel'stve a urbanizmu, Stavebnej fakulte, Žilinskej univerzity v Žiline

Katedra pozemného stavitel'stva a urbanizmu (KPSU), Stavebnej fakulty (SvF), Žilinskej univerzity v Žiline (UNIZA) sa už dlhší čas venuje pozorovaniu a skúmaniu konštrukciám s vegetačnou vrstvou ako sú experimentálne extenzívne vegetačné strechy a experimentálna vegetačná fasáda. Hlavným cieľom tohto výskumu je rozšírenie teoretických, technických a technologických aspektov navrhovania, realizácie a užívania vegetačných konštrukcií. Ďalej sa sústreďujeme na hodnotenie faktorov vplyvujúcich na vegetačné konštrukcie, výskum konkrétnych riešení vegetačných fasád a striech zameraných na:

- efektívnosť zavlažovacieho systému s dopadom na vonkajšie prostredie
- analýzu evaporačného chladenia vegetačných konštrukcií
- vplyv indexu listovej plochy a hodnoty albeda na priebeh teplôt v skladbách konštrukcií
- vplyv slnečného žiarenia na evapotranspiráciu vegetačných častí konštrukcií
- vtanovenie vodozáržnosti konkrétnych skladieb extenzívnych vegetačných striech.

Na základe vykonaných experimentov následne správne validujeme simulačné modely vegetačných konštrukcií.

Naša katedra sa aktívne venuje analýze extenzívnych striech rôznych skladieb od bežne dostupných komerčných spoločností od roku 2020, kedy prešla hlavná budova SvF UNIZA rekonštrukciou strešného plášťa. V tomto období boli do jednotlivých vrstiev strešného plášťa vložené snímače, na meranie teploty v konštrukcii. Následne sa postupne rozrastal počet skladieb vegetačných striech, kde sa analyzoval ich teplotný a vodný režim. Jednotlivé skladby konštrukcií sú



Obr. 165: Experimentálne vzorky extenzívnych vegetačných striech



Obr. 166: Experimentálna vzorka vegetačnej fasády

vyhotovené v dvoch identických variantoch, pričom v jednom sa skúma teplotný režim – priebeh teploty v jednotlivých vrstvách a v druhom variante sa skúma ich vodný režim – retencia dažďovej vody v skladbe [25].

V lete v roku 2021 sa výskum rozrástol o vzorku experimentálnej dvojplášťovej vegetačnej fasády, ktorá je súčasťou pavilónového laboratória KPSU SvF UNIZA. Vzorka vegetačnej fasády je zrealizovaná v troch segmentoch, pričom sa na jednotlivých segmentoch skúma efektívnosť a vplyv aktívneho zavlažovacieho systému. Vegetačná fasáda je zhotovená z inovatívnych recyklovaných dosiek spoločnosti MDM Stered s vopred predpestovanou vegetáciou. Pozoruje sa vplyv vegetačnej fasády na vybrané stavebno-fyzikálne veličiny v jej bezprostrednej blízkosti a porovnania týchto hodnôt s „klasickou“ vzorkou fasády – fasáda bez vegetačného krytu. Skúmajú sa a porovnávajú sa veličiny ako sú: teplota vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu, teplota na povrchu konštrukcie, retenčná schopnosť vzorky či nutná údržba vzorky. Táto vegetačná fasáda je prototypom svojho druhu a skúma sa vhodnosť použitého technologického riešenia. Samotná vzorka si prešla už dvomi zmenami technologického vyhotovenia.

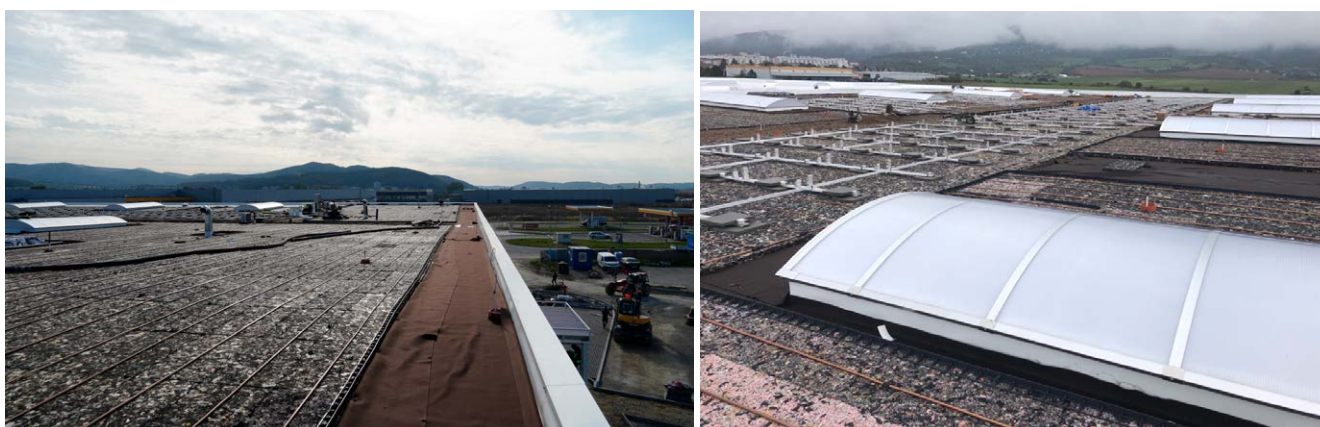
Merané veličiny sa zaznamenávajú v minútových intervaloch. Nakoľko ide o rozsiahli štatistický súbor, výstupy budú prezentované v prehľadných grafov. Na priblíženie a spresnenie grafického znázornenia sa do hodnotenia vyberajú príznačné dni s najlepšou výpovednou hodnotou. Z takéhoto dlhodobého merania, sa vedia vyvodiť adekvátne závery ohľadom sezónnosti výsledkov. Údaje z vonkajšieho prostredia sú získane z meteostaníc, umiestnených v areáli UNIZA. Mobilná meteostanica je umiestnená nad experimentálnou vegetačnou stenou, zatiaľ čo pevná meteostanica sa nachádza na streche pavilónového laboratória. Meteostanice zaznamenávajú veličiny ak sú:

- intenzita globálneho slnečného žiarenia
- intenzita difúzneho slnečného žiarenia
- smer a rýchlosť vetra
- množstvo zrážok
- krátkovlnné a dlhovlnné žiarenie
- UV žiarenie
- teplota a relatívna vlhkosť vzduchu

Nedávno sme na KPSU SvF UNIZA rozbehli pilotný projekt, kde sa bude pozorovať a skúmať vplyv vegetačnej extenzívnej strechy na halovom objekte v Dubnici nad Váhom. Na vegetačnú strechu boli použité inovatívne dosky z recyklovaného materiálu so zeminou a odrezkami rastlín o celkovej ploche takmer 1600 m². V substráte je umiestnená kvapková závlaha. Taktiež sa inovatívne dosky použili aj pod solárnymi panelmi, kde je však vynechaná vegetácia skrz nevhodnej lokality na pestovanie vegetácie – zatienenie a nadmerné teplo v priestoroch pod solárnymi panelmi. V týchto miestach je však takisto vedená kvapková závlaha a tak bude zabezpečený výpar v pod panelovom priestore. V skladbe sú umiestnené snímače na meranie teploty a relatívnej vlhkosti. Priamo na streche je umiestnená aj meteostanica pre relevantné klimatické údaje priamo z miesta merania. Tento projekt podporí a prehĺbi naše poznatky v správaní sa vegetačnej strechy na takomto väčšom priestore.



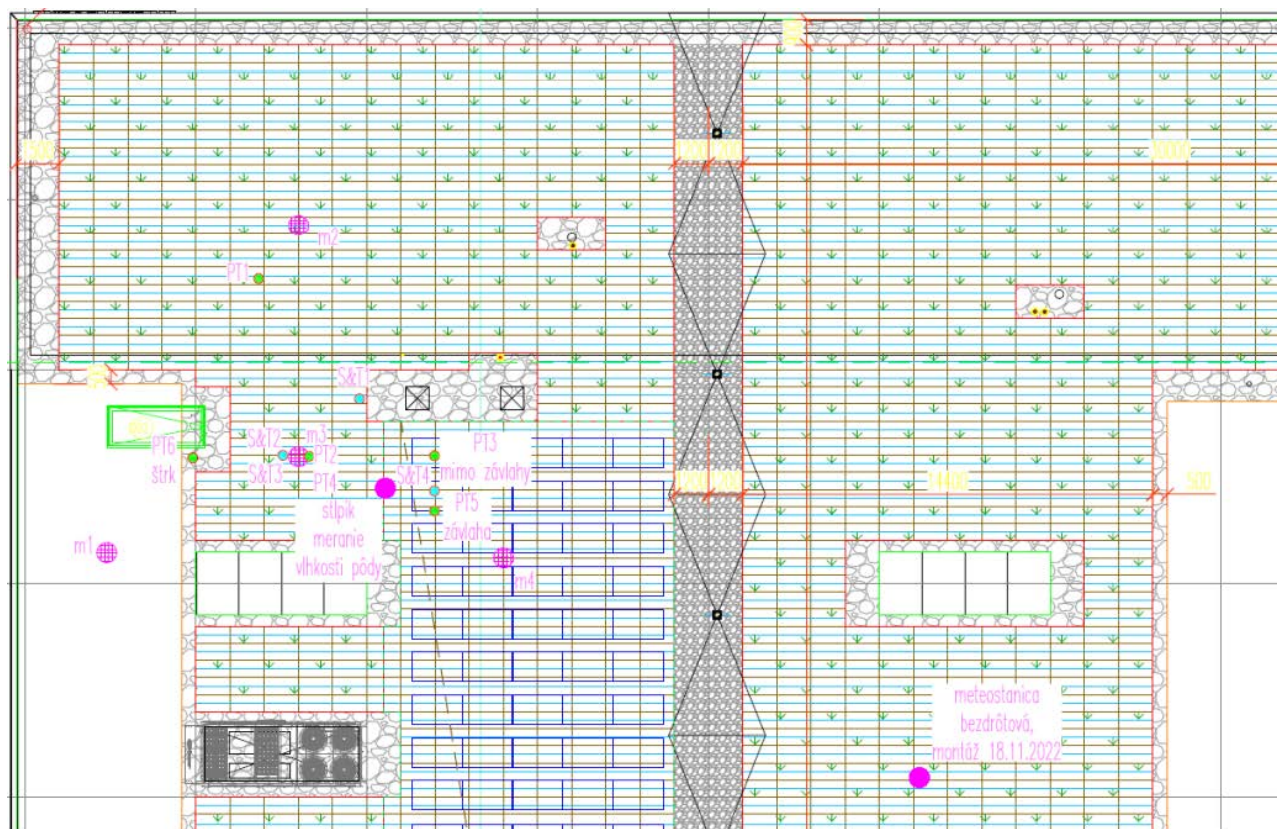
Obr. 167: Meteostanice – vľavo pevne stojaca, vpravo mobilná



Obr. 168: Pohľad na strechu s použitím inovatívnych dosiek s umiestnením kvapkovej závlahy (pred zásypom zeminou)



Obr. 169: Pohľad na strechu po zásype zeminou, umiestnenie meteostanice



Obr. 170: schematické rozkreslenie strechy vyznačenej časti s aplikáciou vegetácie

Použitá literatúra

- [1] CASCONI, S. 2019. Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11), 3020. DOI: 10.3390/su11113020
- [2] TUDIWER, D.; VERTAL', M.; KORJENIC, A.; ČAKYOVÁ, K. 2019. Abbildung der wärmedäm-menden Wirkung eines fassadengebundenen Begrünungssystems in einem Simulation-smodell. *Bauphysik*, 41(3), 155–161. DOI: <https://doi.org/10.1002/bapi.201900009>
- [3] KÖHLER, M. 2008. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosyst*, 11(4), 423–436. DOI: 10.1007/s11252-008-0063-x
- [4] ĎURICA, P.; JURÁŠ, P.; PONECHAL, R.; VERTAL', M. 2021. *Vybrané kapitoly zo stavebno-fyzi-kálneho konštruovania budov*. Žilina: EDIS-vydavateľské centrum Žilina.
- [5] PERINI, K.; OTTELÉ, M.; HAAS, E. M.; RAITERI, R. 2011. Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open. J Ecol*, 1(1), 1–8. DOI: 10.4236/oje.2011.11001
- [6] EL-ZOKLAH, M. H.; REFAAT, T. 2021. How to measure the green façades environmental effectiveness? A proposal to green façade systems technical guide,” *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(2), 154–169. DOI: 10.22712/susb.20210013
- [7] UFFELEN, C. 2016. *Green, Greener, Greenest*. Braun.
- [8] WONG, N. H. et al. 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build Environ*, 45(3), 663–672. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2009.08.005
- [9] PÉREZ, G.; COMA, J.; MARTORELL, I.; CABEZA, L. F. 2014. Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139–165. DOI: 10.1016/J.RSER.2014.07.055
- [10] JURAS, P. 2022. Introduction to the Green Roof Research. In: *XXX Russian-Polish-Slovak Se-minar Theoretical Foundation of Civil Engineering (RSP 2021)*, pp. 108–115.
- [11] DOSTALOVÁ, J. a kol. 2021. *Zelené strechy, souhra architektury s přírodou*. Praha: Grada Publishing.
- [12] ČERMÁKOVÁ, B.; MUŽÍKOVÁ, R. 2009. *Ozeleněné střechy*. Praha: Grada Publishing, a.s.
- [13] DE CUYPER, K.; DINNE, K.; VAN DE VEL, L. 2005. Rainwater discharge from green roofs. *Plumbing Systems and Design*, vol. Nov/Dec, 2005.

- [14] PAULL, N. J.; KRIX, D.; TORPY, F. R.; IRGA, P. J. 2020. Can green walls reduce outdoor ambient particulate matter, noise pollution and temperature? *Int J Environ Res Public Health*, 17(14), 5084. DOI: 10.3390/ijerph17145084
- [15] SANTAMOURIS, M. 2014. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. DOI: 10.1016/J.SOLENER.2012.07.003
- [16] ALSAAD, H.; HARTMANN, M.; HILBEL, R.; VOELKER, C. 2022. The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Build Environ*, 216, 109021. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109021
- [17] BAKHSHOODEH, R.; OCAMPO, C.; OLDHAM, C. 2022. Evapotranspiration rates and evapotranspirative cooling of green façades under different irrigation scenarios. *Energy Build*, 270, 112223. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2022.112223
- [18] BAKHSHOODEH, R.; OCAMPO, C.; OLDHAM, C. 2022. Exploring the evapotranspirative cooling effect of a green façade. *Sustain Cities Soc*, 81, 103822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103822>
- [19] BIOCLIO. BioClio [online]. Dostupné na: <https://bioclio.com/vypar/>
- [20] BAKHSHOODEH, R.; OCAMPO, C.; OLDHAM, C. 2022. Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111744. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.111744
- [21] PÉREZ, G.; COMA, J.; CHÀFER, M.; CABEZA, L. F. 2022. Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade. *Build Environ*, 207(B), 108497. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108497
- [22] HADBA, L.; SILVA L.; MENDONÇA, P. 2017. *Green Walls an Efficient Solution for Hygrothermal, Noise and Air Pollution Control in the Buildings*.
- [23] BEVILACQUA, P. 2021. The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111523>
- [24] BESIR, A. B.; CUCE, E. 2018. Green roofs and facades: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- [25] JURÁŠ, P. 2022. Vplyv extenzívnej vegetačnej strechy na tepelnoizolačné vlastnosti plochej strechy. *Tepelná ochrana budov 2021*, pp. 132–138.
- [26] Semiramidine visuté záhrady. 2018. *Wikimedia* [online]. Londýn: wikimedia. Dostupné na: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Babylon;_the_city_\(above\);_the_hanging_gardens_of_Babylon_Wellcome_L0047679.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Babylon;_the_city_(above);_the_hanging_gardens_of_Babylon_Wellcome_L0047679.jpg) [cit. 2023-03-06].
- [27] Možnosť aplikácie vegetácie do konštrukcií budov. 2015. *Wikimedia* [online]. English: wikimedia. Dostupné na: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Midtown_Manhattan_and_Times_Square_district_2015.jpg [cit. 2023-03-06].
- [28] Možnosť aplikácie vegetácie do konštrukcií budov. 2018. *Createdigital* [online]. Australia: createdigital. Dostupné na: <https://createdigital.org.au/china-city-home-trees-people/> [cit. 2023-03-06].
- [29] Rozmanitosť vegetačných konštrukcií. 2021. *Greenroofs* [online]. Switzerland: greenroofs. Dostupné na: <https://www.greenroofs.com/2021/04/05/green-roofs-towards-circular-and-resilient-cities/> [cit. 2023-03-06].
- [30] Vplyv zavlažovania na životaschopnosť prežitia vegetácie. 2020. *Zelenestrechy* [online]. Brno: zelenestrechy. Dostupné na: <https://www.zelenestrechy.info/odborne-clanky> [cit. 2023-03-06].
- [31] Fyzikálna podstata výparu. 2016. *Bioclio* [online]. Slovensko: bioclio. Dostupné na: <https://bioclio.com/vypar/> [cit. 2023-03-06].
- [32] Snímok z infračervenej kamery. 2020. *Homebydleni* [online]. Česko: homebydleni. Dostupné na: <https://homebydleni.cz/dum/stavebni-materialy/vegetacni-strechu-ocenite-nejen-v-lete/> [cit. 2023-03-06].

Kontakty

Ing. Marek Chabada: marek.chabada@uniza.sk

MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

Ing. Michal Bošanský, Ph.D.¹

¹ Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

Dřevo má své nenahraditelné vlastnosti, které ho zařazují mezi materiály se širokým uplatněním v praxi. Mezi tyto vlastnosti patří mimo jiné mechanické vlastnosti, zejména pružnost a pevnost. Stupeň homogenity uspořádání atomů a molekul v objemu dřeva a orientace zejména kovalentních a vodíkových vazeb určuje velikost a orientaci mechanických vlastností na úrovni mikrostruktury a makrostruktury. Různost mechanických vlastností v objemu dřeva a jejich závislost od směru nazýváme anizotropií mechanických vlastností.

Dřevěné konstrukční prvky jsou vhodné zejména pro přenos tahových, tlakových a ohybových namáhání. Dřevo se vzhledem k jeho vysokému poměru pevnosti k hmotnosti často používá jako konstrukční materiál pro střechy a pro lávky pro chodce a cyklisty. Modul pružnosti dřeva je v porovnání s modulem pružnosti oceli nebo betonu nízký. Na druhou stranu má dřevo při relativně malé hmotnosti dobrou pevnost a výhodný vzájemný poměr těchto vlastností činí ze dřeva, z konstrukčního hlediska, jeden z nejvhodnějších materiálů. Rovnoběžně s vlákny, tj. ve směru kmene, je pevnost materiálu zvláště vysoká, zatímco kolmo k vláknům jsou pevnostní vlastnosti nízké.

Napětí

Napětí ve dřevě představuje míru vnitřních sil, které se v tělese objevují jako odpověď na působení vnějších mechanických sil. Napětí (σ) definujeme jako velikost vnitřní síly, která je vztahována na jednotku plochy tělesa podle vztahu

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

Jestliže síly působí kolmo na průřezovou plochu tělesa, jedná se o normálové napětí (σ), například napětí v tahu nebo tlaku. Působí-li síly v rovině průřezu, vzniká tangenciální (smykové) napětí (τ), například napětí ve smyku. Kombinaci normálového a tangenciálního napětí představuje ohyb.

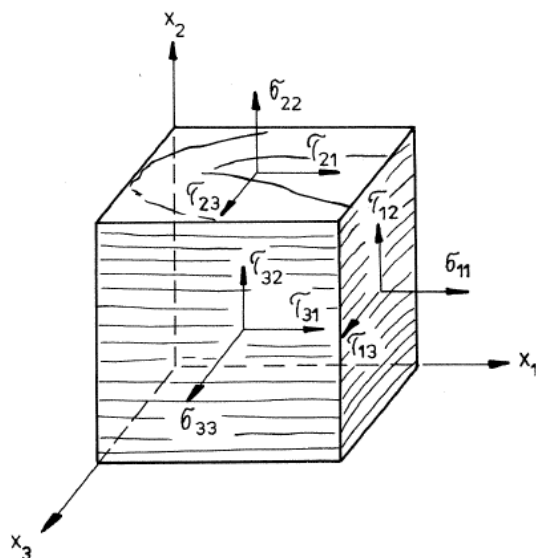
Každý systém napjatosti v libovolném bodě prostoru je možné zobrazit pravoúhlým elementem jakým může být například jednoduchá kostka, a to tak aby její hrany byly rovnoběžné se zvoleným souřadnicovým systémem – karteziánský souřadnice x , y , z .

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

Vektory napětí mohou být na každé ploše rozloženy do tří složek. Při označování napětí první index značí plochu, na kterou napětí účinkuje, a druhý index označuje směr složky napětí. Devět složek napětí je dostatečných na specifikování kompletního stavu napětí elementární kostky. Uvažujeme s podmínkou rovnováhy

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





Obr. 171: Složky napětí na kostce dřeva v pravoúhlém systému

Normálové napětí působící na opačných plochách jsou vždy stejné, na základě toho můžeme napsat rovnici

$$\sigma_{ii} = \sigma'_{ii}$$

Takto dostáváme devět složek napětí σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} , τ_{13} , τ_{21} , τ_{31} , τ_{23} , τ_{32} .

Složky σ_{11} , σ_{22} a σ_{33} představují normálové napětí. Ostatní složky působí na plochu tangenciálně a jsou označené jako smykové napětí. Stav napětí v bodě můžeme vyjádřit pomocí maticového zápisu:

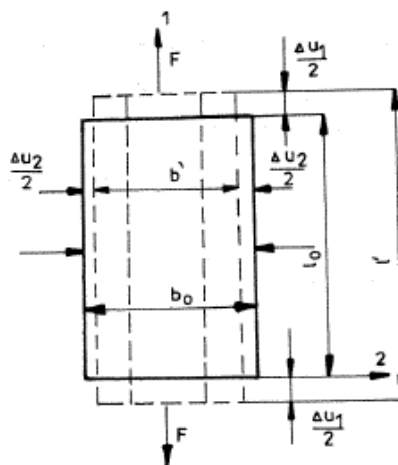
$$\sigma = \lim_{\Delta S_i \rightarrow 0} \begin{bmatrix} \frac{\Delta F_1}{\Delta S_1} & \frac{\Delta F_2}{\Delta S_1} & \frac{\Delta F_3}{\Delta S_1} \\ \frac{\Delta F_1}{\Delta S_2} & \frac{\Delta F_2}{\Delta S_2} & \frac{\Delta F_3}{\Delta S_2} \\ \frac{\Delta F_1}{\Delta S_3} & \frac{\Delta F_2}{\Delta S_3} & \frac{\Delta F_3}{\Delta S_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Deformace

Působením mechanických sil dochází ke změně tvarů a rozměrů dřeva, což nazýváme deformací. Kromě jednoduchého prodloužení nebo zkrácení se pravoúhlý průřez dřeva může zkroutit do kosodélníkového tvaru. Prodloužení a zkrácení rozměrů jsou charakteristická pro normálová napětí a nazýváme je normálovými deformacemi ϵ . Kroucení tělesa vzniká při tangenciálních napětí a nazýváme jej smykovou (tangenciální) deformací γ .

Deformace můžeme rozdělit na pružné deformace, deformace pružné v čase a na plastické deformace. Pružná deformace je návratná změna dřeva po odstranění působení vnějších sil. Když je dřevo namáhané napětím, které vyvolává jen pružné deformace, nachází se ve stavu napjatosti v pružné oblasti. Pružná deformace v čas je návratná změna tvarů dřeva po uvolnění vnějších sil, které nenastává okamžitě, ale za určitý čas. Trvalá deformace je nenávratná změna tvaru dřeva, která po odstranění působení vnějších mechanických sil zůstává (nemizí) a těleso dostává nový tvar a rozměry.

Působícímu napětí těleso odporuje příslušnou změnou svého tvaru, tedy se deformuje. Mezi působícím napětím a vnitřním odporem materiálu proti deformaci vzniká rovnováha.



Obr. 172: Změna tvaru tělesa při tahu

Vlivem působení vnější síly se prodlouží a šířka tělesa se zúží o absolutní deformace a deformace Δu_1 a Δu_2 .

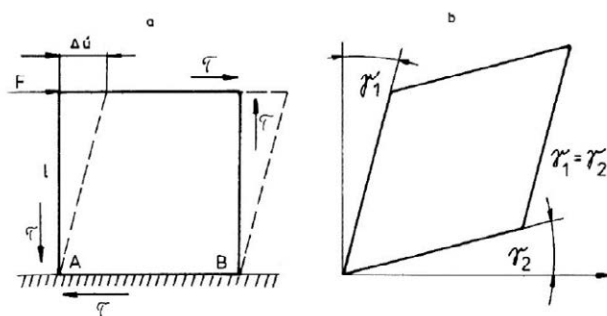
Poměrná pružná deformace ve směru působící síly se vypočítá

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta u_1}{l_0}$$

a poměrné příčné zkrácení

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta u_2}{b_0}$$

V tělese také mimo deformace vzniklé normálovým napětím, vznikají deformace smykové γ . Smyková deformace vzniká posunutím dvou sousedních přířezů, ve kterých působí napětí. Při tangenciálním napětí se mění pravoúhlost hran, což je zásadní rozdíl mezi deformací vzniklou normálovým a tangenciálním napětím.



Obr. 173: Deformace tělesa navozené smykovým napětím

Pravý úhel základny tělesa se změní o hodnotu

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$$

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

Při tangenciálním napětí se mění pravoúhlost stran. V tom je hlavní rozdíl mezi deformacemi smykovými a deformacemi normálovými.

Prostorová deformacemi označujeme deformace v rámci prostoru pravoúhlého souřadného systému. Poměrná deformace ε_{11} ve směru osy x se potom definuje jako limita podílu

$$\varepsilon_{11} = \lim_{\Delta x_1 \rightarrow 0} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1}$$

Když budeme počítat s ortogonálním systémem, můžeme všeobecně vyjádřit všechny tři směry ve tvaru

$$\varepsilon_{ij} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i}$$

Poměrnou smykovou deformaci ve všeobecném tvaru definujeme jako

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

Stav deformace v bodě můžeme vyjádřit pomocí maticového zápisu

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} + \frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} \right) & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} + \frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} \right) & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Pružnost

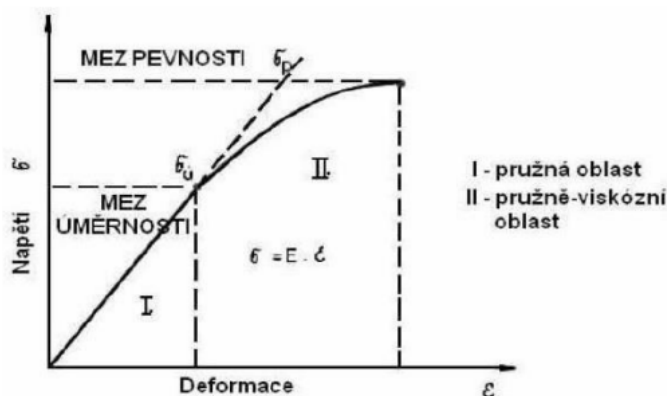
Pružnost dřeva se všeobecně definuje jako schopnost dosáhnout původní tvar (rozměry) po uvolnění vnějších sil. Vycházejíc z digramu napětí-deformace můžeme pružnost kvantifikovat těmito charakteristikami:

- Modul pružnosti (E),
- Poissonovy čísla (μ),
- mezí úměrnosti (σ_u),
- energií pružné deformace.

Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace. Rozlišujeme moduly pružnosti E při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a moduly G při tangenciálním namáhání (krut, smyk).

Diagram napětí-deformace můžeme rozdělit na dvě části, a to na lineární část po mezí úměrnosti σ_u a nelineární část nad mezí úměrnosti po mezí pevnosti σ_p . Mez úměrnosti je definována jako takové napětí, do kterého v tělese vznikají pouze deformace pružné, případně pružné v čase, a napětí je v tělese rovnoměrně rozděleno. Po ukončení silového působení tyto deformace zcela zanikají a těleso se vrací do původního stavu.



Obr. 174: Diagram napětí-deformace

Z průběhů diagramu napětí-deformace vyplývá, že po mez úměrnosti jsou vztahy lineární a příslušná rovnice přímky má tvar $y = k \times x$. Pokud tento vztah převedeme na souřadnice deformace a napětí, tak rovnice přímky má tvar Hookova zákona a směrnice přímky svůj fyzikální význam. Je to vlastně modul pružnosti materiálu, v našem případě modul pružnosti dřeva E . Všeobecně můžeme napsat:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Poissonovo číslo

Poissonova čísla jsou důležitými charakteristikami pružnosti dřeva a využívají se především při objemových změnách dřeva způsobených vlivem mechanického zatížení. Pokud hranol dřeva namáháme tlakem nebo tahem, vznikají v něm kromě deformací ve směru působení síly (zkrácení a prodloužení), také deformace kolmé na směr síly. Nazýváme je příčnými deformacemi (neměli by se zaměňovat s deformacemi kolmo na vlákna. Poissonovo číslo vyjadřuje poměr příčné deformace k podélné deformaci.

Poměr obou deformací je Poissonovo číslo

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Mez úměrnosti

Pokud napětí dřeva překročí mez úměrnosti, lineární úsek diagramu se odklání a pozvolně přechází do nelineárního průběhu (viz obr. 173). Napětí, které odpovídá bodu odklonu od lineární části, nazýváme mezí úměrnosti σ_v . Tuto hranici možno definovat jako nejvyšší napětí ve dřevě, při kterém ještě nevznikají plastické deformace a deformace pružné v čase.

Hookeův zákon

Na základě zákonitosti, že při jednoosém namáhání se dřevo chová po mez úměrnosti jako lineárně pružný materiál, předpokládáme, že je mezi ostatními složkami napětí a deformací lineární vztah a mají tvar Hookeova zákona.

Obecný ortotropní materiál

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

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

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

Obdobně úpravou Hookeova zákona v inverzním tvaru pro obecný anizotropní materiál obdržíme Hookeův zákon obecného ortotropního materiálu.

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

Rovněž matice poddajnosti obecného ortotropního materiálu obsahuje 9 nezávislých materiálových konstant.

Jednotlivé prvky matice poddajnosti S_{ij} je možné rovněž stanovit pomocí fyzikálních charakteristik, které mají jasný fyzikální či geometrický význam. Do této skupiny patří modul pružnosti E , modul pružnosti ve smyku G a Poissonovo číslo μ . V případě ortotropního materiálu mají tyto veličiny navíc směrové indexy v souladu s hlavním ortotropním souřadnicovým systémem 1, 2 a 3. Fyzikální charakteristiky jsou pochopitelně v různých ortotropních směrech různé.

Pro poměrné přetvoření a zkosení v hlavních ortotropních směrech dostáváme

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{21} * \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{31} * \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \varepsilon_2 &= -\mu_{21} * \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{32} * \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \varepsilon_3 &= -\mu_{13} * \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{23} * \frac{\sigma_2}{E_2} + \frac{\sigma_3}{E_3} \\ \gamma_{23} &= \frac{\tau_{23}}{G_{23}}; \gamma_{31} = \frac{\tau_{31}}{G_{31}}; \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \end{aligned}$$

Předchozí složkové rovnice napíšeme v maticovém tvaru

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

A následně symbolicky

$$\begin{aligned} [\sigma] &= [C] * [\varepsilon] \\ [\varepsilon] &= [S] * [\sigma] \end{aligned}$$

Matice obsahuje celkem 12 technických materiálových parametrů. Z podmínek symetrie pro matici materiálové poddajnosti $[S]$ vyplývá velice důležitá vazba mezi technickými materiálovými parametry zapsané obecně

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

Porovnáním matic můžeme vyjádřit jednotlivé prvky matice poddajnosti pomocí technických materiálových charakteristik.

Rovinný ortotropní materiál

Zvláštním případem prostorového ortotropního materiálu je rovinný ortotropní materiál, který se používá jako výpočtový model tenké vrstvy kompozitu-laminy. Předpokládáme, že element leží v hlavní souřadnicové rovině 1, 2 a v ní je také zatěžován. Jde tedy o rovinnou napjatost a následující napětí jsou nulová

$$\sigma_3 = \tau_{31} = \tau_{32} = 0$$

V tomto případě se maticová relace platící pro obecný prostorový ortotropní materiál zredukuje následovně

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

Matice tuhosti [C] rovinného ortotropního materiálu tedy obsahuje čtyři nezávislé materiálové konstanty. Inverzní tvar Hookeova zákona vypadá následovně

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

Rovněž matice poddajnosti má ve sledovaném případě 4 nezávislé prvky.

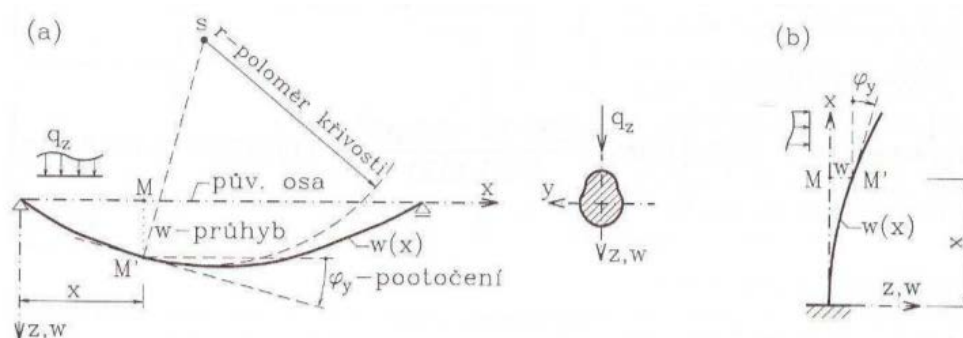
Pokud použijeme inženýrských materiálových konstant, potom má inverzní Hookeův zákon pro rovinný případ následující tvar

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

opět se čtyřmi nezávislými inženýrskými materiálovými konstantami.

Diferenciální rovnice ohybové čáry

Je-li nosník (prut) dostatečně štíhlý, je jeho deformační stav určen tvarem ohybové čáry, tj. křivky, v níž přejde původně přímá osa nosníku vlivem zatížení. Omezíme se na rovinný případ, kdy zatížení i podepření je symetrické ke svislé rovině xz, přičemž osa z je hlavní osou setrvačnosti průřezu. Na obr. 175 je vyznačena ohybová čára $w(x)$, jejíž jednotlivé pořadnice označujeme jako průhyb nosníku v daném místě; kladný je průhyb, směřuje-li dolů.



Obr. 175: Ohybová čára nosníku (Šmirák, 2000)

Pootočení $\varphi = \varphi_y$, tj. úhel, který svírá tečna k ohybové čáře s osu x , budeme pokládat za kladné po směru chodu hodinových ručiček. V teorii malých deformací je $\varphi \ll 1$, takže platí

$$\varphi \approx \tan \varphi = \frac{dw}{dx}$$

Z matematiky je znám výraz pro křivost rovinné čáry

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2w}{dx^2}$$

Zanedbáme-li vliv smyku na tvar ohybové čáry, tedy přisoudíme-li deformační účinky jen ohybovým momentům, pak vyjde po úpravě následující vztah

$$M = EI \frac{d^2w}{dx^2}$$

$$M = D * \kappa$$

což je diferenciální rovnice ohybové čáry 2. řádu. Druhá derivace ohybové čáry je tedy přímo úměrná ohybovému momentu M v daném místě a nepřímo úměrná ohybové tuhosti EI (E – modul pružnosti, I – moment setrvačnosti)

Je-li ohybová tuhost nosníku konstantní ($EI = \text{konst.}$), pak dvojnásobným derivováním a využitím Schwedlerových vět obdržíme

$$q = EI \frac{d^4w}{dx^4}$$

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

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

Tab. 23: Přehled diferenciálních závislostí (čárkami nad w je označena derivace průhybu

Ohyb desky

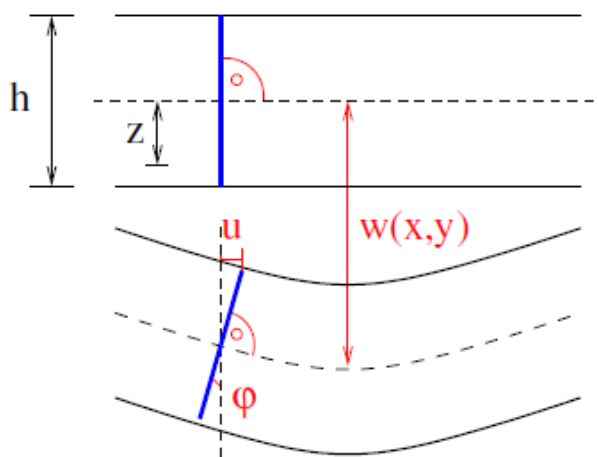
V technické praxi se často vyskytují plošné konstrukce, které jsou převážně zatěžovány ohybovými účinky (podobně jako ohýbané nosníky). Jsou jimi například stropní desky a panely nebo mostovky. Jako desky počítáme plošné konstrukce, které jsou zatíženy a podepřeny výhradně kolmo ke svojí střednicové rovině.

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

Kirchhoffova teorie ohybu tenkých desek

Předpoklady Kirchhoffovy teorie je možné shrnout do několika bodů:

- Jednotlivé vrstvy desky na sebe netlačí,
- Normálová napětí ve střednicové vrstvě jsou nulová,
- Body ve střednicové rovině se mohou přemísťovat pouze ve směru osy z ,
- Normály střednicové roviny zůstávají i po deformaci přímé a kolmé k této rovině.



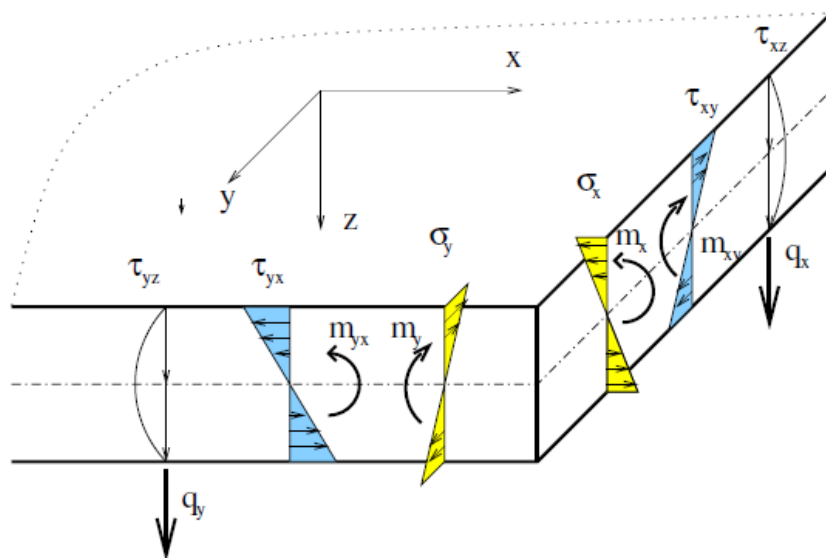
Obr. 176: Deska-předpoklad o normálách

Předpoklad o kolmosti normál je ilustrován na obr. 176. Tento předpoklad stejně jako u ohýbaných nosníků způsobuje lineární změnu normálových poměrných deformací ε a normálových napětí σ po tloušťce desky. Tedy prodloužení u (ve druhém směru pak v) lineárně roste se zvětšující se vzdáleností z od střednicové roviny.

Neznámé veličiny na desce

Jak vyplývá z předpokladů Kirchhoffovy teorie, body ve střednicové rovině se mohou pohybovat jen ve svislém směru w (tedy směru kolmém k nezdeformované střednicové ploše). Obdobně jako na nosnících můžeme pracovat s pootočeními φ zdeformované střednicové plochy:

$$\varphi_x = \frac{dw}{dx}$$
$$\varphi_y = \frac{dw}{dy}$$



Obr. 177: Napětí a vnitřní síly na desce (Brožovský, 2012)

Ve střednicové ploše desky je nenulové pouze posunutí w ve směru osy z systému souřadnic. Jak je ovšem vidět na obr. 177, mimo střednicovou plochu jsou zbývající dvě (vodorovná) posunutí u a v obecně nenulová. Budeme-li předpokládat, že přibližně platí $\tan(\varphi) = \varphi$, pak můžeme v souladu s obr. 177 psát:

$$u = -z\kappa_x = -z \frac{dw}{dx}$$

$$v = -z\kappa_y = -z \frac{dw}{dy}$$

K získání výrazu pro poměrné deformace využijeme geometricko-deformačních vztahů teorie pružnosti a dosadíme do nich za u a v výrazy podle rovnice:

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

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} = -z \frac{d^2w}{dy^2}$$

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

které můžeme zjednodušit do tvaru

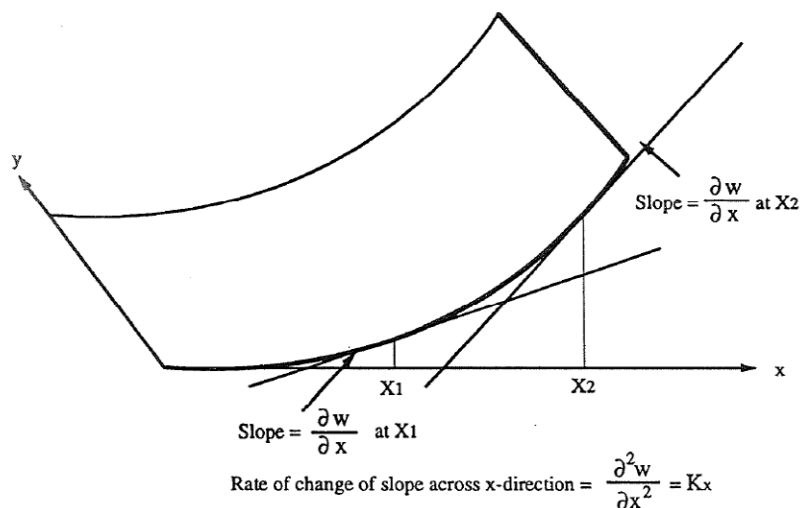
$$\varepsilon = Z * \kappa$$

kde

$$\kappa_x = \frac{d^2w}{dx^2}$$

$$\kappa_y = \frac{d^2w}{dy^2}$$

$$\kappa_{xy} = 2 \frac{d^2w}{dx * dy}$$



Obr. 178: Zakřivení desky po ose x

Díky tomuto můžeme napsat vztah pro celkovou deformaci

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \kappa.$$

Stále budeme uvažovat materiál pro který platí Hookeův zákon. Můžeme tedy vyjít ze základních vztahů platných pro pružné těleso a do nich dosadit výraz pro celkovou deformaci

$$\delta = C\varepsilon_0 + C\kappa.$$

Okrajové podmínky

Jestliže vnější zatížení konstrukce není v rovnováze, způsobí její pohyb, kterému bráníme podepřením, respektive uložením konstrukce. Pohyb hmotného objektu může být posuvný (translační) nebo otáčivý (rotační) a počet možností pohybu udávají tzv. stupně volnosti. Tuhé těleso má v prostoru 6 stupňů volnosti, tj. má možnost celkem šesti pohybů: tři pohybů translačních ve směru souřadnicových os x, y a z a tři pohybů rotačních kolem těchto os. Volnost pohybu hmotného objektu omezují nebo znemožňují tzv. vazby, tzn. že ruší nebo odebírají stupně volnosti objektu.

Vazeb může být obecně v prostoru větší počet, pro potřeby této podkladu budou stačit následující:

- Volná deska

- umožňuje veškeré průhyby po ose x i y

$$\iint w \, dx \, dy = 0.$$

- Podepřená deska (podepřený okraj desky)

- znemožňuje průhyb

$$w = 0.$$

- může se otáčet, nemůže se ovšem kroutit

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{d^2 w}{dy^2} = 0.$$

- Vetknutá deska

- vetknutí znemožňuje průhyb $w = 0$

$$w = 0.$$

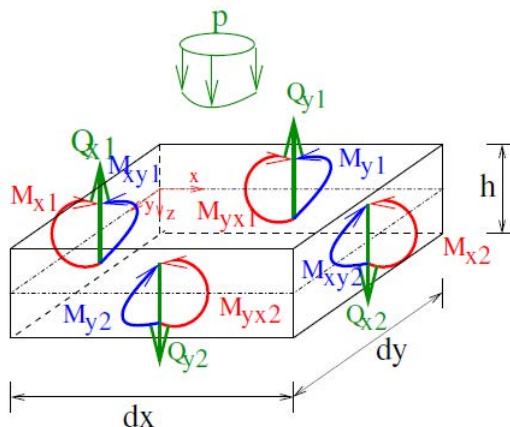
- nemůže se otáčet $dw/dx = dw/dy = 0$

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dw}{dy} = 0.$$

Desková rovnice

Deskovou rovnici je možné získat z podmínek rovnováhy na diferenciálním elementu desky, přičemž musíme mít stále na paměti, že dále uvedený výsledek bude platný jen pro desku z izotropního a lineárně pružného materiálu.

$$\begin{aligned} x: \frac{dM_x}{dx} + \frac{dM_{xy}}{dy} &= V_{xy} \\ y: \frac{dM_{xy}}{dx} + \frac{dM_y}{dy} &= V_{yz} \end{aligned}$$



Obr. 179: Vnitřní síly na elementu desky

Díky znalosti podoby vztahu pro distribuci spojitého zatížení můžeme napsat vztah

$$\frac{dV_{xz}}{dx} + \frac{dV_{yz}}{dy} = q.$$

Díky znalosti podoby diferenciální rovnici 4. řádu derivace průhybu můžeme napsat konečnou podobu deskové rovnice

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{q}{D}.$$

Pokud bychom chtěli tuto deskovou rovnici rozepsat pro obecně ortotropní materiál, museli bychom využít koeficienty ohybové tuhosti. Výsledná rovnice desky by vypadala následovně:

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

Laminární teorie

Použitím klasické laminační teorie lze odvodit tuhost výsledného kompozitního laminátu z jeho jednotlivých vrstev. Klasická laminační teorie je založena na Love-Kirchhoffově teorii “tenké skořápky” (rovné přímky, kolmé ke středové vrstvě zůstávají po deformaci rovnými, jsou stále ke středové vrstvě kolmé; tloušťka desky se při deformaci nemění).

Předpoklady klasické laminátové teorie jsou:

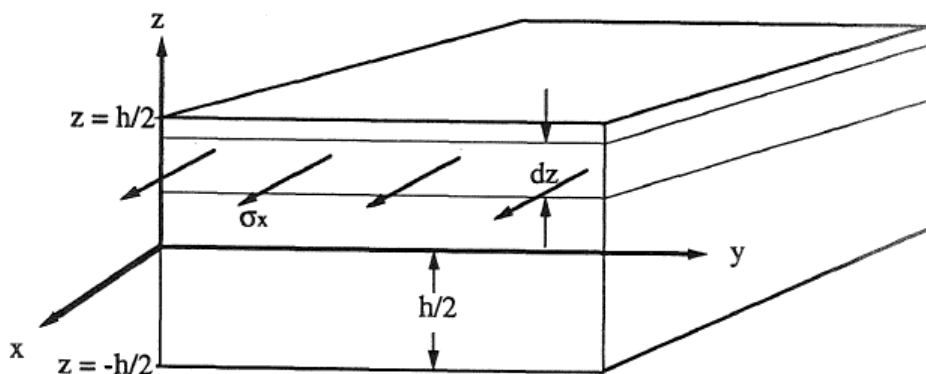
- Deska je složena z libovolného počtu vrstev ortotropních plátů slepených dohromady (ortotropní osy vrstev nemusí souhlasit s osami x, y desky)
- Deska je tenká-tloušťka h je mnohem menší než ostatní rozměry
- Posunutí u, v, w jsou malá ve vztahu k tloušťce desky

- Vlastnosti desky jsou definovány referenční rovinou, KLT je tedy použitelná především na symetrické lamináty
- Napětí v ploše σ_x , σ_y a σ_{xy} , jsou malá vzhledem k celku
- Příčná smyková napětí σ_{xx} a σ_{yz} jsou zanedbatelná
- Tangenciální posunutí u a v jsou lineárními funkcemi osy z
- Příčné normálové napětí σ_z je zanedbatelné
- Pro každou vrstvu platí Hookeův zákon
- Deska má konstantní tloušťku

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

Definice napětí a momentu

Protože napětí v každé vrstvě se mění v závislosti na tloušťce laminátu, bude pohodlné definovat napětí pomocí ekvivalentních sil působících na střední plochu. Na obr. 180 je vidět, že napětí působící na hranu lze rozdělit na přírůstky a sečíst. Výsledný integrál je definován jako výslednice napětí a je značena jako N_i , kde dolní index označuje směr.



Obr. 180: Definice výslednice napětí (Nettles, 1994)

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

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

$$N_x \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz$$

Dle obr. 180 lze také zapsat rovnici 2.1.71 ve směru y . Výslednice můžeme zapsat následovně:

$$\begin{aligned} N_x \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \\ N_y \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\ N_{xy} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \end{aligned}$$

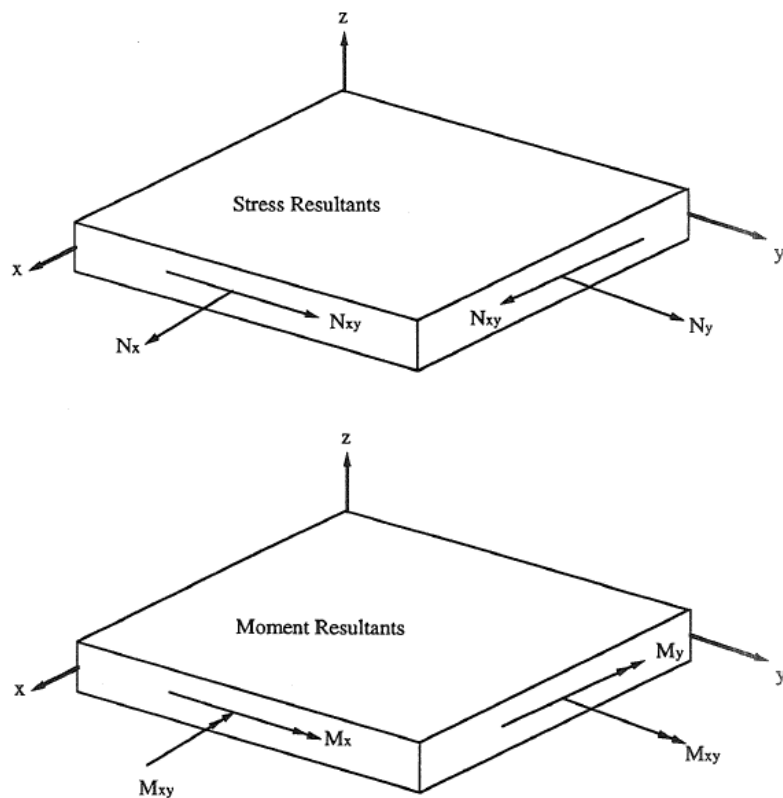
Jak je patrné z obr. 180, napětí působící na hranu vytváří moment kolem střední roviny. Momentové rameno je ve vzdálenosti z od střednicové plochy. Stejným postupem jako u výslednic napětí lze definovat momentové výslednice, která budou následující:

$$M_x \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz$$

$$M_y \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz$$

$$M_{xy} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz$$

Směry všech výslednic napětí a momentů jsou znázorněny na obr. 181. Šipka se dvěma hlavami označuje točivý moment. Za povšimnutí stojí skutečnost, že momenty M_x a M_y způsobí, že se deska ohne a moment M_{xy} způsobí, že se deska zkroutí.



Obr. 181: Výslednice napětí a momentů

Konstitutivní rovnice pro laminát

Pokud rovnice převedeme do maticového tvaru získáme následující matici:

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

a pokud rovnice převedeme do maticového tvaru získáme následující matici:

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

Integrály v rovnicích musí být provedeny přes každou vrstvu a poté sečteny, protože na rozhraních vrstev může dojít k diskontinuitě napětí. Při použití obr. 182 se rovnice zapíší následovně:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz$$

V tuto chvíli je možné rovnici dosadit do rovnice, do které následně vložíme rovnice

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

a

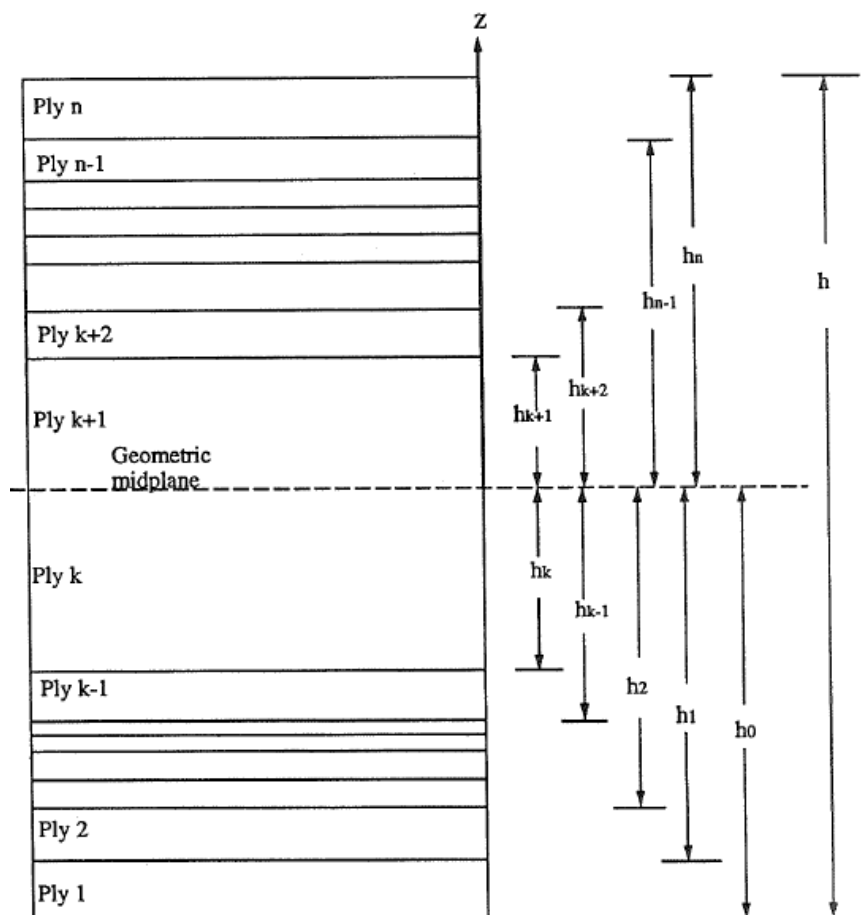
$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz \right. \\ \left. + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right\}$$

Provedením jednoduché integrace získáme následující tvary:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} (h_k - h_{k-1}) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right\}$$

a

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \frac{1}{3} (h_k^3 - h_{k-1}^3) \right\}$$



Obr. 182: Průřez laminátu

Kontakty

Ing. Michal Bošanský, Ph.D.: michal.bosansky@mendelu.cz

Název: Dřevo ve stavebnictví materiál minulosti i budoucnosti

Autor: Richard Slávik (ed.)

Vydavatel: Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno

Vydání: první, 2023

Počet stran: 160

ISBN 978-80-7509-925-9

<https://doi.org/10.11118/978-80-7509-925-9>