

FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

# Fakulta stavební

---

## Stavební hmoty II

Filip Khestl, Pavel Mec



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

2013

# OBSAH

Obsah.....	1
1 Úvod.....	1
2 Dřevo.....	2
2.1 Definice dřeva .....	3
2.2 Rozdělení základních dřevin .....	3
2.3 Struktura dřeva.....	4
2.3.1 Molekulární struktura .....	5
2.3.2 Anatomická struktura (Submikroskopická stavba dřeva) .....	6
2.3.3 Geometrická struktura (Makroskopická stavba dřeva).....	9
2.4 Zkoušení dřeva.....	17
2.5 Fyzikální vlastnosti dřeva .....	18
2.5.1 Voda ve dřevě a vlhkost dřeva.....	18
2.5.2 Hygroskopicitá a rovnovážná vlhkost.....	20
2.5.3 Nasákavost dřeva vodou .....	20
2.5.4 Důsledky změn vlhkosti dřeva.....	20
2.5.5 Hustota dřeva (dle ČSN 49 0108).....	22
2.5.6 Trvanlivost dřeva.....	24
2.5.7 Přirozená odolnost a trvanlivost dřeva .....	26
2.6 Mechanické vlastnosti dřeva .....	27
2.6.1 Modul pružnosti.....	29
2.6.2 Pevnost dřeva.....	29
2.6.3 Statická pevnost.....	31
2.6.4 Dynamická pevnost.....	31
2.6.5 Tvrdost dřeva .....	32
2.6.6 Štípatelnost dřeva .....	33
2.6.7 Ohýbatelnost dřeva.....	33
2.7 Dřevařské výrobky.....	33
2.7.1 Lesní spotřební sortimenty.....	33
2.7.2 Pilařské výrobky.....	33
2.8 Materiály na bázi dřeva .....	35
2.8.1 Základní rozdělení materiálů na bázi dřeva .....	35

2.8.2	Celulózové materiály.....	39
2.9	Způsoby zpracování dřeva .....	40
3	Polymery .....	42
3.1	Úvod .....	42
3.2	Rozdělení polymerů.....	44
3.2.1	Přírodní polymery.....	44
3.2.2	Umělé (syntetické) polymery.....	45
3.2.3	Členění polymerů podle chemického složení.....	46
3.2.4	Struktura polymerů.....	47
3.2.5	Rozdělení podle chemické konstituce a struktury makromolekul, nadmolekulární struktury a napěťově deformačního chování .....	49
3.2.6	Nadmolekulární struktura – stupeň uspořádanosti makromolekul polymerů (morfologie).....	49
3.2.7	Fázové stavy polymerních materiálů.....	50
3.2.8	Dělení plastů podle druhu a použití přísady .....	51
3.3	Výroba polymerů .....	52
3.4	Zpracování plastů .....	54
3.4.1	Rozdělení plastů podle aplikace .....	57
3.5	Vlastnosti polymerů .....	57
3.5.1	Zkoušky pevnosti .....	58
3.5.2	Chování polymerů za zvýšené teploty a působení vnější síly .....	59
3.5.3	Zkoušky tvrdosti .....	62
3.5.4	Rázová a vrubová houževnatost.....	62
3.5.5	Cyklické zkoušky.....	63
3.5.6	Další zkoušky polymerů .....	63
3.5.7	Běžné vlastnosti polymerů .....	63
3.5.8	Výhody a nevýhody polymerů pro konkrétní použití.....	65
3.6	Základní typy polymerů .....	66
3.6.1	Polyetylen .....	66
3.6.2	Polypropylen .....	66
3.6.3	Polyizobutylem.....	66
3.6.4	PVC .....	66
3.6.5	Polystyren .....	66

3.6.6	Fenolformaldehydy .....	66
3.6.7	Polyuretany .....	67
3.6.8	Akrylové polymery .....	67
3.6.9	Silikony .....	67
3.6.10	Polyestery .....	67
3.6.11	Furanové pryskyřice .....	67
3.6.12	Epoxidové pryskyřice .....	67
3.6.13	Polymerní disperze .....	67
4	Alkalicky aktivované materiály, Geopolymery .....	69
4.1	Úvod .....	69
4.2	Alkalicky aktivované hmoty a geopolymerní hmoty .....	70
4.2.1	Materiály pro výrobu .....	70
4.2.2	Alkalická aktivace materiálů .....	73
4.2.3	Alkalická aktivace – hydratační reakce .....	74
4.2.4	Struktura geopolimerů .....	75
4.2.5	Vlastnosti alkalicky-aktivovaných hmot .....	77
5	Nanotechnologie ve stavebnictví .....	79
5.1	Úvod .....	80
5.1.1	Nanosvět .....	80
5.1.2	Historie nanotechnologií .....	82
5.1.3	Metody výroby nanostruktur .....	83
6	Keramické materiály .....	85
6.1	Definice keramiky .....	86
6.2	Dělení keramiky .....	87
6.2.1	Dle technologie výroby .....	87
6.2.2	Dle použití výrobků .....	87
6.2.3	Dle vlastností keramického střepu .....	87
6.2.4	Dle obsahu pórů .....	87
6.2.5	Dle způsobu zpracování .....	88
6.2.6	Dle chemického a fázového složení .....	88
6.3	Tradiční, stavební keramika .....	89
6.3.1	Suroviny pro výrobu keramiky .....	89
6.3.2	Neplastické suroviny .....	90

6.3.3	Suroviny používané k úpravě povrchu keramického střepu .....	91
6.4	Výroba (cihlářské) keramiky .....	92
6.4.1	Těžba keramických surovin .....	92
6.4.2	Předpříprava keramických surovin.....	93
6.4.3	Zpracování keramických surovin.....	93
6.4.4	Vytváření.....	94
6.4.5	Lisování .....	95
6.4.6	Vytváření z tvárného plastického těsta .....	96
6.4.7	Lití suspenze (břečky) do forem.....	97
6.4.8	Sušení.....	97
6.4.9	Výpal.....	98
6.4.10	Kontrola, skladování a expedice výrobků .....	101
6.5	Zkoušení a základní vlastnosti keramiky .....	101
6.5.1	Základní vlastnosti stavební keramiky .....	102
6.6	Výhody a nevýhody keramiky pro konkrétní použití.....	104
6.6.1	Prvky pro vertikální (svislé) konstrukce .....	104
6.6.2	Prvky pro horizontální konstrukce .....	107
6.6.3	Ostatní keramické výrobky.....	109
6.7	Technická keramika.....	112
6.7.1	Technickou keramiku můžeme rozdělit na:.....	113
7	Alternativní suroviny ve stavebnictví.....	115
7.1	Úvod .....	116
7.2	Recyklace odpadů .....	116
7.3	Druhotné suroviny ve stavebnictví.....	116
7.4	Vybrané druhotné suroviny.....	119
7.4.1	„Odpadní“ sádrovce .....	119
7.4.2	Energosádrovec.....	119
7.4.3	Chemosádrovce.....	120
7.4.4	Syntetický anhydrit.....	120
7.4.5	Struska.....	120
7.4.6	Vysokopecní granulovaná struska .....	121
7.4.7	Popílky .....	121
7.4.8	Křemičité úlety .....	123

7.5	Přírodní materiály ve stavebnictví.....	124
7.5.1	Obecné vlastnosti stavebních hmot na bázi rychleobnovitelných surovin 124	
7.5.2	Základní tradiční přírodní materiály v ČR.....	125
7.6	Rozdělení stavebních materiálů na rostlinné bázi .....	129
7.6.1	Izolační materiály .....	129
7.6.2	Střešní krytina .....	132
7.6.3	Pomocné materiály .....	133
7.6.4	Výplňové (izolační) materiály z pazdeří .....	133
7.6.5	Hliněné materiály .....	134
7.6.6	Konopné pazdeří jako plnivo vhodné pro pojení asfaltem.....	134
7.6.7	Konstrukční materiály .....	135

## 1 ÚVOD

Učební texty jsou určeny jako studijní opora k předmětu Stavební hmoty II. v 1. ročníku studijního programu Stavební inženýrství na FAST VŠB-TU Ostrava. Tato studijní opora přímo doplňuje opory Stavební hmoty I.

Cílem předmětu je seznámit studenty s vlastnostmi, použitím, výrobou a sortimentem základních stavebních materiálů a výrobků. Předmět poskytuje základní informace o strukturách a fyzikálních a mechanických vlastnostech stavebních hmot a o metodách zjišťování těchto vlastností. Dále je zaměřen na konkrétní stavební hmoty, zejména na problematiku keramických hmot, dřeva, polymerů a geopolymérů či alternativních surovin.

## 2 DŘEVO



### CÍLE KAPITOLY

Cílem této kapitoly je komplexní seznámení se dřevem jako tradičním stavebním materiálem. Pro pochopení vlastností dřeva a správného použití v praxi budou muset posluchači zvládnout a pochopit dřevo nejen z hlediska vlastností makroskopických, ale také z hlediska mikroskopie.



### RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

V této kapitole se posluchači dozví o dřevě jako stavebním materiálu od definice a základního rozdělení, výroby až po využití a zkoušení základních charakteristik.



### ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

Na prostudování kapitoly „Dřevo“ je potřeba 48 hodin.



### KLÍČOVÁ SLOVA

Dřevo, řezivo, makrostruktura, mikrostruktura, celulóza, hemiceluloza, lignin, dýhy, mez nasycení buněčných stěn.



## 2.1 Definice dřeva

Dřevo je přírodní materiál, který z hlediska využití ve stavebnictví patří k jednomu z nejstarších a nejvíce využívaných stavebních materiálů. Dřevo je vnitřní zdřevnatělá část kmene, ale také větvi a kořenů, která tvoří až 90% objemu stromu. Lze jej také charakterizovat jako biopolymer přírodního původu, který se získává ze stromů.

Základní výhody dřeva	Základní nevýhody dřeva
<ul style="list-style-type: none"> <li>- velmi dobrá pevnost,</li> <li>- malá objemová hmotnost,</li> <li>- snadná opracovatelnost,</li> <li>- dobré izolační vlastnosti (malá tepelná vodivost),</li> <li>- ekologické hledisko – přirozeně obnovitelná surovina,</li> <li>- estetické a pocitové hledisko (barva, vzhled, vůně).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- podléhá živočišným, biologickým škůdcům a atmosférickým vlivům,</li> <li>- je hořlavé,</li> <li>- mění svůj tvar s vlhkostí (podobně i jiné vlastnosti – např. tepelná vodivost),</li> <li>- má značné nároky na údržbu a ošetřování.</li> </ul>

## 2.2 Rozdělení základních dřevin

Dřeviny lze rozdělit podle různých hledisek, přičemž botanicky se dělí na jehličnaté a listnaté, obě tyto skupiny pak lze dělit na dřeviny měkké a tvrdé, mezi nimiž však není přesná hranice. Dále je lze dělit např. podle původu na tuzemské, domestikované a dovážené.

**Jehličnaté stromy** - dřeva obecně lehká, měkká a lehce opracovatelná. Jehličnaté stromy jsou, s výjimkou modřínu, stálezelené a neopadavé. Jsou vývojově starší a stavbou jednodušší než stromy listnaté. Rostou především v mírném podnebném pásmu. Používá se na prakticky všechny druhy stavebního řeziva - jako konstrukční dřevo i na stavebně truhlářské výrobky.

- **Měkké jehličnany** – smrk, jedle, modřín, borovice (lesní, černá, douglaska, vejmutovka, limba)
- **Tvrdé jehličnany** – tis, jalovec

**Listnaté stromy** – oproti jehličnatým stromům mají složitější strukturu. V zimě přestávají růst, a proto na podzim shazují listy.

- **tvrdé** – dub zimní, letní, dub cer, buk, jasan, javor, trnovník bílý - akát, habr, jilm, bříza, jeřáb,
- **tvrdé ovocné** – švestka, třešeň, hrušeň, jabloň, ořešák
- **měkké** – lípa, olše, topol, osika, jírovec (kaštan), vrba



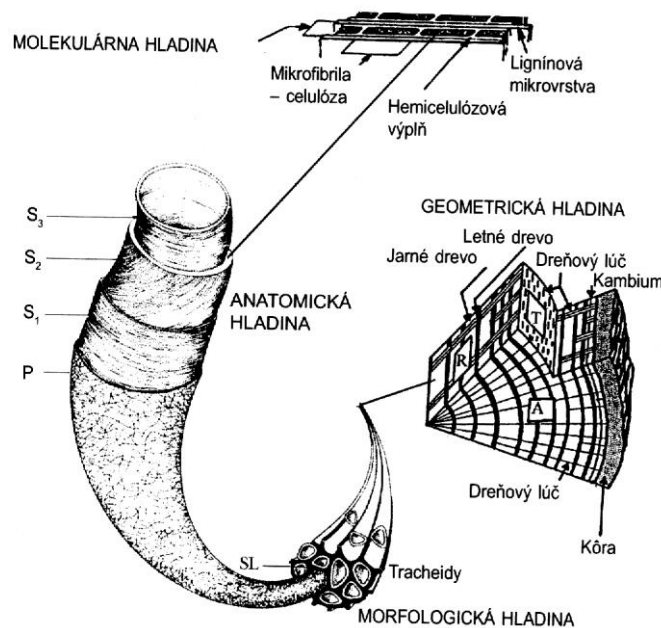
Obrázek 01: Makroskopie vybraných dřevin

### 2.3 Struktura dřeva

Struktura dřeva a jeho vlastnosti se vyznačují nehomogenitou, anizotropií a proměnlivými vlastnostmi, které závisí nejen na druhu dřeviny, ale také například na podmínkách při růstu. Vliv na vlastnosti dřeva mají například klimatické podmínky, hustota okolního porostu, typ půdy apod. Liší se i vlastnosti dřeva z jednoho stromu podle toho, ze které části stromu řezivo pochází.

**Rozlišujeme následující strukturu rostlého dřeva:**

- **Molekulární struktura** – primární, chemické složení dřeva
- **Anatomická struktura** – sekundární, submikroskopická stavba dřeva
- **Morfologická struktura** – terciální, mikroskopická stavba dřeva
- **Geometrická struktura** – kvartérní, makroskopická stavba dřeva



Obrázek 02: Molekulární struktura dřeva

### 2.3.1 Molekulární struktura

Molekulární struktura definuje jak typy a chemickou strukturu jednotlivých komponentů dřeva, tak i jejich fyzikálně-chemický stav.

**Chemická struktura dřeva je tvořena:**

- **hlavními složkami** - celulózou, hemicelulózou a ligninem,
- **složkami doplňujícími**, které tvoří vnitřní hmotu buněk - pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny, barviva, alkaloidy a látky minerální.

**Celulóza**, polysacharid, který je hlavní komponentou dřeva s asi 45-55% zastoupením v jehličnatých stromech. V listnatých stromech má obecně asi o 5 % menší zastoupení. Je základní strukturální částí jeho buněčných stěn.

**Hemicelulóza** je také polysacharid, avšak od celulózy se liší zejména stavbou řetězce a nižší molekulovou hmotností. Hemicelulózy se dělí do mnoha skupin, z nichž nejvýznamnějšími jsou manany (obsaženy zejména v jehličnatých stromech) a xylany (zejména v listnatých

stromech), případně galaktany. Ve dřevě je obsažena v množství od 15-25% (jehličnany) až po 25-45 % u listnatých stromů.

**Lignin** je po celulóze druhou nejčastější organickou sloučeninou na Zemi. Jeho podíl je vyšší v jehličnanech, cca 25-30%. Listnaté dřevo obsahuje cca 20-25% ligninu. Jeho hlavním úkolem je spojování celulózových buněk, vláken a cév, čímž vytváří strukturu dřeva, ale také dalších rostlin, jako je sláma, konopí, len atd. Dřevu dodává pevnost, především pevnost v tlaku. Je termoplastický a vyznačuje se absorpcí světla.

**Doplňující složky** – mohou být jak organického tak anorganického charakteru, např. pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny, barviva, alkaloidy a látky minerální.

Molekulární struktura má významný vliv na trvanlivost dřeva a rychlost průběhu degradačních procesů dřeva, jako je například hniloba, hoření, atmosférická koroze aj. Nejméně odolné jsou hemicelulózy, které rychle degradují za zvýšené teploty, při hydrolýze kyselinami nebo enzymy mnoha hub. Lignin je velmi málo odolný vůči UV záření nebo oxidačním enzymům hub. Ostatní látky mohou působit buď biocidně (třísloviny, dřevní živice), ale také mohou být lehce degradovatelné (tuky nebo látky na bázi sacharidů - škroby, pektiny).

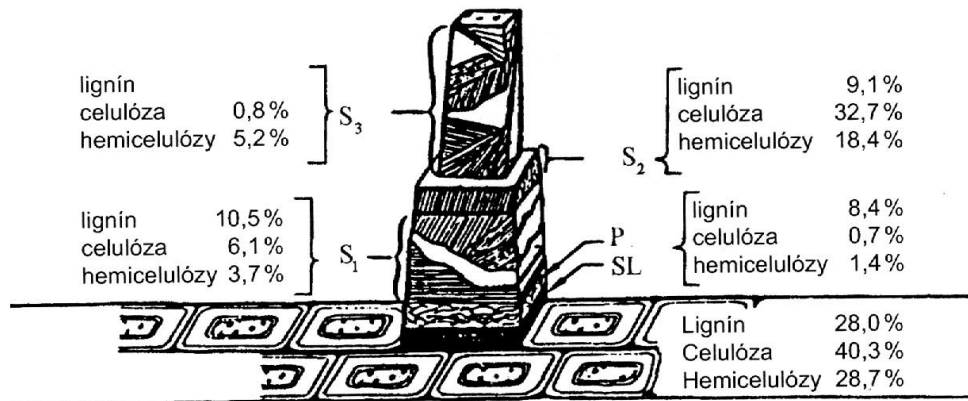
Chemicky se všechny druhy dřeva skládají ze stejných prvků, a to přibližně ve stejném množství. Organické látky, tvořící převážnou část dřeva, obsahují:

Chemická skladba	Uhlík	Kyslík	vodík	dušík	Ostatní minerální látky a popeloviny
Obsah v %	49,0 ± 1,0%	43,0 ± 1,0%	6,1 ± 0,1%	0,3 ± 0,1%	Zbytek obsahu (Ca, Mg, P, Na, K aj.)

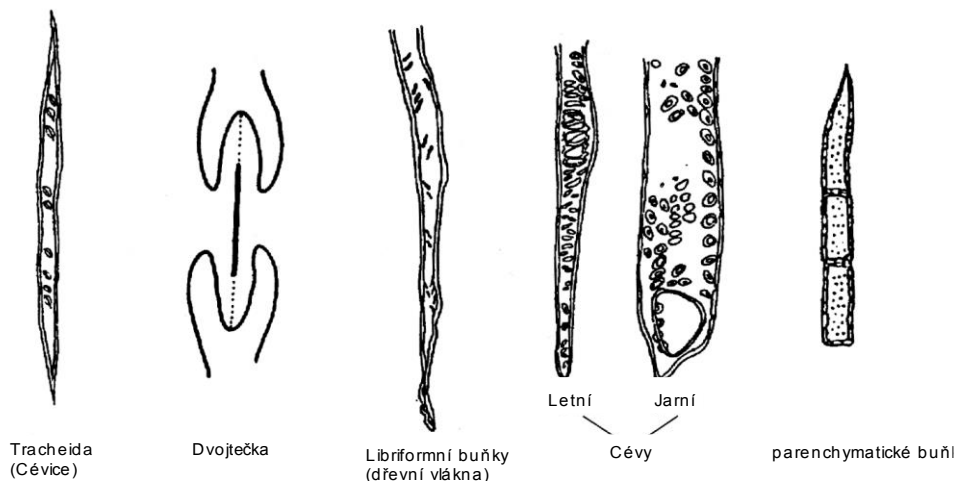
### 2.3.2 Anatomická struktura (Submikroskopická stavba dřeva)

Anatomická struktura dřeva definuje stavbu buněčných stěn jak z hlediska jejich vrstevnatosti, tak z hlediska podílu a způsobu lokalizace jednotlivých polymerů (celulózy, hemicelulózy a ligninu) a dalších látek ve formě fibril a amorfních výplní jednotlivých vrstev.

Buněčná stěna se skládá s několika vrstev (primární a sekundární buněčné stěny a střední lamely). Při zkoumání submikroskopické stavby používáme elektronový mikroskop.



Obrázek 01: Stavba buněčné stěny

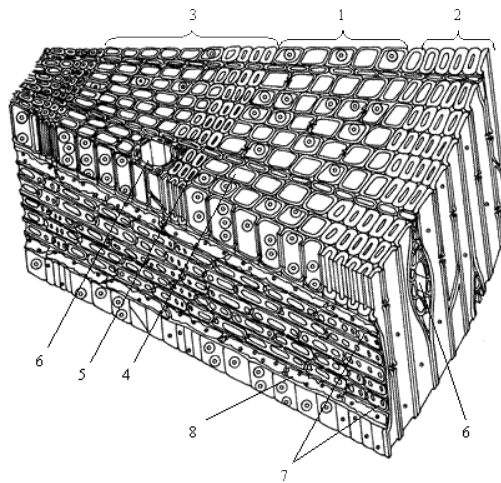


Obrázek 02: Znázornění nejčastějších buněk: 1 – tracheidy, 2 – dvojtečky, 3 – libriforní vlákna, 4 – jarní a letní cévy, 5 – parenchymatické buňky

Dřevo se skládá z buněk, které v průběhu života stromu plní různé funkce. Podle jejich funkcí rozlišujeme tři typy buněk:

- parenchymatické buňky – vyživovací vodivé a zásobní buněčné elementy,
- sklerenchymatické buňky – vyztužovací buněčné elementy,
- cévy – vodivé buněčné elementy (tracheje – pravé cévy, tracheidy – cévice).

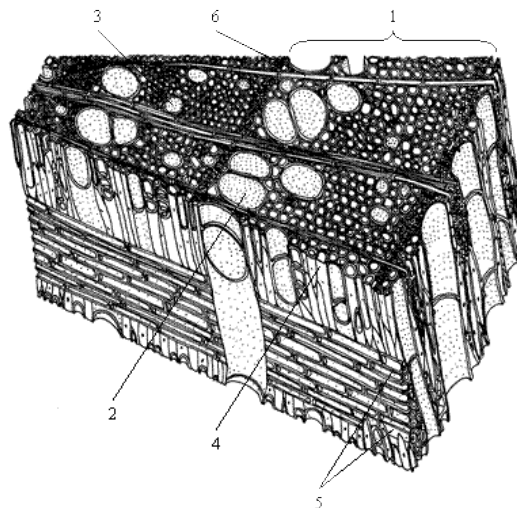
**Jehličnaté dřeviny** se vyznačují jednodušší anatomickou stavbou dřeva. Převládajícím buněčným elementem jehličnanů jsou tracheidy, které představují 90 – 94 % jehličnatého dřeva. Zbývající část dřeva tvoří parenchymatické buňky.



Obrázek 03: **Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva. 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřeňový paprsek, 8 – příčná tracheida**

**Dřevo listnatých dřevin** je tvořeno větším počtem různých buněk, které jsou více specializovány a přizpůsobeny své funkci, obsahuje následující typy buněk:

- cévy (tracheje) – vodivá funkce,
- cévice (tracheidy) – vodivá a vyztužovací funkce,
- libriformní buňky (dřevní vlákna) – vyztužovací funkce,
- parenchymatické buňky – vodivá a zásobní funkce.

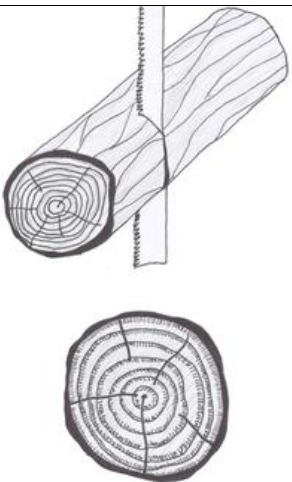
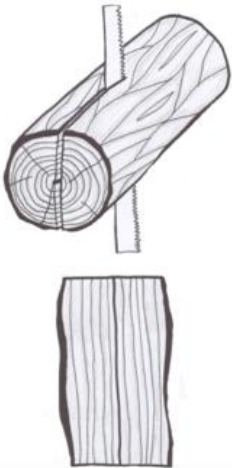
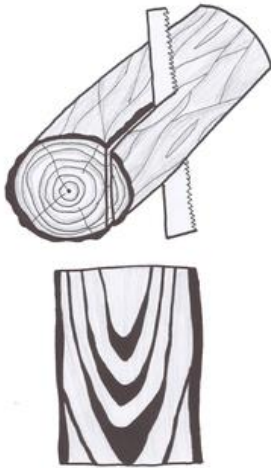





Obrázek 04: **Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997): 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřeňový paprsek, 6 – podélný parenchym**

### 2.3.3 Geometrická struktura (Makroskopická stavba dřeva)

Makroskopickou stavbou dřeva rozumíme popis vnějšího vzhledu, který je dán souhrnem morfologických znaků, které jsou viditelné pouhým okem nebo pod lupou. Podle těchto znaků dokážeme určit dřevinu na úroveň rodu.

Dřevo je stavební materiál, který má velmi nestejnou strukturu a v různých směrech má velice odlišné vlastnosti - anizotropní materiál. Na jednotlivých řezech dřeva můžeme popisovat strukturu dřeva.

Základní řezy dřevem		
Transversální řez (Příčný, čelní)	Radiální řez (středový, poloměrový)	Tangenciální řez (tečnový, fládrový)
označení "P"	označení "R"	označení "T"
		
		
<p>Řez vedený v rovině kolmé k ose kmene.</p> <p>Většina anatomických elementů řezána příčně.</p> <p>Rozpoznatelný podle koncentricky probíhajících letokruhů.</p>	<p>Řez vedený v rovině rovnoběžné s osou kmene a procházející středem kmene (dření).</p> <p>Letokruhy mají tvar svislých pásů.</p>	<p>Řez je rovnoběžný s osou kmene, neprochází osou kmene, kolmý k řezu příčnému.</p> <p>Letokruhy vytvářejí parabolické útvary, tzv. <i>fládr</i>.</p>

Na příčném řezu kmene různých druhů dřevin je možné pozorovat stavbu kmene a jednotlivé makroskopické znaky: kůra (borka + lýko), kambium, dřevo – běl a jádro nebo vyzrálé dřevo, dřevň.

**Kůra** se nachází na povrchu stromů, dle typu dřeviny nabývá různých podob - od tenké až po mnohvrstevnatou kůru, která se postupně odlupuje - **borka**. Kůra zaujímá cca 6 - 25 % objemu stromu.

Dle charakteristického vzhledu povrchu kůry můžeme rozlišovat například na hladké, brázdité, šupinaté či bradavičnaté.



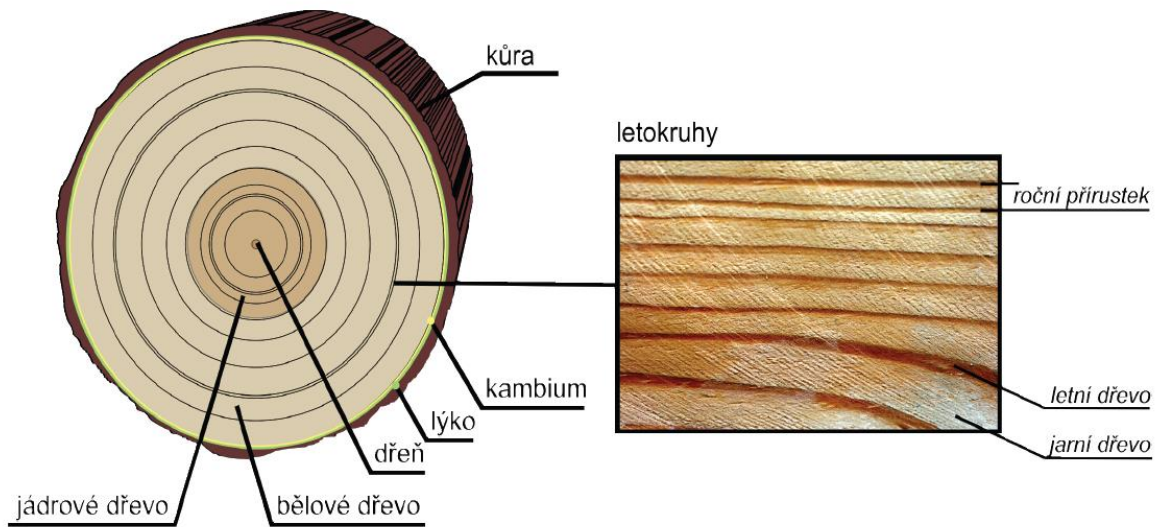
Obrázek 05: Příklady několika vzhledů borky – brázdité (ořešák černý, dub letní), šupinatě odlupčivá (smrk ztepilý, borovice lesní), hluboce brázdité (dub zubatý), hladké (platan).

Kůra se skládá celkem ze tří částí:

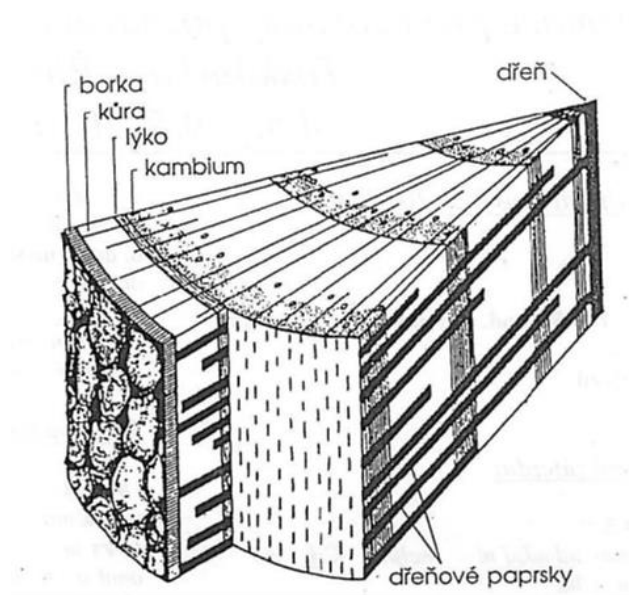
- **Lýko** - vnitřní vrstva kůry, přiléhá ke kambiu. Vede vodu se živinami kmenem a produkty fotosyntézy z koruny do všech ostatních částí stromu.
- **Zelená kůra (Feloderm)** – rostlinné pletivo tvořené činností felogenu, obsahuje chlorofyl, proto má zelené zbarvení.
- **Borka** - odumřelá vnější vrstva kůry. Může být silná (např. borovice) nebo hladká (např. buk). Základním úkolem je zajištění ochrany dřeva vůči působení vnějších vlivů. Je neprostupná pro vodu a plyny. Podle způsobu zakládání nových felogenů a také podle charakteru pletiv mezi nimi dochází k praskání borky a ke vzniku různých druhově specifických typů borky (důležitý znak při určování dřevin). Hladkou borku mají dřeviny, u nichž je felogen v činnosti více let, např. buk.

**Kambium** je tenká vrstva, která se nachází mezi lýkem a dřevem a je pouhým okem neviditelná (tloušťka 30 – 60 mikrometrů). Základní schopností této vrstvy je dělení buněk, tedy zajišťuje růst stromu – směrem do středu xylém (dřevní část) a směrem ven floém (lýkovou část).





Obrázek 06: Makroskopická stavba kmene stromu



Obrázek 01: Makroskopická stavba kmene stromu

**Vnější vzhled dřeva je charakterizován znaky:**

**Dřev** se nachází uprostřed kmene. Většinou je posunuta mimo geometrický střed kmene (v ideálním případě se nachází v jeho geometrickém středu). Má nejčastěji tvar kruhový nebo oválný o průměru cca 2- 5 mm.

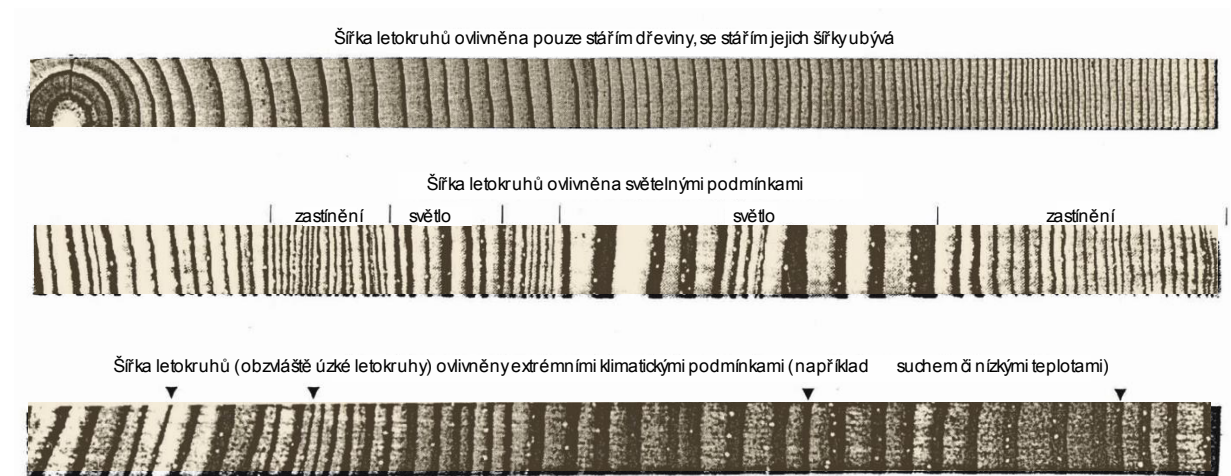
**Dřev** se nachází mezi kůrou a dřevem. Dřev je tvořeno různě barevnými zónami – bělí, jádrem a vyzrálým dřevem.

**Běl** je světlá vnější část dřeva. Její šířka závisí na druhu dřeviny, může mít pouze několik letokruhů, ale může zaujímat i celý průřez kmene (bělové dřeviny). Běl vede vodu od kořene k listům, resp. jehličí a ukládá zásobní látky. Je nejširší ve spodní části kmene, s výškou se zužuje. Je málo odolná proti napadení dřevokaznými houbami a hmyzem, v porovnání s jádrem může mít i rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti.

**Jádro** vzniká vyřazením centrální části kmene z fyziologických procesů (stárnutím živých buněk), jedná se o centrální, tmavěji zbarvenou část kmene. Tmavou barvu dodávají jádru právě oxidované jádrové látky (hnědá barva), u jehličnanů např. živice, u listnáčů třísloviny, minerální látky atd. Jeho vodivé elementy jsou pro vodu neprůchodné. Tato neprůchodnost je způsobena přítomností tzv. jádrových látek, které se ukládají v buněčných stěnách i dutinách. U jehličnanů se jedná o pryskyřice, u listnáčů o gummy, alkaloidy aj. Jádrové dřevo je trvanlivější než dřevo bělové, huře však propouští kapaliny (ztížená impregnace)

**Vyzrálé dřevo** má stejnou strukturu jako dřevo jádrové. Tvoří centrální část kmene, která však od běle není barevně odlišena. Makroskopicky je vyzrálé dřevo viditelné jen u čerstvě skáceného dřeva, běl je tmavší než vyzrálé dřevo, po sušení se barevně neliší.

**Letokruhy** představují tloušťkový (radiální) přírůst dřeva za vegetační období. Stavba a šířka letokruhu je typická pro jednotlivé druhy dřevin a je ovlivněna věkem dřeviny, polohou ve kmene, podmínkami stanoviště.



Obrázek 02: Příklady vzhledu letokruhů a příklady ovlivnění jejich šířky

Na základě stavby letokruhů můžeme dřeva u nás rostoucích dřevin rozdělit do tří skupin:

- dřeva jehličnatých dřevin – jejich stavba je vzhledem k dřevu listnáčů jednodušší, v rámci letokruhu je barevný rozdíl mezi jarním a letním dřevem, u některých druhů jsou viditelné pryskyřičné kanálky
- dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou – mají výrazné letokruhy, světlejší vrstva jarního dřeva je zvýrazněna velkými jarními cévami, které jsou na příčném řezu kruhovitě seřazené a jsou pouhým okem viditelné jako póry, letní dřevo je tmavší

- dřeva listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou – mají hůře rozlišitelné letokruhy, stejně jako hranice mezi jarním a letním dřevem, cévy přibližně stejných rozměrů nejsou u většiny dřev makroskopicky pozorovatelné

Šířka letokruhu má vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti dřeva.

Jarní dřevo vzniká na počátku vegetačního období. Jde o vnitřní část letokruhu a má převážně vodivou funkci.

Letní dřevo vzniká v druhé polovině vegetačního období. Je tmavší, hustší a tvoří vnější část letokruhu. Má spíše mechanickou funkci.

S rostoucím podílem letního dřeva v letokruhu jsou tedy hodnoty fyzikálních a mechanických veličin vyšší.

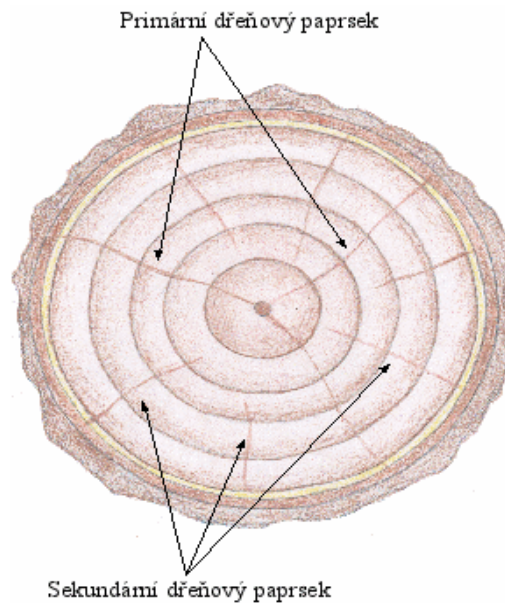


Obrázek 03: **Příčný řez modřínem - letokruhy s výrazným barevným a tloušťkovým rozdílem jarního a letního dřeva.**

Dřeviny lze také rozdělit podle rozdílu v barvě jarního a letního dřeva:

- velmi výrazný s ostrým přechodem (u jehličnatých stromů),
- velmi výrazný, ale přechod jarního přírůstku v letní je postupný. (např. dub, jilm, jasan, topol nebo javor),
- nebo jsou rozdíly malé (např. u lípy, buku nebo habru).

**Dřeňové paprsky.** Tvoří seskupení převážně parenchymatických buněk orientovaná kolmo na průběh letokruhů. Významně ovlivňují vlastnosti dřeva a jsou jednou z příčin rozdílných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva v tangenciálním a radiálním směru. Dřeňové paprsky mají všechny dřeviny, ale ne u všech dřevin jsou makroskopicky zřetelné. Viditelné dřeňové paprsky jsou různě barevně odlišené od okolního dřeva a vytvářejí lesklé plošky (zrcátka).



Obrázek 04: **Primární dřevňové paprsky probíhají radiálním směrem od dřeně až do lýka, zatímco sekundární dřevňové paprsky vznikají později, na dřevě nenavazují, probíhají od některého z letokruhů do lýka.**

- příčný řez - patrné jako široké pásy, které probíhají od obvodu do středu, kolmo k letokruhům
- radiální řez – kolmo na osu kmene, různě vysoké pásy či skvrny
- tangenciální řez - jemné svislé čárky

Šířka, výška, hustota a počet dřevňových paprsků je pro různé druhy dřevin typická a je důležitým diagnostickým znakem.

- Široké dřevňové paprsky (dobře viditelné ve všech směrech) - např. dub, buk a platan
- Úzké dřevňové paprsky (dobře viditelné v radiálním řezu) - např. lípa, jilm a akát
- Velmi úzké dřevňové paprsky (nezřetelné) - u všech dřevin jehličnatých a některých dřevin listnatých (např. jasan, bříza, topol, hrušeň, jabloň)

**Nepřavé dřevňové paprsky** vznikají sdružením samostatných makroskopicky od sebe neodlišitelných dřevňových paprsků (např. olše, habr)

Mezi makroskopické znaky dřeva patří také popis přítomnosti, množství a stavu makroskopických nehomogenit – **vady dřeva** (například suky, tlakové a tahové dřevo, živice kanálky aj.).

Vadami dřeva se rozumí odchylky od normálního stavu, popř. se za vady dřeva považují takové vlastnosti dřeva, které ovlivňují jeho účelové použití.

K vadám dřeva patří i poškození cizopasnými organismy (tj. plísněmi a houbami) nebo hmyzem (chodby a otvory ve dřevě).

**Suky** jsou základem živých nebo pozůstatky odumřelých větví. Vyskytují se u všech dřevin. Množství a rozměry suků závisí na typu dřeviny, stanovišti i poloze ve kmene. Narušují stavbu dřeva, což se projeví zhoršením mechanických vlastností.

**Svalovitost (vlnitost)** je nepravidelná stavba dřeva, zvlnění nebo spletení průběhu dřevních vláken ve směru osy kmene. Projeví se po rozštípnutí kmene zvlněným povrchem, na vyhlazeném povrchu podélných řezů pak střídáním lesklých a matných pruhů napříč vláken. Svalovitost se projevuje u habru v oddenkové části kmene a u tisu v jeho celé délce.



Obrázek 05: **Kořenice**



Obrázek 06: **Svalovitost**



Obrázek 07: **Lískovcové dřevo**



Obrázek 08: **Očka**

**Dřeňové skvrny** se projevují na příčném řezu jako hnědé nebo zelenkavé skvrny a svým tvarem připomínají dřeňové paprsky. Jejich výskyt nepříznivě ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva. Výskyt nejčastěji u olše, břízy, vrby či lípy.

**Očka** jsou zarostlé pupeny, které po rozřezání dřeva vytváří charakteristickou tzv. očkovou kresbu. Vznikají ve vrstvě dřeva v blízkosti lýka. Projevují se na tangenciálních řezech jako okrouhlé tmavší nebo světlejší útvary. Jejich výskyt je charakteristický zejména pro javor klen, dub a břízu. Takové dřevo se využívá k dekoračním účelům.

**Kořenice** představuje oddenkovou část kmene a charakterizuje jí přechod stavby dřeva kořenů ve stavbu dřeva kmene. Letokruhy jednotlivých kořenů vrůstají do kmene, kde se přizpůsobují jeho letokruhům. Použití ořešáku, jasanu, dubu, atd. pro dekorační účely.

**Lískovcové dřevo** se projevuje u některých dřev (nejvíce u smrku, méně pak u jedle, buku nebo jasanu) na příčném řezu jako lokální zvlnění/ zakřivení letokruhů v radiálním směru. Mechanické vlastnosti lískovcového dřeva jsou nižší než u normálního dřeva.

**Reakční dřevo** vzniká jako reakce na mechanické namáhání dřeva větrem, sněhem, ledem apod. a je spojeno s výraznou excentricitou kmene. Lze ho charakterizovat jako místní změnu struktury dřeva, která se projevuje jednostranným zvýšením podílu letního dřeva v letokruzích a výrazně tmavším zbarvením letního dřeva. Je příčinou borcení a praskání dřeva. Reakční dřevo lze rozdělit na:

- **Tlakové dřevo (křemenitost)** vzniká u jehličnatých stromů v místě tlakového namáhání – zesílení buněčných stěn – lignifikace. Vypadá jako hnědá zóna zasahující jeden nebo několik letokruhů. Je méně pružné než okolní dřevo.
- **Tahové dřevo** vzniká v listnatých stromech zesílením buněčných stěn vlivem zvýšeného obsahu celulózy. Jeví se na příčném řezu jako lesklá bílá plocha.

### Vedlejší makroskopické znaky:

**Barva dřeva** – barvu dřeva ovlivňují látky ve dřevě jako je barviva, třísloviny, pryskyřice aj. Barva je proměnlivá. Barvu také ovlivňuje stáří stromu, působení klimatických podmínek, působení světla a původní stanoviště růstu. Druhy mírného pásma mají světlejší barvu než druhy rostoucí v tropech. Barvu také mění dřevo, které bylo napadeno hnilobou. Dřevu můžeme měnit barvu také při zpracování dřeva např. mořením, pařením aj.

**Lesk dřeva** – přirozený lesk dřeva je dán odrazem světelných paprsků od jeho povrchu. Velký význam pro lesk je přítomnost dřeňových paprsků, proto největší lesk bývá na povrchu radiálního řezu. Lesk zvyšuje nepravidelný směr vláken, či větší množství dřeňových paprsků. Výrazný lesk na radiálním řezu má např. platan, buk, jilm nebo akát.

**Textura dřeva** – kresba dřeva, která se objeví po rozřezání na jeho povrchu. Je tvořena rozmanitým zastoupením makroskopických elementů, charakteristických pro určitou dřevinu. Zřetelnou kresbu ovlivňují velké cévy, široké dřeňové paprsky, kontrast mezi jarním a letním dřevem, kontrast mezi jádrem a bělem nebo speciální struktury jako jsou očka, vlnitost, kořenice nebo reakční dřevo. Jehličnaté dřevo má jednoduchou stavbu a jeho textura závisí na kresbě výrazných letokruhů. Listnaté dřeviny mají stavbu poměrně složitější a obsahují řadu prvků viditelných pouhým okem.

**Vůně dřeva** – slouží jako rozpoznávací znak u některých dřevin. Je výrazná jen u čerstvého dřeva, vysycháním jeho vůně slábne. Její intenzitu ovlivňují zejména éterické oleje, pryskyřice a třísloviny (např. terpentýnové, cedrové či santalové silice).

**Hustota dřeva** je doplňkový charakteristický znak pro makroskopickou identifikaci dřeva. Nestanovuje se přesná hustota v  $\text{kg/m}^3$ , ale provádí se její přibližný odhad na základě hmotnosti vzorku.

**Tvrдость dřeva** je dána schopností jiného tělesa proniknout do struktury dřeva. Při makroskopické identifikaci se tato zkouška provádí orientačně vrypem nehtem. Tvrдость dřeva závisí na jeho struktuře, hustotě, anatomické stavbě.

**Příklady tvrdosti dřeva.**

<p><b>Velmi měkké</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- do 35 MPa,</li> <li>- smrk, borovice, jedle, topol, vrba, lípa,</li> <li>- vryp tvoří zřetelnou rýhu.</li> </ul>	<p><b>Měkké</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 35 – 50 MPa,</li> <li>- modřín, kleč, olše, bříza, jalovec, jíva,</li> <li>- vryp tvoří zřetelnou rýhu.</li> </ul>
<p><b>Středně tvrdé</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 50 – 65 MPa,</li> <li>- kaštan, platan, jilm, líska,</li> <li>- vryp nehtem netvoří výraznou rýhu.</li> </ul>	<p><b>Tvrdé</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 65 – 100 MPa,</li> <li>- tis, dub, buk, ořešák, javor, jabloň, hrušeň.</li> </ul>
<p><b>Velmi tvrdé</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 100 – 150 MPa,</li> <li>- ptačí zob, dub pýřitý, zimostřez.</li> </ul>	<p><b>Neobyčejně tvrdé</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nad 150 MPa,</li> <li>- cizokrajné dřeviny - eben, mahagon.</li> </ul>

**2.4 Zkoušení dřeva**

Dřevo je materiál anizotropní, tudíž vykazuje v různých směrech různé vlastnosti. Výrazně se od sebe liší vlastnosti sledované podél vláken a kolmo na vlákna. Stejně tak se pak liší i vlastnosti v kolmém směru v radiálním či tangenciálním směru. Obecně se dá říct, že nejlepší vlastnosti má dřevo ve směru podél vláken. Na výsledky zkoušek má významný vliv také vlhkost dřeva.



Obrázek 01: Anizotropie dřeva - směry zkoušení vlastností dřeva

**Vlastnosti dřeva můžeme rozdělit na vlastnosti:**

- **Fyzikální vlastnosti dřeva** – sorpce, rozměrové změny spojené se změnou vlhkosti, hustota a pórovitost dřeva, pohyb vody ve dřevě, propustnost tekutin ve dřevě, tepelné vlastnosti dřeva, elektrické a magnetické vlastnosti dřeva, akustické vlastnosti dřeva, povrchové a optické vlastnosti dřeva.
- **Mechanické vlastnosti dřeva** - pevnost dřeva, pružnost dřeva, plasticnost dřeva, odvozené a technologické vlastnosti.

## 2.5 Fyzikální vlastnosti dřeva

Se změnou obsahu vody ve dřevě jsou spojeny změny fyzikálních a mechanických vlastností i odolnosti proti houbám a napadení hmyzem.

Dřevo je vzhledem k okolnímu prostředí hygroskopickým materiálem, který je schopný přijímat nebo naopak odevzdávat vodu, a to ať už ve skupenství kapalném tak i plynném. **Obsah vody ve dřevě velmi významně ovlivňuje vlastnosti dřeva.**

### 2.5.1 Voda ve dřevě a vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu - vlhkost absolutní  $w_{abs}$ , nebo podílem hmotnosti vody ke hmotnosti mokrého dřeva - vlhkost relativní  $w_{rel}$ . Vlhkost se nejčastěji vyjadřuje v procentech.

Z hlediska uložení vody ve dřevě ji můžeme rozdělit:

- **Voda chemicky vázaná** - je součástí chemických sloučenin. Nelze ji ze dřeva odstranit sušením, ale pouze při chemickém rozkladu (např. suchá destilace, spálení). Je ve dřevě zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti dřeva. Celkové množství se pohybuje v rozmezí 1 - 2 % sušiny dřeva. Množství chemicky vázané vody neovlivňuje fyzikálně mechanické vlastnosti dřeva.
- **Voda vázaná (hygroskopická)** - nachází se v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH. Voda vázaná se ve dřevě vyskytuje při vlhkostech 0-30%. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.
- **Voda volná (kapilární)** - je obsažena v dutinách cév a cévek vodivých letokruhů. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná. Při vysychání uniká jako první a nezpůsobuje změnu objemu dřeva, borcení ani trhliny.

Důležitou hodnotou vlhkosti je tzv. **mez nasycení buněčných stěn MNBS** nebo **mez hygroskopicity MH**, kdy buněčné stěny jsou vodou ještě nasyceny, ale v buněčných dutinách již voda není. Dřevo s vlhkostí do této meze mění svoje vlastnosti, zejména mechanické, ale nad touto mezí jsou téměř stálé. MNBS představuje hranici mezi vodou vázanou a volnou. Rozdíl mezi MNBS a MH spočívá v prostředí, kterému je dřevo vystaveno. U MNBS je to voda ve skupenství kapalném, u MH ve skupenství plynném. Při teplotě 15 - 20°C mají obě veličiny přibližně stejnou hodnotu (cca 30 %). MH je na rozdíl od MNBS závislá na teplotě prostředí (s rostoucí teplotou klesá).

Závislost MNBS (MH) na hustotě dřeva:

$$MNBS = \left( \frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \rho_{H_2O}$$

Vlhkost dřeva má velký význam při zpracování dřeva a používání výrobků ze dřeva. Tato vlhkost se označuje za technickou vlhkost. Technická vlhkost zahrnuje jak výrobní tak



provozní vlhkost. Jako obecně správné se považuje pravidlo, že výrobní vlhkost se má rovnat provozní vlhkosti, resp. u některých druhů výrobků má být o 1 - 2% nižší. Tím se předejde nežádoucím deformacím v důsledku kolísání teploty a relativní vlhkosti prostředí. V praxi se rozlišuje tzv. **relativní vlhkost** a **absolutní vlhkost** dřeva. **Relativní vlhkost** vyjadřuje podíl vody v procentech z celkové hmotnosti vzorku v okamžiku měření. Nemůže nikdy dosáhnout hodnoty 100%. **Absolutní vlhkost** vyjadřuje procentuální podíl vody z hmotnosti absolutně suchého dřeva. Tento parametr může nabývat i hodnoty přes 100%.

**Podle vlhkosti se dřevo často v praxi zařazuje do následujících skupin:**

- dřevo mokré, dlouhou dobu uložené ve vodě ( $w > 100\%$ )
- dřevo čerstvě skáceného stromu ( $w = 50 - 100\%$ , ale např. topol až 180%)
- dřevo vysušené na vzduchu ( $w = 15 - 22\%$ )
- dřevo vysušené na pokojovou teplotu ( $w = 8 - 15\%$ )
- dřevo absolutně suché ( $w = 0\%$ )

**Na zjišťování vlhkosti dřeva se používá celá řada metod, které se dělí na:**

**Přímé (absolutní) metody**, kterými zjišťujeme skutečný obsah vody ve dřevě;

- váhová (gravimetrická) metoda - provádí se podle ČSN 49 0103.
- destilační metoda (extrakční) - provádí se destilací u impregnovaného nebo silně pryskyřičného dřeva, je velmi zdlouhavá a vyžaduje nákladné laboratorní zařízení
- jodometrická titrace podle Fischera

**Měření vlhkosti gravimetrickou (váhovou) metodou**

Gravimetrická metoda je přímá metoda, která je zároveň nejpřesnější metodou k určení vlhkosti dřeva. Je také referenční metodou při posuzování přesnosti ostatních metod.

Gravimetrická metoda spočívá ve zjištění hmotnosti vlhkého dřeva  $m_w$  a absolutně suchého dřeva  $m_0$  po jeho vysušení při teplotě  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Výhodou gravimetrické metody je její vysoká přesnost, k nevýhodám patří náročnost na čas, pracnost přípravy tělísek a nemožnost kontinuálního měření vlhkosti.

**Nepřímé (relativní) metody**, kterými se obsah vody určuje nepřímo prostřednictvím měření jiné veličiny, jejíž hodnota závisí na obsahu vody ve dřevě.

Vlhkost dřeva výrazně ovlivňuje všechny základní elektrofyzikální veličiny. Z nepřímých metod jsou rozšířené metody:

- elektrofyzikální – odporové, kapacitní, absorpční, mikrovlnné a impedanční
- radiometrické (založené na absorpci různých druhů záření), akustické (využití rychlosti šíření nebo adsorpce zvuku a ultrazvuku) nebo
- termofyzikální.

Pro svoji jednoduchost a rychlost je asi nejpoužívanější metodou zjišťování vlhkosti pomocí elektrických vlhkoměrů. Tyto vlhkoměry spolehlivě měří vlhkost suchého dřeva, s rostoucí vlhkostí (nad mez nasycení) jejich přesnost významně klesá.

## 2.5.2 Hygroskopicit a rovnovážná vlhkost

Dřevo mění svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí díky adsorpci. Adsorpcí dřeva rozumíme poutání plynné, nebo kapalné látky na měrném vnitřním povrchu dřeva.

**Hygroskopicit (navlhavost)** vyjadřuje schopnost dřeva pohlcovat ze vzduchu vodní páry. Vlhkost dřeva, která se ustálí při daných podmínkách prostředí (relativní vzdušná vlhkost a teplota) se nazývá rovnovážnou vlhkostí dřeva *RVD*. Stav, který je takto dosažen se potom nazývá stavem vlhkostní rovnováhy *SVR* (tlak vodních par ve vzduchu a tlak vodních par ve dřevě jsou v rovnováze).

## 2.5.3 Nasákavost dřeva vodou

Nasákavost je schopnost dřeva v důsledku pórovité stavby nasávat vodu ve formě kapaliny. Množství pohlcené vody závisí na době, po kterou bylo dřevo ve vodě. Udává se v procentech. Rychlost přijímání vody závisí na počáteční vlhkosti, teplotě a na tvaru i rozměrech dřeva.

## 2.5.4 Důsledky změn vlhkosti dřeva

### Bobtnání a sesychání

**Bobtnáním  $\alpha$**  nazýváme schopnost dřeva zvětšovat lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa při přijímání vázané vody (v rozsahu vlhkosti 0 % - MNBS). Bobtnání se vyjadřuje podílem změny rozměru k původní hodnotě. Udává se v %. Ve směru podélném bobtná o 0,1 až 0,6 %, ve směru radiálním bobtná o 3 až 6 % a ve směru tangenciálním bobtná o 6 až 12%.

**Sesychání  $\beta$**  – Sesychání je opakem bobtnání. Proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa při ztrátě vody vázané. Pro výpočet sesychání platí obdobné vztahy jako pro bobtnání. Sesychání je dáno součtem lineárních sesychání v podélném, radiálním a tangenciálním směru se stejným podílem v jednotlivých směrech. Celkové objemové sesychání je přímo úměrné konvenční hustotě dřeva:

Na základě hodnot koeficientu objemového sesychání můžeme rozdělit dřeva do následujících skupin:

- dřeva málo sesychavá -  $K_{\beta V} < 0,4$  (tis, olše, akát, topol, kaštan)
- dřeva středně sesychavá -  $K_{\beta V} = 0,4 - 0,47$  (smrk, borovice, jedle, osika, dub, jasan, jilm, ořešák)
- dřeva hodně sesychavá -  $K_{\beta V} > 0,47$  (modřín, bříza, lípa, líska)

### Borcení dřeva

Následkem objemových změn dřeva způsobených vlhkostí (vysycháním, bobtnáním) dochází ke tvarovým změnám a tvorbě drobných trhlin. Jeho příčinou jsou jednak rozdíly mezi

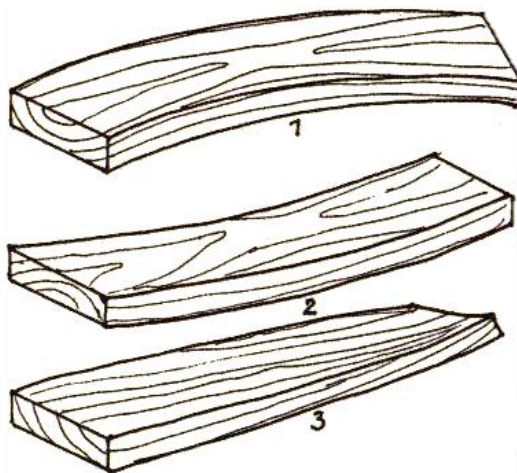
radiálním a tangenciálním sesycháním a jednak nerovnoměrné vysychání v důsledku pomalého pohybu vody ve dřevě při sušení.



Obrázek 02: **Způsoby příčného borcení dřevěného sortimentu**

**Příčné borcení** je vyvoláno rozdílným radiálním a tangenciálním sesycháním sortimentu a je tím větší, čím větší je jeho vzdálenost od dřeně k obvodu kmene

**Podélné borcení** vzniká nerovnoměrným podélným sesycháním dřeva, které způsobí prohnutí nebo stočení řeziva



Obrázek 03: **Způsoby podélného borcení dřevěného sortimentu (1. boční prohnutí, 2. plošné prohnutí a 3. šroubovitě prohnutí)**

### Praskání dřeva

Důsledek vnitřních napětí ve dřevě, způsobených nerovnoměrným vysycháním dřeva. Protože na povrchu dřevo vysychá rychleji a uvnitř pomaleji, vzniká na povrchu dřeva tahové napětí. Vnitřní vrstvy jsou tak vystaveny tlakovému napětí. Pokud tahové napětí překročí mez pevnosti v tahu, dřevo praskne a vzniká povrchová výsušná trhlina směřující od povrchu ke dřeně. V dalším průběhu se děje opačný postup. Vlivem vysychání vnitřní části jsou tlakovému napětí vystaveny povrchové vrstvy, které však již rozměry nemění. Tahové napětí vzniká uvnitř, takže se mohou vytvořit vnitřní výsušné trhliny. V této fázi se povrchové trhliny poněkud uzavírají.

## Ustrnutí dřeva

Jev, který může nastat při sušení i navlhání dřeva. Jestliže na dřevo působí při sušení nebo vlhnutí síly, které překračují mez pružnosti, nemůže dřevo měnit svůj objem. V tom případě mění svůj objem trvale. Jestliže vznikne při nerovnoměrném vysychání ustrnutí v sušeném řezivu, vzniká napětí, které se vyrovnává trháním a deformací dřeva.

## Kornatění dřeva

Může nastat jako důsledek nestejnomyšného ustrnutí jednotlivých vrstev dřeva například při rychlém sušení dřeva o velké počáteční vlhkosti. V důsledku nerovnoměrného sušení a sesychání dřeva na povrchu a uvnitř může dojít k nestejnomyšnému ustrnutí povrchových a vnitřních vrstev. Vznikají vnitřní napětí, a pokud tato napětí nepřekročí mez pevnosti dřeva, dochází k tzv. ustrnutí. Dřevo se navenek může jevit bez deformací jako dobré. Zkornatění dřeva se projeví nejvíce při podélném řezání – dřevo pilu svírá, nebo se rozestupuje a vzniklé části jsou prohnuté. Pokud není kornatění intenzivní, nemusí se projevit při řezání dřeva, ale až po několika hodinách.

## 2.5.5 Hustota dřeva (dle ČSN 49 0108)

**Objemová hmotnost** obecně závisí na mnoha faktorech a to zejm. na druhu dřeva a vlhkosti (s rostoucí vlhkostí objemová hmotnost roste), přičemž rozmezí, ve kterém se objemová hmotnost pohybuje, činí cca 400 – 800 kg.m<sup>-3</sup> (v suchém stavu). V praxi se pro dřevo místo objemové hmotnosti používá pojem **hustota dřeva**.

### Poznámka:

V materiálovém inženýrství běžně užívaný pojem hustota, která označuje měrnou hmotnost materiálu, označujeme u dřeva jako **hustota dřevní hmoty** (poměr hmotnosti a objemu dřeva bez buněčných dutin). Hustota dřevní hmoty má u všech dřevin přibližně stejnou hodnotu kolem 1550 kg.m<sup>-3</sup>.

Měřením rozměrů a vážením tělesa s přirozenou vlhkostí  $W$  zjistíme jeho objem a hmotnost.

Nejčastěji rozlišujeme tři různé **hustoty dřeva** (objemové hmotnosti) v závislosti na vlhkosti:

- **hustota dřeva v suchém stavu** - hmotnost objemové jednotky zcela vysušeného dřeva ( $W = 0 \%$ ).
- **hustota dřeva při vlhkosti  $W = 12 \%$** .
- **hustota dřeva při vlhkosti  $W$**  - hmotnost objemové jednotky dřeva při vlhkosti  $W > 0 \%$ .

### Rozdělení dřevin podle hustoty stanovené při 12 % vlhkosti dřeva:

- **dřeva s nízkou hustotou  $\rho_{12} < 540 \text{ kg/m}^3$** : borovice, smrk, jedle, topol, lípa, olše, vrba, osika aj.,
- **dřeva se střední hustotou  $\rho_{12} = 540\text{-}750 \text{ kg/m}^3$** : modřín, buk, dub, jilmy, bříza, hrušeň, dub, ořešák, jilm, jabloň, jasan, jeřáb, třešeň,
- **dřeva s vysokou hustotou  $\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$** : habr, zimostráz, dřín, moruše, akát.

Střední hodnoty hustoty dřeva při obsahu vody w:		
Druh dřeva	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
	w = 0 %	w = 15 %
<b>Smrk</b>	<b>0,42</b>	<b>0,46</b>
<b>Jedle</b>	<b>0,43</b>	<b>0,48</b>
<b>Borovice</b>	<b>0,49</b>	<b>0,52</b>
<b>Modřín</b>	<b>0,55</b>	<b>0,58</b>
<b>Javor</b>	<b>0,60</b>	<b>0,64</b>
<b>Dub</b>	<b>0,56</b>	<b>0,69</b>
<b>Jasan</b>	<b>0,67</b>	<b>0,71</b>

**Tepelná vodivost** dřeva je malá a zvětšuje se s objemovou hmotností, vlhkostí a teplotou dřeva. Ve směru vláken je dřevo dvakrát vodivější než kolmo na vlákna. Součinitel tepelné vodivosti dřeva || s vlákny při vlhkosti 12 % se pohybuje kolem 0,25–0,45 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a ⊥ na vlákna 0,075 – 0,18 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
dřevo ⊥ (w = 12 %)	0,075–0,18
dřevo    (w = 12 %)	0,25–0,45
dřevní substance ⊥	0,44
dřevní substance	0,88
vzduch	0,024
voda	0,59
cihla	0,70
beton	0,93
sklo	1,05
kámen	1,80
ocel	20,0
hliník	202,0
měď	396,0

**Teplotní roztažnost** – měna rozměrů dřeva vlivem teploty je velice malá – přibližně 10x menší než vlivem vlhkosti. Dilatační spáry jsou nutné tedy řešit pouze kvůli objemovým změnám způsobenými vlivem vlhkosti.

**Hořlavost dřeva** je charakterizována:

- **Bodem vzplanutí** je označována taková teplota dřeva, při které se v důsledku termického rozkladu vyvine dostatečné množství plynů, které ve směsi se vzduchem při přiblížení plamene vzplanou a po jeho oddálení uhasnou. Bod vzplanutí u dřeva je v rozmezí 180 – 275 °C a závisí na druhu dřeva, hustotě, chemickém složení a vlhkosti dřeva.
- **Bodem hoření** je označována taková teplota, při které dřevo po oddálení vnějšího zdroje plamene samo dále hoří. Bod hoření se u dřeva pohybuje mezi 260 – 290°C.
- **Bodem zápalnosti** je označována taková teplota, při které se plyny vzniklé termickým rozkladem při dodání kyslíku samovolně vznítí. Bod zápalnosti u dřeva leží mezi 330 – 520 °C.

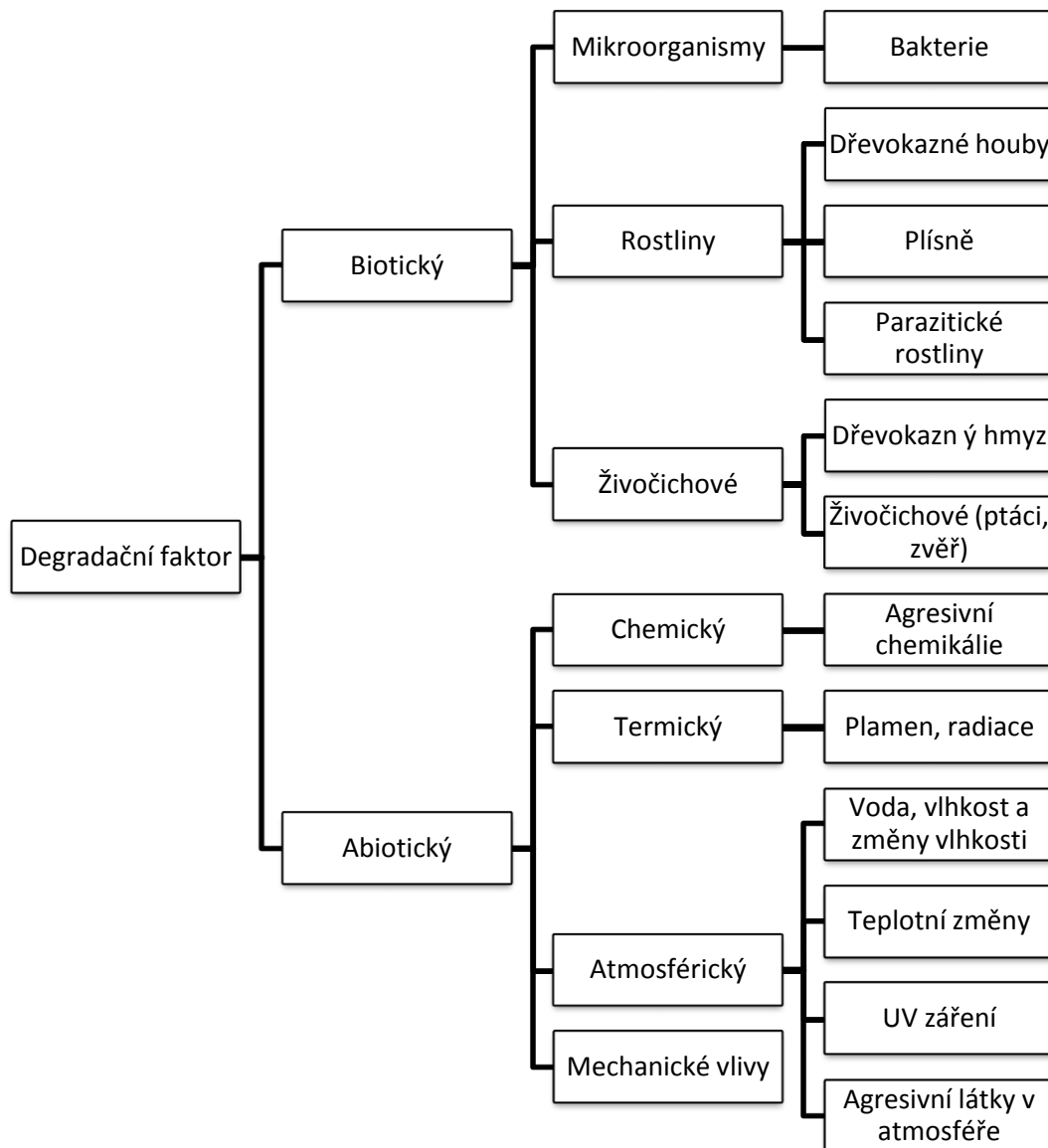
Hořlavost dřeva je ovlivňována jeho chemickým složením a průměrným zastoupením základních chemických sloučenin dřeva. Nejméně odolná vůči termickému rozkladu je hemicelulóza (170 – 240 °C), u celulózy intenzivní rozklad nastává při 250 – 350 °C a nejodolnější lignin s rozkladem při 300 – 400 °C.

**Elektrická vodivost** dřeva v suchém stavu prakticky nulová, se vzrůstající vlhkostí se však prudce zvětšuje. Na závislosti vodivosti a obsahu vody spočívá princip fungování elektrických přístrojů pro měření vlhkosti dřeva

**Akustické vlastnosti dřeva** Akustické vlastnosti jsou vyjadřovány schopností materiálu utlumit, vést nebo zesílit zvuk. Dřevo je materiálem s velmi dobrými akustickými vlastnostmi. Z hlediska posuzování akustických vlastností dřeva je důležitá rychlost šíření zvuku ve dřevě. Rychlost šíření zvuku ve dřevě je pro naše dřeviny přibližně 4500 m.s<sup>-1</sup> v podélném směru a 1100 m.s<sup>-1</sup> ve směru příčném (ve vodě 41 485 m.s<sup>-1</sup>, v železe 5000 m.s<sup>-1</sup>).

## 2.5.6 Trvanlivost dřeva

K poškození dřeva dochází především díky degradačnímu působení fyzikálních, biologických a atmosférických faktorů.



### Biologické vlivy

Jedná se o napadení bakteriemi, houbami a dřevokazným hmyzem. Houby podle typu buď vytvářejí plísně, mění zbarvení dřeva (dřevo zbarvující houby) nebo způsobují jeho rozklad (hniloba – tzv. dřevokazné houby). Plísně a dřevo zbarvující houby nezpůsobují přímo rozklad dřeva, ale vytvářejí optimální podmínky pro napadení dřeva dřevokazným hmyzem a dřevokaznými houbami, které již způsobují destrukci dřeva.

### Rizikové hodnoty pro biologické napadení:

- **Dřevokazné houby** – vlhkost dřeva 18–20 % nebo vyšší (cca 85–90 % relativní vlhkosti) a teplota v rozmezí od 2 do 40 °C. V interiéru je těchto hodnot dosaženo např. při zatékání dešťové vody, při haváriích vodovodního nebo kanalizačního potrubí, nebo v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu > 85 %; v exteriéru jsou tyto hodnoty v našich klimatických podmínkách dosaženy vždy.

- **Dřevokazný hmyz** – vlhkost dřeva 12 % nebo vyšší (cca 60 % relativní vlhkosti) a teplota nad 10 °C (v interiéru i v exteriéru jsou tyto hodnoty v našich klimatických podmínkách splněny téměř vždy).

Dřevo s vlhkostí pod 12 % (pod cca 60 % relativní vlhkosti) je přirozeně odolné proti všem biotickým škůdcům.

Komplikovaná stavba buněčných stěn některých dřevin sehrává významnou úlohu při degradační aktivitě mnohých znehodnocujících faktorů dřevní hmoty. Např. konkrétní druhy plísní a bakterií nejsou schopny komplikovanou strukturu dřevních buněčných stěn vůbec atakovat - především nejsou schopny narušovat lignin. Vliv stavby buněčných stěn se projevuje u všech forem znehodnocování dřeva, a tím působí i na jeho trvanlivost. Problematika ohrožení biologickým napadením je předmětem ČSN EN 335 -1 –2 Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi.

## **Atmosférické vlivy**

Zahrnuje působení fyzikálních a chemických činitelů z okolí na dřevo. Nejdůležitější atmosférické vlivy vyvolávající degradaci dřeva jsou UV záření, vzdušný kyslík, déšť, teplota a znečištěné ovzduší.

- Kombinovaným působením UV záření a kyslíku na nechráněné dřevo dochází k chemickým změnám v povrchové vrstvě, dřevo žlutne a hnědne vlivem rozkladu ligninu.
- Déšť ze dřeva extrahuje a vymývá hnědé produkty štěpení ligninu a dřevo šedne.
- Dřevo vystavené intenzivnímu slunečnímu záření a vysokým teplotám vysychá, vznikají trhliny, narušuje se jeho struktura, snižuje se pevnost, dřevo křehne.
- Působením větru nebo proudící vody a písku dochází k abrazi dřeva, obrušuje se jeho povrch, ze dřeva vystupují tvrdší části.

## **2.5.7 Přirozená odolnost a trvanlivost dřeva**

Hlavním činitelem, který způsobí úplný zánik dřeva je kromě požáru napadení houbami. Z toho plyne potřeba trvale se starat, aby nevznikly podmínky příznivé pro napadení dřeva.

Faktory, ovlivňující trvanlivost dřeva a jeho odolnost vůči napadení:

- prostředí, zejména vlhkost, přítomnost vzduchu a teplota;
- druh dřeva;
- kvalita dřeva;
- ochranné látky.

Na odolnosti dřeva vůči biotickým činitelům se pozitivně projevuje zvýšený podíl doprovodných látek typu tříslovin (jádro dubu, akátu) a živic (borovice), které působí na řadu škůdců toxicky. Naopak některé organické a anorganické složky dřeva na bázi dusíku,



hořčíku, fosforu, draslíku, síry a ve stopových množstvích i jiných prvků, obsažených hlavně v rychlerostoucích dřevinách, jsou simulátory růstu aktivity dřevokazových hub.

Pro posouzení a stanovení rizika napadení dřevokaznými houbami konkrétní dřevěné konstrukce zabudované v určitém prostředí a pro kvalifikovaný odhad její životnosti jsou rozhodující tyto dva faktory, které je nutno znát:

- parametry prostředí, v němž bude dřevo zabudováno, tj. obecně řečeno stanovit třídu ohrožení,
- přirozenou odolnost dřeva proti dřevokazným houbám.

Znalost a vyhodnocení těchto základních faktorů pro konkrétní podmínky pak umožňuje kvalifikovaně posoudit nutnost případné další ochrany konkrétní dřevěné konstrukce i její způsob – konstrukční, chemická aj.

**Přirozená trvanlivost dřeva** je jeho odolnost proti napadení dřevokaznými organismy. Pro jednotlivé dřeviny se zkouší metodami popsány v příslušných evropských normách a výsledky se porovnávají s výsledky referenčních dřevin. Na základě zkušebních výsledků se přirozená trvanlivost konkrétní dřeviny proti napadení biotickými škůdci klasifikuje:

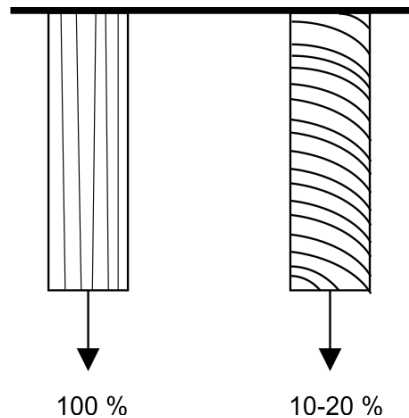
Přirozená trvanlivost dřeva je definována v technických normách ČSN EN 350 – (1,2) - Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Kromě definice uvádí jednotné metody jejího zjišťování a způsoby klasifikace. Stanovuje také impregnovatelnost vybraných dřevin používaných v Evropě.

Přirozenou odolnost dřeva proti dřevokazným houbám je možno podle EN 350–1 experimentálně stanovit či ověřit polní nebo laboratorní zkouškou.

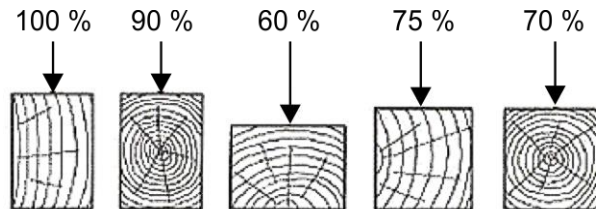
Druh dřeviny	Poměrná trvanlivost při aplikaci dřeva v různých prostředích [%]		
	v exteriéru	ve vodě	v suchém prostředí
dub	100	100	100
borovice stará	85	80	90
borovice mladá	60	70	60
smrk	75	50	75
buk	60	70	40
osika	50	-	95
olše	40	100	38
bříza	40	-	38
topol	30	-	35

## 2.6 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti vyjadřují schopnost dřeva vzdorovat účinkům vnějších mechanických sil. Dřevo je stavební materiál, který má velmi nestejnou strukturu a v různých směrech má velice odlišné vlastnosti, je to anizotropní materiál. Obecně jsou **mechanické vlastnosti ve směru vláken několikanásobně vyšší než kolmo na vlákna**.



Obrázek 01: **Rozdíl pevností v tahu dřeva ve směru a kolmo na směr vláken**



Obrázek 01: **Závislost pevnosti v tlaku na směru působící síly a tvaru tělesa**

Jsou výrazně ovlivňovány zejména vlhkostí a hustotou, ale také řadou dalších činitelů jako je konstrukční rozměr, vady dřeva, rychlost zatěžování aj. Zkoušení dřeva se provádí na vzorcích (případně se provádí přepočet) o vlhkosti dřeva 12%, platí však, že **čím vyšší bude vlhkost dřeva, tím nižší bude jeho pevnost** (tento trend se zastavuje na mezi nasycení vláken, tj. cca 30% vlhkost, pak se již pevnost dřeva nemění). U hustoty dřeva stejného druhu dřeviny platí, že čím je vyšší, tím je vyšší i pevnost dřeva.

Mechanické vlastnosti dřeva lze rozdělit do tří skupin a to na základní, odvozené a technologické. Mezi základní lze zařadit pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost dřeva. Mezi odvozené vlastnosti řadíme tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu.

**Mezi mechanické vlastnosti můžeme zařadit:**

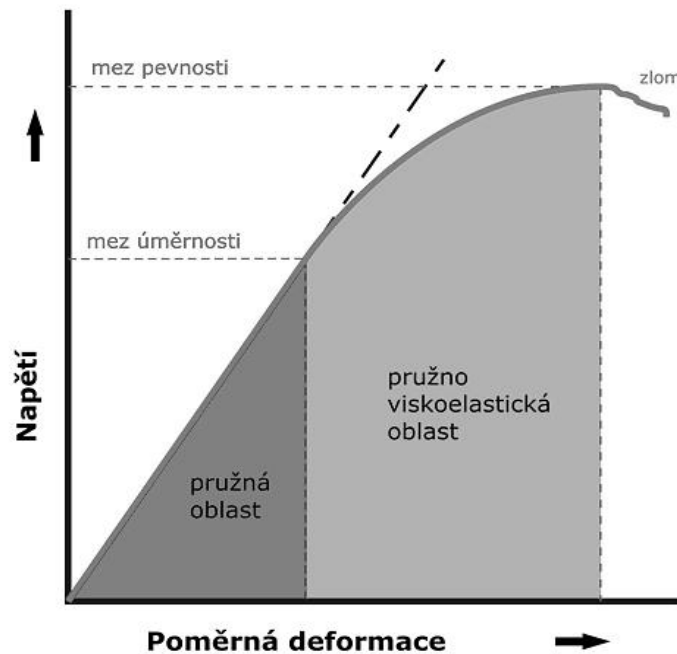
**Pružnost dřeva** – vratná deformace dřeva působením vnějších sil, dřevo se ale po jejich působení vrací do původního tvaru. **Modul pružnosti** vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva, udává se v MPa. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeviny, na vlhkosti, na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti. Modul pružnosti dřeva v ohybu je nejčastěji používaným údajem při dimenzování stropů, krokví a jiných vodorovných nosníků. Modul pružnosti v ohybu se v literatuře často značí zkratkou MOE z anglického – Modulus of Elasticity.

**Pevnost dřeva** – je nevratná deformace nebo celkové porušení dřeva působením vnějších sil.

### 2.6.1 Modul pružnosti

Zkouší se podle normy ČSN EN 408. Modul pružnosti v tahu i tlaku je charakterizován podílem napětí a poměrné deformace. Průměrná hodnota modulu ve směru vláken se pro domácí dřeviny udává v rozpětí 9 000 - 15 000 MPa při  $w = 12\%$ . Napříč vláken je tato hodnota až 25x menší, přičemž v radiálním směru je o 20 - 50% vyšší než ve směru tangenciálním.

Modul pružnosti ve smyku se pro naše dřeviny se pohybuje v rozpětí 100 - 2 000 MPa. Nejmenší hodnoty dosahují v příčné a největší v radiální rovině.



Obrázek 02: Pracovní diagram dřeva při zkoušce v tlaku podél vláken

### 2.6.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva vůči jeho trvalému porušení. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa - napětím na mezi pevnost  $\sigma_p$ . Pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje síla v okamžiku porušení tělesa. Jedinou výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, která je definována jako konvenční pevnost, jelikož zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout.

**Podle druhu namáhání rozeznáváme pevnost dřeva:**

- v tahu
- v tlaku
- ve smyku
- v ohybu

# PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

- v kroucení

**S ohledem na směr působící síly k orientaci vláken a letokruhům dřeva rozlišujeme:**

- pevnost v tlaku ve směru vláken ( $\sigma_p \parallel$ )
- pevnost v tlaku napříč vlákny
  - o ve směru radiálním ( $\sigma_p$  kolmo - R)
  - o ve směru tangenciálním ( $\sigma_p$  kolmo - T)

**V následující tabulce jsou uvedeny mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin (Zdroj: Ústav nauky o dřevě, LDF, podklad pro výuku, 2003).**

objemová hmotnost	pevnost v tlaku	pevnost v				modul pružnosti	tvrdost dle Janky	
		tahu $\parallel$	tahu $\perp$	ohybu	smyku		$\parallel$ s vlák- ny	$\perp$ na vlákna
[kg.m <sup>-3</sup> ]	[MPa]	[MPa]				[GPa]		
800	23	90	2,7	78	6,7	11	270	160

	HUSTOTA	TAH		TLAK		OHYB		SMYK
		$\parallel$	$\perp$	$\parallel$	$\perp$	Mez pevnosti (MOR)	Modul pružnosti (MOE)	
	[kg / m <sup>3</sup> ]	[MPa]						
jedle	430	78	1,4	33	4,7	67	9 600	5,5
smrk	440	84	1,5	30	4,1	60	9 100	5,3
borovice	530	102	2,9	54	7,5	98	11 750	9,8
modřín	600	105	2,2	54	7,3	97	13 500	8,8
topol	340	84	1,5	35	3	64	10 700	7,6
osika	460	100	2,7	47	2,6	77	10 700	7,7
vrba	520	83	2,4	36	3,4	65	9 800	6,7
lípa	540	83	4,9	51	1,8	104	7 300	4,4
olše	550	92	2	54	6,4	83	11 500	4,4
kaštanovník	610	121	5	49	5	75	8 800	7,8
javor	630	100	5,2	45	6,4	97	10 300	9,8
jilm	670	84	3,9	55	9,8	87	10 800	6,9
ořešák	690	98	3,5	71	11,8	124	12 300	6,9
jasan	700	142	6,9	51	10,8	118	13 100	12,5
dub	700	108	3,3	42	11,5	116	11 600	12,7
buk	720	130	3,5	46	7,9	104	13 100	12,3
bříza	730	134	6,9	50	10,8	134	16 100	11,8
akát	760	133	4,2	70	18,6	102	11 000	12,5
habr	820	153	3,8	54	16,7	140	14 700	16,9

### 2.6.3 Statická pevnost

**Pevnost v tahu** - odolnost dřeva proti působení síly, která se jej snaží prodloužit, při překročení meze pevnosti dřevo praská. Pevnost v tahu se zkouší podle ČSN 49 0113 a ČSN 49 0114.

**Pevnost v tlaku** - odpor, který klade dřevo vnější síle, jež se snaží dřevo stlačit. Pevnost v tlaku se zkouší podle ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112.

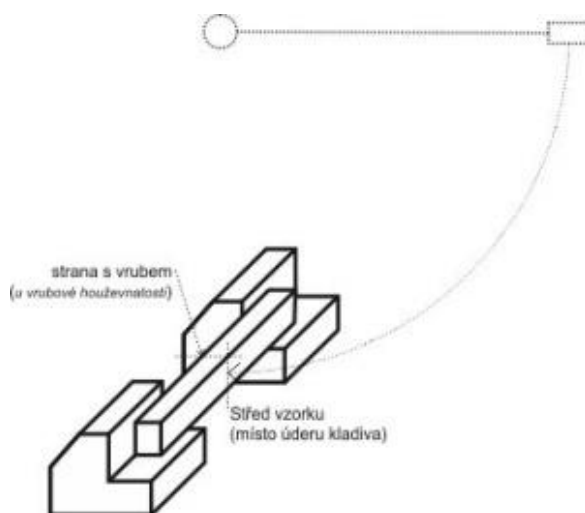
**Pevnost ve smyku** - odolnost dřeva proti působení vnějších sil, které se snaží posunout jednu část tělesa po druhé. Pevnost ve smyku se zkouší podle ČSN 49 0118.

**Pevnost v ohybu** - schopnost dřeva odolávat zatížení, je-li materiál podepřen a síla působí mimo tyto podpěry. Pevnost v ohybu je zkoušena podle ČSN 49 0115. (nosníky, stropní trámy aj.).

**Pevnost ve vzpěru** - zvláštní případ tlakové pevnosti, částečně zde spolupůsobí pevnost v ohybu. (např. u stojek a sloupů)

### 2.6.4 Dynamická pevnost

Je to odpor materiálu proti namáhání, které se často mění nárazem nebo rychlými změnami zatížení. Odolnost dřeva vůči dynamickému (rázovému) namáhání vyjadřujeme houževnatostí dřeva. **Rázová houževnatost dřeva** je tedy schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem. Vyjadřuje se energií spotřebovanou na přeražení dřeva definovaných rozměrů. Je zkoušena přerážecí zkouškou dle ČSN 49 0117. Při přerážecí zkoušce naráží na střed zkušebního vzorku kyvadlové kladivo z konstantní výšky. Zjišťujeme energii potřebnou k porušení tělesa při působení dynamického zatížení. Rázovou houževnatost vypočítáme z poměru energie a příčných rozměrů zkušebního tělesa.



Obrázek 03: Zkoušení, Charpyho kladivo

Podle vzhledu lomu můžeme určit jakost dřeva.

- Jakostní dřevo - lom třískovitý a dlouze vláknitý.

- Nekvalitní, křehké dřevo - lom hladký.
- Průměrně jakostní dřevo - lom zubovitý.

Houževnatost dřeva je silně ovlivněna vadami dřeva, sušením dřeva při vyšších teplotách, násilnou impregnací, atd.

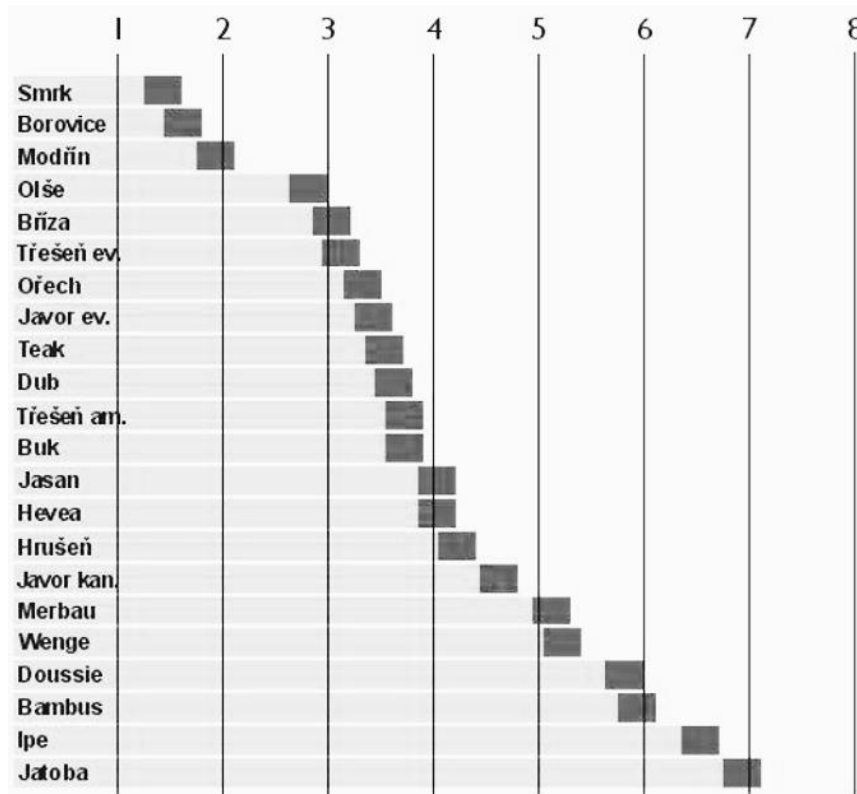
Mezi houževnaté dřeviny můžeme zařadit například jasan, dub, buk, tis nebo smrk.

### 2.6.5 Tvrdost dřeva

Tvrdost dřeva vyjadřuje velikost jeho odporu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost dřeva ovlivňuje: směr vláken, vlhkost dřeva, objemová hmotnost, anatomická stavba. Podle druhu zatížení se rozlišuje tvrdost statická a dynamická.

Naše dřeviny dělíme podle tvrdosti při  $w = 12\%$  na dřeva:

- **měkká - tvrdost 40 MPa a méně:** smrk, jedle, borovice, topol, lípa – vryp nehtem tvoří zřetelnou rýhu,
- **středně tvrdá - tvrdost 40 - 80 MPa:** jasan, jilmy, duby, ořech – vryp netvoří výraznou rýhu,
- **dřeva tvrdá - tvrdost nad 80 MPa:** habr, akát, tis.



Obrázek 04: Tabulka tvrdosti dřevin dle Brinella. 1-2 měkké dřevo, 2-3 polotvrdé dřevo. 3-4,5 tvrdé dřevo a 4,5-8 velmi tvrdé dřevo.

### 2.6.6 Štípatelnost dřeva

Schopnost dřeva dělit se na části působením klínu. Štípatelnost dřeva se zkouší podle ČSN 49 0119 a ovlivňuje ji opět směr vláken, vlhkost dřeva, objemová hmotnost a anatomická stavba.

### 2.6.7 Ohýbatelnost dřeva

Schopnost materiálu přijmout účinkem vnějších sil nový tvar a podržet ho, i když síly přestaly působit. Ohýbatelnost ovlivňuje množství ligninu ve dřevě. Dřevo se dá plastifikovat teplem a vlhkem, ale také chemicky (např. čpavkem). Po ohnutí se dřevo vysušuje pro zafixování ohybu.

## 2.7 Dřevařské výrobky

- lesní spotřební sortimenty – surové dříví,
- pilařské výrobky – řezivo, přířezky, dýhy,
- materiály na bázi dřeva (překližky, laťovky, výrobky z aglomerovaného dřeva)
- hlavní dřevařské výrobky – stavební dílce, okna.

### 2.7.1 Lesní spotřební sortimenty

Jsou to výrobky z pokácených stromů a vizuálně zatřídované nejméně do dvou jakostních tříd. Pro použití ve stavebnictví se člení:

- výřezy průmyslové (jehličnaté i listnaté) – např. stavební kulatina,
- sloupovina,
- tyče a tyčky (jehličnaté) – např. plotovky, kůly a sloupky,
- rovnané dříví průmyslové – slouží k mechanickému zpracování (např. vlysky) a pro výrobu aglomerovaného dřeva.

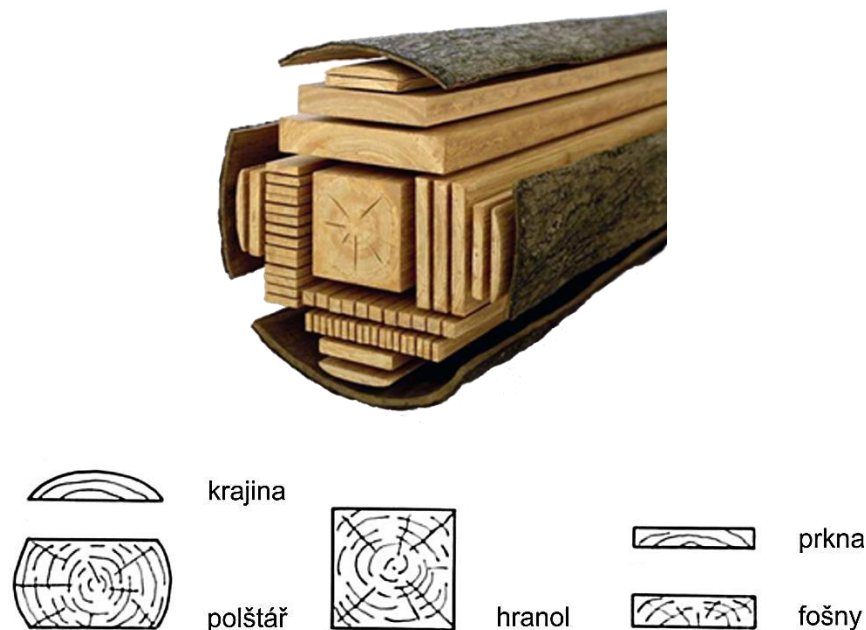
### 2.7.2 Pilařské výrobky

Rozřezáním surového dřeva rovnoměrně s podélnou osou získáme stavební a truhlářský materiál zvaný řezivo.

Dělí se na:

- neopracované řezivo,
- dřevěné pražce,
- přířezy.

Výroba řeziva nejčastěji probíhá ve specializovaných provozech, tzv. pilách za pomoci rámových, kotoučových nebo pásových pil, které kulatinu podélně rozřežou, získáváme tak několik druhů řeziva.



Obrázek 05: Stavební materiál (řezivo) získaný zpracováním kmene stromu

**Podle úpravy povrchu kmene rozlišujeme řezivo omítané a neomítané.** Při omítaném řezivu jsou prkna rovnoměrně oříznuta tak, aby jejich šířka byla v každém místě stejná. Při neomítaném řezivu zůstává na bočních stranách část kmene.

Neopracované řezivo může být podle způsobu výroby omítané (řezivo s pravoúhlým vnitřním průřezem) nebo neomítané (řezivo s rovnoběžnými plochami a jedním nebo dvěma neopracovanými bloky). Podle tvaru a rozměrů příčného průřezu se řezivo dělí na **deskové, hraněné a polohraněné.**

**Deskové řezivo** zahrnuje neomítané i omítané řezivo o tloušťce  $t$  do 100 mm, jehož šířka  $b$  je rovná nebo větší než dvojnásobek tloušťky  $t$ . Dělí se na prkna (s tloušťkou menší než 40 mm), fošny (s tloušťkou 40 až 100 mm) a krajiny (vnější část výřezu, která má na jedné straně řeznou plochu a na druhé oblý povrch kmene).

**Hraněné řezivo** je řezivo pravoúhlého příčného průřezu, jehož šířka  $b$  je menší než dvojnásobek tloušťky  $t$ . Podle plochy příčného průřezu se dělí na hranoly (s tloušťkou větší než 100 mm nebo s plochou příčného průřezu větší než 100 cm<sup>2</sup>), hranolky (s tloušťkou nejvýše 100 mm a plochou příčného průřezu 25 až 100 cm<sup>2</sup>), latě (s plochou příčného průřezu 10- 25 cm<sup>2</sup>) a lišty (s plochou příčného průřezu menší než 10 cm<sup>2</sup>).

**Polohraněné řezivo** je dvoustranně řezané řezivo o šířce  $b$  menší než dvojnásobek tloušťky  $t$ , s oblými boky po výřezu, z něhož bylo vyrobeno. Podle tloušťky se dělí na polštáře (s tloušťkou nejvýše 100 mm) a trámy (řezivo o tloušťce větší než 100 mm, jehož nejmenší šířka odpovídá 2/3 tloušťky).



K dalším pilařským výrobkům patří pražce, přířezy (pro výrobu vlysů a spárovek), dlažební kostky, dýhy (tvořící základ pro výrobu překližek) apod.

## 2.8 Materiály na bázi dřeva

Na mechanicko-fyzikální vlastnosti (a na způsoby aplikace) materiálů na bázi dřeva mají výrazný vliv téměř všechny výrobní parametry. Mezi nejpodstatnější se obvykle uvádí: druh dřeviny, velikost, geometrie, orientace, formování a kvalita třísek, typ a množství použitého lepidla a přídatných látek a lisovací faktory (lisovací čas, teplota a tlak, rychlost uzavírání lisu, vlhkost, chemické reakce při lepení třísek, plastifikace, formát výrobku), které vzájemnou interakcí v průběhu lisování třískového koberce usměrňují zejména tvorbu hustotního profilu charakterizující rozložení hustoty v deskách.

Obvykle platí, že se zmenšující se velikostí částic se zlepšuje možnost jejich formování, což má za následek stoupající hustotu vyráběného materiálu. Současně také platí, že pro materiály se stejnou hustotou, se zmenšující se velikostí částic klesá pevnost.

### 2.8.1 Základní rozdělení materiálů na bázi dřeva

- **Masivní materiály** – materiály, které mají původní strukturu a uspořádání buněk dřeva (např. spárovky, biodesky...).
- **Překližované materiály** – materiály vytvořené vzájemným splením lišících se vrstev, zpravidla lepených na sebe pod úhlem 90° (křížem). Mezi tyto materiály se řadí např. lamely, překližky, laťovky....
- **Aglomerované materiály** – materiály vyrobené spojením drobných dřevních částic (vláken, třísek...) pomocí lepidla a tlaku.
- **Kompozitní materiály** – heterogenní materiály složené z více odlišných surovin, které mají rozdílné vlastnosti. Mezi kompozitní materiály se někdy zahrnují i aglomerované a překližované materiály.





Obrázek 06: Příklady nejčastějších dřevních částí používaných pro výrobu materiálů na bázi dřeva (z vrchu a zleva): dýhy, velké ploché štěpky, štěpky, hobliny, dřevní vlna, dřevní vlákna a dřevní moučka.

**Dýha** je tenký list dřeva o tloušťce 0,2 – 5 mm vyrobený z kvalitní dýhárenské kulatiny centrickým nebo excentrickým loupáním, krájením nebo řezáním. Z takto připravených dých se vyrábí překližky.



Obrázek 07: Způsoby získávání dých.

**Překližovaná deska** je deskový materiál tvořený souborem tří a více vrstev navzájem slepených dých (tenkých vrstev dřeva), přičemž směry vláken sousedních vrstev jsou zpravidla na sebe kolmé.

**K překližovaným deskám** patří překližky (tvořené několika vrstvami dých), laťovky (překližky s jádrem), dýhovky a složené desky a podle trvanlivosti prostředí se dělí na desky použitelné v suchém, vlhkém a venkovním prostředí.

**Laťovky** se pak vyrábí tak, že se mezi překližky vkládá jádro, tvořené slepenými nebo neslepenými laťkami z masivního dřeva. Plášť tvoří jedna nebo více vrstev překližených dých. V případě dýhovek se mezi překližky vkládá jádro z pruhů loupané dýhy.

**Vrstvené dřevo** je materiál podobný překližce, ovšem na rozdíl od překližek jsou dýhy slepovány zpravidla s vlákny v jednom směru (podélném). Jako pojivo se používá fenolová pryskyřice. Prvky z vrstveného dřeva lze použít na příruby I-nosníků, při výstavbě hal apod. Pevnost v ohybu se pohybuje kolem 50 MPa a modul pružnosti kolem 14 000 MPa.

**Desky z aglomerovaného dřeva** jsou materiály, které vznikají spojením rozdělené dřevní hmoty, spojené minerálními (cement) nebo polymerními (pryskyřičnými) pojivy. Mezi tyto výrobky patří:

- dřevotřískové desky,
- dřevovláknité desky,
- dřevoštěpkové desky,
- heraklit,
- cetris.

**(Dřevo) třísková deska** (DTD) je deskový materiál z dřevěných částic (dřevěných třísek, hoblin, pilin, lamel apod.) nebo jiných celulózových částic (lněné a konopné pazdeří, bagasa) s přísadkou lepidel (většinou fenolformaldehydovými), vyrobený lisováním za tepla. Ve stavebnictví se používají pro vnitřní zařízení, pro nosné účely, akustické účely, ztracené bednění apod. V současnosti jsou nejznámější OSB desky, neboli desky z orientovaných plochých třísek (Oriented Strand Board).

**Deska z plochých orientovaných třísek** (OSB) je vícevrstevná deska z dřevěných třísek a lepidla. Třísky mají přesně stanovený tvar a tloušťku. Ve vnějších vrstvách jsou orientovány rovnoběžně s délkou nebo šířkou desky a lamely ve vnitřní vrstvě jsou orientovány zpravidla v kolmém směru ke třískám vnější vrstvy.

**Deska pojená cementem** je deskový materiál vyráběný lisováním dřevěných nebo jiných rostlinných částic pojených hydraulickým cementem, který může obsahovat různé přísady.

**(Dřevo) vláknitá deska** (DVD) je deskový materiál vyrobený z ligno-celulózových vláken pomocí tepla a s nebo bez působení tlaku. Soudržnosti je dosaženo buď jejich přirozenou lepivostí nebo aplikací pryskyřic na vlákna. Jako zdroj vláken se používá, např. řepková sláma, len a konopí. Uplatnění nalézají tyto desky např. jako laminátové podlahy, čímž do jisté míry nahrazují používané vlasy. Lze je vyrábět mokřím nebo suchým způsobem. Mokřím způsobem se postupuje tak, že se vlákna naředí vodou a po přidání přísad se hmota lisuje. Při suchém způsobu se vlákna obalují práškovými lepidly, proudem vzduchu se navrství do surové matrace, které se pak přelisuji a za horka se z nich lisují desky. Příkladem nelisovaných desek jsou HOBRA desky, lisovaných pak SOLOLIT nebo BUKOLIT.

**MDF (Medium Density Fiberboard)** – vláknité desky se střední hustotou (často nazývány středně tvrdé vláknité desky). Vyznačují se stejnorodou strukturou slisovaných vláken v celém svém průřezu. Jsou vyráběny jako jednovrstvé i vícevrstvé. Do této skupiny zařazujeme desky s hustotou od 350 do 850 kg/m<sup>3</sup>.

**WPC** (*Wood Plastic Composite*) – takto se označují kompozitní materiály vyráběné ze dřeva (dřevních vláken) a polymeru. Optimální poměr dřeva a polymeru bývá kolem 2/3 dřeva a 1/3 polymeru, nejčastěji se používá vysokotlaký polyetylén nebo polypropylen nebo PVC. Používají se např. jako obkladové desky, okenní a dveřní rámy a průmyslové podlahy.



Obrázek 08: (zleva): spárovka, překližovaná deska, deska z orientovaných plochých třísek (OSB), dřevotřísková deska, izolační (měkká) vláknitá deska, vláknitá deska se střední hustotou (MDF), dřevo-plastová deska (WPC), sendvičový panel (foto převzato z <http://drevene-materialy.fld.czu.cz>)

**Dřevovláknité desky** lze vyrábět mokrým nebo suchým způsobem. Mokrým způsobem se postupuje tak, že se vlákna naředí vodou a po přidání přísad se hmota lisuje. Při suchém způsobu se vlákna obalují práškovými lepidly, proudem vzduchu se navrství do surové matrace, které se pak přelisuji a za horka se z nich lisují desky. Příkladem nelisovaných desek jsou HOBRA desky, lisovaných pak SOLOLIT a BUKOLIT.

**Dřevoštěpkové desky** se vyrábí z uspořádaných (do tří vrstev, kolmo na sebe) borovicových štěpků. Tyto se poté za zvýšeného tlaku a teploty pojené vodovzdornou pryskyřicí lisují (OSB 2,3,4).

**Cementotřískové desky** (Cetris desky) se vyrábějí lisováním z částic na bázi dřeva nebo jiných rostlinných částic pojených běžným portlandským cementem nebo cementy na bázi hořčíku s možnými jinými přísadami (např. hydratačními). Obecně mají cementotřískové desky objemovou hmotnost v rozmezí 1000 – 1500 kg.m<sup>-3</sup>, pevnost v tahu za ohybu přes 10 MPa, výborné zvukově izolační vlastnosti. Desky s doplňkovou izolační vrstvou z pěnového polystyrenu lze použít jako ztracené bednění. Kromě cementotřískových desek se také vyrábějí cementotřískové tvárnice.

**Desky z dřevité vlny** neboli heraklit jsou vyráběny obdobně jako Cetris desky, ovšem jako plnivo je použita dřevitá vlna mineralizovaná vodním sklem.

**Zhuštěné dřevo** se vyrábí lisováním při teplotách 140 – 160 °C a tlaku 10 – 15 MPa, přičemž rychlost lisování je přibližně 1 mm za minutu.

**Modifikované dřevo** je v podstatě chemicky upravené dřevo, které se vyznačuje zejména zvýšenou trvanlivostí, menšími objemovými změnami, výbornými akustickými vlastnostmi. Prvky z modifikovaného dřeva jsou používány v exteriéru např. jako okenní a dveřní rámy a lepené prvky pro mostní konstrukce.

**Lepené lamelové dřevo** je konstrukční prvek vytvořený slepením dřevěných lamel s převážně rovnoběžnými vlákny. Lepené prvky mají řadu výhod, např. do méně namáhaných částí průřezů je možné použít dřevo nižších tříd, řezivo malých rozměrů, skládáním malých průřezů je také možné vyloučit vady apod., těmito postupy lze ušetřit až 30 % dřeva. Též požární odolnost lamelového dřeva je výborná. Díky svým dobrým vlastnostem nalézají lamelové prvky uplatnění ve sportovních halách, stadionech, pavilonech, krovech apod.

## 2.8.2 Celulóзовé materiály

Chemicky se dřevní hmota zpracovává předhydrolyzou, hydrolyzou a delignifikací. Hlavním produktem chemického zpracování dřeva je celulóza (buničina), lze však izolovat a dále využít i ostatní složky (lignin, hemicelulózy, cukry, silice a pryskyřice).

**Papír** je výrobek získaný zplst'ováním jemných celulóзовých vláken zformovaný na papírenském síti. Celulóza, používaná k výrobě papíru, není chemicky čistá a označuje se jako buničina.

**Lepenka** se vyrábí na zvlňovacím stroji rychlostí 100 - 450 m.min<sup>-1</sup>. Zvlňovací stroj vytváří na pásu vlny mezi rýhovacími válci. Vrcholy vln opatřuje lepidlem a slepuje s krycím kartónem. Slepěná lepenka se tepelně vytvrzuje. Lepicí funkci zajišťuje roztok vodního skla nebo syntetické pryskyřice.

Papíry a lepenky obsahují převážnou měrou vlákninu s přídavkem plnidel a dalších přísad. Mezi nejdůležitější používané vlákniny patří: sulfátová celulóza, sulfitová celulóza, dřevovina, bavlna, textilní vlákna, syntetická vlákna, skleněná či jiná vlákna.

Jako plniva jsou využívány: kaolin, hlinité silikáty, saze, CaCO<sub>3</sub> (vápenec, křída), CaSO<sub>4</sub> (sádra), BaSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub> (titanová běloba), ZnO (zinková běloba) a další. K dalším přísadám patří: klíh, škrob, kasein, vosky, parafin, syntetické pryskyřice, změkčovadla, barviva, vodní sklo, ohnivzdorné impregnační prostředky a další.

Papírenské materiály lze charakterizovat jako lehce zápalné a snadno hořlavé materiály. Papír a lepenky se pro potřeby stavebního, lodního, obalového, ale i jiných průmyslových odvětví upravuje tak, aby bylo dosaženo snížení hořlavosti tohoto materiálu.

### Snížení hořlavosti se realizuje zejména těmito způsoby:

- **Změnou vláknitého složení papíru a lepenky přidáním nehořlavých nebo těžce hořlavých vláken** - hořlavá celulóзовá vláknina částečně nebo výrazně nahradí skleněnými, minerálními nebo kovovými vlákny. Speciální použití.
- **Chemickou modifikací vláken** - ještě před výrobou papíru nebo přímo v procesu výroby papíru. Využívá se např. proces strukturální modifikace, při kterém syntetický polymer se sníženou hořlavostí vyplní pórovitou strukturou papíru.
- Přídavkem retardérů hoření – nejrozšířenější způsob úpravy. Retardéry se přidávají do papírenské suspenze, impregnací, postřikem, nátěrem nebo povrchovým klížením.

## 2.9 Způsoby zpracování dřeva

Mezi základní způsoby zpracování syrového dřeva patří:

- sušení,
- paření,
- impregnace,
- ochrana proti ohni,
- modifikace.

Primárním cílem **sušení** je snižování až odstranění vlhkosti. Sušení se provádí z toho důvodu, že nesmí dojít k zabudování vlhkého dřeva (dřevěného dílce) do stavby (např. lepené prvky lze zabudovat do konstrukce s vlhkostí max. 15 %). Rozlišujeme sušení přirozené, ke kterému dochází na volných prostranstvích, a sušení umělé v sušárnách.

Pod pojmem **paření** se rozumí klasické ošetření a úprava párou neboli sterilizace dřeva. Tím se dřevo stává tužším a snáze se opracovává. Tento postup je důležitý v případě zpracování dýh.

**Impregnace dřeva** je v podstatě jeho napouštění chemickými přípravky, které jsou většinou jedovaté, a to z důvodu preventivní ochrany proti biologickým škůdcům (dřevomorka, tesařík, červotoč aj.). Impregnaci lze provádět buď za přítomnosti tlaku (tzn. tlaková impregnace) nebo bez použití tlaku (tzn. beztlaková impregnace), jež se provádí např. máčením, nátěry a postřiky.

**Ochranou proti ohni** rozumíme snížení hořlavosti daného materiálu. V případě dřeva se používá tzv. dusících plynů, které zamezují přístupu kyslíku a tím znemožňují průběh exotermické reakce hoření.

**Modifikace** je chemická úprava dřeva, při které jsou hydroxylové skupiny OH (obsažené v celulóze, hemicelulóze a ligninu) nahrazeny jinými skupinami. Hydroxylová skupina totiž hraje zásadní roli v tom, jak dřevo přijímá vlhkost. Pokud je hydroxylová skupina nahrazena jinou skupinou, pak dřevo zůstává trvale suché a jeho trvanlivost a biologická odolnost se výrazně zvětšují. Nejčastější modifikací dřeva je acetylace a teplotní modifikace.



## ZDROJE A DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J. *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda, a.s. Bratislava, 1997. 485 s.

KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH D. 2005. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko technologická v Praze. Praha. 190 stran. ISBN 80-7080-568-4.

REINPRECHT, L. *Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1996. 176 s. ISBN 80-7157-194-6.

LYSÝ, F., JÍRŮ, P. *Nauka o dřevě*. Praha: SNTL, 1954. 760 s.

CALLISTER, WILLIAM D. 2007. *Materials Science and Engineering: an introduction*, ISBN 978-0-471-73696-7.

EDWARD ALLEN, JOSEPH IANO. 2013. *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods, 6th Edition*. 1024 pages ISBN: 978-1-118-13891-5.

SVOBODA, L. a kolektiv, 2013. *Stavební hmoty*. 3. Vydání. Praha. ISBN 978-80-260-4972-2. Online: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>.

## 3 POLYMERY



### CÍLE KAPITOLY

Cílem kapitoly je základní seznámení s polymerními materiály využitelnými ve stavebním průmyslu.



### RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

Kapitola „Polymery“ seznamuje posluchače se základním rozdělením, způsoby výroby, využitím a zkoušením polymerních materiálů.



### ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

Na prostudování kapitoly „Polymery“ je potřeba 48 hodin.



### KLÍČOVÁ SLOVA

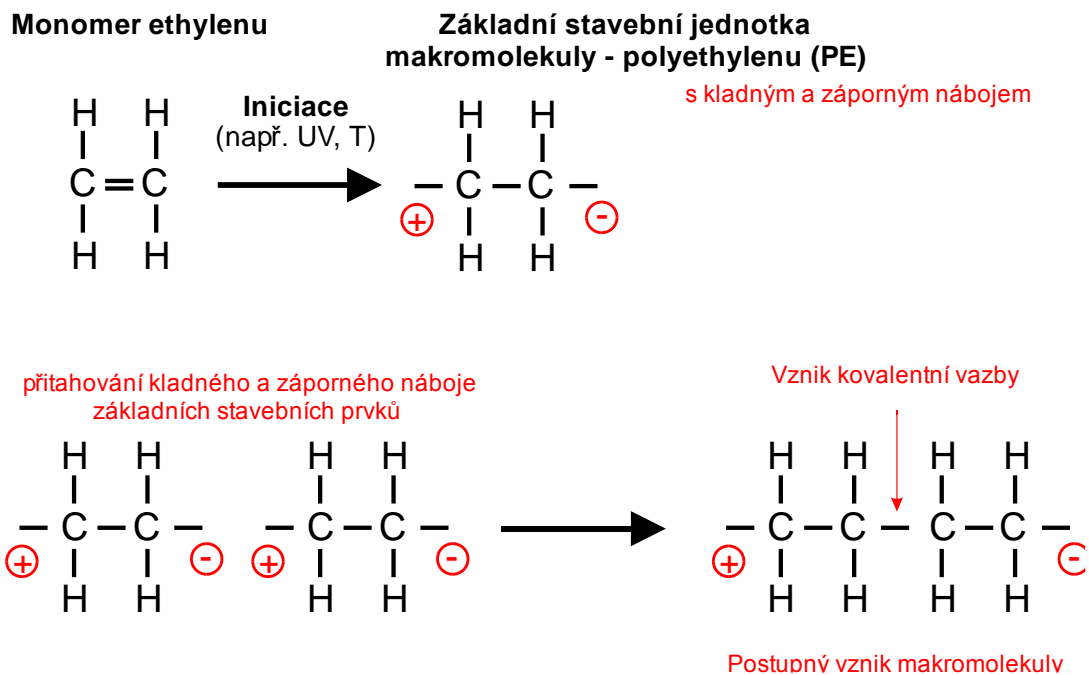
Polymer, plast, monomer, makromolekula, vazby, elastomery, reaktoplasty, termoplasty, kaučuky, polymerace, kopolymerace, polykondenzace, polyadice.

### 3.1 Úvod

Polymery označujeme makromolekulární látky, které jsou vytvářeny řetězci na bázi uhlíku. Další řetězce mohou být na bázi jiného prvku, např. křemíku (silikony). Řetězce jsou vytvářeny základními stavebními prvky – monomery. V přeneseném slova smyslu se jedná o

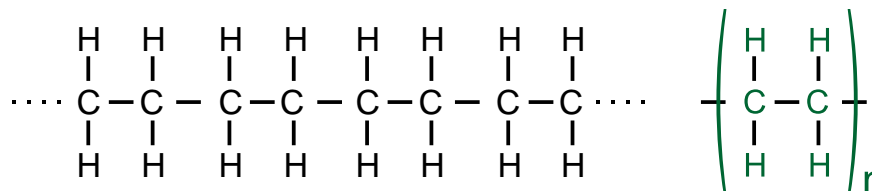


velice variabilní chemickou stavebnicí umožňující mimořádnou variabilitu struktur i vlastností výsledných látek. Tyto vlastnosti závisí na mnoha faktorech, zejména na druhu monomeru/ů a jejich uspořádání, délce vytvořených řetězců nebo třeba teplotě prostředí při reakci. Záleží také na soudržnosti jednotlivých řetězců. Pevné řetězce s vysokou orientací dávají látky mající větší pevnosti, vyšší bod měknutí a některé se jen málo opotřebovávají. Naopak zeslabení polární soudržnosti řetězců zavedením nepolárních substituentů do makromolekuly vede k získání hmot měkkých a pružných.



Obrázek 09: Příklad tvorby makromolekulární látky - polymerace polyethylenu (PE)

**Konečný produkt – polymer** je vyjádřen svým strukturálním („nekonečným“) vzorcem nebo chemickým vzorcem stavební jednotky, která se  $n$  – krát opakuje, obvykle  $n = 10^3$  až  $10^6$  = polymerační stupeň.



Obrázek 01: Konečný produkt – polymer polyethylenu (PE)

### 3.2 Rozdělení polymerů

Polymery jsou chemické látky, které vykazují díky své variabilitě velmi širokou škálu vlastností. Polymery lze rozdělit dle různých kritérií. Základní rozdělení lze vysledovat v tabulce.

Rozdělení polymerů		
<p><b>Podle výchozích surovin</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Přírodní</li> <li>- Umělé (syntetické, polosyntetické)</li> </ul>	<p><b>Podle vzniku</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Polymerací</li> <li>- Polykondenzací</li> <li>- polyadící</li> </ul>	<p><b>Dle chemického složení</b></p> <p>Polyolefiny</p> <input type="checkbox"/> Polystyrény
<p><b>Podle chování za tepla</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Termoplasty</li> <li>- Reaktoplasty (Termosety)</li> </ul>	<p><b>Podle přetvárných vlastností</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elastomery</li> <li>- Plastomery</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Chloroplasty
<p><b>Podle druhu výrobků</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desky, folie, profily, trouby...</li> </ul>	<p><b>Podle účelu použití</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Výztuže, izolace tepelné, zvukové, proti vodě, nátěry ...</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Fluoroplasty
<p><b>Podle druhu přísad</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- neplněné plasty</li> <li>- plněné plasty</li> </ul>	<p><b>Podle aplikace</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desky, folie, profily, trouby...</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Polyestery
		<input type="checkbox"/> Akryláty
		<input type="checkbox"/> Vinilové polymery
		<input type="checkbox"/> Polyamidy
		<input type="checkbox"/> Polyuretany
		<input type="checkbox"/> Silikony
		<input type="checkbox"/> - O, Si ( -O-Si-O-Si-)
		<input type="checkbox"/> Deriváty celulozy

Podle původu je můžeme rozlišit jako polymery **přírodní** a polymery **syntetické**.

#### 3.2.1 Přírodní polymery

- polysacharidy  
(škrob, celulóza), jejichž stavebními jednotkami jsou jednoduché sacharidy – monosacharidy
- bílkoviny  
(proteiny) – jejich stavebními jednotkami jsou aminokyseliny
- nukleové kyseliny - jejich stavebními jednotkami jsou nukleotidy
- polyterpeny (přírodní kaučuk) - jejich stavebními jednotkami je isopren (methylbutadien)

## Polysacharidy

Polysacharidy lze jinak pojmenovat jako polymerní cukry. Jsou tvořeny monosacharidovými jednotkami, které jsou spojeny glykosidickou vazbou. Velmi často se vyskytují v amorfním stavu a jsou nerozpustné ve vodě. I přes jejich název „cukry“ nemají sladkou chuť.

Pokud se molekula polysacharidu skládá pouze z jednoho druhu monosacharidových jednotek, jedná se o homopolysacharid. V opačném případě hovoříme o heteropolysacharidech.

Polysacharidy můžeme popsat obecným vzorcem  $C_n(H_2O)^{n-1}$ , proto se dříve nazývaly karbohydráty.

V přírodě jsou tyto látky velmi rozšířené. Můžeme je rozdělit mezi **polysacharidy rostlinného původu**, mezi které patří například škroby, celulóza, inulin, pektin a dále **polysacharidy živočišného původu** kde můžeme zahrnout chitin, kyselinu hyaluronovou nebo heparin. Například celulóza je společně s hemicelulózou základní sloučeninou tvořící buňky dřeva a rostlin. (viz kapitola „Dřevo“)

## Oligosacharidy

Mezi oligosacharidy je nejznámější **Sacharosa (Saccharum)**, což je disacharid složený z glukosy a fruktosy. Jde o rafinovaný cukr vyrobený z cukrové řepy nebo z cukrové třtiny. Využívá se zejména v potravinářství (regulátor chuti) nebo ve farmacii.

**Laktosa (Saccharum lactis)** neboli mléčný cukr je disacharid složený z galaktosy a glukosy. Nachází se v mléku savců a využívá se zejména ve farmaceutickém či potravinářském průmyslu (dětská výživa).

## Přírodní kaučuk

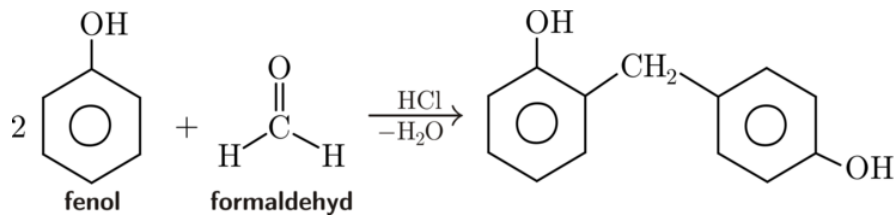
Získává se z tropického stromu kaučukovníku brazilského (*Hevea brasiliensis*). Od počátku 20. století se uměle pěstují na plantážích v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie i Afriky.

Po naříznutí kůry stromu vytéká bílá, mlékovitá kapalina zvaná **latex**, která obsahuje 30 - 40% koloidních částic kaučuku (koloidní částicí se myslí látky, které nejsou schopny krystalizace). Latex se upravuje srážením např. kyselinou mravenčí, pře vodou a suší se buď teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, jinak též uzený kaučuk). Jeho dalšími úpravami (přídavkem plniv, dalších aditiv a vulkanizací) se vyrábí "přírodní kaučuk" čili přírodní pryž. Z jediného stromu lze získat 5 - 25 kg kaučuku.

Po chemické stránce je to polymer 2 - methyl -1,3 - butadienu čili isoprenu a patří mezi elastomery.

## 3.2.2 Umělé (syntetické) polymery

Prvním synteticky vyrobeným polymerem byl bakelit (reaktoplast), který vyrobil v roce 1907 belgický chemik Leo Hendrik Baekeland. Využití bakelitu – kuchyňské přístroje, telefony, elektroinstalační materiál aj.



Obrázek 02: Výroba bakelitu z fenolu a formaldehydu

Syntetické polymery patří mezi jeden z nejmladších, ale zato nejprogresivnějších stavebních materiálů moderní doby. Postupně si vydobýly své místo téměř ve všech průmyslových oborech díky vysokým možnostem modifikace základních makromolekul a tedy možnostem měnit své vlastnosti. V současné době si nedovedeme již představit život bez polymerů ani ve stavebním průmyslu, použití je téměř neomezené. Využívají se například při míchání moderních betonů (přísady, výztuže), přípravě nátěrů či různých ochranných vrstev (pokrytí polymerem), rozvody vody, obalové materiály, kluzné vrstvy, pojiva, těsnění, okenní rámy či výplně oken a množství jiných aplikací.

Můžeme je rozdělit na:

- **polosyntetické**, což jsou přirozené hmoty zušlechtěné chemickými pochody (celulóza, bílkoviny ap.)
- **syntetické** – připravují se z jednoduchých nízkomolekulárních organických sloučenin.

Řetězce syntetických polymerů jsou tvořeny atomy téhož prvku, **nejčastěji uhlíku**, avšak součástí hlavního řetězce mohou být i atomy jiných prvků – kyslíku, dusíku, síry. (Řetězce silikonu tvoří atomy křemíku a kyslíku).

### 3.2.3 Členění polymerů podle chemického složení

- polyolefiny – polyetylen PE, polypropylen PP, apod.,
- polystyrenové plasty – např. standardní polystyren,
- polyhalogenolefiny – PVC, Teflon apod.,
- polyvinylestery – polyvinylacetát,
- polyvinylethery,
- polymery a kopolymery kyseliny akrylové a methakrylové – např. PMMA neboli plexisklo,
- polyethery – např. fenoxypřiskyřice,
- polyestery – polykarbonáty (PC), nenasycené polyesterové přiskyřice (UP),
- polyamidy – např. silon popř. nylon,
- fenoplasty,

- aminoplasty – močovinoformaldehydové a melaminoformaldehydové pryskyřice (UF, UP),
- furanové pryskyřice,
- silikony – silikonové oleje, tmely, pryskyřice a kaučuky,
- epoxidové pryskyřice,
- polyuretany (PUR),
- celulóza a její deriváty.

### 3.2.4 Struktura polymerů

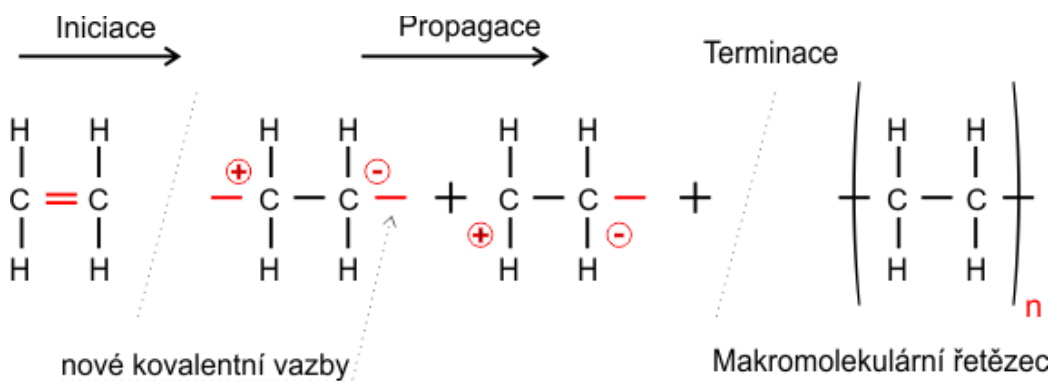
Plasty jsou obecně makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší jak  $10^4$  a z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatou polymerů je *makromolekulární látka* přírodního nebo syntetického původu, která je tvárnitná za působení teploty  $T$  a tlaku  $p$ , v jejichž makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce.

Hlavním převažujícím typem vazby v polymerech (mezi atomy v řetězci) je vazba kovalentní.

**Chemická reakce polymerace sestává ze tří fází: iniciace, propagace a terminace.**

**Iniciací** (nastartování polymerace) – např. zvýšenou teplotou nebo UV- zářením nebo reakcí katalyzátoru v chemickém reaktoru (který obsahuje dané množství molekul monomeru) dojde u několika málo molekul monomeru k posunutí valenčních elektronů uhlíků tak, že okolí jednoho C se projevuje jako kladný náboj, okolí druhého C jako záporný náboj, což vede k zániku (rozštěpení) dvojné vazby molekuly monomeru.

Proces růstu je označován jako **propagace** a ukončení procesu jako **terminace**.

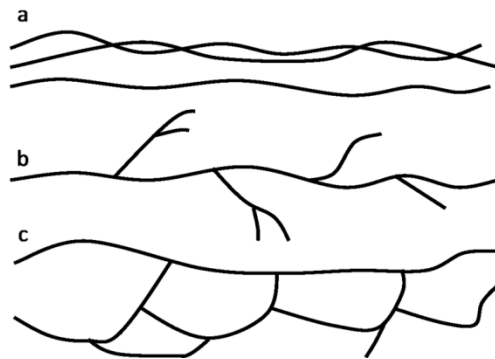


Obrázek 03: Vznik polymerního řetězce, příklad na vzniku PE (Polyetylen)

Struktura polymerních řetězců nemusí být nutně lineární, řetězce se mohou různě větvit a tvořit tzv. polymery rozvětvené, případně se mohou formovat do sítí – polymery zesítěné.

Rozeznáváme tedy tři druhy polymerních makromolekul: *lineární*, *rozvětvené* (typické pro termoplasty) a *zesítěvané* (kaučuky, reaktoplasty):

- **lineární makromolekuly** vznikají tak, že se monomerní molekuly řadí za sebou, jedna vedle druhé. Z prostorových důvodů se mohou více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější prostor. Proto mohou vytvářet polymery o vyšších hustotách (HDPE, HDPP...). Lineární makromolekuly také jednodušeji vytvářejí krystalické struktury, proto mají vyšší obsah krystalických podílů. Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě taveniny mají dobrou zpracovatelnost.
- **rozvětvené makromolekuly** mají na základním řetězci boční větve. Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od lineárních makromolekul nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit. Proto se vyznačují nižší hodnotou hustoty (např. nízkohustotní polyethylen LDPE). Mají horší schopnost krystalizovat a mají nižší stupeň krystalinity. Rozvětvení zhoršuje i pohyblivost makromolekul a tedy i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, které způsobují oddálení sousedních makromolekul, mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností.
- **zesítěvané makromolekuly** mají několik přímých nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami, takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu - prostorovou síť. Tyto polymery nelze tavit a mají nízkou rozpustnost. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, avšak nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Síť mohou být řídké (charakteristické pro elastomerní kaučukovité polymery) nebo husté (reaktoplasty).



Obrázek 01: Makromolekulární struktura polymerů, a - lineární, b - rozvětvené, c - polymery zesítěné.

Uspořádání řetězců má vliv na modul pružnosti  $E$ . Lineární řetězce mají nejnižší, s větvením polymeru se modul pružnosti  $E$  zvyšuje. Mezi různými řetězci jsou přítomny Van der Waalsovy vazby, u reaktoplastů dochází k zesílení struktury kovalentní vazbou.

### 3.2.5 Rozdělení podle chemické konstituce a struktury makromolekul, nadmolekulární struktury a napět'ově deformačního chování

Polymery		
Elastomery	Plasty	
Kaučuky	Termoplasty	Reaktoplasty

**Elastomery** jsou vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek působením síly značně deformovat bez porušení (vratná deformace). Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž (guma).

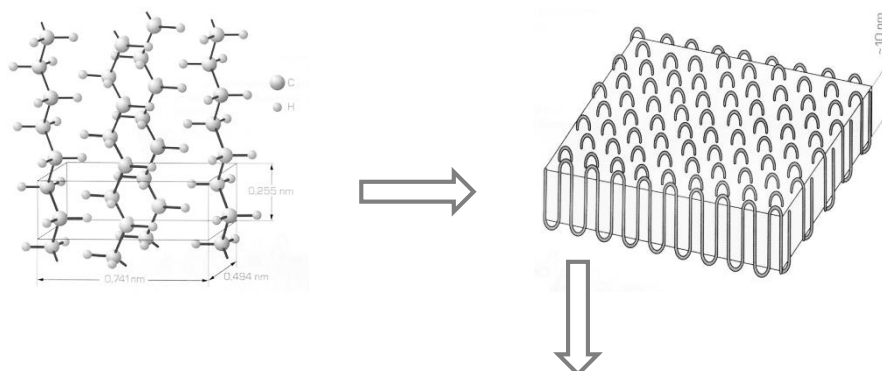
**Plasty** jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými.

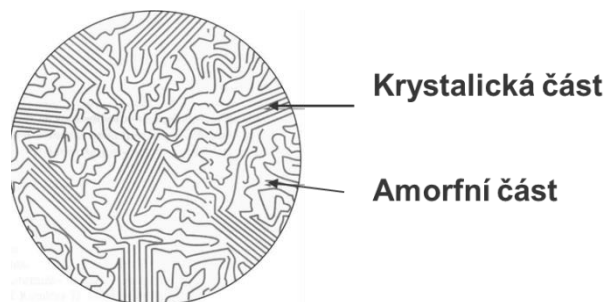
**Termoplasty** – mají výrazné viskoelastické chování, za vysokých teplot jsou rozpustné a proto schopné recyklace, změna z plastického do tuhého stavu je opakovatelně vratná. Tato schopnost je dána pohyblivostí atomů v rámci makromolekulárního řetězce a pohyblivostí mezi řetězci (přítomnost pouze Van der Waalsových vazeb). Vlastnosti, zejména modul pružnosti  $E$ , ovlivňuje větvení jednotlivých makromolekul. Čím je makromolekula více větvená, tím je vyšší modul pružnosti.

Pokud jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou, trvalou), pak se jedná o **reaktoplasty (termosety, pryskyřice)**. **Reaktoplasty** mají zesíťovanou strukturu makromolekul (přítomnost kovalentních vazeb mezi řetězci), které znemožňují schopnost plastické deformace (napět'ově deformační chování je bez výrazné viskoelastické složky), což se projevuje vyšší křehkostí. Zesíťování ovlivňuje pohyb řetězců při zvýšené teplotě, výsledkem působení vysoké teploty je tedy chemická reakce mezi molekulami = dochází k trvalé a nevratné deformaci plasty.

### 3.2.6 Nadmolekulární struktura – stupeň uspořádanosti makromolekul polymerů (morfologie)

Polymery se vyskytují převážně v amorfním stavu. U některých termoplastů s jednoduchými a převážně lineárními řetězci je ovšem možný částečně krystalický stav. Zvyšující se krystalinita pozitivně ovlivňuje tuhost i úroveň mechanických vlastností.





### Amorfní struktura

Polymery amorfní mají strukturu bez jakékoliv uspořádanosti (chaotická struktura), jsou tvrdé a křehké, mají vysokou pevnost a jsou průhledné (nízký index lomu 1,4 až 1,6) a čiré (propouští 92 % světla). Jsou použitelné do teploty zesknění  $T_g$ . Patří zde například PS, PMMA, PC, atd. **Amorfní stav je typický pro reaktoplasty se složitější strukturou.**

### Krystalická (semikrystalická) struktura

Polymery vykazují určitý stupeň uspořádanosti vyjádřený stupněm krystalinity od 40 % do 90 % (100 % není možné). Základním útvarem struktury jsou takzvané **lamely** – tenké hranoly (o tloušťce cca 10 nm) do nichž jsou uspořádány lineární makromolekuly. Částečně krystalická struktura zvyšuje modul pružnosti, mechanické vlastnosti a teplotu skelného přechodu  $T_g$ . Tyto polymery jsou použitelné do teploty tání  $T_m$ . Patří zde například PE, PP, PA, PTFE, POM, atd.

### 3.2.7 Fázové stavy polymerních materiálů

Vysoká molekulová hmotnost polymerů způsobuje, že jejich bod varu je ve všech případech vyšší, než je teplota jejich rozkladu (degradace) = **neexistuje plynný stav**. Polymery se mohou nacházet pouze v kapalném nebo tuhém stavu.

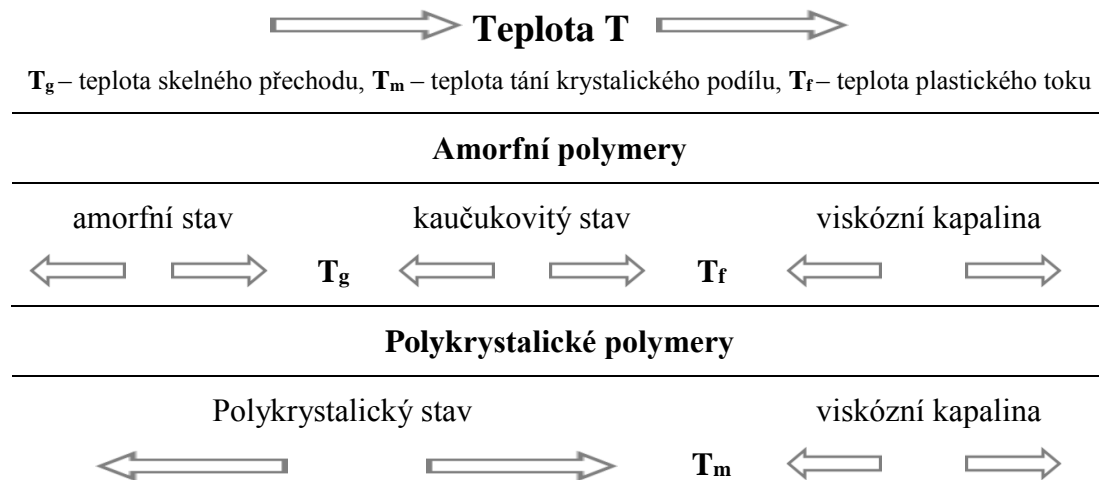
Podle uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhém stavu rozlišujeme vysoce uspořádaný stav – **krystalický** a téměř neuspořádaný stav – **amorfní (sklovitý)**.

Na rozdíl od nízkomolekulárních látek je pro polymery charakteristický ještě přechodový stav mezi stavem sklovitým a kapalným, tzv. stav **kaučkovitý**.

Z hlediska teplotního chování amorfního polymeru jej lze charakterizovat teplotou **zesknění  $T_g$**  (teplota skelného přechodu), u krystalického polymeru **teplotou tání  $T_m$** .



Schematické rozdělení jednotlivých fází v krystalickém a amorfním polymeru v závislosti na rostoucí teplotě.



U reaktoplastů byla při jeho přípravě v materiálu vytvořena velmi hustá trojrozměrná síť chemických vazeb. Díky nim nevykazují reaktoplasty teploty  $T_f$  ani  $T_m$  a jejich vlastnosti nejsou teplotně závislé. Na rozdíl od elastomerů, které vykazují významné elastické vlastnosti, jsou reaktoplasty díky rigidní trojrozměrné struktuře křehké.

### 3.2.8 Dělení plastů podle druhu a použití přísady

- **neplněné plasty** – neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice.
- **plněné plasty** – plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu.

Podle účinku lze aditiva dělit na **přísady modifikující fyzikální vlastnosti plastů** nebo **přísady s ochranným účinkem vůči degradaci**. Podle výsledného požadovaného efektu přísady dělíme na plniva, stabilizátory, změkčovadla a plastifikátory, mazadla a přísady zvyšující tekutost, retardéry hoření, barviva a pigmenty, nadouvadla, retardéry hoření, adhezivní činidla aj.

Dále rozeznáváme plniva s funkcí **vyztužující** (skleněná, uhlíková, kovová, bavlněná/ krátká nebo dlouhá vlákna) a **nevyztužující** plniva ve formě prášku, které se přidávají většinou z důvodu snížení ceny materiálu (moučka z břidlice, kaolinu, křída, aj). Obsah nevyztužujících plniv bývá až 70 %.

#### Příklady nevyztužujících přísad

Stabilizátory (tepelné, světelné) jsou určeny k zpomalení degradačních procesů a zvýšení životnosti součásti. (např. saze)

Maziva (obsah do 1 %) usnadňují zpracování polymerů tím, že snižují viskozitu polymeru nebo zabraňují lepení výrobku na stěnu formy.

Barviva (obsah do 10 %) dávají plastům požadovaný barevný odstín. Většinou se používají barevné pigmenty založené na anorganických sloučeninách kovů (zejména oxidy železa). Organická barviva se používají v případě potřeby zachování průhlednosti polymeru.

Změkčovadla zlepšují houževnatost, zpracovatelnost a ohebnost materiálu (snižují mechanické vlastnosti).

Retardéry hoření působí samozhášivě, zpomalují proces hoření plastů, případně nedovolí zapálení plastu.

Grafit - zlepšuje kluzné vlastnosti, práškové kovy zlepšují tepelnou vodivost atd.

### 3.3 Výroba polymerů

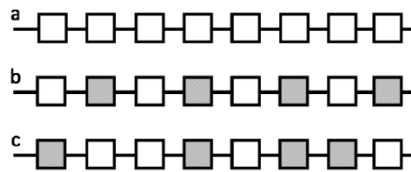
Celkem existují tyto základní způsoby výroby polymerů, které lze také kombinovat, jsou to:

- polymerace,
- kopolymerace,
- polykondenzace,
- polyadice.

V užším slova smyslu lze **polymeraci** definovat jako polyreakci projevující se tím, že u mnoha stejných monomerů dochází k uvolnění nenasycených uhlíkových vazeb nebo vazeb určitých skupin a k jejich následnému spojení do přímých nebo rozvětvených řetězců (např. PVC). Charakteristické pro polymeraci je to, že vzniklý polymer má stejné procentuální složení jako monomer, a že přitom nevznikají žádné nové nízkomolekulární látky. Jinak řečeno **polymerace je polyreakce, při které reagují monomery na polymer bez vzniku vedlejšího produktu**. Polymerací vznikají například

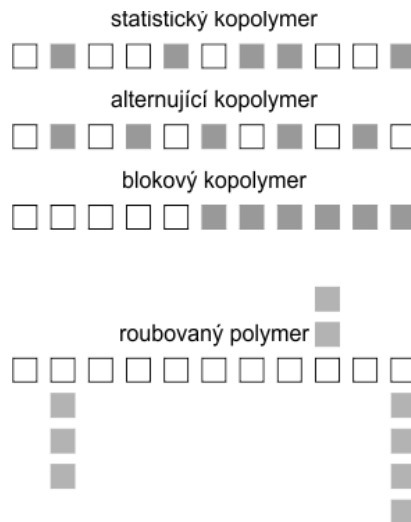
- Polyethylen, PE – fólie, potrubí, láhve, užitkové předměty
- Polypropylen, PP – fólie, elektroizolační materiál, textilní vlákna
- Polyvinylchlorid, PVC – nábytek, tyče, podlahové krytiny, fólie
- Polytetrafluorethylen, PTFE (teflon) – odolný proti teplotám a chemikáliím, kluzné vrstvy
- Polystyren, PS – obalový a izolační materiál

**Polymerní řetězce nemusí být tvořeny stejnými monomerními jednotkami**, pokud však tomu tak je, nazývá se **polymer izotaktický**. Tyto polymery jsou schopny vytvářet krystalické útvary. Pokud se v řetězci opakují pravidelně dvě monomerní jednotky, nazývá se **polymer syndiotaktický**. Tyto polymery jsou schopny omezeně vytvářet krystalické útvary. V případě nahodilého opakování těchto jednotek se jedná o **polymer ataktický**. Polymery nevytvářejí krystalické útvary, jsou amorfní.



Obrázek 02: **a - polymer izotaktický, b - polymer syndiotaktický, c - polymer ataktický.**

**Kopolymerace** se od polymerace liší tím, že řetězce vznikají spojováním různých monomerů. Nejsou to tedy žádné směsi různých polymerů, ale zcela nové makromolekulární látky, které mají zpravidla lepší vlastnosti, než z jednotlivých monomerů vyrobené polymery. Takto vzniká např. butadienstyrenový kaučuk.



Obrázek 03: **Příklady struktury kopolymerů**

Při **polykondenzaci** dochází k mnohonásobně opakované kondenzaci. Může se to stát jen tehdy, obsahují-li reagující nízkomolekulární látky alespoň dvě funkční skupiny (-OH, -NH<sub>2</sub>, -COH, -COOH), aby reakce mohla probíhat bez omezení na obě strany. Polykondenzace je tedy polyreakce dvou různých monomerů, při které vzniká vedlejší produkt. Jako příklad polykondenzace lze například uvést vznik polyesterů, fenolformaldehydových pryskyřic či polyamidů.

- Polyester – textilní vlákna (tesil), sklolamináty
- Polyamidy – vlákna (nylon, silon)
- Fenolformaldehydové pryskyřice (fenoplasty, bakelity) – laky

**Polyadice** je reakce, při níž za přídavku katalyzátorů vznikají makromolekulární látky postupnou adicí na funkční skupiny. Nevznikají zde tedy žádné vedlejší nízkomolekulární látky, jako je tomu v případě polykondenzace. Jako příklad lze uvést polyuretanovou či epoxidovou pryskyřici.

### 3.4 Zpracování plastů

Technologie zpracování plastů je podrobně a uceleně popsána ve skriptech Technologie II – část 2. - Technologie zpracování plastů, proto se zde omezíme pouze na výčet jednotlivých technologií.

Metody tváření plastů lze v zásadě rozdělit na dva základní typy, **zpracování za vysokých teplot a tlaků** (tváření polymerů v plastickém stavu), hlavní technologie při tomto procesu jsou vstřikování, vytlačování, válcování a lisování a **zpracování za nízkých tlaků** (zpracování kapalných systémů – roztoků nebo disperzí polymerů – a zpracování monomerů a oligomerů, takto se děje lití do bloků, dutých těles a fólií, zalévání a impregnace, vrstvení a natírání, máčení apod).

#### Základní způsoby zpracování plastů

- Vytlačování
- Vstřikování
- Vyfukování
- Mechanické a pneumatické tvarování termoplastů
- Lisování a přetlačování plastů
- Válcování
- Odlévání

**Vytlačování** je technologická operace, při které je tavenina plastu kontinuálně vytlačována přes profilovací zařízení (vytlačovací hlavu) do volného prostoru. Technologie vytlačování slouží k výrobě buď konečných tvarů, nebo k výrobě polotovarů. Podle tvaru konečného výrobku nebo tvaru polotovaru se technologie vytlačování mohou rozdělit do tří základních skupin:

- výroba trubek a profilů,
- výroba fólií a desek,
- ostatní způsoby (oplášťování, výroba vláken a povlaků, atd.).

Tyto technologické způsoby využívají hlavně šnekových vytlačovacích strojů.

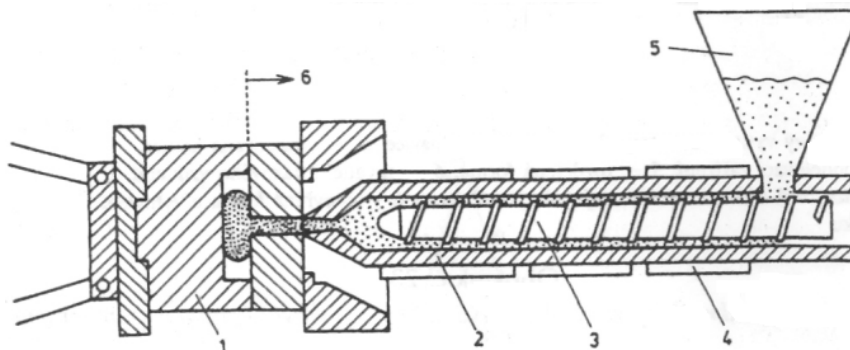
Vytlačováním se připravují také napěněné produkty z PS, LDPE, PP a PVC ve formě většiny typů polotovarů a výrobků, které slouží jako izolační materiály. Jako přísada do plastů se používají různá fyzikální nebo chemická nadouvadla. Proces může být buď jednostupňový, kdy granulát obsahuje již nadouvadlo a k výrobě bude použit vlastní proces vytlačování, nebo dvoustupňový, kdy nejdříve dochází ke smíchání plastu a nadouvadla a teprve potom ve druhém kroku nastává vytlačování.

Vlastní napěnění nejčastěji nastává snížením tlaku taveniny při výstupu z vytlačovací hlavy, kdy se může projevit narůstání objemu, ke kterému by mělo dojít ve všech směrech. Pro snížení tření při kalibraci se používá vzduch. Někdy se aplikují postupy dodatečné expanze

při zahřátí vytlačených výrobků ve vypěňovacích komorách. Vyrábět lze i vícevrstvé produkty nebo laminované výrobky.

**Vstřikování** je způsob tváření plastů, kdy je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové komory vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek. Výhody vstřikování jsou krátký čas cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem.

Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií na zpracování plastů, je to proces diskontinuální, cyklický. Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a kaučuky.



Obrázek 01: : Vstřikování na šnekovém vstřikovacím stroji (1 – částečně naplněná vstřikovací forma, 2 – vstřikovací popř. plastifikační váleček, 3 – šnek, 4 – topení, 5 – násypka, 6 – posun při vyhazování výrobku)

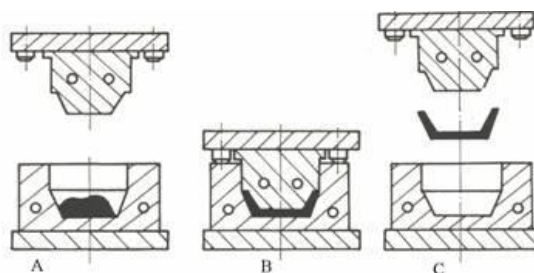
**Vyfukováním** se rozumí takový postup, při kterém je polotovar (předlisek) tvarován ve vyfukovací formě přetlakem vzduchu do tvaru více méně uzavřeného tělesa. Materiál se musí zahřát do plastického stavu, kdy hmota vykazuje potřebnou tvarovatelnost, ale přitom si ještě udržuje dostatečnou soudržnost. Polotovarem může být předlisek vyráběný vstřikováním, vytlačováním nebo i fólie. Vyfukováním se zpracovávají hlavně PE a PP (asi ¾ produkce), PVC a jeho kopolymery a v poslední době PET. V malé míře jsou zastoupeny další termoplasty, jako např. POM, PC, kopolymery PS a jiné.

K nejdůležitějším technologickým parametrům vyfukování patří *teplota* a *tlak*. Z hlediska vlastností výrobků je vhodné používat teplotu co nejvyšší, ale dochází k velkému protahování parizonu, nárůstu smrštění a doby chlazení. Při nízké teplotě není záruka kvalitního svaru ve dně a zhoršují se mechanické vlastnosti. Tlak vzduchu při vyfukování bývá v rozmezí 0,4 až 1 MPa a stlačený vzduch musí působit na vyfouknutý parizon po celou dobu chlazení, aby nedošlo k deformacím. Teplota formy se udržuje mezi 30 až 60 °C.

**Lisování a přetlačování plastů** jsou dva základní technologické způsoby, které byly používány jako jedny z prvních technologických postupů na zpracování plastů. Převážně se

jimi zpracovávají reaktoplasty (fenolické hmoty, aminoplasty, polyestery, atd.). V současné době jsou tyto technologie nahrazovány vstřikováním, neboť se výrazně zkracuje celkový výrobní cyklus, odpadají dodatečné operace, snižuje se prašnost, apod.

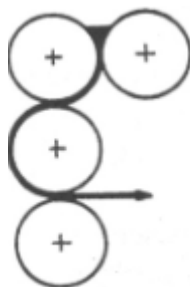
**Lisování** je způsob tváření plastů ve vytápěné formě, nejčastěji ocelové, kdy se na materiál působí tlakem pro dosažení požadovaného tvaru.



Obrázek 02: **Princip lisování termoplastů. A – vložení reaktoplastu do dutiny formy, B – lisování a vytvrzování, C – vyhození vylisku**

**Přetlačování** reaktoplastů je způsob, při kterém se dávka plastu nekládá přímo do tvarové dutiny formy, ale do pomocné dutiny formy, odkud je po zplasticování přetlačena tlakem vtokovými kanály do vlastní dutiny formy. Přetlačování se používá pro vylisky složitých tvarů, pro vylisky se záhlaví, apod.

**Válcování** je technologický způsob, který se používá hlavně k přípravě fólií a podlahovin, koženek, k nanášení polymerů, k míchání, drcení, atd. Válcováním se zpracovávají materiály, jako PVC a jeho kopolymery, HDPE, LDPE, apod.



Obrázek 03: **Válcování na fólie nebo desky**

**Odlévání** je technologie, která je řazena mezi technologie ke zpracování kapalných systémů. Odlévat se dají jak termoplasty (PVC, PMMA, PA, atd.), tak i reaktoplasty (epoxidové, polyesterové, fenolické, apod. pryskyřice, PUR), v omezené míře latexy. Základem této technologie je převedení polymeru do stavu, kdy je hmota velmi dobře tekutá. Výhodou odlévání je výroba dílů bez vnitřního pnutí, výroba tvarově rozdílných dílů najednou, minimální odpad, konstrukční jednoduchost a nízké náklady na formy a stroje. Nevýhodou je omezení počtem vhodných plastů, nízká rozměrová přesnost, dlouhé pracovní cykly. Podle pohybu formy se odlévání dělí na gravitační, rotační a odstředivé.

### 3.4.1 Rozdělení plastů podle aplikace

- **plasty pro široké použití**, mezi které patří polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF),
- **plasty pro inženýrské aplikace**, zde lze zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymetylmakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice,
- **plasty pro špičkové aplikace**, zde lze zařadit polysulfon (PSU, PES, PPSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI), aj.

## 3.5 Vlastnosti polymerů

Fyzikální i chemické vlastnosti vysokomolekulárních látek jsou závislé na jejich struktuře, délce a vzájemném vztahu řetězců makromolekul. **Při technickém použití těchto látek záleží zejména na mechanických vlastnostech** (pevnost v tahu, ohybu, rázu, modul pružnosti, odolnost proti otěru ap.).

**Mechanické vlastnosti polymerů jsou však vysoce závislé na chemickém složení, velikosti a tvaru makromolekul, nadmolekulární struktuře (amorfní, krystalická), ale také na teplotě a čase.**

Mechanické vlastnosti polymerů zjišťujeme pomocí **deformačních zkoušek**. **Vyhodnocuje se vždy vzájemný vztah čtyř proměnných veličin: napětí  $\sigma$ , relativní deformace  $\varepsilon$ , teplota  $T$  a čas  $t$ .**

Mechanickými vlastnostmi rozumíme komplex vlastností, které vykazují polymery vlivem působení vnějších (mechanických) sil.

#### Deformační zkoušky

- **statické zkoušky** – dělí se dále na dlouhodobé (viskoelastické, creep, relaxace napětí) a krátkodobé (pracovní diagram)
- **dynamické zkoušky** – harmonické (cyklické) nebo neharmonické

**Creep** popisuje izotermální časovou závislost relativní deformace v důsledku působení konstantního deformujícího napětí.

**Relaxace napětí** je deformační zkouška, při níž v čase  $t = 0$  je vzorek deformován na určitou konstantní deformaci  $\varepsilon_0$ . Toto je maximální deformační napětí  $\sigma_0$ , které potom pozvolna klesá.

**Pracovní (tahová) křivka** – závislosti napětí na deformaci. Sleduje se deformační chování vzorků stejného průřezu vystavených jednosměrné deformaci ve směru vzorku měnící se konstantní rychlostí ( $d\varepsilon / dt = \text{konst.}$ ).

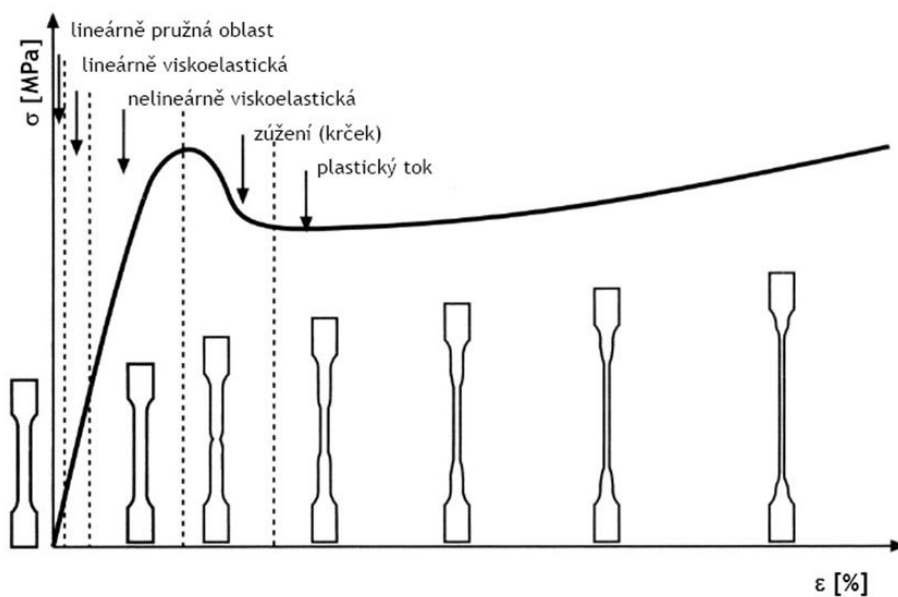
**Dynamické zkoušky** umožňují komplexnější studium viskoelastických vlastností polymeru. Na vzorek působí periodicky proměnné tahové nebo tlakové napětí nebo je vzorek periodicky deformován.

**Podle způsobu stanovení a podle účelu dělíme mechanické vlastnosti na:**

- **krátkodobé** – vliv relaxačních dějů se považuje za zanedbatelný, stanovení požadovaných parametrů proběhne do několika minut (zkouška tahem, zkoušky tvrdosti),
- **dlouhodobé** – podle charakteru působící síly se dělí na statické (relaxace napětí, creepové deformační zkoušky) a dynamické (rázová a vrubová houževnatost, cyklické zkoušky).

### 3.5.1 Zkoušky pevnosti

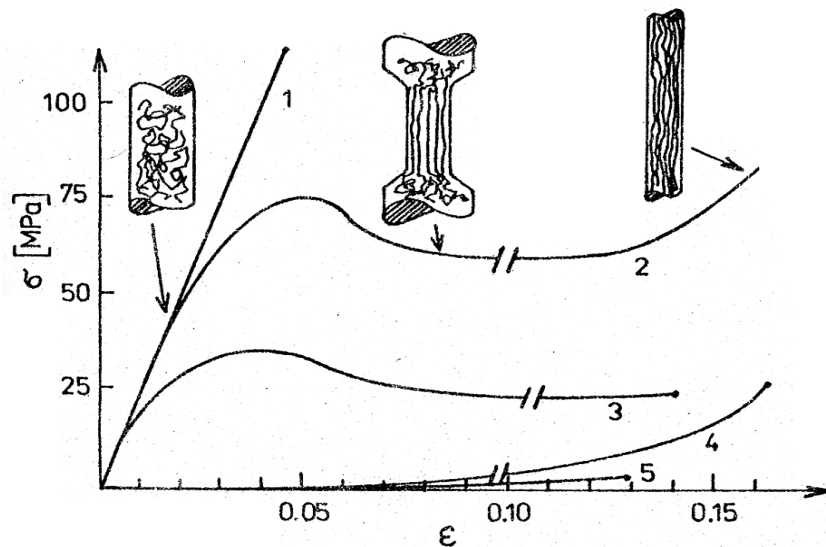
**Zkouška tahem** dle ČSN EN ISO 527-1 se provádí tak, že na zkušební těleso se působí ve směru jeho podélné osy stále se zvětšující silou až do okamžiku, při kterém dojde po určité deformaci k jeho přetržení nebo kdy měřené parametry dosáhnou zvolených hodnot.



Obrázek 01: **Deformační křivka s vyznačením jednotlivých oblastí chování termoplastického polymeru (semikrystalický) při zkoušce tahem.**

Tvar napěťově-deformačních charakteristik se až na termosety výrazně liší od kovů. Většina polymerů má kromě lineárně elastického chování také prvky viskoelastického chování. Význam viskoelastické složky chování s rostoucí teplotou a časem vzrůstá.





Obrázek 02: Napět'ově deformační charakteristiky. 1. – křehké reaktoplasty, 2. – semikrystalické a některé amorfnní termoplasty nad  $T_g$ , 3. – amorfnní termoplasty při  $T_g$ , 4. – krystalizující pryže nad  $T_g$ , 5. – nekystalizující pryže nad  $T_g$

**Modul pružnosti v tahu  $E$**  určuje odpor materiálu proti pružné deformaci – „tuhost“.

Modul pružnosti polymerů je u polymerů nutno definovat v závislosti na čase  $t$  a teplotě  $T$ :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon(t, T)}$$

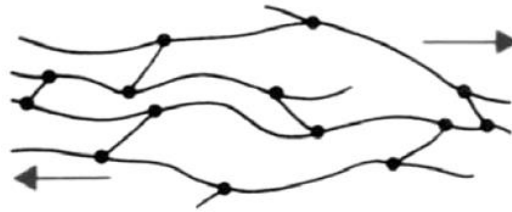
Modul pružnosti se může v závislosti na  $t$  a  $T$  měnit až v rozsahu tří řádů.

### 3.5.2 Chování polymerů za zvýšené teploty a působení vnější síly

Odlíšné chování termoplastu, elastomeru a reaktoplastu.

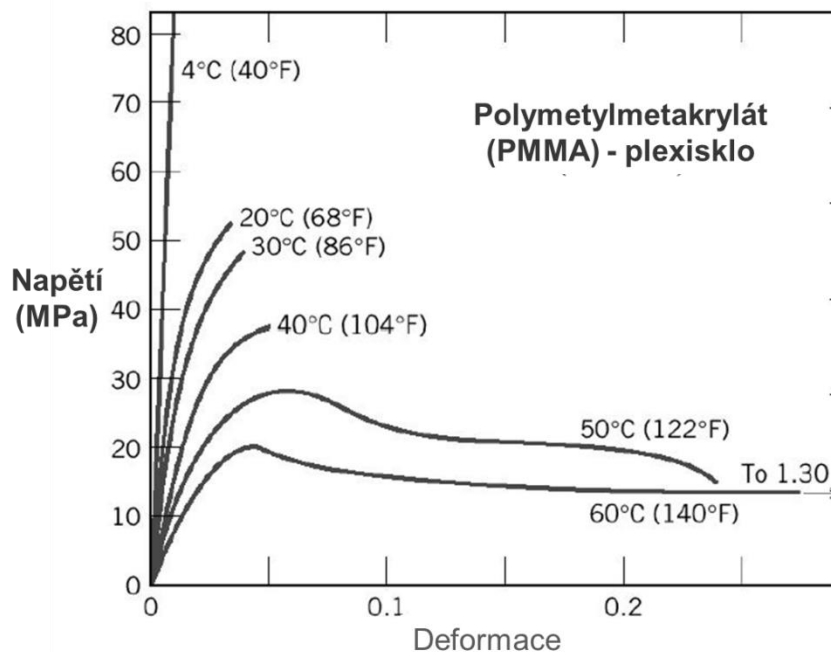
**Termoplasty** jsou tvořeny lineárními nebo mírně rozvětvenými polymerními řetězci, jsou vysoce uspořádané. Jestliže teplota překročí u amorfnního polymeru  $T_f$ , u semikrystalického  $T_m$ , potom dochází v **polymeru k plastickému nevratnému toku a výrobek se zborťí.**

U **elastomeru** nedochází k plastickému toku, jelikož polymerní řetězce jsou vzájemně fixovány příčnými vazbami.



Obrázek 03: Elastomer, který obsahuje mírně zesíťované řetězce, vlivem vnější síly dochází k jeho deformaci, která je vratná

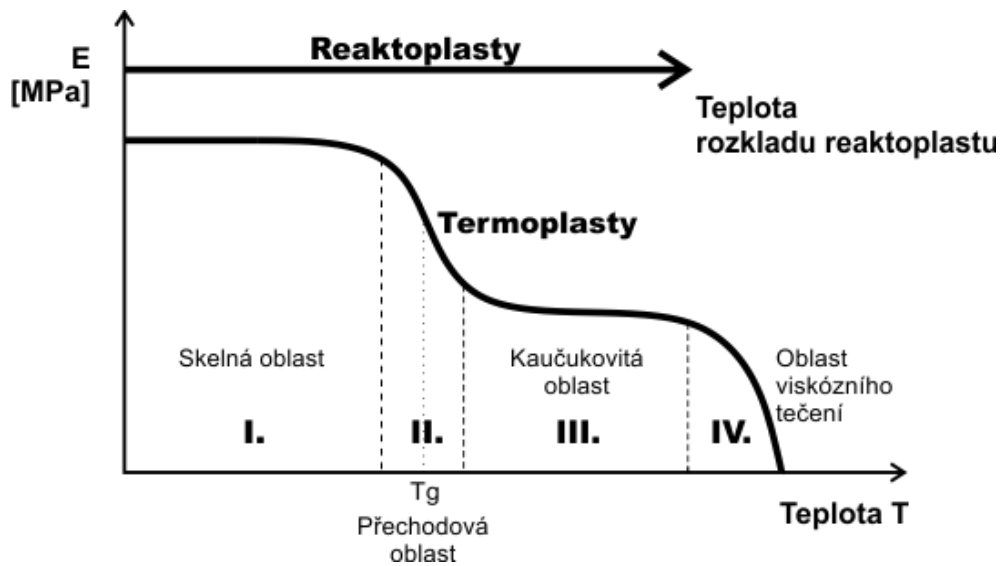
Reaktoplasty (termosety) mají velmi hustou trojrozměrnou síť chemických vazeb, což znamená, že jejich vlastnosti nejsou teplotně závislé. Při působení vnější síly dochází k jeho destrukci.



Obrázek 04: Závislost mechanických vlastností polymeru na teplotě

#### Deformace termoplastů v kaučukovité oblasti

Ve skelné oblasti – pod teplotou skelného přechodu je možná jen elastická deformace a po ní dochází k lomu. V kaučukovité oblasti (nad teplotou skelného přechodu) – je možná i deformace plastická)



Obrázek 05: Závislost modulu pružnosti na teplotě

Závislost lze rozdělit do následujících oblastí:

- skelná oblast – vysoký a málo teplotně závislý modul pružnosti,
- přechodová oblast – dochází k výraznému poklesu modulu pružnosti,
- kaučukovitá oblast – snížená hodnota modulu pružnosti,
- oblast viskózního tečení – ve které se deformace polymeru řídí Newtonovým zákonem

Teplotní závislost modulu pružnosti je výrazně ovlivněna molekulovou hmotností polymeru (tedy stupněm polymerizace), stupněm zesíťení a stupněm krystalizace.

**Zkouškou tlakem** dle ČSN EN ISO 604 se při stlačování houževnatých a měkčích plastů těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci. Zkušební tělesa mají tvar hranolu, válce nebo trubky – délka 10 až 50 mm, šířka 10 mm, tloušťka 4 mm. V průběhu zkoušky se stanovuje síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušební tělesa.

Při **zkoušce ohybem** podle ČSN EN ISO 178 se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tahové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

Zkouška dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné.

### 3.5.3 Zkoušky tvrdosti

Podstatou zkoušek je vtlačování tvrdých hrotů definovaných tvarů za stanovených podmínek do povrchu zkušebního tělesa. Principem měření je určení vztahu mezi silou, která vtlačuje tvrdý hrot, a plochou otisku, která vtlačováním hrotu vznikne. Tvrdost je vlastně vyjádřením tuhosti plastů. Metody měření se dělí podle tvaru hrotu: kulička, jehlan, kužel, komolý kužel. Tvrdost (tuhost) může být silně ovlivněna teplotou, stupněm navlhnutí u polárních plastů nebo stupněm krystalinity.

Při měření **podle Brinella** dle ČSN 640128 konstantní průměr kuličky ( $5 \pm 0,1$ ) mm, působí konstantní zatížení. Proměnnou je hloubka vtisku, která se po určité době odečítá pomocí hloubkového indikátoru.

Během zkoušky tvrdosti **vtlačováním kuličky** v souladu s ČSN EN ISO 2039-1 je průměr ocelové kuličky je ( $5 \pm 0,05$ ) mm. Proměnnou je zatížení vybírané z řady hodnot (49, 132, 358, 961) N tak, aby hloubka vtisku byla po 30s působení zatížení v rozmezí 0,15 až 0,35mm. Hloubka vtisku se měří pod zatížením, plocha povrchu vtlačení se vypočítává z jeho hloubky.

Při zkoušce tvrdosti **podle Vickerse** se vtlačuje se čtyřboký diamantový jehlan. Princip měření spočívá v tom, že po provedení vtisku určitou konstantní silou se měří úhlopříčky vzniklé stopy.

Zkoušky tvrdosti **podle Shoreho** dle ČSN EN ISO 868, hroty mají tvar kužele (Shore D) nebo komolého kužele (Shore A). Hodnota tvrdosti se odečítá ze stupnice tvrdoměru.

### 3.5.4 Rázová a vrubová houževnatost

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým charakteristikám. Je to schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Výsledky stanovení závisí na druhu plastu, jeho složení, teplotě, zkušební metodě, podmínkách provedení zkoušky, tvaru zkušebního tělesa. Houževnatost lze ovlivnit volbou aditiv.

*Rázová houževnatost* poskytuje informace o chování plastů při nárazu. Ukazuje energii spotřebovanou na porušení zkušebního tělesa vztažená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek, označuje se  $a_n$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). *Vrubová houževnatost* – určuje vrubovou citlivost materiálu. Plocha kritického průřezu v místě vrubu, označuje se  $a_k$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). Čím je poměr větší, tím je materiál citlivější na vruby a na koncentraci napětí.

#### Metody zjišťování rázové a vrubové houževnatosti

- Metoda Charpy – ČSN EN ISO 179-1
- Metoda Izod – ČSN EN ISO 180
- Metoda Dynstat – ČSN 64 0611
- Stanovení rázové houževnatosti v tahu – ČSN EN ISO 8256

Lze popsat jako tahová zkouška při vysoké rychlosti deformace. Tímto způsobem se zkouší vysoce houževnaté plasty.

- Rázové zkoušky padajícím závažím

Využívají se především pro zkoušení plochých výrobků. Při zkouškách působí na zkušební tělesa volně padající zkušební závaží s různě volenou kinetickou energií.

Postupným zvyšováním hmotnosti závaží dojdeme k takové hodnotě energie, která způsobí zlomení vzorku nebo při které praskne 50% zkoušených těles.

### 3.5.5 Cyklické zkoušky

V případě dynamického namáhání dochází k porušování materiálu při podstatně menším napětí, než při statické zkoušce. Únava materiálu je proces probíhající v materiálu v důsledku dlouhodobého statického nebo časově proměnlivého namáhání, způsobujícího, že materiál se poruší při napětích nižších, než odpovídá mezi pevnosti zjištěné krátkodobými zkouškami. Při únavových zkouškách se používá cyklického namáhání nucenými kmity za takových podmínek, které vedou k destrukci zkušebních těles. Způsob deformace je např. jednosměrný tah/tlak, ohyb.

Mez časové únavy se zjišťuje Wöhlerovou metodou, při které se zkouší zkušební tělesa při různých výkmitech napětí tak dlouho, až dojde k lomu nebo až se dosáhne stanovené mezní hodnoty.

Mez únavy plastů má značně nižší hodnoty než je pevnost statická – polymery se během namáhání zahřívají (špatná tepelná vodivost), mění se E.

Vyztužené plasty – 25-35% krátkodobé pevnosti, nevyztužené termoplasty – 10%.

### 3.5.6 Další zkoušky polymerů

- Stanovení krípkového chování – ČSN EN ISO 899.
- Stanovení hořlavosti – ČSN 64 0755.
- Stanovení odolnosti za tepla podle Vicata (ČSN EN ISO 306)
- Stanovení teploty průhybu při zatížení podle ISO 75 (ČSN EN ISO 75)

### 3.5.7 Běžné vlastnosti polymerů

#### Modul pružnosti [GPa]

- |                      |             |                            |
|----------------------|-------------|----------------------------|
| - kaučukovité        | 0,01 - 0,15 | vratná elastická deformace |
| - běžné krystalické  | 0,2 - 3     | nevratná deformace         |
| - křehké plasty      | 2 - 7       |                            |
| - orientovaná vlákna | až 120      |                            |

#### Pevnost [MPa]

- |                      |            |
|----------------------|------------|
| - kaučukovité        | 2 - 30     |
| - běžné krystalické  | 30 - 80    |
| - křehké plasty      | 40 - 70    |
| - orientovaná vlákna | 500 - 2000 |

## Tažnost [%]

- |                     |                  |                            |
|---------------------|------------------|----------------------------|
| - kaučukovité       | až 1000 %        | vratná elastická deformace |
| - běžné krystalické | až 500 %         | nevratná deformace         |
| - semikrystalické   | 20 - 50 % i více |                            |
| - amorfní           | pod Tg 2 - 5 %   |                            |

## Elektrické vlastnosti

Vzhledem ke kovalentním vazbám makromolekul je většina plastických hmot elektricky nevodivá. Tuto vlastnost však mohou značně ovlivnit různé příměsi, jako jsou například změkčovadla nebo stabilizátory. Jen u mála makromolekulárních látek se projevuje polarizovanost nebo ionizace. Takové hmoty se pak chovají jako polovodiče.

**Chemické vlastnosti** závisí především na vlastní struktuře (stavbě) daného polymeru a na charakteru příměsí v hotovém výrobku. Odolnost proti působení kyselin, zásad a dalších chemikálií je rozdílná. Vhodnou obměnou struktury a použitím patřičného plnidla lze dosáhnout vynikajících odolností proti vlivu většiny chemikálií.

Všeobecně lze říci, že nejspodněji se všemi makromolekulárními látkami reaguje vzdušný kyslík. Tato reakce probíhá značně rychle zejména tehdy, jsou-li ve hmotě přítomny snadno oxidovatelné dvojně vazby nebo hydroxylové či aldehydicke skupiny. Reakce je zrychlena také přítomností některých oxidačních katalyzátorů nebo působením světla apod. Změny mohou velmi ovlivnit také strukturu makromolekul, což se projevuje zejména změnou barvy, zhoršením průhlednosti nebo průsvitnosti a poklesem pevností. Technicky tento proces nazýváme stárnutím plastických hmot.

Většina makromolekulárních látek velmi dobře odolává vodě, mnohé z nich i většině chemikálií, včetně kyselin a zásad. Tuto odolnost je možno ještě zlepšit, buď úpravou struktury makromolekul, nebo přidáním vhodných příměsí. Organická rozpouštědla však zpravidla snadněji vnikají mezi makromolekulární řetězce, což se projevuje buď bobtnáním, nebo i rozpouštěním hmot. Toto ovšem závisí nejen na struktuře a velikosti makromolekul, ale též na teplotě a druhu rozpouštědla.

**Chování polymerů v plameni**, se může využít k orientačnímu určování jednotlivých druhů makromolekulárních látek. Podle chování v plameni se polymery se rozlišují na tři typy:

- nehořící – např. polytetrafluorethylen (Teflon),
- hořící, ale po vyjmutí z plamene uhasínající – např. PVC a fenolformaldehydové pryskyřice,
- hořící i po vyjmutí z plamene – polystyren, polyethylen, epoxidové pryskyřice, polyuretany apod.

Možností, jak **hořlavost** plastických hmot omezovat, se naskýtá hned několik. Především je možno uvažovat vliv vlastního chemického složení makromolekulárních látek (např. omezit obsah chlóru v PVC). V jiných případech je nutno přidávat tzv. zpomalovače hoření (např. fosfátová). Pokud se jedná o makromolekulární látky lehčené lze při výrobě využít nehořlavých plynů (např. dusík či oxid uhličitý). V některých případech lze chránit polymery proti ohni speciálními nátěry, které při kontaktu s plamenem buď taví, nebo se přeměňují na hustou pěnu, jež brání přístupu vzduchu, a tak hoření zpomalují.

## Teplota skelného přechodu [°C]

- kaučuky kolem - 50 °C a méně
- měkké polymery pod 20 °C krystalinita zvyšuje tuhost
- tuhé polymery nad 20 °C krystalinita zvyšuje tuhost

Teplota tání [°C] do cca 200 °C

Tepelná vodivost velmi nízká

Teplotní odolnost do 100 až 200 °C

### 3.5.8 Výhody a nevýhody polymerů pro konkrétní použití

Plastické hmoty či polymery, jak dnes nazýváme většinu makromolekulárních látek, které se dobře uplatňují v průmyslu stavebních hmot, se vyznačují těmito výhodami:

- jsou lehké,
- mají pěkný vzhled,
- lze je dobře probarvovat,
- jsou snadno tvarovatelné,
- jsou prakticky nenasákavé,
- většinou chemicky odolné,
- výborné elektrické vlastnosti,
- malá tepelná vodivost,
- lze je dobře spojovat a snadno obrábět,
- snadno se čistí a udržují,
- při výrobě lze jejich odpady znovu zpracovávat.

Mají však také pro stavební aplikaci některé nevýhodné vlastnosti, zejména je třeba uvést tyto:

- změny jejich vlastností v silné závislosti na teplotě,
- hořlavost,
- špatná odolnost proti UV záření,
- špatná odolnost proti působení povětrnosti,
- změny jejich vlastností při tzv. stárnutí,
- malá pevnost v tlaku,
- velmi nízký modul pružnosti,
- velký součinitel teplotní roztažnosti,
- v některých případech i snadné mechanické poškození, zejména za nižších teplot.

## 3.6 Základní typy polymerů

### 3.6.1 Polyetylen

Polyetylen se ve velkém měřítku zpracovává na fólie, ty jsou levné, pevné, pružné, zdravotně nezávadné, průsvitné, nenavlhavé a dobře chemicky odolné. Dobrá odolnost proti trhání umožňuje i výrobu pytlů s velkou perforací, přibíjení fólií a přetahování přes hrany. Ve stavebnictví mají polyetylenové fólie široké uplatnění zejm. jako parozábrany (ošetřování betonu) či pro přerušení kapilarity spodní stavby. Polyetylenové trouby a tvarovky se vykazují vysokou trvanlivostí. Z polyetylenu lze vyrábět též různé profily, lišty a kroužky či lehčené izolační hmoty.

### 3.6.2 Polypropylen

Z polypropylenu jsou vyráběna zejm. vlákna, která jsou laciná, odolávají plísni a hmyzu a dále mají malou krčivost. Ovšem špatně odolávají slunečnímu záření a obtížně se vybarvují. Polypropylen má podobné využití jako polyetylen, zejm. jako desky, fólie či trouby. Trouby mají velmi hladký povrch, což oproti kovovému potrubí umožňuje až o 15 – 25 % větší průtok tekutin. Výhodou polypropylenových trub je jejich tvrdost a odolnost vůči vyšším teplotám než je tomu u trub polyetylenových.

### 3.6.3 Polyizobutylen

Ve stavebnictví se polyizobutylen používá zejm. k výrobě fólií, které jsou ve srovnání s polypropylenem a polyetylenem těžší a lze je vyztužovat různými plnivy apod. Používají se pak nejčastěji k aplikacím na střechy či k vykládání vodních (na pitnou vodu) nádrží.

### 3.6.4 PVC

Polyvinylchlorid (PVC) je dosud nejvíce vyráběnou makromolekulární látkou. Použití PVC je opravdu velmi široké, proto je zde uveden pouze stručný výčet, podrobněji se této problematice věnuje. Především se z PVC vyrábějí fólie (např. měkčené, suspenzní), dále je to krytina, potrubí (novodur), žlaby a okapní trouby, profily, schodišťová madla, hřebenáče, rámy oken a dveří. Velkou skupinou jsou též podlahoviny a povrchová úprava plechů.

### 3.6.5 Polystyren

Je třeba si uvědomit, že standardní polystyren je velmi houževnatá látka, ze které se pomocí nadouvadel vyrábí široce známá tepelná izolace pěnový (extrudovaný) polystyren. Pěnový polystyren se vyznačuje zejm. nízkou objemovou hmotností ( $30 - 60 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a s tím související nízkou tepelnou vodivostí.

### 3.6.6 Fenolformaldehydy

Tyto makromolekulární látky nalézají uplatnění především jako lepidla, pryskyřice, tmely, laky či ochranné nátěry, které jsou chemicky odolné, vodotěsné a pevné.



## 3.6.7 Polyuretaný

Polyuretanová lepidla mají výbornou adhezi a kohezi a dobrou mechanickou pevnost. Dalším výrobkem jsou málo hořlavé a vodě odolné polyuretanové laky. Velkého významu se těší také lehčené polyuretaný. Pravděpodobněji neznámější je polyuretanová pěna, která se používá jako izolační materiál.

## 3.6.8 Akrylové polymery

Nejcharakterističtější vlastností polymetylmakrylátu (PMMA) je jeho čirost a naprostá bezbarvosť i v tlustých vrstvách, to umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednosť, ale i snadné probarvování. Neznámější aplikace PMMA je ve formě plexiskla.

## 3.6.9 Silikony

Silikonové makromolekulární látky se používají zejm. k výrobě těsnicích tmelů, které se vyznačují hydrofobními vlastnosťmi. Další uplatnění nalézají silikony při výrobě kaučuků (spárové, konstrukční a adhezivní) tmely. Neméně významnými aplikacemi silikonů jsou nátěrové hmoty, intenzifikátory mletí, výroba olejů atd.

## 3.6.10 Polyestery

Do této skupiny náleží nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), z nichž jsou vyráběny jak nevyztužené tak vyztužené výrobky. Jsou vhodné např. pro výrobu litých podlah, speciálních polymerbetonů, lepidel i tmelů.

## 3.6.11 Furanové pryskyřice

Vytvrzené furanové produkty mají vysokou tepelnou odolnosť a odolnosť proti kyselým i alkalickým prostředím. Jejich nevýhodou je do jisté míry černá barva. Jsou používány zejm. na tmely k tmelení kachliček, cihel a čedičového potrubí, lisovací hmoty s azbestem, skelné lamináty pro samonosné konstrukce a potrubí, nátěrové hmoty.

## 3.6.12 Epoxidové pryskyřice

V současné době je jejich používání u nás velmi rozšířeno. Epoxidové pryskyřice (EP) jsou využívány jako lepidla, zalévací a lisovací hmoty, lamináty a lakařské pryskyřice. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází jen k malému smrštění. Vytvrzené produkty mají výbornou přilnavosť na kovy, sklo, keramiky, dřevo aj. Mají dobré chemické a elektroizolační vlastnosť v poměrně široké oblasti teplot, výhodná je i jejich značná odolnosť vůči vodě, roztokům alkálií a kyselin a některým rozpouštědlům. Významného uplatnění dosahují epoxidy zejména v oblasti sanačních technologií.

## 3.6.13 Polymerní disperze

Polymerní disperze, používané při výrobě polymercementových kompozitů a k výrobě nátěrových hmot a lepidel, jsou dvoufázové systémy ředitelné vodou. Jsou tvořeny kulovitými částicemi polymeru o průměrné velikosťi 100 – 300 nm (micely) rovnoměrně rozptýlenými ve

vodní fázi (s přidavkem emulgátoru a ochranného koloidu). Dnes se takto využívají zejm. akryláty.



## ZDROJE A DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

CALLISTER, WILLIAM D. 2007. *Materials Science and Engineering: an introduction*, ISBN 978-0-471-73696-7.

EDWARD ALLEN, JOSEPH IANO. 2013. *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods, 6th Edition*. 1024 pages ISBN: 978-1-118-13891-5.

SVOBODA, L. a kolektiv, 2013. *Stavební hmoty*. 3. Vydání. Praha. ISBN 978-80-260-4972-2. Online: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>.

BRYDSON, J. A. 1999. *Plastics Materials (7th ed)*. Butterworth-Heinemann. 920 pages. ISBN: 978-0-7506-4132-6

SPERLING, L. H. 2006. *Introduction to Physical Polymer Science, 4th Edition*. 880 pages. ISBN: 978-0-471-70606-9.

KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH D. 2005. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko technologická v Praze. Praha. 190 stran. ISBN 80-7080-568-4.

DROCHYTKA, R. *Plastické látky ve stavebnictví*, CERM s.r.o. Brno, 1998.

KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH D. 2005. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko technologická v Praze. Praha. 190 stran. ISBN 80-7080-568-4.

## 4 ALKALICKY AKTIVOVANÉ MATERIÁLY, GEOPOLYMERY



### CÍLE KAPITOLY

Cílem kapitoly je seznámit posluchače s alkalicky aktivovanými materiály a geopolymery.



### RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

Kapitola „Alkalicky aktivované materiály a geopolymery“ podává základní informace o těchto alternativních pojivech/ materiálech k cementovým pojivům, jejich výrobě a použití.



### ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

Na prostudování kapitoly je potřeba 24 hodin.



### KLÍČOVÁ SLOVA

Geopolymer, alkalické prostředí, pH, aktivátor, metakaolin, struska, popílky, zeolity.

### 4.1 Úvod

Základním stavebním materiálem současnosti je klasický cementový beton. Jedná se kvalitní a časem ověřený materiál, který je velice dobře zaveden do stavební praxe. Možnosti výroby pojivových materiálů jsou však v současnosti mnohem širší a hmoty na bázi alternativních surovin k cementu často svými parametry výrazně převyšují klasický beton. Širokému zavedení těchto materiálů do průmyslu brání především neochota výrobců stavebních hmot měnit technologii výroby. Často jsou také problematické vstupní materiály kvůli své chemické nebezpečnosti. Alternativní pojiva také nejsou prověřeny časem na velkých dlouho

fungujících stavbách, jako je tomu u běžného cementového betonu. V některých případech se však již podařilo zavést alespoň částečně do výroby alternativní pojiva na bázi polymerních, geopolymerních nebo alkalicky aktivovaných hmot. Specifickým necementovým pojivem je také hlína a jíly, které se používají v hliněných stavbách a omítkách.

## **Druhy alternativních pojiv**

- Alkalicky aktivované hmoty
- Geopolymerní hmoty
- Asfaltové pojivo (asfaltobeton)
- Polymerní pojiva
- Přírodní pojiva a malty

## **4.2 Alkalicky aktivované hmoty a geopolymerní hmoty**

V současné době často výrazy, které se zaměňují, avšak principem se jedná o různorodé materiály. Dalo by se zjednodušeně říci, že i geopolymerní hmota vzniká alkalickou aktivací, ale ne každá alkalicky aktivovaná hmota je geopolymerní. Geopolymer jako výraz byl zaveden francouzem Davidovidem a v základu je rozdíl především ve výsledné struktuře vytvrzeného materiálu. Velmi vyzdvihovanou pozitivní vlastností je to, že tyto materiály se vyrábějí především z odpadních nebo druhotných surovin. Problematické je pak především nutné využití silných hydroxidů při samotné alkalické aktivaci.

### **4.2.1 Materiály pro výrobu**

Kromě možnosti použít klasický slínkový cement v alkalicky-aktivovaných materiálech se používají především druhotné suroviny. V této kapitole jsou popsány pouze stručně, jelikož druhotným surovinám je věnována celá kapitola skript.

#### **Jemně mletá vysokopecní struska**

Ačkoliv se jedná o druhotnou surovinu, je v dnešní době velmi intenzivně využívána při výrobě cementu. Nedá se tedy říci, že by byl této suroviny na trhu přebytek, spíše naopak. Vysokopecní struska vzniká při výrobě železa ve vysoké peci. Velkou výhodou je poměrně velká stálost chemického složení vysokopecních strusek. Je to dáno především tím, že se v dnešní době využívá poměrně čistého vápence a železné rudy pro výrobu železa. Alkalicky aktivované hmoty na bázi vysokopecní strusky jsou tak velice kvalitní a dá se říci, že jsou také nejvíce zkoumanou oblastí. Struska má vysokou reaktivitu, jelikož obsahuje velké procento skelné reaktivní fáze. Poměr hlavních oxidů ve strusce se podobá složení cementového slínku. Výsledné krystalové fáze obsažené ve strusce jsou také podobné fázím v cementovém slínku, což je opět způsobeno podobnými teplotami, při kterých struska vzniká asi 1400-1600°C. Výsledné zastoupení jednotlivých fází závisí také od způsobu chlazení vysokopecní strusky. V praxi se používají dva způsoby, rychlé ochlazování pomocí proudu

vody, nebo pomalé chladnutí na vzduchu. U pomalu chladnoucí strusky je dostatek času na vykrytalizování minerálních fází a téměř nevzniká reaktivní skelná fáze. Tato struska má tak jen velmi slabou schopnost působit jako pojivo.

Tabulka typického složení vysokopecní strusky z několika zemí

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$Na_2O$	$K_2O$	$S$	$TiO_2$	$MnO$	Origin	Reference
35.04	13.91	0.29	39.43	6.13	0.34	0.39	0.44	0.42	0.43	Australia	Collins and Sanjayan (2001a)
35.3	9.9	0.6	34.7	14.6	0.3	0.4	1.0	0.5		Canada	Shi (1992)
36.23	9.76	1.99	39.4	10.5				0.7		China	Shi <i>et al.</i> (1991b)
36	9	1.3	41	8			1.1	0.9	0.85	Finland	Gjorv (1989)
35.4	12.9	0.3	41.8	6.8	0.26	0.38	1.0	1.65	0.42	Japan	Sato <i>et al.</i> (1986)
35	13.5	2.3	36.5	7.5			0.6	2.0	1.25	Norway	Gjorv (1989)
35.3	9.4	1.1	39.7	10.03	0.98		1.16	0.72	0.98	Sweden	Byfors <i>et al.</i> (1989)
34.9	7.12	1.02	42.87	10.30	0.24	0.50	1.16	0.39		USA	Hogan and Rose (1986)
34.2	11.3	1.17	41.6	8.21	0.26	0.4	0.48	0.77	0.25	UK	Osborne and Singh (1995)

### Jemně mletá ocelářská struska

Tato surovina již vykazuje poměrně problematické použití. Vlivem různých technologií a využitých přísad při výrobě oceli dochází k velkým výkyvům v chemickém složení. Ocel se vyrábí odstraňováním nečistot ze surového, železa a snižování obsahu uhlíku. Používá se pecí s vháněním vzduchu (basic oxygen furnace, BOF) nebo elektrických obloukových pecí (Electric arc furnace, EAF). Nelze tak jednoznačně deklarovat vlastnosti a výsledné materiály jsou také závislé na těchto výkyvech.

Tabulka chemického složení ocelářské strusky v závislosti na typu výroby.

<i>Components</i>	<i>BOF</i>	<i>EAF (carbon steel)</i>	<i>EAF (alloy/stainless)</i>	<i>Ladle</i>
SiO <sub>2</sub>	8–20	9–20	24–32	2–35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–6	2–9	3.0–7.5	5–35
FeO	10–35	15–30	1–6	0.1–15
CaO	30–55	35–60	39–45	30–60
MgO	5–15	5–15	8–15	1–10
MnO	2–8	3–8	0.4–2	0–5
TiO <sub>2</sub>	0.4–2	N/A	N/A	N/A
S	0.05–0.15	0.08–0.2	0.1–0.3	0.1–1
P	0.2–2	0.01–0.25	0.01–0.07	0.1–0.4
Cr	0.1–0.5	0.1–1	0.1–20	0–0.5

Proces chlazení ocelářské strusky má stejný vliv jako u strusky vysokopecní. Rychle chlazená struska obsahuje reaktivní fáze, které způsobují schopnost reagovat s vodou a fungovat jako pojivo.

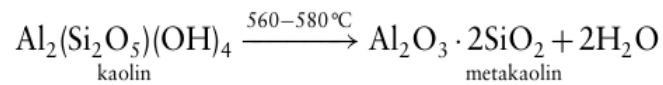
### **Fluidní popílek**

Fluidní popílek vzniká při spalování mletého uhlí v elektrárnách. Vzniká tak velmi jemný materiál, který má na mikroúrovni vzhled malých skelných kuliček s dutým jádrem. Tento materiál je získáván filtrováním vzniklých spalin. Na rozdíl od předchozích dvou materiálů obsahuje popílek pouze velmi malé množství oxidu vápenatého. Toto je dáno již samotným vznikem, kdy v mletém uhlí se vápník nachází jen v minoritním množství a při spalovacím procesu se nikde nedotuje. Popílek tak obsahuje především oxidy křemíku a hliníku. Stejně tak jako vysokopecní struska i popílek se poměrně hodně používá při výrobě cementu. Avšak na trhu s druhotnými surovinami se tohoto materiálu nachází přebytek a je hojně využíván také na různé zásypy a výplně, například starých důlních děl. Nevýhodou popílku je také jeho chemická nestálost. Složení je závislé na mnoha faktorech. Již vstupní surovina se může výrazně lišit svou kvalitou a typem. V české republice se můžeme setkat s elektrárnami spalující černé nebo hnědé uhlí. Hnědé uhlí obsahuje často výrazné množství síranů a v mnoha elektrárnách doposud nejsou zavedeny odsiřovací filtry. Proces spalování je taktéž různě prováděn s různou kvalitou a technologií. Obecně je tak nutné používat popílek například pouze z jedné elektrárny, aby byly zajištěny stálé vlastnosti.

### **Metakaolín**

V tomto případě se nejedná o druhotnou surovinu, ale o cíleně vyráběný materiál. Snaha jedná se o pálený jíla na bázi kaolinitu. Tyto látky jsou známy již ze starověku a v posledních dvaceti letech je snaha o jejich obrození a znovupoužívání ve stavebnictví. Kaolinit je velice běžný hlinitokřemičitan. Samotný se používá v širokém odvětví oborů, jako je například papírenství. Jeho velkou nevýhodou je proces výroby, který je poměrně nákladný.

Metakaolín vzniká procesem kalcinace kaolínu. Jedná se o zahřívání, kdy dochází při teplotách od cca 450°C k odstranění krystalové vody a vzniká bezvodý hlinitokřemičitan s amorfni strukturou.



Tento materiál je velice reaktivní a především při kontaktu s hydroxidem vápenatým vznikají produkty podobné hydraulickým fázím, jako je tomu u klasického cementu. Stejně jako fluidní popílek i metakaolín obsahuje pouze minoritní množství oxidu vápenatého.

#### 4.2.2 Alkalická aktivace materiálů

Alkalická aktivace je reakce alkalického aktivátoru (NaOH, KOH, vodní sklo) s latentně hydraulickou látkou (struska, popílek, metakaolín, přírodní zeolity, cementy) za vzniku fázových systémů podobného složení, jako je tomu u tuhnutí portlandského cementu.

Vlastní proces je z hlediska teorií a použitých vstupních materiálů rozdělován na hmoty, které se ve výsledku označují jako hmoty alkalicky-aktivované a hmoty geopolymerní. V obou případech se však používá stejný typ aktivátorů. Rozdíl se dá jednoduše popsat tak, že v prvním případě vznikají hmoty podobné zatvrdlému cementu s obsahem CaO a ve druhém hmoty, které jsou podobné přírodním zeolitům bez CaO. Pro aktivaci se používají alkalické aktivátory.

##### Alkalické aktivátory

Obvykle se jedná o tekuté roztoky oxidů a hydroxidů s velmi vysokým pH. Následující seznam vypisuje různé typy chemikálií, které slouží jako aktivátory

- Hydroxidy – sodný, draselný
- Uhličitany, slabé kyseliny – Uhličitan sodný (draselný), Siřičitan sodný, Forsforečnan sodný
- Hydrogenuhlíčitany – sodný
- Vodní skla – sodná, draselná, litná
- Pevné aktivátory – metakřemičitan sodný

##### Hydroxidy alkalických kovů

Jedná se o roztoky s velmi vysokým pH (12-13). Současně alkalické kovy jsou velmi reaktivní. Tyto roztoky se při alkalické aktivaci využívají hojně. Jejich žíravost je současně největším problémem jejich použití. Hydroxid sodný je velmi důležitou chemikálií v průmyslu a také je velice snadno dostupný. Ve stavebnictví se může využívat k urychlení tuhnutí cementu.

##### Uhličitany

Uhličitan sodný neboli soda, je taktéž velmi důležitou látkou v různých průmyslových odvětvích. Jedná se o práškovou látku, snadno rozpustnou ve vodě. Pro alkalickou aktivaci se obvykle používá ve formě roztoku.

## Vodní skla

Nejvíce využívané alkalické aktivátory. Jedná se o roztoky křemičitanů, s různým poměrem složek oxidů křemíku a oxidů alkalických kovů. Vlastní poměr může být téměř jakýkoliv. Díky tomu, že se jedná o roztok dají se poměry složek dobře modifikovat pomocí přidavku hydroxidu daného alkalického kovu. Vodní skla také obsahují oxid křemičitý v koloidním nebo velmi jemném amorfním stavu. Tento oxid křemičitý pak tvoří nukleátor při vlastním procesu alkalické aktivace.

Základem výroby je tavení křemičitého písku při teplotě 1300-1450°C společně s uhličitanem sodným. Směs se poté rozpouští v autoklávu při teplotách 140-160°C. Vzniká roztok vodního skla. Vodní sklad mají obecně široké použití, ve stavebnictví jako urychlovače, impregnace a příměsi do nátěrů.

### 4.2.3 Alkalická aktivace – hydratační reakce

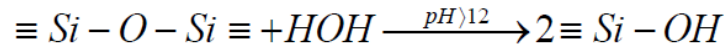
Ani v oblasti hydratace alkalicky aktivovaných materiálů není, ve srovnání s cementem, rozdíl v tom, jak probíhá. Dá se konstatovat, že hlavní rozdíl je zda vstupní systém obsahuje nebo naopak neobsahuje oxid vápenatý. Vlastní hydratační proces se závislý především na velmi vysoké hodnotě pH. Vysokopevní struska smíchaná s vodou, začne také pomalu reagovat, ale vzhledem k malému množství  $\text{OH}^-$  iontů, pouze pomalu a neochotně. Volné  $\text{OH}^-$  ionty štěpí vazby v molekulách oxidů  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zatímco oxid hlinitý a oxid křemičitý mají poměrně silnou vazebnou energii, oxid vápenatý již menší. Pokud je obsažen v systému, dochází nejdříve ke štěpení jeho vazeb. Vstupní materiály obsahující  $\text{CaO}$  mají malý obsah hlinitanů. Systém je podobný tomu jako u klasického cementu. Výsledné hydratační produkty se tak podobají produktům hydratovaného cementu. V průběhu hydratace se formují C-S-H gely, které tvoří amorfni strukturu a výslednou matici hydratovaného materiálu.

V případě hydratace vstupních surovin s nízkým obsahem  $\text{CaO}$ , dochází opět ke štěpným reakcím vazeb, avšak následně vzniklé fáze, již nenapodobují cement. Jednotlivé molekuly se navzájem spojují do vícečetných struktur podobným polymerním molekulám. Díky tomuto procesu se tyto vzniklé materiály nazývají geopolymerní. Jednotlivé struktury mohou být jednoduchého typu nebo i velice složité. Na bázi křemíku vznikají tzv. siloxany, hliníkové struktury nesou název sialáty. Ve zreaktivovaném materiálu se pak vyskytují kombinace nazývané polysialáty.

### Zjednodušený průběh reakce

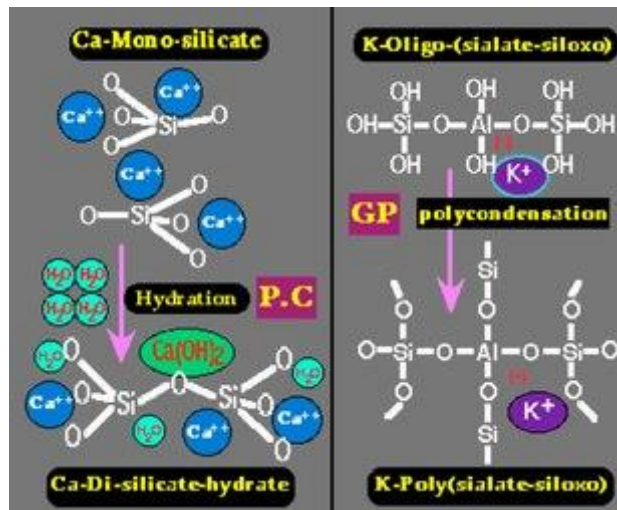
- V první fázi dochází v důsledku silně zásaditého prostředí k rozrušení vazeb Si-O-Si, a tím vlastně k hydrolyze skelné fáze alumosilikátové látky za vytvoření silanolátové skupiny.





- Rozklad probíhá relativně rychle v silně alkalickém prostředí o vysokém pH 13–14.
- Vedle vznikajících fází C-S-H a C-A-H následuje polykondenzace vzniklých křemičitanových a hlinitanových tetraedrů, které se vzájemně prováží kyslíkovými atomy na vrcholech tetraedrů do trojrozměrné geopolymerní struktury amorfního gelu.

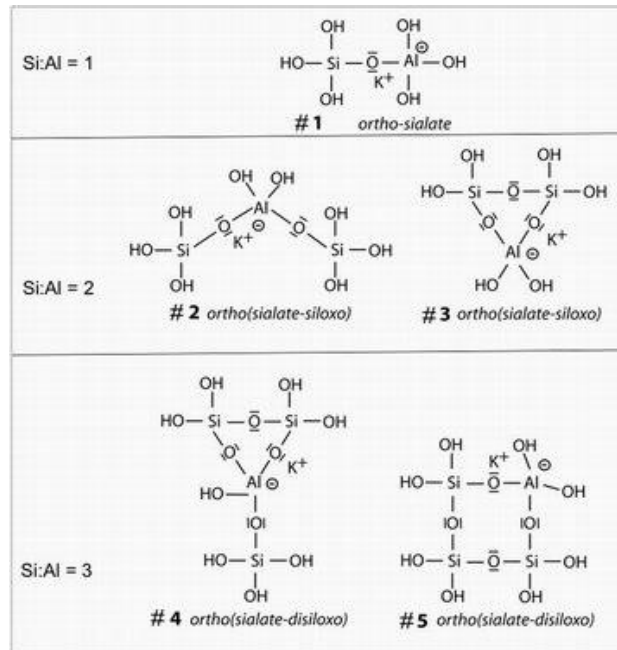
**Pozor.** Voda hraje v tomto systému „pouze“ roli nosiče alkalického aktivátoru a také plní funkci reologickou. Voda se neúčastní chemických procesů jak tomu je při hydrataci cementu!



Obrázek 06: Srovnání hydratace cementu (PC) a geopolymerního (GP) (wikipedia)

#### 4.2.4 Struktura geopolymerních

Jedná se o novodobý materiál, u něhož zatím struktura není plně objasněna. Struktura alkalicky aktivovaných materiálů je pórovitá, s póry o velikosti od nanometrů po mikrometry. Podle charakteru surovin a podmínek alkalické aktivace mohou vznikat produkty krystalické i amorfni. V případě přebytku vody a za působení tepla dochází ke krystalizaci výsledných produktů do struktury podobné zeolitům. V případě malého obsahu vody vznikají produkty amorfni. Zpravidla jde o síťovité útvary složené z tetraedrů SiO<sub>4</sub> a AlO<sub>4</sub> spojených – O – můstky. Vytvářejí se řetězce či kruhy spojené Si – O – Al můstky.



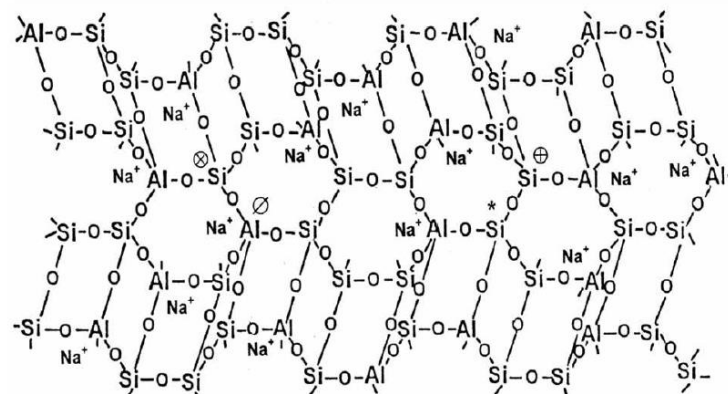
Obrázek 01: **Struktury vzniklé v geopolymerních hmotách (wikipedia)**

Společným znakem všech alkalicky aktivovaných aluminosilikátů je amorfní **nejspíše** trojrozměrná mikrostruktura s nahodilým uspořádáním křemičitanových a hlinitanových tetraedrů s kationem alkalického kovu vyvažující náboj  $[Al(OH)_4]^-$ .

V současné době existují dva základní uznávané modely geopolymerní struktury.

### Davidovitsův model geopolymerní struktury

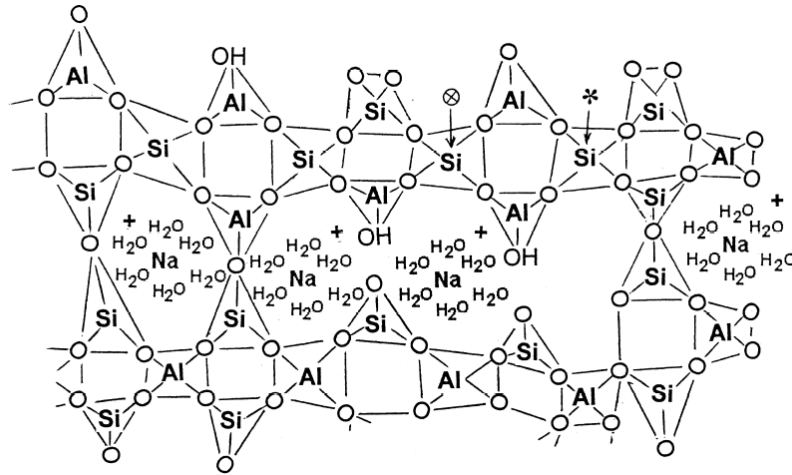
Strukturální model geopolymery vypracoval Davidovits na základě alkalické aktivace metakaolinu. V tomto modelu předpokládá v podstatě monolitický polymer podobný organickému polymeru.



Obrázek 02: **Davidovitsův model geopolymerní struktury**

### Barbarosův model geopolymerní struktury

Barbarosův model geopolymerní struktury, předpokládá, že jde o síťovité útvary složené z tetraedrů  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$  spojených – O – můstky. Ve vysoce alkalickém prostředí, za přítomnosti kationtů Na, K či Li, se vytvářejí geopolymerní řetězce či kruhy spojené Si – O – Al můstky.



Obrázek 03: **Barbarosův model geopolymerní struktury**

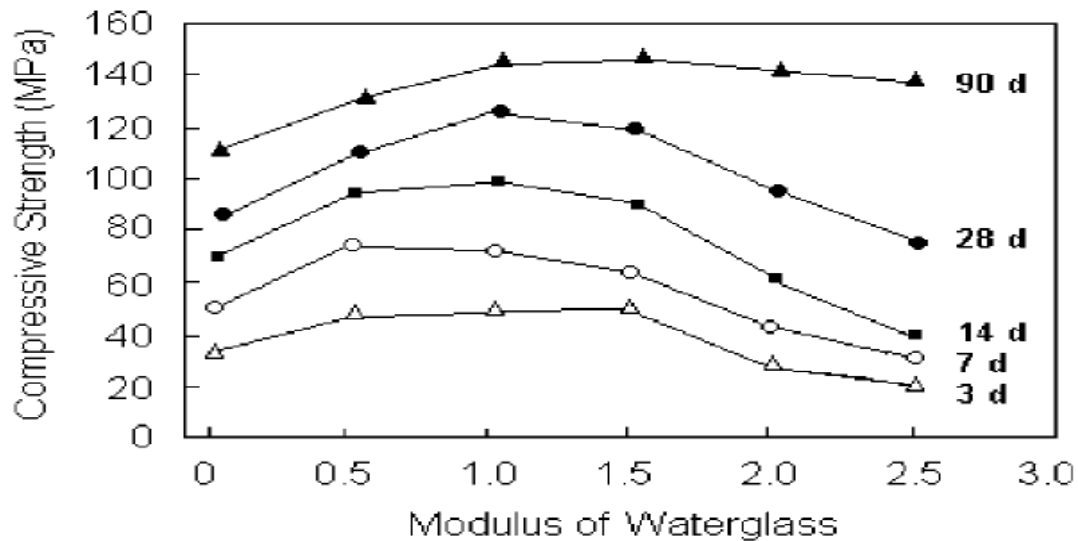
#### 4.2.5 Vlastnosti alkalicky-aktivovaných hmot

Díky celé řadě možností vstupních surovin, je možné vyrobit velkou škálu typů výrobků s různými vlastnostmi. Ve stavebnictví se tyto materiály prosazují jen těžko, ale jejich výborné parametry jsou prokázány mnoha výzkumy. Dosahují výborných mechanických vlastností a odolností vůči povětrnostním vlivům. Jsou poměrně dobře odolné vysokým teplotám a chemickým vlivům. Jejich nevýhodou pak jsou barevná nestálost a v častých případech výkvěty uhličitánů použitých alkálií vlivem reakování se vzdušným  $\text{CO}_2$ .

##### **Mechanické vlastnosti**

Alkalicky-aktivované hmoty mívají vyšší pevnost především v tlaku než klasické cementové materiály. S tím ovšem souvisí také větší křehkost. Pevnost je obecně závislá na celé škále vlivů, avšak především na použitých vstupních surovinách a jejich poměrech. Velký vliv na mechanické vlastnosti má například:

- Modul vodního skla, tedy poměr alkalického oxidu k oxidu křemičitému.
- Množství vneseného aktivátoru.
- Stejně jako u portlandského cementu má vliv na vlastnosti také jemnost mletí použité suroviny. Vysokopeční struska mívá větší měrný povrch než cement.
- Dále také na způsobu uchování po dobu zrání. Pokud uchováváme hydratující materiál ve zvýšené teplotě, můžeme dosáhnout v několika hodinách stejných pevností jako u běžně zrajících hmot. Tyto teploty se však musí pohybovat nad 60-70°C.



Obr. Vliv modulu vodního skla na pevnost v tlaku

### Chemická odolnost

Stejně jako mechanické vlastnosti i chemická odolnost je stejně závislá na vstupních parametrech a průběhu hydratace. V oblasti cementového betonu je velmi nebezpečná difuze chloridových iontů. Především z důvodu vzniku koroze na ocelové betonářské výztuži. Různé výzkumy uvádí, že difuze Cl iontů je u alkalicky-aktivovaných hmot 30-40 krát pomalejší než u betonu. V tabulce jsou uvedeny difuzní součinitele pro portlandský cement a alkalicky-aktivovanou strusku s různým poměrem vody a pojiva.

Tab. Difuzní součinitel pro cementové a alkalicky-aktivované pasty (Kryvenko)

No.	Paste	Water-to-cement (slag) ratio	Diffusion coefficient (cm <sup>2</sup> /s)
1	Portland cement	0.23	$321 \times 10^{-12}$
2	Alkali-activated slag	0.23	$75 \times 10^{-12}$
3	Portland cement	0.35	$6390 \times 10^{-12}$
4	Alkali-activated slag	0.35	$240 \times 10^{-12}$

Stejných odolností dosahují alkalicky-aktivované hmoty také při styku s kyselinami a organickými látkami.

Veškeré vlastnosti závisí na složení a poměru jednotlivých použitých surovin. Obecně však dosahují alkalicky-aktivované hmoty lepších vlastností než běžný cement.



## ZDROJE A DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

C. SHI, P. V. KRIVENKO, D. ROY. *Alkali-activated cements and concretes*, Taylor & Francis, Oxford, 2006.

F. ŠKVÁRA. Alkalicky aktivované materiály - geopolymery. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and application*, Saint-Quentin, Francie, 2008.

## 5 NANOTECHNOLOGIE VE STAVEBNICTVÍ



### CÍLE KAPITOLY

Cílem kapitoly je seznámit posluchače s novodobými materiály z oblasti nanotechnologie.



### RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

Nanočástice a nanotechnologie je rapidně se rozvíjející obor, který proniká i do stavebnictví.



## ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

K prostudování kapitoly je potřeba asi 60-120 minut.



## KLÍČOVÁ SLOVA

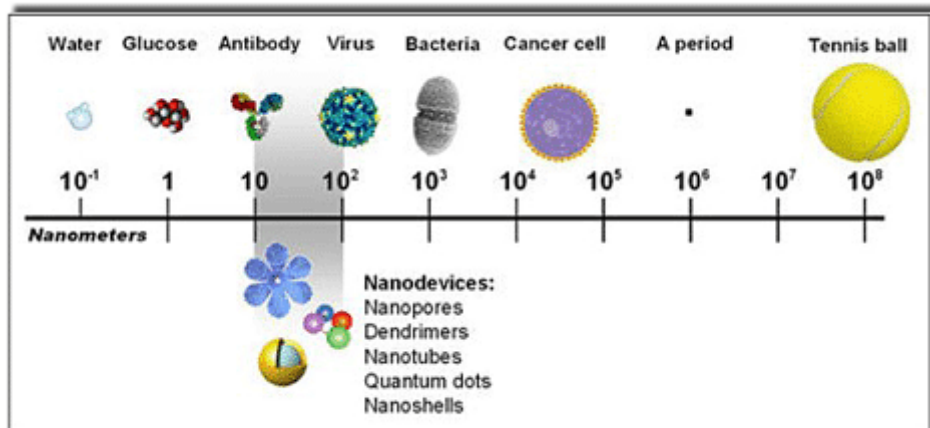
Nano, nanotechnologie, částice, nanometr, nanoobjekty, .

## 5.1 Úvod

Materiály a technologie s termínem „Nano“ v názvu v dnešní době zaplavují trh a samotný pojem nano je široce využíván v různých oblastech techniky. Za nanotechnologii nebo nanomateriál se v dnešní době považují i materiály, které jsou studovány desetiletí a jsou široce využívány. Dáno je to především výrazným technologickým pokrokem a snahou popsat přírodní a člověkem vytvořený svět do větší hloubky s větší přesností. I když se nanomateriály široce zkoumají a je jim věnována velká pozornost a výzkumu značné prostředky, do skutečného průmyslu pronikají jen pozvolna. Především převod výroby z laboratorního prostředí do průmyslu pracujícího s velkými objemy je problematický. Laboratorní technologie využívané pro výrobu a práci v nanosvětě jsou velmi nákladné a často přesahují možnosti průmyslové velkovýroby.

### 5.1.1 Nanosvět

Pojmem nano označuje rozměr, který se pohybuje na úrovni  $10^{-9}$  základní jednotky. V oblasti nanotechnologií se tím myslí rozměr délkové jednotky. Pohybujeme se tedy na úrovni nanometrů. Pro představu jak velká tato jednotka je můžeme použít například molekulu vody. Ta dosahuje velikosti přibližně 0,1nm. To znamená, že v jednom nanometru může být těchto molekul deset. Za nanostruktury se pak považují takové, které, alespoň jeden ze svých rozměrů mají v oblasti 0,1 – 100nm.



Obr. Rozměry nanostruktur

Celá problematika nanotechnologie je velmi složitá a práce s těmito strukturami také. V oblasti nano již nestačí práce s běžnou fyzikou a chemií jak jsou využívány na běžné materiálové úrovni. Velký vliv zastávají meziatomové a vazebné síly a na důležitosti tak nabírá využití kvantové mechaniky a kvantové chemie.

Dle normy **ISO/TS 27687** je základním parametrem pro třídění různých typů nanoobjektů počet souřadnic, ve kterých daná struktura splňuje interval rozměrů 1 – 100 nm:

- **0D nanoobjekty** – vyhovují intervalu ve všech **3 souřadných osách (nanočástice)**
- **1D nanoobjekty** – vyhovují intervalu ve **2 osách (nanovlákná)**
- **2D nanoobjekty** – vyhovují intervalu v **1 souřadné ose (nanodesky, nanovrstvy)**

### 0D nanoobjekty

- **nanokrystaly**, tvořící vrstvy, povlaky i celé objemy nanomateriálů
- **porézní (leptané) nanomateriály** a **nanopěny** (nanofoams)
- **kvantové tečky** (quantum dots)
- objemové nanomateriály a nanostroje složené z makromolekul

### 1D nanoobjekty (nanovlákná)

- **nanovlákná** (nanofibers) s poměrem  $(x,y) : z > 1 : 3$ ;  $x,y \in (1 - 100\text{nm})$
- **nanopásky** (nanoribbons) jsou nanovlákná pravoúhlého tvaru s poměrem rozměrů průřezu větším jak 2:1
- **nanotyče** (nanorods), zde patří přímá plná nanovlákná
- **nanotrubic** (nanotubes) - dutá nanovlákná
- **nanodráty** (nanowires) - elektricky vodivá nebo polovodivá nanovlákná

- **kvantové dráty** (quantum wires) - charakteristické vlastnosti jsou dány kvantovým omezením
- **pilíře** (pillars) nanotyče nebo nanotrubičky rostoucí kolmo k základně

## 2D nanoobjekty (nanodesky)

- **vrstvy** (layers, films) - povlaky
- **deskovité nanokrystaly**
- **kvantové jámy** (quantum wells) - soustava tenkých vrstev vykazující charakteristické vlastnosti závislé na rozměrech vrstev, dané kvantovým omezením
- **nanostěny** (nanowalls) dvourozměrné útvary rostoucí kolmo k základně
- **rovinné makromolekuly** např. grafen (jednoatomární vrstva grafitu)

## 5.1.2 Historie nanotechnologií

Již v roce 1959 použil jeden z největších fyziků R.P.Feynman větu *There is a plenty of room at the bottom (Tam dole je spousta místa)*. Čímž v podstatě vyzval celý vědecký svět k tomu, aby se touto problematikou zabýval. Především když ve své přednášce věnované tomuto tématu položil otázku „Proč bychom nemohli na špendlíkovou hlavičku zapsat všech 24 svazků encyklopedie Britanika“. Toto se mimochodem vědcům již povedlo. Nanotechnologie se pomalu rozvíjely od přibližně 70let 20. Století, avšak nelze vytvořit pevnou časovou hranici. S rozvojem technologií pracujících na úrovni nanometrů se tato věda prudce začala rozvíjet. Dá se říci, že velkým průlomem bylo vyvinutí tunelovacího mikroskopu v roce 1981 (vynálezci obdrželi nobelovu cenu). Díky tunelovacímu efektu je možné manipulovat a pozorovat objekty na úrovni zlomku nanometrů. Tato metoda je však pouze jedna z mnoha a zatím se využívá především při laboratorním výzkumu. Posledních třicet let se tedy nanotechnologie rozvíjejí velice intenzivně.

Je třeba také zmínit, že již ve starověku se využívaly techniky, které pracovaly s nanomateriály. Často jsou zmiňovány techniky výroby skla, při kterých bylo použito práškových kovů způsobujících zbarvení výsledného skla. Bylo zjištěno, že tyto prášky obsahovaly částice velké pouze několik nanometrů. Samotná technologie však zůstane utajena v historii.

### Současné aplikace nanomateriálů

Aplikace nanomateriálů se každým rokem posouvají v závislosti na rozmachu v oblasti výzkumu a vývoje v posledních letech. Aplikace ještě donedávna nedosažitelné použitím nanomateriálů postupně začínají být téměř každodenní záležitostí všech průmyslových oborů. Často se používají částice stříbra v různých impregnacích a nástřicích, které mají desinfekční účinky. Českou chloubou může být vývoj průmyslového přístroje na výrobu nanovlákn, které může mít velké využití jak při výrobě různých velmi hustých filtrů tak pro výrobu oblečení. V lékařství se pomalu objevují nosiče chemických látek na úrovni nano. Nové elektronické součástky, tvořené jednou vrstvou molekul se jeví jako průlomové.



Co se nanotechnologií ve stavebnictví týče, jejich využití je zatím pouze výjimečné. V některých moderních betonových konstrukcích se již použily nanočástice oxidu titaničitého, který využívá tzv. fotokatalytický efekt. Jedná se o jakýsi samočistící efekt vlivem UV záření získaného ze slunečního svitu. Povrch betonu si tak zachovává svou čistotu.

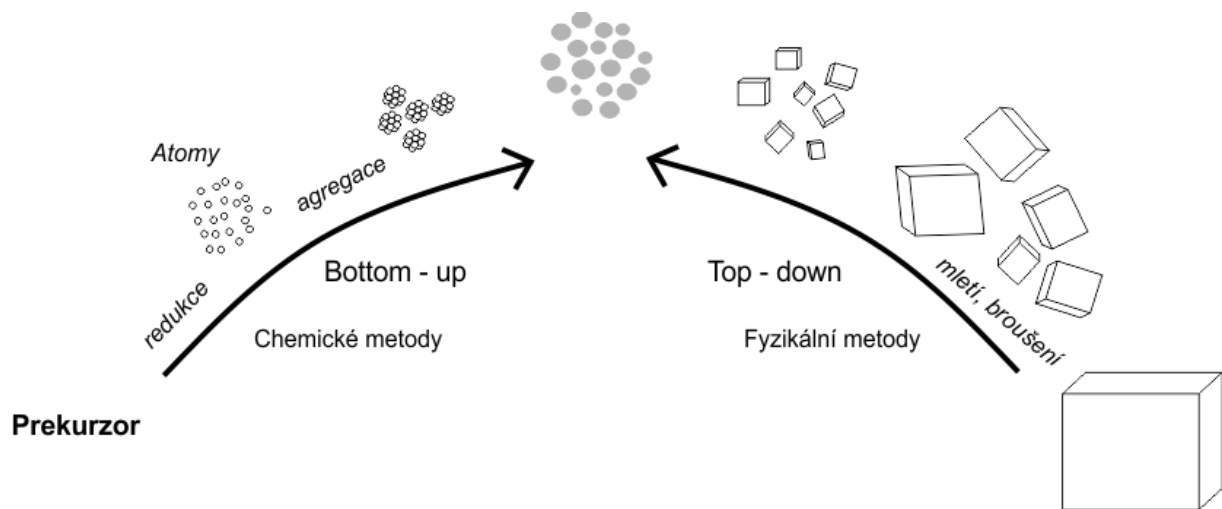
Používaná je také nanosilis, která zvyšuje kvalitu betonu, jelikož reakcí s cementem vyplňuje i prostory, kde cement nevnikne, vzniká tak pevnější vazba cement-kamenivo a beton je odolnější a pevnější.

Příklady možností současného a budoucího použití:

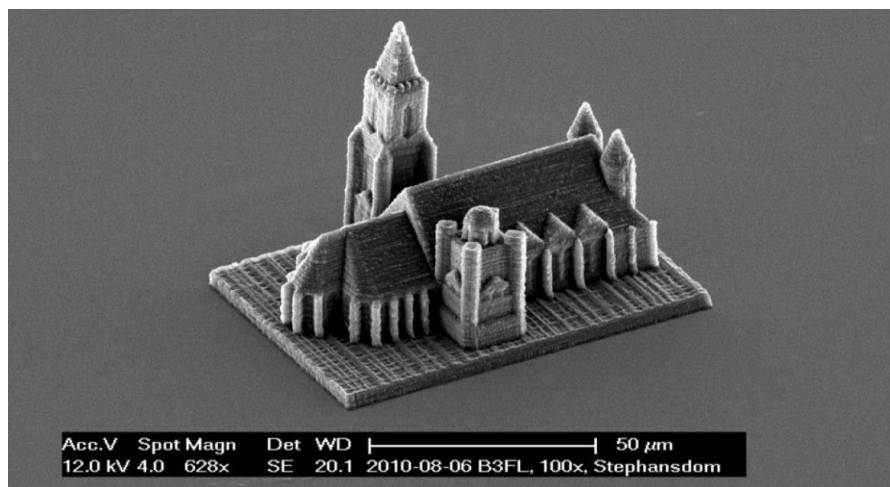
- zdravotnictví (cílená doprava léčiv na postižené místo, umělé klouby, chlopně, náhrada tkání, desinfekční roztoky, analyzátory, ochranné roušky)
- strojírenství (supertvrdé povrchy s nízkým koeficientem tření, samočistící laky, obráběcí nástroje)
- chemický průmysl (nanotrubice, nanokompozity, selektivní katalýza, aerogely)
- textilní průmysl (nemačkové, hydrofóbní a nešpinící se tkaniny, izolační netkané textilie z nanovláken)
- elektrotechnický průmysl (vysokokapacitní záznamová média, fotomateriály, palivové články, spintronika, bioelektronika, kvantová elektronika)
- optický průmysl (optické filtry, fotonické krystaly a fotonická vlákna, integrovaná optika)
- automobilový průmysl (nesmáčivé povrchy, filtry čelních skel)
- kosmický průmysl (odolné povrchy satelitů, nanokeramika)
- vojenský průmysl (nanosenzory, konstrukční prvky raketoplánů)
- životní prostředí (odstraňování nečistot, biodegradace, značkování potravin).
- stavebnictví (nové izolační materiály, samočistící fasádní nátěry, antiadhezní obklady)

### 5.1.3 Metody výroby nanostruktur

V zásadě existují dva přístupy k přípravě nanomateriálu. V anglickém jazyce se používá označení top-down a bottom-up. První metoda je v podstatě výroba materiálu v rozměru nano ze struktury o větších rozměrech. Nejběžnější používanou technikou je tak mletí nebo obrušování. Druhá technika naopak pracuje se strukturami ještě menšími než je nano a shlukuje je do struktur větších. Obvykle se využívá chemických procesů, například příprava koloidních roztoků, kdy nanočástice vznikají vysrážením z chemicky dokonalých roztoků.



Existují také hybridní techniky jako nanolitografie (technologie přípravy příčně strukturovaných tenkých vrstev). Zvláštní příprava spíše z oblasti vědeckých bádání je příprava struktur pomocí kvantového tunelování, kdy jsou vytvářeny nanostruktury skládáním jednotlivých atomů. Moderní technologií pro výrobu nejen nanostruktur je 3D tisk. Pomocí laserem roztaveného základního materiálu je možné vytisknout jakýkoliv objekt, který je namodelován v počítači.



Obr. Model katedrály v nanoměřítku vyroben pomocí 3D



## ZDROJE A DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

HOŠEK, J. *Úvod do nanotechnologie*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2010. str. 170s. ISBN 978-80-01-04555-8.

CAO, G. 2004. *Nanostructures & nanomaterials - Synthesis, Properties & Applications*. Imperial College Press. ISBN 978-1-59124-997-9.

BHUSHAN B. (Ed.). 2010. *Springer Handbook of Nanotechnology*. 3rd revised and extended edition. Springer Heidelberg. 1964 pages. ISBN: 978-3-642-02524-2

## **6 KERAMICKÉ MATERIÁLY**



## CÍLE KAPITOLY

Cílem této kapitoly je komplexní seznámení se keramickými materiály jako stavebním materiálem od výroby až po využití a zkoušení základních charakteristik.



## RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

Kapitola pojednává o keramických stavebních materiálech, jejich definici, surovinách, technologii výroby, vlastnostech a využití ve stavebnictví.



## ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

Čas potřebný k prostudování kapitoly je 48 hodin.



## KLÍČOVÁ SLOVA

Keramika, cihla, silikát, keramický stěp, kamenina, technická keramika, tvarovka.

### 6.1 Definice keramiky

Keramické materiály a výrobky jsou již po mnoho století materiálem se širokým uplatněním, zejména díky poměrně snadné technologii výroby, dostupné suroviny a výhodné vlastnosti (první cihlářská keramika je známa již několik tisíciletí př.n.l.).

Keramické materiály vynikají vysokou pevností, tvrdostí a otěruvzdorností, ale současně jsou náchylné ke křehkému porušení.

Keramické výrobky jsou řazeny mezi silikáty = krystalické anorganické výrobky nekovové povahy získané tepelným zpracováním nejčastěji přírodních surovin obsahující převážně oxidy křemíku. Mimo keramiku je mezi silikáty řazeno také sklo, maltoviny a smalty.

Keramické výrobky lze definovat jako skupinu stavebních hmot, uměle vyrobených z upravených anorganických surovin, které byly vytvarovány a žárově zpevněny.

Keramika často obsahuje skelné fáze a zejména póry, které jsou samostatnou fází se zcela odlišnými fyzikálně mechanickými vlastnostmi, avšak z makroskopického hlediska se jedná o homogenní izotropní materiál.

Charakteristickým znakem je **keramický střep**, což je základní keramická hmota bez ohledu na tvar. Celistvost keramického střepu se porušuje místním tahovým napětím za vzniku trhlin.

Užití keramických výrobků je ve stavebním průmyslu velmi široké, na základě toho je lze rozdělit z několika hledisek do různých skupin.

## 6.2 Dělení keramiky

### 6.2.1 Dle technologie výroby

- **Hrubá keramika** – jde o cihlářské výrobky, kanalizační a chemická kameninu, zahradní keramiku, žárovzdorné výrobky. Okem je zřetelný podíl zrn nad 100  $\mu\text{m}$  až do 5 mm,
- **Jemná keramika** – jde o jemnou kameninu (dlaždice), pórovinové obkladačky, zdravotní a nádobovou kameninu, kachle, porcelán a speciální střepy (slinuté oxidy apod.). Stavba střepu je pozorovatelná jen mikroskopem všechny zrna jsou do 100  $\mu\text{m}$ .

### 6.2.2 Dle použití výrobků

- **Stavební (tradiční) keramika** - mezi výrobky stavební keramiky patří především všechny cihlářské výrobky (zdící a stropní tvarovky, pálená krytina, dlaždice aj.), keramické obkladové prvky (obkladačky, dlaždice), kamenina (trouby, dlaždice), zdravotnická keramika (např. umývadla), kachle a částečně i žárovzdorné výrobky.
- **Technická keramika** – vyrábí se převážně z velmi čistých a jemných syntetických surovin a využívá se v řadě technických aplikací se zvýšenými požadavky například na chemickou odolnost, žáruvzdornost, pevnost v tlaku, odolnost vůči opotřebení, odolnosti vůči kolísání teplot a zatížení.

### 6.2.3 Dle vlastností keramického střepu

- **podle nasákavosti,**
- **podle barvy střepu na: bílý a barevný,**
- **podle charakteristiky střepu:** cihlářský, bělninový, kameninový, žárovzdorný, porcelánový apod.

### 6.2.4 Dle obsahu pórů

- **pórovitá keramika** - s hmotnostní nasákavostí střepu  $n_m$  nad 10%
- **polohutná keramika** - s hmotnostní nasákavostí střepu  $n_m = 6 - 10\%$
- **hutná keramika** - s hmotnostní nasákavostí střepu  $n_m = 3 - 6\%$
- **poloslinutá keramika** - s hmotnostní nasákavostí střepu  $n_m = 1,5 - 3\%$

- **slinutá keramika** - s hmotnostní nasákavostí střepu  $n_m$  pod 1,5%

### 6.2.5 Dle způsobu zpracování

- **keramickým způsobem** - nejčastěji, tj. vytvářejí se za sucha a potom se zpevňují pálením - *pálená keramika*
- **hutnickým způsobem** - tj. roztavením surovin v žáru a odléváním taveniny - *keramika odlévaná*.

### 6.2.6 Dle chemického a fázového složení

- fázový systém  $\text{SiO}_2$  – dinas
- fázový systém  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – korundová keramika
- fázový systém  $\text{ZrO}_2$  – zirkoničitá (baddeleyitová) keramika
- ostatní žárovzdorná oxidová keramika – fázové systémy typu  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ThO}_2$
- fázový systém  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  – cihlářské výrobky, hrubá kamenina, šamot
- fázový systém  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{K}_2\text{O}$  ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) – porcelán, pórovina, jemná kamenina, zdravotnická keramika
- fázový systém  $\text{MgO}$  –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – chrommagnezitové žárovzdorné hmoty
- fázový systém  $\text{MgO}$  -  $\text{SiO}_2$  – steatitová, stealitová a forsteritová žárovzdorná keramika
- fázový systém  $\text{MgO}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  – cordieritová keramika (s nízkou teplotní roztažností)
- fázový systém  $\text{BaO}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  – celsianová keramika (s nízkou teplotní roztažností)
- fázový systém  $\text{Li}_2\text{O}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  – lithná keramika (s nízkou teplotní roztažností)
- fázový systém  $\text{TiO}_2$  – rutilová keramika
- fázový systém  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{TiO}_2$  - thialitová keramika (s velmi nízkou teplotní roztažností)
- fázový systém  $\text{BaO}$  -  $\text{TiO}_2$  - speciální elektrokeramika (skupina tzv. feroelektrických dielektrik)
- fázový systém  $\text{ZrO}_2$  -  $\text{SiO}_2$  – zirkonsilikátová keramika
- fázový systém  $\text{ZrO}_2$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – korundo-baddeleyitová (tavená, odlévaná) keramika
- fázový systém **MeO** –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - feritová (magnetická) keramika, kde **Me** je buď Mn, Ni, Zn, Co, Cu, Mg u tzv. magneticky měkkých feritů nebo **Me** je Ba, Sr, Pb u tzv. magneticky tvrdých feritů
- neoxidová keramika – keramika na bázi  $\text{SiC}$  (karbidu křemíku),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (nitridu křemíku),  $\text{B}_4\text{C}$  (karbidu boru), BN (nitridu boru) – keramika s velmi vysokými teplotami tání a zpravidla velmi vysokou tvrdostí
- grafitová keramika – keramika na bázi C (uhlík)

## 6.3 Tradiční, stavební keramika

Keramika je soudržná, ve vodě nerozpustná polykrystalická látka, získaná převážně z přírodních anorganických nekovových surovin (nejčastěji silikátů) s určitým podílem skelné fáze, získaná zpracováním do tvaru a vypálením v žáru, při kterém dojde slinováním ke zpevnění a dosažení požadovaných fyzikálně mechanických vlastností.

Ve stavebním průmyslu má největší význam keramika na bázi jílových surovin. Pro tyto výrobky je typické, že jsou tvarovány za studena a potom zpevňovány pálením, případně odléváním taveniny.

Hlavními představiteli jsou cihlářské výrobky, kamenina, pórovina, porcelán a šamot, který však, z hlediska praktického užití náleží k žárovzdorné keramice.

### 6.3.1 Suroviny pro výrobu keramiky

Suroviny pro výrobu keramiky jsou látky, které svým chemickým, mineralogickým a granulometrickým složením vytvářejí předpoklady pro požadované vlastnosti keramického střepu nebo glazury.

*Podle původu je dělíme na:*

- **suroviny přírodní** – převažující v keramické výrobě,
- **suroviny syntetické** – upravené přírodní suroviny užívané především při výrobě speciální nebo žárovzdorné keramiky (např. oxid hlinitý, oxid zirkoničitý), typické použití zejména v technické keramice
- **suroviny druhotné a recyklované** – nejčastěji průmyslové odpady (popílký, kaly aj.). **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**
- **pomocná aditiva** **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

*Podle funkce v keramickém střepu se dělí na:*

- **suroviny střepové** – slouží pro vznik samotného keramického střepu,
- **suroviny nástřepné** – slouží k vytváření speciálních povrchů keramického střepu – glazury nebo engoby,
- **suroviny pomocné** – jsou nezbytné při technologii výroby keramiky (např. sádra nebo ztekuvadla při vytváření litím).

*Podle chování po rozdělení s vodou dělíme keramické suroviny na:*

- **suroviny plastické** – po rozdělení s vodou jsou schopné tvarování (např. jíly, hlíny, kaoliny),
- **suroviny neplastické** – nemají plastické schopnosti a upravují chování směsi surovin při vytváření, sušení a pálení. Dělí se na *ostřiva*, *taviva* a *lehčiva*. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

**Plastické (tvárnivé) suroviny**

Plastické keramické suroviny (tzv. jílovinové zeminy) jsou schopny po určitém přídavku vody (průměrně asi 20 % hmotnostních) vytvořit těsto, které je možno snadno tvarovat bez porušení jeho celistvosti a je schopné se sušením a výpalem zpevnit. Jílovinové zeminy mají schopnost vázat zrna neplastických surovin, během sušení se smršťují a díky značné kohezi (přitažlivosti) zrn po vysušení zajišťují dostatečnou pevnost výsušku.

Mezi plastické suroviny patří zejména produkty zvětrávání hornin s podstatným nebo převažujícím obsahem jílových minerálů (**spraše, sprašové a svahové hlíny, jíly a jílovce, slíny, zvětraliny břidlic**).

Mezi tyto jílovinové zeminy řadíme:

- **jílovin** s velikostí zrna o průměru  $< 2 \mu\text{m}$ ,
- **prachoviny** s velikostí zrna o průměru 2 - 50  $\mu\text{m}$  a
- **pískoviny** s velikostí zrna o průměru 50  $\mu\text{m}$  a větším.

Obecně platí, že s rostoucím podílem jíloviny roste plastičnost zemin.

Z hlediska granulometrie můžeme se dále tyto zeminy dělit na:

- **jíly** - obsahují více než 50 % jíloviny,
- **kaolíny** - 45 – 65% jíloviny a 0 – 55% prachoviny
- **hlíny** - obsahují 20 - 50 % jíloviny a 50 - 80 % prachoviny s pískovinou.

Jílovité suroviny můžeme také rozdělit podle obsahu typických jílových minerálů, mezi něž patří zejména **kaolinit**  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , **montmorillonit**  $(1/2\text{Ca-Na})_{0,25-0,6}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  a **illit**  $(\text{KH}_3\text{O})\text{Al}_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .

## 6.3.2 Neplastické suroviny

Neplastické suroviny nejsou schopny po rozdělání s vodou vytvořit plastické těsto. Nejčastěji se používají jako příměsi do plastických keramických surovin (jílovinových zemin), ve speciální keramice (např. žárovzdorné) mohou být základní surovinou ve výrobní směsi s příměsí např. pojiva (jílovinová zemina, vodní sklo, fosforečnany apod.). Podle funkce, kterou plní v surovinové směsi se dělí na:

- ostřiva,
- taviva a
- lehčiva.

Některé přísady plní různou měrou více funkcí současně. Například živce v plastickém těstě plní funkci ostřiva, při výpalu fungují jako významné tavivo.

### Ostřiva

Ostřiva jsou přírodní nebo umělé (v cihlářství i odpadní) látky, které jednak **upravují vlastnosti plastického těsta - snižují plastičnost**, naopak ale **zmenšují adhezi těsta k formám, snižují citlivost k sušení a snižují smrštění sušením** - a jednak mohou být



**účinné při výpalu**, kdy reakcí s oxidy přítomnými v ostatních složkách dochází ke **vzniku pevné vazby ostřivo-pojivová složka** a tím se získá hutný a pevný střep. Podle chemické povahy je lze rozdělit na ostřiva:

- křemičitá (např. křemelina a křemenný písek),
- hlinitokřemičitá (např. šamot),
- speciální (např. korund  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nebo SiC).

Další logické dělení je podle granulometrie (maximální zrno, tvar zrn a křivka zrnitosti).

## **Taviva**

Při výpalu keramického střepu se taviva účastní tvorby taveniny, která spojuje krystalické fáze střepu, reaguje s nimi a může spolupůsobit při tvorbě nových krystalických fází. **Taviva snižují teplotu výpalu** - při jejich použití lze získat střep o stejné pórovitosti při nižší teplotě výpalu než bez jejich použití. Lze je rozdělit na taviva:

- **základní** - obecně suroviny s nízkou teplotou tavení (živce, fonolity, frity, skla apod.),
- **eutektická** - suroviny obsahující oxidy, které reakcemi v žáru s dalšími oxidy ve střepu vytváří nízkotavitelné sloučeniny. Tavenina je vytvořena při nižší teplotě, než je teplota tavení jednotlivých reagujících složek (uhličitany, mastek apod.).

## **Lehčiva**

Lehčiva slouží ke snížení objemové hmotnosti keramického střepu, resp. jeho tepelné vodivosti. Současně dochází ke snížení pevnosti střepu. Rozeznávají se lehčiva působící **přímo** (tyto látky při výpalu vyhořívají – piliny, korková drť, briketová drť, pěnový polystyren apod.) a **nepřímo** (svou nižší objemovou hmotností v surovinové směsi např. křemelina, škvára, cenosféry, keramzit, perlit).

### **6.3.3 Suroviny používané k úpravě povrchu keramického střepu**

**Povrchovými úpravami keramického střepu jsou především:**

- **Glazury** – sklovité povlaky na povrchu keramického střepu, který má jak estetický, tak technický význam. Zajišťují nepropustnost výrobku pro plyny a kapaliny, zvyšují jeho odolnost proti povětrnostním vlivům, mohou zvyšovat chemickou odolnost a pevnost a umožňují omyvatelnost.

Glazury jsou zpravidla suspenzí nízkotavitelných jíílů a skel (tzv. frity), živců, barevné hlinek a kříd. Glazura díky příbuznosti materiálů dokonale přilne a pronikne do pórů.

- **Engoby** – jsou tenkovrstvé povlaky (jemné jíly/hlíny, které se rozplavují na břechku), které slouží k zušlechťování povrchu keramických výrobků nebo zlepšují jeho některé vlastnosti (např. nasákavost střešní krytiny). Keramické barvy jsou tvořeny barvicími oxidy, většinou kovy. Engoby vytváří hutné keramické nezeskelněné vrstvy (dříve nazývané nástřepí). Engoby tvoří pórovité a většinou hutné povrchy, používané zejména na cihlářských výrobcích. Nanášejí se na vypálený nebo nevypálený střep a jejich povrch po výpalu je matný.



Obrázek 04: Nanášení engoby na povrch střešní krytiny

- **Jiné způsoby povrchové úpravy – zejména u technické keramiky se provádí také** pokovování či pokrytí polymerním povlakem. Povrch lze (velmi obtížně) také pro speciální účely brousit a leštit.

## 6.4 Výroba (cihlářské) keramiky

Největší objem keramických výrobků v současnosti produkuje cihlářská technologie. Cihlářské výrobky představují jednu z nepoužívanějších skupin stavebních hmot. Ve stavebnictví se cihlářské zboží uplatňuje ve formě pálených zdících materiálů, pro konstrukce stropů i pro krytí střech.

Proces výroby keramických produktů lze rozdělit do několika následujících etap, a to:

- těžba a předpříprava keramických surovin,
- zpracování keramických surovin,
- vytváření/lisování,
- sušení,
- výpal
- skladování a expedice.

### 6.4.1 Těžba keramických surovin

Keramické suroviny se těží povrchově, pouze ojediněle se některá ložiska těží podpovrchově, nákladným důlním způsobem. V České republice se těží výhradně v povrchových dolech v blízkosti cihelny. Místo těžby se obvykle označuje jako hliniště. Pro těžbu se používají rypadla korečkové s kolejovým pohybem nebo s pojezdem na pásech, kolesové, lžicové a stroje pro plochou těžbu (dozery, skrejpry, grejdry aj.). Každý typ stroje má určité výhody i nevýhody. Korečkové rypadlo se nehodí pro selektivní těžbu apod. Doprava natěžené suroviny k výrobní lince může být kontinuální dopravními pásy nebo přetržitá kolejová (úzkokolejná doprava se dnes téměř nepoužívá) a nákladními auty (dnes nepoužívanější). Volba způsobu dopravy závisí na dopravní vzdálenosti.



Obrázek 05: Zleva: Hlinišťe cihelny Wienerberger, Jezernice a hlinišťe závodu Tondach Hranice.

#### 6.4.2 Předpříprava keramických surovin

Předpřípravou suroviny se rozumí technologické operace, které předcházejí vlastní přípravě (úpravě) suroviny v závodě. Mezi základní způsoby předpřípravy suroviny patří zejména **haldování**, které je při dnešní strojní těžbě téměř nezbytná úprava především plastických surovin. Jedná se o způsob ukládání/vrstvení natěžené zeminy na haldy nejčastěji 5 až 10m vysoké. Halda plní dvě základní funkce:

- umožňuje prvotní homogenizaci a částečné odležení suroviny,
- vytváří dostatečnou zásobu suroviny.

Natěžená surovina se skladuje v blízkosti cihelny v množství potřebném podle objemu výroby. Z technického hlediska zajišťují zásoby, zejména plastických surovin, prvotní úpravu a homogenizaci. Ke zlepšení stejnorodosti materiálu lze haldu zkrápět, čímž dojde k rozdužení zrn jílovin a jejich nabobtnání, což vylepší reologii těsta. **Homogenizace** je proces vedoucí k rovnoměrnému rozdělení všech druhů částic v surovině. Z hlediska zásobování umožňují zásoby na haldách překonat případné období záplav či jiných nepříznivých podmínek, kdy není možné provádět těžbu suroviny.

#### 6.4.3 Zpracování keramických surovin

Jedná se o technologický proces úpravy vstupních surovin zejména drcením, mletím, mísením tak, aby došlo ke stabilizaci výsledných vlastností v celém objemu výroby.

Každý keramický výrobek potřebuje určitou jemnost výrobku směsi, která se popisuje maximálním zrnem ve směsi a jeho maximálním obsahem. Zpracování surovin se uskutečňuje v sestavě vhodných strojů. Z hlediska vlhkosti surovinové směsi při zpracování surovin rozlišujeme mokrou a suchou úpravu surovin. V praxi je běžnější mokrá úprava, tj. při přírodní vlhkosti surovin cca 10 – 25 %.

**Plavení** je nejúčinnější způsob úpravy plastických surovin, během které dojde k dokonalému odstranění hrubých součástí, resp. škodlivin (např. křemen, slídy, cicvár, sádrovec, pyrit) a k velmi dobré homogenizaci.

Následující fází zpracování keramických surovin je **fyzikálně mechanická úprava**, jejímž úkolem je rozrušení původní struktury natěžené suroviny, tj. příprava surovinové směsi (drcením, mletím, mísením, hnětením, dávkováním).

Sestava strojního zařízení (mlýny) působí na surovinu mechanicky tak, že ji dokáže rozmělnit na velikost zrna např. pod 1 mm. Zrna jíloviny jsou však mnohem menší a proto je třeba fyzikálně mechanickou úpravu doplnit i **fyzikálně chemickou**, která postihuje i nejjemnější zrna zeminy a je nezbytná především při vytváření z plastického těsta. Důležitým činitelem při této úpravě je voda. Mezi fyzikálně chemické metody úpravy keramických surovin patří: odležení, ostření, odvzdušňování, proteplování a propařování a přidavek chemických přísad.

Součástí přípravných operací, prováděných zpravidla před samotným vytvářením výrobků, je **propařování suroviny** horkou párou a **odvzdušnění těsta** ve vakuové komoře šnekového lisu. **Připravené plastické těsto, které vchází do šnekového lisu má vlhkost (tzv. vytvářecí vlhkost, resp. rozdělavací vodu) zpravidla v rozmezí 18 – 22 %**. Odležárna plní kromě funkce homogenizační také funkci provozní - zajišťuje zejména dostatečnou zásobu suroviny pro překlenutí špatného nebo zimního počasí, výpadků v těžbě apod.

Pro úpravu vlastností plastického keramického těsta se v cihlářství používají zejména tyto základní úpravářská zařízení:

- **podávání a dávkování**: skříňové a bubnové podavače, na sypké příměsi i podavače šnekové,
- **míšení a homogenizace**: kolové mlýny, talířová mísidla, protlačovací mísidla,
- **drcení a mletí**: kolové mlýny, válcové mlýny,
- **skladování a odležování**: odležárny, odležovací věže, zásobníky. Volba konkrétní varianty přípravy pracovní směsi je závislá na vlastnostech komponent cihlářského těsta a požadavcích na jeho kvalitu.



Obrázek 06: Zásobník hlíny, odležárna

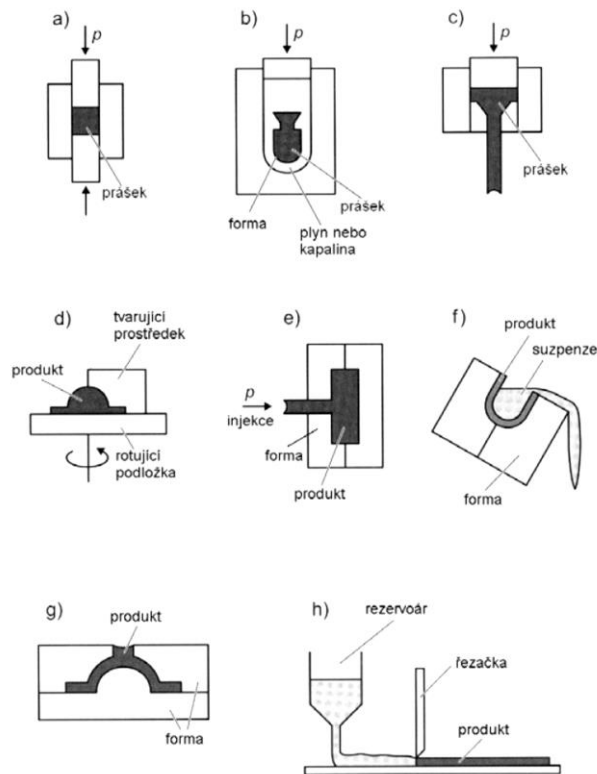
## 6.4.4 Vytváření

Vytváření v keramice představuje technologický postup převedení polydisperzního systému výrobní směsi v kompaktní systém konkrétních geometrických rozměrů - výlisek.

Existuje mnoho různých technik tvarování, které se volí dle dispozic výroby (tvar, vlastnosti, přesnost, množství, druh vstupní suroviny aj.).

V podstatě se nejčastěji využívají tři základní technologie vytváření, které se odvíjí od vlhkosti surovinové směsi (tzn. její tvárnosti).

- Lisování,
- Vytváření z tvárného (plastického) těsta,
- Lití suspenze (břečky) do forem, vstřikování



Obrázek 07: **Rozšířené možnosti tvarování keramických výrobků (p – tlak). a) Suché lisování, b) Izostatické lisování, c) Vytlačování, d) Plastické tvarování, e) Injekční formování, f) Lití ze suspenze, g) Lití do formy, h) Foliové lití**

#### 6.4.5 Lisování

Lisování je fyzikálně mechanický proces, při němž dochází k formování hmoty za použití tlaku. Celkem rozeznáváme čtyři základní typy lisování:

##### - běžné

Pro suché až polosuché směsi o vlhkosti cca 0 – 15 %, lisovací tlak až 200 MPa. Ze suché směsi se lisují například obklady a dlaždice (granulát o vlhkost 4 - 7 %, tlak 25 - 45 MPa), ze zavlhlé směsi (drolenky) se lisují např. žárovzdorné tvarovky.

Pro vlhké směsi (drolenky až plastická těsta) o vlhkosti až 25 % - lisovací tlak do 20 MPa.

- **mžikové** – pro suché a polosuché směsi – nejčastěji dusání, vibrování (nebo jejich kombinace),
- **izostatické** – suché směsi, lisování tlakem až 1000 MPa,
- **speciální** – žárové lisování, izostatické žárové lisování.

### 6.4.6 Vytváření z tvárného plastického těsta

V cihlářství se využívá téměř výhradně způsobu vytváření z plastického těsta. Tento postup se používá při vlhkosti těsta 15 - 25 %. Výlisky se zpracovávají dvěma základními způsoby:

**Tažením** - základním strojem je šnekový lis (dnes výhradně vakuový), výlisky jsou tvarovány buď horizontálním tažením (cihlářské výrobky) nebo vertikálním tažením (kameninové trouby větších světlostí).



Obrázek 08: : Vytvářecí část výrobního procesu keramické tvarovky. Odzadu: protlačování keramického těsta, vytváření vakuovým šnekovým lisem, řezání strunou na jednotlivé výrobky.

Kromě tažení se využívá také **vytváření ražením** na revolverových lisech. Takto se vyrábí ražená střešní krytina (pálená krytina).



Obrázek 09: Ražení střešní krytiny, Tondach Hranice.

Další technologie výroby - vytáčením (nádoby kruhového průřezu, talíře, hrnky aj.) nebo vytlačováním do formy (kachličky).

#### 6.4.7 Lití suspenze (břečky) do forem

Metoda lití suspenze do forem se používá k vytváření složitých tvarů (např. zdravotní keramika) s vysokým obsahem vody v suspenzi (běžně 30 - 40 %). Nejdůležitější vlastností licí břečky je její ztekucení, což je v podstatě nejlepší tekutost při maximálním obsahu tekuté fáze v suspenzi. Prakticky ve všech případech se běžně používají ztekucovadla. Dnes se používají technologie lití:

- na stěp (pro výrobky s tenkým stěpem),
- na jádro (pro silnostěnné výrobky složitějšího tvaru).

V keramice je v závislosti na použitých technologiích výroby a požadovaných vlastností finálních výrobků využíváno třech typů **forem**, a to: pórovitých (sádrových, polymerních), kovových, elastomeroých (pro izostatické lisování).

#### 6.4.8 Sušení

Podle způsobu vytváření obsahuje vylisek větší (při vytváření z plastického těsta a litím z břeček) nebo menší (vytváření lisováním ze suchých a polosuchých směsí) množství vody, kterou je nutno před výpalem z vylisku odstranit. Bez procesu vysušení by při výpalu došlo k nevratným deformacím a destrukci vlivem expanze plynů (vodní páry) v pórech.

**Sušení** je technologický proces, při němž se snižuje působením tepla vlhkost vylisku na takovou hodnotu, která je určena podmínkami výpalu. Během procesu sušení se z vylisku s cca 20% vody (plastické těsto) stává **výsušek** se zbytkovou vlhkostí v rozmezí 1-1,5%. Doba sušení je závislá na druhu výrobků (síle stěny) a typu sušárny a pohybuje se obvykle v rozmezí 12 – 76 hodin. Důležitým parametrem při sušení je citlivost k sušení (nejčastěji dle Bigota), která určuje rychlost sušení, aniž by došlo k negativním změnám ve struktuře výsušku. Během sušení získá určitou pevnost a odpařováním vody také dojde ke smrštění, které se pohybuje v rozmezí 4-6%.

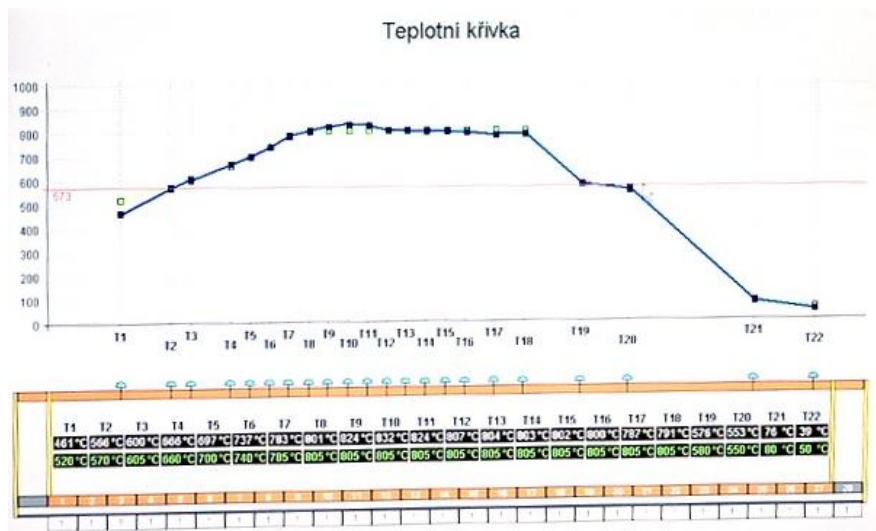
Existují dva základní typy sušáren: periodické (např. komorová) a kontinuální (např. kanálové a skříňové sušárny). Proces sušení je energeticky náročný, proto se využívá velmi výhodně odpadního tepla z výpalu.

### 6.4.9 Výpal

Výpal je dalším důležitým technologickým krokem, při němž vysušený vylisek získává své konečné vlastnosti pálením. Teplota vypalování se liší dle druhu použitých surovin a druhu keramického výrobku, obvykle se pohybuje v intervalu 900 - 1400 °C.

- cihlářské výrobky 860 - 1100 °C
- kameninové výrobky 1150 - 1350 °C
- pórovinové výrobky 1050 - 1280 °C
- žárovzdomné výrobky 1300 - 1600 °C
- porcelán 1350 - 1450 °C

Vypálený keramický stěp získává vyšší pevnost, stabilní tvar, jinou barvu a je odolný proti působení povětrnosti i proti řadě agresivních látek. **Výpal** je proces tepelného zpracování vysušeného polotovaru, který zahrnuje několik fází. Při vstupu do pece dochází v předehřívacím pásmu k **ohřevu** vypalovaného tělesa z počáteční teploty **na požadovanou vypalovací teplotu** (dochází k dosoušení a počátku reakcí), dále se posouvá v peci do žárového pásma, kde si udržuje svou teplotu výpalu (**izotermická výdrž**, období zhuťňování a slinování) a poté dochází v chladnoucím pásmu k postupnému **ochlazení** vypalovaného tělesa na teplotu okolí. Jednotlivé časové úseky jsou dány tzv. pálicí křivkou.



Obrázek 10: Příklad teplotní křivky pro výrobu tvarovky s náběhem teploty, izotermickou výdrží a pozvolným chlazením. Rychlost změny teploty se musí přizpůsobit povaze výrobku

Výpal je ekonomicky nejnáročnější proces, který se podílí průměrně 30 - 50 % na ceně výrobku, proto je snaha optimalizovat vstupní suroviny tak, aby poměr maximální teplota výpalu ke kvalitě vypáleného výrobku byl co nejnižší.



V cihlářství se, oproti jiným oborům keramiky, uplatňuje výpal na nižší vypalovací teploty (zpravidla v rozmezí asi 860 – 1050 °C). Doba výpalu činí v průměru 10 až 35 hodin.

### Procesy při výpalu keramiky

Během výpalu proběhnou ve střepu fyzikální, chemické a mineralogické děje, které vedou k dosažení požadovaných vlastností výrobku. Dochází ke ztrátě hmotnosti vypalovaného výrobku, a to v důsledku ztráty vody žíháním, vyhořívání organických látek a termického rozkladu některých sloučenin. Při výpalu dochází rovněž ke smrštění vypalovaného tělesa (0,5 – 1 %), délkové změny jsou však celkově menší než při sušení. Jílové minerály ztrácejí výpalem svoji tvárnost, tento proces je nevratný.

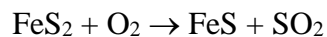
Zpevňování keramických střepů během výpalu se děje procesem slinování. **Slinování** je proces, při kterém dochází k zpevňování práškové nebo pórovité látky vzájemným spojováním zrn účinkem teploty, aniž by se musela látka tavit (teplota slinování silikátů = 0,8 - 0,9 násobek teploty tavení).

### Základní reakce při výpalu

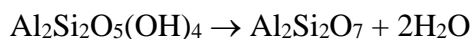
- **dehydratace**, resp. **dehydroxilace** (tj. ztráta volné a vázané vody),
- **oxidace** (tj. vyhořívání) organických látek,
- **termická disociace** (tj. tepelný rozklad, typický zejména u karbonátů),
- **polymorfní transformace** (tj. změna krystalové modifikace, typická u křemene),
- **reakce v tuhé fázi** před slinováním (např. vznik spinelové fáze z metakaolinitu),
- **tavení**, tj. tvorba skelné fáze.

S postupně narůstající teplotou lze (zjednodušeně) v cihlářském střepu popsat tyto hlavní chemické a mineralogické reakce:

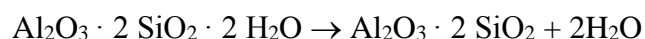
- v teplotním intervalu **od běžné teploty do asi 200 až 250 °C** se z materiálu uvolňují zbytky vlhkosti, která nebyla odstraněna při sušení; jedná se o vodu adsorbovanou v pórech materiálu,
- **při cca 200 °C** začíná uvolňování prchavých hořlavých látek, jejich spalování nastává - pokud je přítomen kyslík - až při **asi 350 °C, do asi 300 °C** zároveň těkají uhlovodíky, pokud jsou ve střepu přítomny (např. z mazacích olejů),
- při poměrně nízkých teplotách dochází k rozkladu siřičku železa – **pyritu** (FeS<sub>2</sub>), který se oxiduje při teplotách asi **350 - 450 °C** podle rovnice:



- v rozmezí zhruba **450 – 600 °C** probíhá **dehydroxilace kaolinitu** jako jednoho ze základních jílových minerálů, a to podle schematické rovnice:



respektive



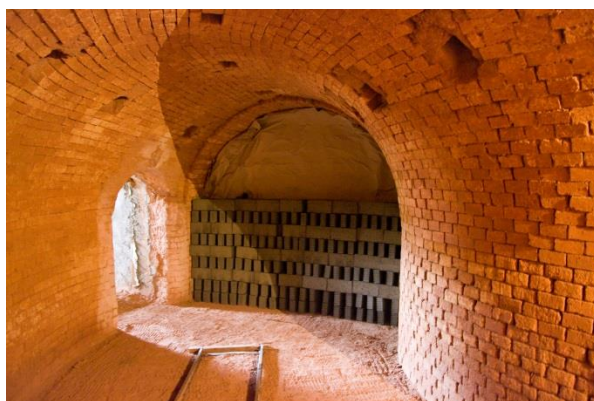
*kaolinit*

*metakaolinit*

## Keramické pece

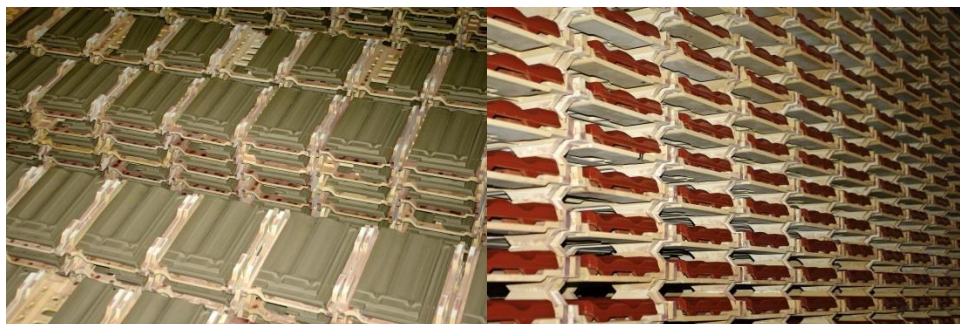
Vývoj keramických pecí směřuje od periodicky pracujících pecí do 19. století (např. mlíře) ke kontinuálním pecím (kruhové pece od roku 1858). Vývoj je patrný i v používaném palivu, kde se postupně přešlo od tuhých paliv k výpalu zemním plynem. Pece se rozdělují podle způsobu výpalu na:

- **kontinuální pece** - v hrubé keramice se používají již výhradně **tunelové pece** (v cihlářské výrobě již nahradily kruhové pece) a v jemné keramice (např. při výrobě keramických obkladových prvků) se stále využívá **válečkových pecí** (princip tunelové pece s válečkovým dopravníkem).
- **periodické pece** - jsou vhodné pro malosériovou nebo kusovou výrobu, které se podle konstrukce dělí na **vozokomorové** nebo **pokloповé** pece. Výrobky se během výpalu nepohybují, celá pálicí křivka probíhá na jednom místě.



Obrázek 11: Periodická pec, Cihelna Polom

Cílem výpalu je kromě minimalizace spotřeby energie také maximálního kapacitního využití pece, proto se využívá různých pálicích pomůcek.



Obrázek 12: Střešní tašky v pálicích boxech na pecním voze. Vlevo vysušené výlisky před vypálením, vpravo již vypálené střešní tašky.

#### 6.4.10 Kontrola, skladování a expedice výrobků

Závěrečnou etapou výrobního procesu je kontrola kvality jednotlivých výrobků, která se provádí např. vizuálně, případně akusticky - poklepem. Poslední etapou je zapáskování výrobků, paletování a balení do smršťovací fólie. U pálené krytiny se provádí před zabalením máčení ve vodní lázni vzhledem k možnému výskytu vápenných částic, které se tímto vyhasí.

### 6.5 Zkoušení a základní vlastnosti keramiky

Stanovení vlastností keramiky je možné rozdělit do několika skupin:

- zkoušení vlastností těsta (břečky),
- zkoušení vlastností výsušku,
- stanovení parametrů finálního vypáleného střepu.

Tyto zkoušky a stanovení fyzikálně mechanických a chemických vlastností platí téměř pro všechny keramické výrobky obecně. Samozřejmě, že keramických výrobků je mnoho, tudíž se zde vzhledem k obsáhlosti této problematiky nelze dopodrobna věnovat všem charakteristikám.

Pro stanovení **vlastností cihlářských zemin** existuje řada norem ČSN 72 1565-XX. V této normě jsou dány postupy pro stanovení vlastností cihlářských zemin (jsou zde zahrnuty všechny tři výše zmíněné skupiny tj. vlastnosti těsta, výsušků i keramického střepu) jako např. **vlhkost, zrnitost sedimentací, stanovení délkových změn, stanovení citlivosti k sušení dle Bigota, stanovení škodlivosti cicváru nebo stanovení náchylnosti ke tvorbě výkvětu.**

Z dalších zkoušek lze zmínit **stanovení pracovní vlhkosti dle Pfefferkorna**, jež je dána normou ČSN 72 1074.

Jednou z nejdůležitějších vlastností keramických výrobků (použitých v exteriéru i interiéru) je **nasákavost**. Existuje několik metod k určení nasákavosti, jednak nasákavost **varem** dle ČSN 72 1565-6, nasákavost **vakuovým způsobem** prováděná v souladu s ČSN EN ISO 10545-3 a nasákavost **za studena**.

Poněkud přesnější ukazatel pórovitosti než nasákavost je **zdánlivá pórovitost** stanovovaná dle ČSN 72 1565-6. Tato potom udává poměr objemu otevřených pórů zkušební vzorku k jeho celkovému objemu včetně pórů. Společně s touto vlastností se většinou provádí také stanovení vlastnosti zvané **zdánlivá hustota**, jež charakterizuje hmotnost vysušeného vzorku na jednotku jeho objemu včetně uzavřených pórů.

S pórovitostí také úzce souvisí **distribuce pórů**, která je stanovována metodou zvanou vysokotlaká rtuťová porozimetrie. Princip je založen na vlastnosti kapalné rtuti nesmáčet povrchy většiny pevných látek (tzn. mají úhel smáčení 90°). Díky tomu vniká rtuť do otevřených pórů pevné látky výhradně účinkem definovaného, rovnoměrně se zvyšujícího tlaku. Na základě známých konstant a absolutního tlaku se následně vypočte poloměr pórů.

**Vzlínavost** charakterizuje do jaké výšky je střep schopen pojmout vodu za 90 minut. Udává se mezní hodnota 50 mm / 90 min.

Podstatou zkoušky **pevnosti v ohybu** dle ČSN EN ISO 10545-4 je stanovení velikosti síly, potřebné k porušení zkušebního tělíska předepsaného tvaru a rozměrů při rovnoměrném zatěžování (namáhání) ohybem.

Další podstatnou vlastností je **prosákavost**, jež hraje významnou roli v případě střešní krytiny. Prosákavost se svým charakterem již řadí mezi zkoušky speciální.

Pro stanovení vlastností **keramických obkladových prvků** platí řada norem ČSN EN ISO 10545-XX.

Za zmínku také stojí požadované vlastnosti na **kameninu** které udělují normy ČSN 72 5220 (Hospodářská kamenina. Jakost, tvary a rozměry) a ČSN 72 5250 (Chemicky odolná stavební kamenina - Požadavky a zkušební metody).

Pro stanovení vlastností **žárovzdorných tvarovek** platí řada norem ČSN ISO 5019-X, která ve svých celkem šesti částech definuje všechny požadované parametry a jejich stanovení.

Další podstatnou řadou norem je ČSN EN 772-XX (celkem 20 částí), která definuje požadavky na vlastnosti a zkušební metody **zdících prvků** obecně.

Stanovení geometrických charakteristik **pálených střešních tašek** pro skládané krytiny udává ČSN EN 1024. Zkouška prosákavosti pálených střešních tašek se pak provádí dle ČSN EN 539-1 a mrazuvzdornost se stanoví dle ČSN EN 539-2.

## 6.5.1 Základní vlastnosti stavební keramiky

**Keramický střep je charakterizován zejména následujícími vlastnostmi:**

- Mrazuvzdornost,
- Výkvětovost,
- Tepelná vodivost,
- Pevnost,
- Tvrdost,
- Chemická odolnost,
- Žárovzdornost,
- Hygienické nezávadnost.

**Mrazuvzdornost** je schopnost keramického výrobku vydržet za daných podmínek určený počet cyklů zmrazování a rozmrazování bez následného vzniku závad na střepu nebo glazuře. Častou příčinou špatné mrazuvzdornosti střepů je porušení v důsledku vnitřní skryté vady. Existuje vztah mezi odolností vůči mrazu a **nasákavostí**. Nižší nasákavost je předpokladem větší odolnosti proti vlivu mrazu. Mrazuvzdornost je ovlivňována rovněž tvarem a velikostí přítomných pórů. Některé keramické střepy na základě vhodného rozložení a velikosti obsažených pórů i při nasákavosti nad 10 % vykazují za určitých podmínek dobrou mrazuvzdornost.

**Výkvěty solí** se mohou po čase objevit na povrchu keramických střepů, zejména s vyšší pórovitostí. Jsou způsobeny usazováním rozpustných solí po odpaření vlhkosti. Rozlišují se

primární a sekundární výkvěty. *Primární výkvěty* jsou vlastností výrobku, pokud obsahuje rozpustné soli, které při výpalu nevytvořily taveninu. Vyloučení primární výkvětovitosti je záležitostí technologie (výše teploty výpalu, typ suroviny, použití přísad). *Sekundární výkvěty* vznikají ve zdivu. Pokud malta obsahuje rozpuštěný  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , který je v roztoku nasáván do pórů cihel a na povrchu, po odpaření vody reaguje se vzdušným  $\text{CO}_2$  za vzniku jemných krystalků  $\text{CaCO}_3$ .

Tepelná vodivost keramických střepeů je kvantifikována **součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$**  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], který vystupuje jako hlavní parametr při šíření tepla vedením. Hodnota  $\lambda$  se určuje na základě experimentálních měření a závisí na mnoha činitelích, zejména na:

- objemové hmotnosti,
- obsahu vlhkosti,
- druhu, velikosti a rozdělení pórů v látce,
- mineralogické struktuře,
- absolutní teplotě.

**Pevnost** keramického střepeu je funkcí pórovitosti. Závislost pevnosti keramického střepeu na pórovitosti je matematicky popisována v mnoha tvarech, ale většinou s empirickými koeficienty. **Pórovitost** má velký význam v hrubé keramice, zejména cihelného střepeu, kde u běžných zdících tvarovek je požadována minimální nasákavost 12 %. V praxi se přikládá největší význam lomové síle a **pevnosti v ohybu** (tří bodová).

**Tvrдость** určuje mechanické chování lícního povrchu. Vyjadřuje odolnost výrobku proti mechanickému opotřebování (poškození škrábáním, rypáním pohybem těles po povrchu). Ke stanovení stupně tvrdosti se u keramiky používá nejčastěji vrypová metoda, při které se tvrdost stanovuje ve vztahu k Mohsově stupnici tvrdosti. Tvrдость se udává v hodnotách od 1 do 10 stupňů Mohsovy stupnice tvrdosti srovnáním s tvrdostí přírodních nerostů.

**Chemická odolnost** hraje rozhodující úlohu při použití keramického střepeu v agresivním prostředí. Vysoká chemická odolnost je také zárukou dlouhodobé životnosti např. dlažeb a také lícového zdiva. Odolnost keramického střepeu proti chemickým činidlům může být udáván jako poměr hmotnosti vzorku po působení kyseliny nebo louhu ke hmotnosti vysušeného vzorku před zkouškou v procentech. Absolutní kyselinovzdornost, resp. louhovzdornost je vyjádřena hodnotou 100 %.

**Žárovzdornost** je schopnost materiálu odolávat vysokým teplotám. Vlastnost se posuzuje u jílovinových zemin (ČSN EN 993-12) určených pro žárovzdorné výrobky, z nichž se vytvarují žároměrky (ČSN EN 993-13). Indikací žárovzdornosti je ohnutí zkoušené a referenční žároměrky = žároměrná deformace. Referenční žároměrky jsou trojhranné komolé jehlany zhotovené z přesně definovaného složení vstupních látek. Slouží ke stanovení teploty výpalu a žárovzdornosti surovin od 600 do 1980 °C odstupňované většinou po 20°C. Indikace teploty je tehdy, když se vrchol dané žároměrky dotkne podložky.

Podle vyhlášky Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně č.307/2002 Sb. v platném znění, je usměřován obsah radioaktivity Ra 226 ve stavebních materiálech. Pro pálené cihly a jiné výrobky stavební keramiky je stanovena mezní hodnota hmotnostní aktivity Ra 226 na 150  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pro stavby s pobytovým prostorem a 500  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  pro stavby

jiné než s obytným prostorem. Pro keramické dlaždice a obkladačky jsou příslušné limity 300, resp. 1000 Bq.kg<sup>-1</sup>.

## 6.6 Výhody a nevýhody keramiky pro konkrétní použití

Použitelnost keramiky jakožto stavebních výrobků, ať už v konstrukcích nebo jako doplňkového sortimentu je doprovázena výhodami a nevýhodami pro konkrétní použití.

### Výhody keramických výrobků:

- poměrně dobře přístupný materiál z přírodních zdrojů,
- příznivá schopnost tepelné izolace,
- dobrá schopnost akustické izolace,
- výborná odolnost vůči ohni,
- vysoká pevnost,
- hygienická nezávadnost,
- při výstavbě odpadá mokrá proces (systém zdění pero + drážka, pěny) zcela nebo je minimalizován,
- malá teplotní roztažnost,
- podstatně menší objemová hmotnost ve srovnání s betonem.

### Nevýhody keramických výrobků:

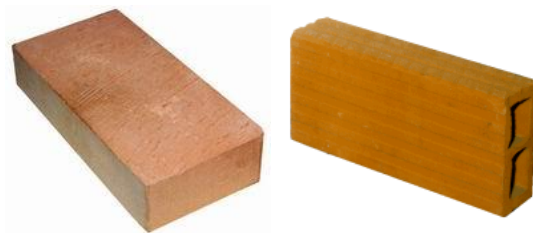
- pracnější provádění zděných konstrukcí,
- možnost či náchylnost k výskytu výkvětů,
- při výskytu textury snížení mrazuvzdornosti.

### 6.6.1 Prvky pro vertikální (svislé) konstrukce

Keramické výrobky pro vertikální konstrukce lze rozdělit na prvky tradiční (cihly plné a duté), novodobé (např. příčně děrované, lehčené) a současné, kde náleží poslední typy příčně děrovaných tvárnic s vyšším tepelným odporem (počátky 21. století)

**Cihly duté** (podélně děrované) jsou určeny pro příčkové nenosné zdivo, anebo pro přízdívky obvodového zdiva. Pevnost v tlaku 2 až 8 MPa, objemová hmotnost 1100 kg.m<sup>-3</sup>, tloušťky 65, 140 mm (bez omítek).

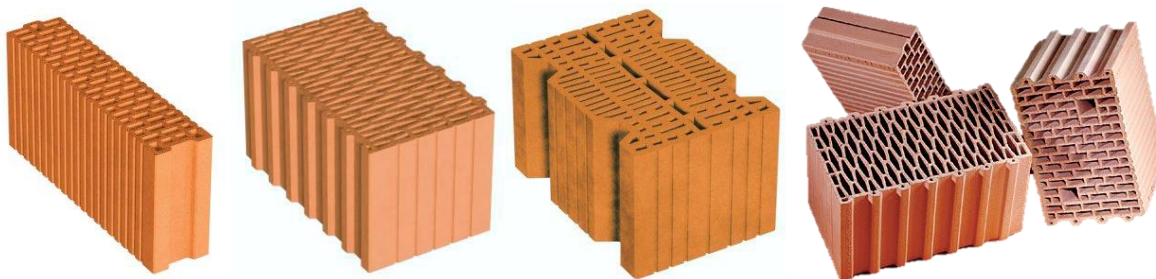
**cihly dutinové** – CD, příčně děrované, kde převážná část otvorů je tvořena dutinami s průřezem jednoho otvoru > 25 cm<sup>2</sup>, oba rozměry otvoru > 15 mm. Většinou se jedná o tenkostěnné výrobky (tloušťka střepe < 20 mm).



Obrázek 01: Cihla plná pálená (základní formát) a příčkovka dutinová

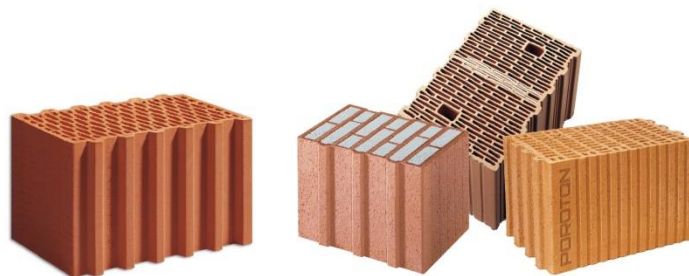
**Cihly děrované – CD** - s větším počtem děr a štěrbin (otvory s plochou jednoho <math> < 2,5 \text{ cm}^2 </math>),

**Cihly a tvárnice příčně děrované** jsou vyráběny v různých formátech a jsou určeny pro stěny nosné i nenosné, jak vnitřní tak vnější. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí  $800$  až  $1450 \text{ kg.m}^{-3}$  a pevnosti nabývají hodnot od  $4$  do  $15 \text{ MPa}$ . Hmotnost tvárnice bývá od  $5,5$  do  $17,5 \text{ kg.ks}^{-1}$ .

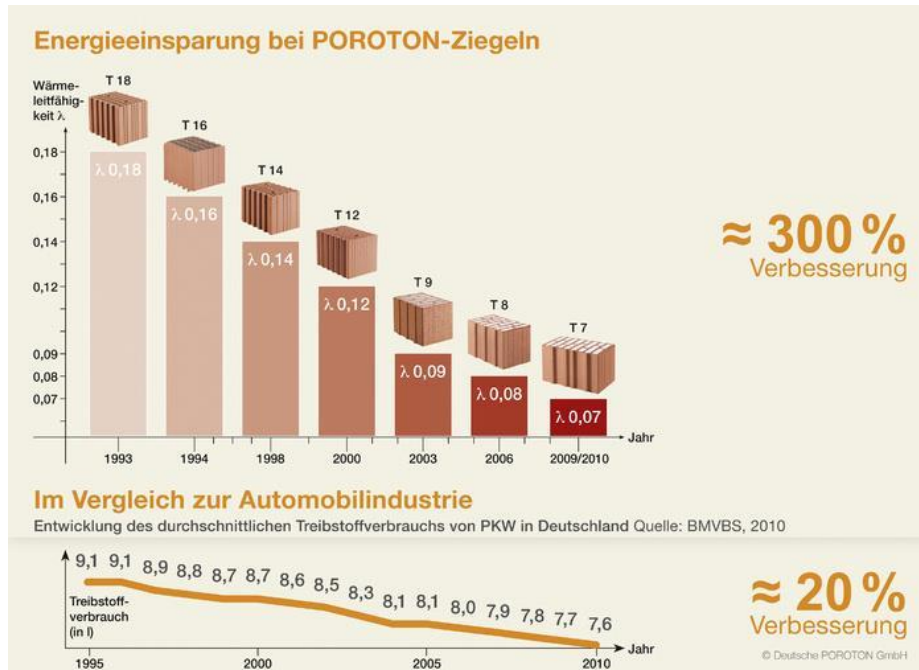


Obrázek 01: : Příčně děrované tvárnice firmy Porotherm (zleva: Porotherm 11,5 CB; Porotherm 40 P+D; Porotherm 36,5 AKU, Porotherm CB)

**Tvárnice a cihly lehčené** – (Poroton, Keratherm apod.) jsou příčně děrované tvárnice, jejichž cihelný stěp je vylehčen např. pilinami, objemová hmotnost je přibližně  $800 \text{ kg.m}^{-3}$  a pevnost v tlaku cca  $6 \text{ MPa}$ . Tyto tvárnice se vyzdívají na velmi vylehčenou maltu s tepelnou vodivostí až  $\lambda = 0,08 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

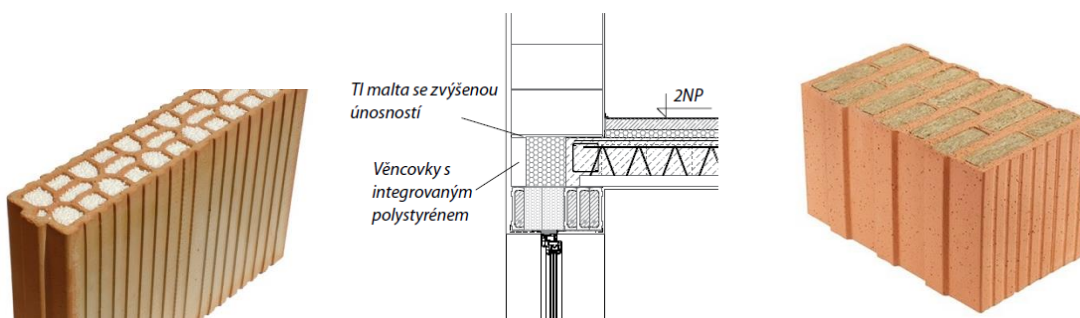


Obrázek 02: : Příčně děrované tvárnice (zleva: Keratherm 38 P+D, Poroton)



Obrázek 03: Postup v oblasti vývoje keramických tvárnic, například pro stavbu pasivních domů lze vidět na příkladu firmy POROTON, který ukazuje pokrok v oblasti snižování součinitele tepelného prostupu u tvárnic. Tento vývoj je obdobný u většiny výrobců tvárnic. Posledním trendem jsou tvárnice s integrovanou tepelnou izolací.

**Cihly s integrovanou tepelnou izolací** jsou posledním trendem v oblasti inovací příčně děrovaných tvárnic. Dutiny jsou pro zvýšení tepelného odporu vyplněny izolační hmotou, nejčastěji minerální izolací, polystyrenem v bloku nebo kuličkách, perlitem či jiným lehkým materiálem. Tyto tvárnice se vyzdívají na velmi vylehčenou maltu s tepelnou vodivostí až  $\lambda = 0,07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .



Obrázek 04: Tvárnice s integrovanou izolací. Vlevo věncovka HELUZ a vpravo POROTHERM 36,5 T Profi



**Lehčené izolační cihly** se používají jako primární izolační vrstva tepelných agregátů (až 1760 °C). Použití jako tepelná izolace v sušících, vypalovacích či tavicích pecích, komínech, rafinérských zařízeních a podobných vysokoteplotních zařízeních.

**Vrstvené zděné konstrukce** jsou prováděny pro zajištění dostatečných tepelně a zvukově izolačních vlastností. Existuje více variant provedení vrstveného zdiva, většinou je nutné využít vrstvené zdivo s tepelnou izolací v jádru stěny.

**Lícové cihly, klinkery** většinou slouží k opravám kulturních památek a ke ztvárnění povrchu fasády. Povrch lícových tvarovek může být opatřen různým dezénem, případně engobou. Lícové cihly odolávají 50 cyklům mrazuvzdornosti (nízká hodnota nasákavosti – do 7%) a mají pevnost v tlaku až 50 MPa. Nepříjemnou stránkou často bývají primární nebo sekundární výkvěty.



Obrázek 01: Lícovka TERCA klinker a cihlová dlažba firmy Wienerberger

**Cihly kanalizační** (rovnoběžky a klíny) s malou nasákavostí (do 14 – 16 %) a vysokou pevností v tlaku (až 35 MPa),

**Komínovky** pro zdění továrních komínů s objemovou hmotností až 1990 kg.m<sup>-3</sup> a pevností v tlaku až 35 MPa.

**Ručně tvarované výrobky** – speciální použití, většinou pro rekonstrukci kulturních památek.

## 6.6.2 Prvky pro horizontální konstrukce

Rozhodující vlastností horizontální konstrukce je její únosnost, deformace, statická bezpečnost vzhledem k určenému užitému zatížení. Podle účelu se dále hodnotí:

- Vzduchová a kročejová neprůzvučnost u stropů oddělujících místnosti chráněné proti nadměrnému hluku.
- Tepelně-technické vlastnosti konstrukcí oddělujících prostory s rozdílným teplotním režimem nebo střechy vytápěných objektů. Z hlediska případného vzniku tepelných mostů posuzujeme i překlady a nosníky.

- Reakci na oheň, neboť většinou jsou horizontální konstrukce požárně dělícími konstrukcemi mezi požárními úseky.

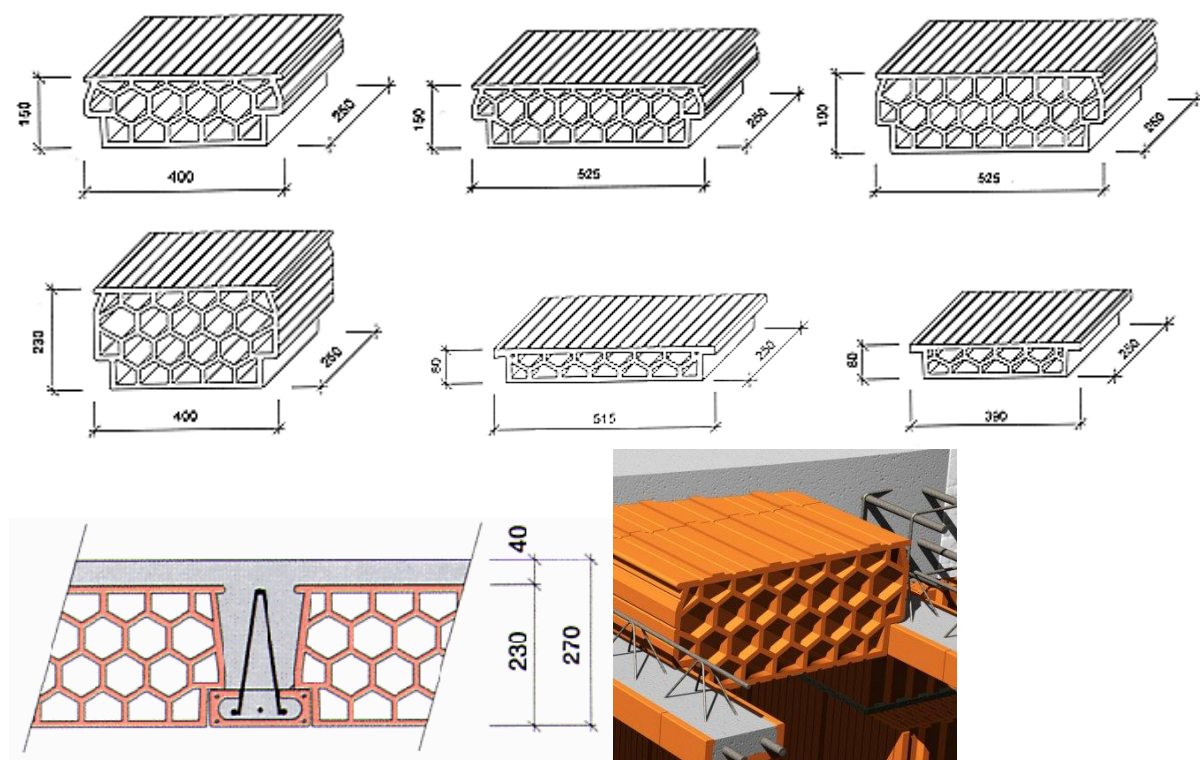
**Skládané stropní konstrukce** se většinou užívají na stavbách nízkopodlažních budov. Nevyžadují vysokou nosnost zdvihacích prostředků, ale jsou relativně pracné. Nejsou omezeny půdorysným tvarem, pouze rozpětím.

Princip skládání se sestává ze třech fází, a to: uložení nosníků na stěny s potřebnou roztečí, vkládání vložek mezi nosníky a dodatečné zabetonování stropní roviny dle statického výpočtu (40 – 120 mm).

Pravděpodobně dvěma nejznámějšími typy keramických vložek jsou:

- MIAKO
- HURDIS

Tyto stropní vložky se používají v rozličných kombinacích s různými typy nosníků. Nosníky mohou být buď ocelové (tvaru I), železobetonové, z předpjatého betonu ve tvaru lichoběžníku (zde potom slouží jako vložky HURDIS) nebo keramické prefabrikované, což jsou cihelné tvarovky, do jejichž drážek je vložena a následně zabetonována ocelová výztuž.

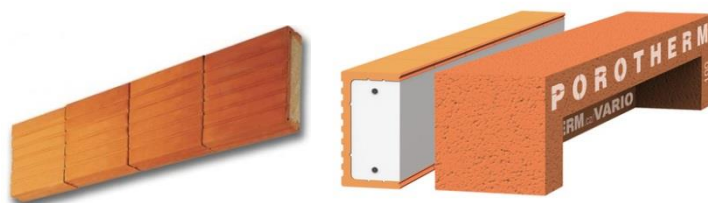


Obrázek 02: : Skladba stropní konstrukce – vložky MIAKO, nosníky POT, vrchní vrstva - konstrukční beton



Obrázek 03: **Keramické duté tvarovky - stropní desky HURDIS s rovným a šikmým čelem**

**Keramické nosníky a překlady** se vyrábějí jako nosníky a ve zdivu umožňují vytvořit ztracené bednění pro různé tloušťky zdiva, velikost otvoru a zatížení skládáním základních nosníků. Řešeny jsou např. také varianty keramických překladů pro vnější žaluzie.



Obrázek 04: **Překlady Wienerberger, POROTHERM 23,8 a POROTHERM překlad VARIO - roletový**

### 6.6.3 Ostatní keramické výrobky

Do této skupiny keramických produktů lze zařadit:

- obklady,
- cihelné plotovky,
- cihelná dlažba (půdovky, stájovky),
- drenážní trubky (trativodky),
- střešní krytina,
- kamenina,
- komínové tvarovky,
- zdravotní keramika,
- žárovzdomné tvarovky.

**Obklady** a dlažby jsou dokončovacími stavebními prvky, plní jedna k funkci estetickou a zároveň technickou ve vztahu k danému prostředí. Kromě úpravy vzhledu chrání konstrukci proti působení negativních atmosférických vlivů a proti mechanickému opotřebení. Keramické obklady stěn a podlah se snadno udržují a umožňují splňovat náročné hygienické požadavky potravinářských a zdravotnických zařízení. Keramické obklady se vyrábějí v nejrůznějších tvarových, materiálových a barevných provedeních až po speciální tvarovky s doplňkovými tvary a formáty. Základní dělení keramických obkladových prvků dle

příslušných normativních dokumentů je založeno na dvou základních parametrech, a to nasákavosti a způsobu výroby (tažené, lisované odlévané).

### Pálená střešní krytina

Střešní krytinu keramickou můžeme dle výrobní technologie rozdělit **na taženou pálenou krytinu** (např. bobrovky, drážková krytina), nebo **raženou pálenou krytinu** (příčně a podélně drážkovaná krytina). Dále lze doplnit tyto produkty o **doplňkové tašky a hřebenače** (např. prejzy u historických budov),

Střešní krytinu můžeme rozdělit také podle povrchové úpravy na režnou, glazovanou nebo engobovanou pálenou krytinu.

Nejdůležitějšími parametry krytiny je trvanlivost, která je definována zejména prosákavostí a s tím související mrazuvzdorností.

Bobrovky kryjí střechu šupinově nebo korunově. Obvykle se vyrábějí v šířce 180 až 200 mm a délce 380 až 400 mm. Minimální sklon střechy je 30 ° a v případě podbití hydroizolací i 22°. Hmotnost bobrovky se dle použití pohybuje v rozmezí 1,6 až 2 kg.km<sup>-2</sup>.

Existují také kameninové bobrovky, ty se vyznačují vysokými trvanlivostními parametry a zvýšenou únosností.

Tažené drážkové tašky umožňují svými podélnými drážkami jednoduché krytí, a proto je jejich plošná hmotnost nízká, cca od 41 do 52 kg.m<sup>-2</sup>. Podle sklonu střechy se volí příslušná rozteč latění. Min. sklon střechy je 35 ° popř. 30 °.

Ražená krytina se vyrábí v několika typech. Například TONDACH vyrábí typy s únosností překračující hodnotu 1,5 kN. Při sklonu nad 30 ° je doporučena pojistná hydroizolace a do 45° není nutné tašky připevňovat, při sklonu 45 – 60 ° je třeba připevňovat každou třetí tašku a nad 60 ° pak každou tašku.



Obrázek 05: Keramické střešní tašky.

**Kamenina** je v podstatě hutná keramika šedožluté až hnědé barvy, která se vyznačuje zejména nízkou hodnotou nasákavosti a vysokou odolností vůči agresivnímu prostředí (vyjma HF – kyseliny fluorovodíkové), mrazuvzdorností a ořezuvzdorností. Nasákavost kameniny obvykle nepřekračuje hodnotu 6 %, vykazují se též nízkým hydraulickým odporem a předpokládanou životností 100 let (kameninové trouby). Kamenina se používá zejména k výrobě kanalizačních trub, produktů pro potravinářský a chemický průmysl, zemědělství, lícovek, fasádek, plátek apod.



Obrázek 06: **Kameninové glazované potrubí**



Obrázek 07: **Komínové tvarovky společnosti Gruppco effe 2 a Heluz.**



Obrázek 08: **Trativodky (rozměry v mm)**

**Sanitární keramika** - výrobky k zařizování hygienických vybavení staveb, zařizovací předměty laboratoří apod. Patří sem umyvadla, dřezy, bidety, vany, vaničky, záchodové mísy, pisoáry, splachovací nádržky a případně další doplňky pro kompletní hygienické zařízení.



Obrázek 09: Výrobky sanitární keramiky

**Žárovzdorné tvarovky** jsou určeny především k vyzdívání tepelných agregátů (např. rotačních pecí pro výrobu cementu) a podle chemického složení se dělí na šamotové ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ ), dinasové ( $\text{SiO}_2$ ), magnezitové ( $\text{MgO}$ ).



Obrázek 10: Speciální žárovzdorné výrobky pro vyzdívký pecí.

## 6.7 Technická keramika

Technická keramika vyniká zejména vysokou tlakovou pevností, chemickou odolností, žáruvzdorností a svými elektrickými vlastnostmi.

Mezi technickou keramikou řadíme například:

- Žárovzdorná keramika - pro vyzdívký pecí a tepelných agregátů. Nejběžnější jsou šamot, dinas, magnezitové a chrommagnezitové výrobky.
- Keramika pro průmyslové účely - brusné a řezné nástroje, chemicky odolné nádoby, potrubí, čerpadla, mlecí tělesa. Dále chemicky odolné (kyselinovzdorné) keramické vyzdívký, izolátory a doplňky elektrozařízení, kde se očekávají elektrické výboje nebo vysoká teplota. Při obrábění litiny, jako konstrukční materiál pro součásti vysokoteplotních zařízení, tavicí kelímky, řezné plátky k obrábění kovů
- Spotřební keramika - nádobová a umělecká keramika, porcelán a různé artefakty.
- Biokeramika – využívá se zejména pro kloubní a jiné implantáty, které mají vysoké nároky na pevnost, zdravotní nezávadnost a musí být inertní vůči vnitřnímu prostředí člověka.
- Mezní oblast - sem se řadí výrobky mezních oblastí mezi keramickou a odlišnou technologií tavené žárovzdorné výrobky a tavený čedič (sklářská technologie), žárobeton

(betonářská technologie), brusiva, oxidová vlákna (technologie minerálních a skelných vláken) apod.

### 6.7.1 Technickou keramiku můžeme rozdělit na:

#### - keramika oxidická

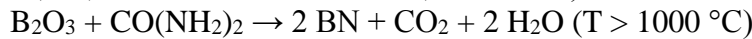
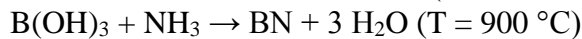
Tato keramika je tvořena jediným oxidem, zejména se jedná o keramiku na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tato skupina je jednou z nejznámějších a nejpoužívanějších typů keramických systémů. Vyniká vysokou pevností, tvrdostí a odolností vůči korozi. Je také velmi dobrým izolátorem. Využívá se pro výrobu tavicích kelímků, řezných nástrojů, k obrábění litiny, jako konstrukční materiál vysokoteplotních zařízení. Nejznámější systém je na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{ZrO}_2$ .

#### - keramika neoxidická

Tuto skupinu lze rozdělit na nekovové a kovové bez ostré hranice mezi skupinami. Dosahují velmi vysokých teplot tání, až  $1800^\circ\text{C}$  a většinou vynikají velmi vysokou tvrdostí. Nejčastěji ji tvoří materiály na bázi nitridů a karbidů. Do této skupiny patří např.  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ale také zde můžeme zařadit polykrystalický diamant a nitrid nebo karbid bóru (BN,  $\text{B}_4\text{C}$ ).

Využívá se pro výrobu brusiva, řezných nástrojů, tavicích kelímků, trysky k tažení kovů, součásti plynových turbín aj. Karbid boru je třetím nejtvrdším materiálem po diamantu a borazonu (kubický BN).

Příklad výroby BN (hexagonální):



Výroba kubického BN se provádí nejčastěji z hexa BN podobným způsobem jako výroba syntetického diamantu (z grafitu), tedy působením vysoké teploty a tlaku ( $5\text{-}18\text{GPa}$  /  $1700^\circ\text{C}$  -  $3200^\circ\text{C}$ ).

#### - keramika směsná

Jedná se o kombinaci keramiky oxidové a neoxidové. Využívá se nejčastěji k obrábění kalených ocelí či tvrzené litiny.

Mechanické vlastnosti vybraných typů technické keramiky

Materiál	E[GPa]	$R_{m,tlak}$ [MPa]	$R_{m,ohyb}$ [MPa]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	400 – 410	3000	350 - 400
$\text{SiC}$	410 - 480	2000	200 - 400
$\text{Si}_3\text{N}_4$ (tlakově sintrovaný)	200 - 310	1200	700 - 800
$\text{ZrO}_2$	150 - 200	2000	100 - 200



## ZDROJE A DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

SVOBODA, L. a kolektiv, 2013. *Stavební hmoty*. 3. Vydání. Praha. ISBN 978-80-260-4972-2. Online: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>.

HIDVÉGHY, J. – DUSZA, J.: *Nekovové konstrukční materiály* (Plasty a konstrukční keramika). 1.vyd. Košice: Technická univerzita, 1998. 162 s. ISBN 80-7099-363-4.

SOKOLÁŘ, R. *Keramika modul BJ01\_M01*, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT Brno, 2005.

HLAVÁČ, J. *Základy technologie silikátů*, SNTL Praha, 1988.

HANYKÝŘ, V., Kutzendörfer, J.: *Technologie keramiky*. - Silikátový svaz a Vega, s.r.o., 2000, 287 s.

HERAINOVÁ, M. *Keramické obkladové materiály*. – Silikátový svaz, 2003, 31 s.

KONTA, J. *Keramické a sklářské suroviny*. – UK Praha, 1982, 364 s.

PYTLÍK, P. *Cihlářství*. - VUT Brno, CERM, s.r.o. Brno, 1995, 264s.

STARÝ, J. a kol.: *Surovinové zdroje České republiky. Nerostné suroviny (stav 2012)*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2013.

SHACKELFORD, JAMES F., DOREMUS, ROBERT H. 2008. *Ceramic and Glass Materials - Structure, Properties and Processing*, ISBN 978-0-387-73361-6.

CALLISTER, WILLIAM D. 2007. *Materials Science and Engineering: an introduction*, ISBN 978-0-471-73696-7.

EDWARD ALLEN, JOSEPH IANO. 2013. *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods, 6th Edition*. 1024 pages ISBN: 978-1-118-13891-5.

KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. 2005. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko technologická v Praze. Praha. 190 stran. ISBN 80-7080-568-4.



## 7 ALTERNATIVNÍ SUROVINY VE STAVEBNICTVÍ



### CÍLE KAPITOLY

Cílem kapitole je seznámení posluchačů s jinými než primárními surovinami používanými ve stavebním průmyslu.



### RYCHLÝ NÁHLED DO KAPITOLY

Kapitola pojednává o alternativních surovinách použitelných a používaných ve stavebnictví. Jedná se především o druhotné suroviny, recyklované suroviny, případně přírodní organické suroviny jako je len, konopí, rákos a další.



### ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

K prostudování kapitoly je potřeba 3 – 6 hodin.



### KLÍČOVÁ SLOVA

Odpad, recyklace, druhotná surovina, vedlejší energetický produkt, popílky, strusky, energosádrovec, organické přírodní materiály, konopí, len, rákos, vlákna, pazdeří, izolační materiál.

## 7.1 Úvod

Stavebnictví je výrobním odvětvím, které zpracovává značné množství surovin. Tato skutečnost je dána zejména vysokými nároky společnosti na stavební výrobu, potažmo tedy na spotřebu stavebního materiálu. Samotná produkce stavebních hmot byla dosud převážně založena na využívání klasických nerostných surovin, které jsou získávány dobýváním ze zemské kůry a jsou tedy neobnovitelné. Tyto suroviny označujeme jako primární suroviny. Mezi tyto látky patří přírodní látky anorganického i organického původu. S využíváním těchto primárních neobnovitelných zdrojů souvisí také problematika jejich cenové dostupnosti v souvislosti s ubýváním surovinových zásob v ČR i ve světě.

## 7.2 Recyklace odpadů

Pojem recyklace odpadů nám definuje možnost opětovného využití odpadu ve výrobním procesu. Můžeme rozlišit primární recyklaci, kde odpad vzniklý při výrobním procesu je spotřebován v rámci téhož procesu výroby, jedná se o tzv. bezodpadovou technologii výroby. Typickým představitelem je technologie výroby pórobetonu, při které se seříznuté přerosty navrací zpět do výroby. Sekundární, neboli druhotná recyklace materiálu nám definuje uplatnění odpadu v následném procesu výroby. Možnosti využití druhotných materiálů, vzniklých recyklací, v následné stavební výrobě jsou velmi široké. V současnosti převažuje využití recyklátů jako podkladního a zásypového materiálu při stavbě nejrůznějších inženýrských sítí. Odpady používané jako sekundární suroviny se od přírodních surovin odlišují zejména v těchto parametrech:

- objem odpadů je omezen lokalitou a výrobní kapacitou původce odpadů a často nerovnoměrností jejich vzniku
- chemické složení a některé fyzikální vlastnosti nejsou většinou stabilizovány, vyznačují se velkým rozptylem vlastností
- skladování a manipulace s odpady se děje s minimální pozorností, dochází k zašpinění, přimísení cizích látek, není zajištěna dostatečná selektivita skládek odpadů a tím je omezeno jejich plnohodnotné využití
- odpady často obsahují různé složky, které i v nepatrném množství ovlivňují výsledné vlastnosti výrobků z nich vyrobených

## 7.3 Druhotné suroviny ve stavebnictví

Druhotné suroviny se účelově využívají ve stavebních materiálech zejména pro snížení ekologické zátěže a pro dosažení ekonomických úspor. Ve stavebním průmyslu se tyto druhotné suroviny využívají v mnoha rozličných materiálech, ať už se jedná o různé druhy betonů a malt, izolační materiály, materiály pro zásypy, pojiva, přísady, lehčené výrobky a jiné. Mezi tyto druhotné suroviny můžeme zařadit nespočet surovin, které se v současné době ve stavebním průmyslu již využívají nebo jsou pro tyto účely testovány. Mezi tyto suroviny patří zejména recyklované stavební odpady, popílky, strusky, odpady z těžby

## PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

kamene, odpady z výroby skla, z výroby chemických látek (např. acetonu), dále odpady z odsiřování elektráren, slévárenské písky a mnoho dalších. Nejčastější druhotné suroviny produkované nebo zpracovávané ve stavebnictví jsou uvedeny v následující tabulce:

Zdroje	Surovina	Příklady dalšího využití
<b>Recyklované stavební odpady</b>	Betony, malty, omítky	Kamenivo v méně hodnotných betonech, většinou ale na terénní úpravy, zásypy a podsypy vozovek
	Cihly	Výroba cihlobetonu, vibrolisovaných tvárnic, plniva malt pro zdění, ve stabilizovaných podkladech a nestmelených vrstvách vozovek, antuka
	Sklo	Expandovaný granulát do malt a betonů, tzv. pěnové sklo, zvukově a tepelně izolační materiál k izolačním násypům, izolační desky
	Dřevo	Nejčastěji ve formě štěpek a třísek, výroba tepelně izolačních materiálů z odpadních hoblin, lehké plnivo do betonu
	Kovový šrot	100% recyklace, kovové materiály a výrobky
	Plasty (Polystyreny, PUR drť, aj.)	Výroba - prvků pro exteriérové použití – kabelové žlaby, desky, plotové dílce, střešní krytiny, okapy, zatravnovací dílce, izolace, obaly, protihlukové stěny atd., recyklovaný polystyren, sypaná tepelná izolace, jako plnivo do lehkého betonu, pro výrobu tvárnic ztraceného bednění, jako zásypový materiál
	Asfalt	100% recyklace, vozovky
<b>produkovávané stavebnictvím</b>	<b>Odpady z výroby stavebních hmot</b>	
	Čerstvé betony a malty, cihly, plasty, aj.	Většina odpadů se navrací zpět do výroby (primární recyklace)

# PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Zdroje	Surovina	Příklady dalšího využití	
<b>z jiných průmyslových odvětví</b>	<b>Odpady ze spalovacích procesů</b>	Popílky a popely	Výroba cementu, plnivo i pojivo do betonu, malt a omítek, výroba pórobetonu či cihel, přidává se do asfaltu, pro výrobu umělého kameniva (v Nizozemsku téměř 20 % z produkce popílku), náplně filtrů pro čistírny odpadních vod, stabilizát do výsypek dolů, pro násypy a zásypy při úpravě reliéfu krajiny a pro stavbu konstrukčních vrstev vozovek
		Škvára	Podsypy, do betonu
		Strusky	Využití podobné jako u popílků, výroba cementu (pro výrobu směsných cementů běžně používána od roku 1945), plnivo i pojivo do betonu, malt a omítek, stabilizát do výsypek dolů, pro násypy a zásypy při úpravě reliéfu krajiny a pro stavbu konstrukčních vrstev vozovek
		Sádrovce (energósádrovec, chemosádrovec)	Pro výrobu cementu (regulátor tuhnutí, přídavek do surovinové směsi na vázání většího množství alkálií), k výrobě sádrokartonových desek, sádrovláknité desky (celulózová vlákna), k výrobě omítkových směsí, k výrobě pórobetonu, smíchání s popílkem - stabilizát k rekultivačním účelům
		Syntetický anhydrit	Pro výrobu pórobetonu, sádrokartonu, jako složka do samonivelačních podlah a do cementových a maltových směsí
		Křemičité úlety	Využití v betonech a maltách
	<b>Odpady z těžby a zpracování kamene</b>	Odpady vzniklé při těžbě primární suroviny (štěrk, písky, jíly aj.)	Pro zásypy, menší množství se využije pro výrobu betonů nižších kvalit
		Odpady vzniklé při zpracování suroviny (brusné kaly, odprašky)	Jemné plnivo v betonech a v maltách
	Odpady z výroby skla, z výroby chemických látek, slévárenské písky, karbidové vápno a mnoho dalších.		

## 7.4 Vybrané druhotné suroviny

- Odpadní sádrovce
- Vysokopeční struska
- Popílek
- Křemičité úlety
- Betonový recyklát

### 7.4.1 „Odpadní“ sádrovce

Česká republika má velmi malé zásoby přírodního, ne příliš čistého sádrovce. V současnosti se těží v jediném lomu v Kobeřicích u Opavy. Tato surovina lze nahradit velice úspěšně tzv. odpadními sádrovci, což jsou chemicky velmi čisté suroviny (nezávadné, min 90% sádrovce a anhydritu).

### 7.4.2 Energosádrovec

Obrovský rozsah spalování fosilních paliv k energetickým účelům má za následek emise značného množství oxidu siřičitého vznikajícího ze síry obsažené v palivech, a to zejména černého a hnědého uhlí a dále topných olejů z ropy. Pro odsiřování kouřových plynů se ve většině případů používá vodní suspenze vápence nebo páleného vápna. Produktem tohoto procesu je síran vápenatý nazvaný energosádrovec.

#### Mechanismus vzniku energosádrovce

Ve všech systémech absorpčního odsiřování spalin na bázi CaO/CaCO<sub>3</sub> probíhá tvorba energosádrovce v následujících krocích:

- absorpce SO<sub>2</sub> - přechod SO<sub>2</sub> z plynné fáze do absorpčního roztoku
- oxidace absorbovaného SO<sub>2</sub> na SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>
- krystalizace CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O
- odloučení krystalického CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O z roztoku

Energosádrovec odpadá z běžného odsiřovacího procesu mokrým způsobem jako vlhký, jemnozrný prášek s obsahem povrchové vlhkosti 8 – 12 %.

V poslední době došlo k vyčlenění energosádrovce z evropského katalogu odpadů s tím, že je klasifikován jako surovina. Hlavní rozdíl mezi energosádrovcem a přírodním sádrovcem spočívá ve fyzikálních vlastnostech – ve velikosti zrna a typu krystalů. Dále základní vlastnosti energosádrovce a rozdíly od přírodního sádrovce:

- energosádrovce jsou jemně krystalické, vysoce disperzní o velikosti částic do 100 μm (průměrná velikost částic bývá 70 - 90 μm ) / drcený přírodní sádrovec má většinou plynulou granulometrii 0 - 50 mm

- negranulovaný energosádrovec kolem 10% vlhkosti / přírodní sádrovec má vlhkost kolem 1% vlhkosti
- Energosádrovce obsahují nečistoty, které se v přírodních sádrovcích běžně nevyskytují.
- Hustota sádrovce je  $2320 \text{ kg/m}^3$ ,
- Sypná hmotnost závisí na vlhkosti  $850 - 1200 \text{ kg/m}^3$ ,
- sypná hmotnost setřeseného materiálu do  $1500 \text{ kg/m}^3$ .

### Uplatnění energosádrovce

Energosádrovec jako surovina je průmyslově využíván hlavně při výrobě sádry a při výrobě cementu. Další uplatnění je při výrobě omítkových směsí a stabilizátů.

Hlavní uplatnění energosádrovce v cementářském průmyslu je jako regulátor tuhnutí, v některých případech pak jako přídavek do surovinové směsi na vázání většího množství alkálií - to slouží k úpravě síranového modulu.



Obrázek 11: **Energosádrovec**

### 7.4.3 Chemosádrovce

jsou sekundární suroviny vznikající jako odpad nejčastěji v chemickém, potravinářském a sklářském průmyslu (fosfosádrovec, citrosádrovec, sádrovec z leštění skla aj.). Většinou se jedná o suroviny chemicky velmi čisté, s obsahem sádrovce a anhydritu nad 90 %.

### 7.4.4 Syntetický anhydrit

vedlejší produkt při výrobě kyseliny fluorovodíkové. Jedná se o jemný prášek šedé barvy, nehořlavý, nevýbušný a netoxický. Vzhledem k malému přebytku CaO se běžně používá pro výrobu pórobetonu, sádrokartonu, jako složka do samonivelačních podlah a do cementových a maltových směsí.

### 7.4.5 Struska

Struska je vedlejším produktem při výrobě surového železa (vysokopecní struska) a při výrobě oceli (ocelářská struska).

## 7.4.6 Vysokopecní granulovaná struska

Výroba surového železa probíhá ve vysokých pecích, kdy vsázkové suroviny klesají zvolna pecí a zahřívají se proudem horkých plynů. Při teplotách nad 1100°C na sebe začnou působit hlušiny rud a struskotvorné přísady a vytváří se tzv. prvotní struska, která v nížeji reaguje s popelem koksu a se surovým železem za vzniku konečné strusky.

Granulovaná vysokopecní struska je latentně hydraulická látka, vznikající rychlým ochlazováním vhodně složené tekoucí taveniny zásadité strusky, která odpadá jako vedlejší zplodina při výrobě surového železa ve vysoké peci. Je-li tavenina strusky rychle zchlazena vodou, zabrání se její krystalizaci, takže se stabilizuje její sklovitý charakter. Rychlé ochlazení má udržet strusku ve skelném stavu, neboť hlavně taková má při vhodném složení latentně hydraulické vlastnosti. Je schopna v alkalickém prostředí reagovat za přítomnosti síranů na hydráty podobným způsobem jako portlandský slínek.



Obrázek 12: Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska

## 7.4.7 Popílky

Popílky jsou tuhé, nerostné zbytky po spalování práškového hnědého či černého uhlí, získávané z kouřových plynů zachycováním v odlučovačích.



Obrázek 01: Cement (vlevo) a popílek (vpravo).

Podle způsobu vzniku dělíme popílky na popílky klasické, vzniklé při klasickém spalování, a popílky fluidní.

Ve stavebnictví se v největší míře využívají popílky klasické, které vznikají při „klasickém“ způsobu spalování paliva při teplotách cca 1400 až 1600°C se vyznačují obsahem hlavně  $\beta$ -

křemene a mullitu ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ). Rovněž obsahují sklovitou fázi, jejíž množství je zpravidla vyšší než 50%, která zásadním způsobem ovlivňuje reaktivitu popílků s CaO nebo cementem jak za normální, tak zvýšené teploty (autoklávování). Mullit se zúčastňuje reakce pouze ve velmi malé míře výhradně za hydrotermálních podmínek. Z hlediska chemického složení je v popílku obsažen hlavně oxid hlinitý (15-25%) a oxid křemičitý (40-60%). Dále pak  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5-15%), CaO (2-15%), MgO, FeO. Právě obsah amorfního  $\text{SiO}_2$  ve sklovité fázi pak určuje nejvíce reaktivnost a následně i použití popílku jako aktivní či pasivní příměsi. Při nízké reaktivnosti se používá jako pasivní příměs a často nahrazuje jemné frakce kameniva, čímž vylepšuje křivku zrnitosti. Naopak pokud obsahuje větší podíly reaktivního  $\text{SiO}_2$  je využíván jako aktivní příměs. Obecně je popílek tvořen malými kuličkami křemičitanového skla o průměru 1-100 mikrometrů, čemuž odpovídá měrný povrch podle Blaina  $200\text{-}300\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ . Měrná hmotnost se nachází v rozmezí  $2100\text{ až }2400\text{ kg/m}^3$ , sypaná hmotnost se pohybuje mezi  $550\text{-}900\text{ kg/m}^3$ . Kuličky jsou buď plné, nebo duté, mohou být jak průhledné tak i neprůhledné, často našedlé barvy.

**Fluidní popílků** vznikají v elektrárnách a teplárnách, kde se využívá technologie fluidního spalování. Mleté palivo s přísadou vápence případně dolomitu se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě  $850^\circ\text{C}$ . V těchto provozech vznikají pevné odpady dvojího typu: ložový popel a popílků z elektrofiltrů (odlučovačů).

Nevýhodou nízké teploty spalování je zejména vysoký podíl nezreagovaného CaO (ve formě tzv. měkce páleného vápna), který může být až 35%. Dále má nízký obsah taveniny ale naopak poměrně vysoký obsah  $\text{SO}_3$  - 7 až 18%, který může způsobit v pojetí vznik ettringitu ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

## **Reakce popílků v cementovém systému**

Popílek sám o sobě není hydraulický, tedy není schopen reagovat s vodou. Je-li však mísen s hydroxidem vápenatým - např. z cementu - reaguje a vytváří stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle typu a druhu popílku a označována jako pucolanita. V popílku skladovaném delší dobu ve vlhku může být pucolanový účinek porušen.

Pucolanová reakce popílků je definována jako reakce oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$  a hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z popílku s hydroxidem vápenatým  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  přičemž vznikají kalciumsilikátové a kalciumaluminátové hydratační produkty. Při hodnocení pucolanové aktivity popílků je nutno brát v potaz nejen schopnost vázat  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ale i časový průběh reakce mezi popílkem a hydroxidem vápenatým. Podle Venuata se pucolanová reakce začíná projevovat přibližně okolo 28. dne při podmínkách normálního zrání, přičemž pevnosti získané na vzorcích betonů s přísadou popílku byly podstatně vyšší po 90. dnech normálního zrání.

Pro zkoušení fluidních popílků jako jedné z přísad do cementu zatím neexistují normové předpisy a na rozdíl od klasických popílků, které se v cementářském průmyslu používají při výrobě některých cementů, nejsou dosud s fluidními popílků v českém cementářském průmyslu významnější zkušenosti a ani žádná z českých cementáren tento typ popílku nevyužívá.

## **Využití popílků**

Popílek může působit jako aktivní nebo neaktivní složka. Základní využití:

- Výroba cementu



- Plnivo i pojivo do betonu, malt a omítek
- Výroba pórobetonu
- Výroba cihel
- Přidává se do asfaltu
- Pro výrobu umělého kameniva (v Nizozemsku, kde je téměř 20 % produkce popílku, Technologie LYTAG nebo Aardelite)
- náplně filtrů pro čistírny odpadních vod
- Stabilizát do výsypek dolů, pro násypy a zásypy při úpravě reliéfu krajiny a pro stavbu konstrukčních vrstev vozovek

## 7.4.8 Křemičité úlety

Křemičité úlety jsou velmi jemné práškové materiály, které vznikají jako vedlejší produkt při výrobě krystalického křemíku či ferosilicia v obloukových pecích. Ruda se v pecích pálí společně s uhlím, křemenem a někdy se přidávají i dřevěné odštěpky. Při vysokých teplotách dochází k odpařování  $\text{SiO}_2$ , který následně kondenzuje v kolektorech. Chemické složení křemičitých úletů závisí na druhu vyráběné feroslitiny. Uměle jsou také vyráběny pod označením mikrosilika nebo nanosilika. Jejich užití v betonu je známo již kolem 70 roků.

Chemické složení křemičitých úletů závisí na druhu vyráběné feroslitiny. Převládající složkou úletů je amorfní oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , jehož obsah se zpravidla pohybuje mezi 80 až 98%. V menší míře jsou zastoupeny ostatní složky jako např. oxid hlinitý, oxid hořečnatý, oxid vápenatý či oxidy sodíku a draslíku.

Křemičité úlety mají světle až tmavě šedou barvu. Dodávají se jako jemný prášek ( $\rho = 130\text{--}430 \text{ kg/m}^3$ ), kaše ( $1300\text{--}1400 \text{ kg/m}^3$ ) nebo granulované ve směsi s vodou a trochou cementu ( $400\text{--}700 \text{ kg/m}^3$ ). Částice mají průměr 0,1 až 0,2  $\mu\text{m}$ , měrný povrch křemičitých úletů se zpravidla pohybuje v rozmezí 15000 až 25000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Měrná hmotnost křemičitého úletu přibližně 2200  $\text{kg/m}^3$ .

### Účinek křemičitých úletů v cementovém systému

Reakce minerálních příměsí a pucolánových materiálů, které probíhají v průběhu tuhnutí a tvrdnutí cementové směsi jsou obecně známy. Jedná se o kombinaci fyzikálních a chemických účinků těchto materiálů, které jsou ovlivněny jejich fyzikálním stavem (zejména velikostí měrného povrchu).

### Účinek křemičitých úletů v procesu hydratace rozdělit na dva vzájemně se doplňující efekty:

**fyzikální efekt** - jemné částice vyplňují prostor mezi hydratujícími zrny cementu, případně dalšími složkami a lze je považovat za mikroplnivo, tzn. při dokonalé homogenizaci částice úletu vyplňují prostor, ve kterém by se nacházela voda, a tím výraznou mírou přispívají ke zvýšení hutnosti cementového tmele.

**chemický efekt** - částice úletů jsou schopny reagovat s  $\text{Ca(OH)}_2$  vznikajícím při hydrataci cementu a vytvářet kvalitativně vyšší vazné produkty. Provedený výzkum potvrdil předpoklady o vynikajících pucolánových vlastnostech křemičitých úletů. Schopnost těchto

materiálů (v některých případech označovaných jako superpucolány) vázat hydroxid vápenatý vznikající při procesu hydratace cementu, je výrazně vyšší než u ostatních pucolánových materiálů např. popílků.

Výše popsany účinek úletů má za následek ovlivnění charakteru vytváření pórovité struktury pojivového tmelu: současně se snížením celkové pórovitosti dochází zpravidla i ke snižování mediánu poloměru mikropórů, které má za následek zhutnění pojivového tmelu. Tato skutečnost příznivě ovlivňuje vlastnosti malt a betonů jako např. pevnost, nepropustnost, odolnost proti korozi apod. Důležitá je též úloha, kterou křemičitý úlet sehrává na rozhraní mezi zrny kameniva a hydratujícím cementovým tmelem. Mikroskopická pozorování prokázala, že úlety významnou mírou přispívají ke zlepšení vazby mezi kamenivem a hydratujícím cementem, zlepšuje se též vazba s výztuží.

Vývin hydratačního tepla závisí kromě dávky úletů na dalších faktorech (složení směsi, druh cementu apod.). Obecně platí, že vývin hydratačního tepla pro betony s úlety je nižší než u betonů obdobného složení bez přídavku úletů.

## 7.5 Přírodní materiály ve stavebnictví

Přírodní materiály používané ve stavebnictví je možné podle původu rozdělit do tří základních skupin:

- Živočišné organické materiály - ovčí vlna
- Rostlinné organické materiály
  - o *rostlinné dřevní* - dřevo v různých formách (celulóza, dřevní vlákna, dřevní vlna, hobliny atd.), korek
  - o *rostlinné stonkové (technické plodiny)* - rákos, konopí, len, sláma, kokosová vlákna, bavlna (různé formy, vlákna, pazdeří, celé stonky, rohože atd.)
- *Minerální anorganické materiály* - kámen, hlína (jíl, často využívaný společně s organickou výplní)

Přírodními materiály z obnovitelných zdrojů se v tomto smyslu rozumí technologicky zušlechťené organické hmoty rostlinného původu. Pokud je použitá surovina původně odpadem, případně vedlejším produktem jiné výroby, pak ji lze charakterizovat také jako druhotnou surovinu.

Průzkumy týkající se využívání stavebních hmot vyrobených z přírodních obnovitelných surovin ukázaly, že tyto materiály většinou vykazují o něco méně příznivé mechanicko-fyzikální vlastnosti než výrobky s materiály anorganickými. Na druhé straně bylo také prokázáno, že tyto nedostatky mohou být v praxi vyváženy jinak vysokou úrovní ostatních užitečných vlastností.

### 7.5.1 Obecné vlastnosti stavebních hmot na bázi rychleobnovitelných surovin

Zejména vláknitý charakter a nízká tepelná vodivost přispívají k lepším tepelně-izolačním vlastnostem. Přírodní materiály rostlinného původu poskytují oproti běžným anorganickým materiálům vyšší hodnoty měrné tepelné kapacity  $c$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ], proto zabudování takových

materiálů do stavby významně ovlivňuje tepelně-akumulační schopnost stavebních konstrukcí.

Dále najdou využití zejména u vnějších lehkých konstrukcí. Přírodní materiály rostlinného původu jsou obecně propustné pro vodní páru a mohou akumulovat jisté množství vlhkosti sorpcí ze vzduchu. Vlastností rostlinné hmoty a materiálů z ní vyrobených je schopnost absorbovat vlhkost do vnitřního pórového systému při zvýšené vlhkosti vzduchu a při snížení vlhkosti vzduchu ji naopak pozvolna uvolňovat do okolního prostředí. Tento mechanismus příznivě ovlivňuje vlastnosti mikroklimatu uvnitř objektu z hlediska vlhkosti vzduchu, hlavně v zimním období, kdy může docházet k dlouhodobému snížení vlhkosti vzduchu uvnitř objektu. Na druhou stranu ovšem takový materiál mění se změnou vlhkosti více či méně své rozměry, což může nepříznivě působit na vzhled konstrukce. Zároveň je nutná zvýšená pozornost při montáži těchto materiálů a dodržení podmínek a doporučení výrobce materiálů na bázi přírodních surovin. V neposlední řadě poskytují materiály na bázi rostlinných vláken dobré zvukově izolační vlastnosti, jak z hlediska vzduchové neprůzvučnosti, tak i akustického útlumu. Konkrétní vlastnosti však přímo závisejí hlavně na struktuře a objemové hmotnosti použitého materiálu.

Nevýhodou většiny rostlinných materiálů je vyšší hořlavost a určitá vlhkostní citlivost. Nadměrná dlouhodobá vlhkost může zapříčinit biologickou korozi, tedy degradaci působením bakterií, plísní či hub na materiál. Proto by tyto materiály, zabudované ve stavební konstrukci, měly být vždy spolehlivě odděleny od zdrojů vlhkosti anebo musí být při navlhčení zajištěna možnost jejich rychlého vysychání. Při správném návrhu skladby a provedení stavby by však s vlhkostí ve stěně neměly vznikat problémy. Hořlavost se dá snížit přísadami retardujícími hoření. Hořlavost můžeme ovlivnit také nanesením vhodné nehořlavé povrchové úpravy (omítka nebo obklad). Požární odolnost, stejně jako vlhkostní charakteristiky můžeme nicméně primárně příznivě ovlivnit v kompozitních materiálech užitím anorganických pojiv, které mimo jiné dokážou částečně tyto přírodní materiály stabilizovat a snížit tak náchylnost k biologické degradaci.

### **7.5.2 Základní tradiční přírodní materiály v ČR**

Vyjma dřeva, lze využít ve stavebním průmyslu také přírodní rychleobnovitelné materiály, mezi které můžeme zahrnout již zmíněnou ovčí vlnu jako zástupce živočišných materiálů nebo častěji přírodní suroviny získávané ze stonkových rostlin, které můžeme označit jako technické plodiny. Jedná se o plodiny, které mají podobné (v některých případech i lepší) fyzikálně mechanické či chemické vlastnosti a přitom mohou růst mnohem rychleji než dřevo.

V Česku, Moravě i na Slovensku mají tradici rostliny jako je konopí, len, rákos, sláma aj. Ve světě se dále využívají další suroviny jako je bambus, rýžové slupky, kokosová či palmová vlákna, ramie, sisal a další.

Tyto materiály lze využít jako náhradu za dřevo, lze je použít také na konstrukční prvky a nevznikají přitom takové problémy s jejich recyklací, popřípadě likvidací, jako u plniv či výztuží anorganického nebo polymerního původu.

Zmíněné přírodní materiály a jejich průmyslové využití nejsou žádnou novinkou, ba právě naopak. Ve většině případů jsou to rostliny beze zbytku uživatelné a běžně se používaly a v současnosti také používají v mnoha průmyslových odvětvích. Ve stavebnictví je ovšem současná situace značně odlišná. Tyto přírodní zdroje se stále využívají poměrně v nepatrné

míře, zejména jako výplňový materiál nebo pro výrobu zvukově a tepelně izolačních materiálů, ačkoliv potenciál mají i v případě materiálů konstrukčních, například desek či tvárnic. Konkrétní vlastnosti přímo závisí hlavně na struktuře a objemové hmotnosti použitého materiálu.

## Ovčí vlna

Ovčí vlna patří mezi nejlepší tepelně izolační materiály, což je důvodem využití zejména v šikmých střeších, ale i k izolaci stěn a vycpávky mezer mezi dřevěnými trámy. Vedle velmi dobrých izolačních vlastností také neobsahuje žádné zdraví škodlivé látky, při manipulaci s ní není potřeba používat ochranných pomůcek, jelikož je na dotyk příjemná. Další výhodou je, že díky částečné hygroskopicitě (s minimálním vlivem na své tepelně izolační schopnosti) není třeba využívat parozábrany, využívá se zde přirozené prodyšnosti a udržování mikroklimatu uvnitř konstrukce. Vlna je hořlavá, ale samozhášivá. Pro snížení hořlavosti se impregnuje např. fosforečnanem sodným, případně jinými přísadami, které také mají za úkol zvyšovat odolnost proti hmyzu, molům a plísním. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 12 – 30 kg/m<sup>3</sup>, tepelná vodivost  $\lambda_D = 0,038 - 0,05$  W/mK.



Obrázek 02: **zateplení příčky ovčí vlnou** (foto převzato z: <http://www.isolena.cz>)

Obrázek 03: **srubová spára opatřená izolací z ovčí vlny** (foto převzato z: <http://www.isolena.cz>)

## Sláma

Sláma je přírodní obnovitelná surovina, která se ve stavebnictví používá již odedávna. Je to produkt vznikající při pěstování obilí, lze ji většinou získat jako odpadní produkt zemědělství, proto lze její využívání ve stavebnictví chápat jako zužitkování druhotné suroviny. Asi nejširší využití měla sláma v doškových střeších, dále se používala například při výrobě nepálených cihel, tzv. vepřovic, nebo k tepelné izolaci. V dnešní době se využívá slámy zejména pro výrobu materiálů zajišťující tepelnou a zvukovou izolaci. Nevýhodou slámy je její sklon k degradaci vlivem vlhkosti.

### Sláma se používá ve formě:

- slaměné balíky – tepelná izolace, konstrukční bloky (vývoj)
- slámovláknité desky – konstrukční desky
- slámokartonové panely
- slaměné došky – střešní krytina

- slaměná řezanka – do jílových omítek



Obrázek 04: **Ekopanel (Slámokarton), slámovláknitá deska a slaměné balíky v dřevěné konstrukci.**

V poslední době právě využití slámy zažívá mírný vzestup díky stavbám ekologických domů a cenové nenáročnosti tohoto materiálu. Tepelná vodivost je silně závislá na objemové hmotnosti (míře slisování) slámy. Tepelná vodivost slámy závisí také na orientaci stébel. Kvalitně slisované slaměné balíky o objemové hmotnosti 90 - 110 kg/m<sup>3</sup> dosahují hodnotu  $\lambda_D = 0,052 \text{ W/(m.K)}$  při použití kolmo na stébla, rovnoběžně se stébly pak  $\lambda_D = 0,061 \text{ W/(m.K)}$ . Izolace má ve spojení s hliněnou omítkou požární odolnost až 90 minut, vyhovuje proto všem typům konstrukcí.

### **Rákos**

V České republice roste pouze jeden druh - rákos obecný (*Phragmites australis*, syn.: *Phragmites communis Trin.*). Jedná se o travu vysokého vzrůstu rostoucí zpravidla na zamokřených místech a často vytváří rozsáhlé monodominantní porosty. Může to být i expanzivní druh na nivních loukách v případě, že nejsou dlouhodobě koseny. Oproti slámě se stébla rákosu vyznačují vyšší pevností, větším objemem a delší trvanlivostí. Ve stavebnictví se používá zejména ve formě nosiče omítek u dřevěných stěn a stropů. Rákos je dobrý tepelný izolant, vyznačuje se vodoodpudivostí, proto se používal také jako střešní krytina - došková střecha. V současnosti se používá jen výjimečně, avšak nikoliv jako levná krytina. Je to hořlavý materiál, proto se musí stejně jako sláma upravovat pomocí retardérů hoření.



Obrázek 05: **došková střecha z rákosu**

Obrázek 06: **Rákosové panely vázané drátem** (foto převzato z: <http://stepis.cz/>)

### **Len**

Lněné vlákno se získává ze stonku lnu setého (*Linum usitatissimum L.*). V surovém lnu tvoří jednotlivá 20-50 mm dlouhá vlákna svazek o délce 50-90 cm.

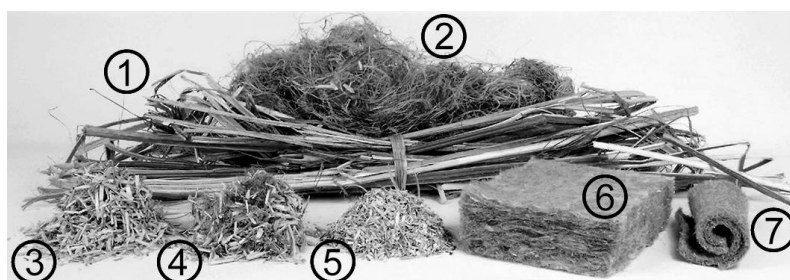
Len se pěstuje nejen u nás, ale i v řadě evropských zemí. Rostlina lnu je jednoletá a dorůstá do výšky jednoho metru. Lýko ze stonku se používá pro textilní účely, rozlámaný dřevnatý stoněk, takzvané pazdeří, se původně přidávalo do cihel – vepřovic, později se lisovalo s pojivem na pazderodesky pro stavební a nábytkářský průmysl.

## Konopí

Konopí je univerzální, bezezbytku zužitkovatelná rostlina, která je využitelná snad ve všech odvětvích činnosti moderního způsobu života. Pro technické účely se ale nejvíce používá konopné vlákno a dřevnaté jádro.

Konopné vlákno je z více než 70 % tvořeno celulózou a je považováno za nejdelší a nejpevnější vlákno rostlinné říše. Jeho úkolem je chránit výživové rourky a celou rostlinu před zlomením či roztrhnutím. Elementární buňky vláken mají uprostřed dutinu (lumen), která je významná z hlediska izolačních vlastností. Kromě svazků primárních vláken obsahují stonky také sekundární vlákna, která při zpracování poskytují tzv. koudel.

Dřevnaté jádro tvoří až 2/3 objemu stonku. Při zpracování získává podobu jemné štěpky zvané pazdeří. Skládá se převážně z hemicelulózy, obsahuje ale také řadu minerálů, mj. křemík. Oproti dřevu je pazdeří lehčí a jemnější, dobře se díky tomu zpracovává.



Obrázek 07: **Zpracování konopného stonku: samotný stoněk jako celek či ve formě delších částí a to včetně vláken či pouze vnitřní část bez vláken (1), konopná vlákna (2), drcené konopí - pazdeří - v různých frakcích pro různé využití (3) (4) a (5), izolace či rohože ze stlačených konopných vláken (6) a (7).** (Upravená fotografie ze serveru firmy Le Chanvre.)

Konopí bylo oblíbeným stavebním materiálem již v historii. Pro jeho velmi dobré fyzikálně mechanické a tepelně izolační vlastnosti a také jeho dostupnosti se hojně využívalo i ve stavebnictví, zejména jako střešní pokrývka nebo výztuž do hliněných konstrukcí a do tzv. „vepřovic“ (nepálené hliněné cihly). V podobě provazů a lan se konopná vlákna využívala pro upevnění dřevěných lešení a jiných konstrukcí. Konopná vlákna rovněž dobře posloužila jako tepelná izolace například mezi dřevěnými trámy.

V dnešní době kromě jiných odvětví se konopí využívá i ve stavebnictví, a to zejména jako surovina vhodná pro výrobu tepelných a akustických izolací. Tyto izolace mohou být buď ve formě izolačních desek a rohoží, většinou pojených pouze tlakem, případně s přísadkou

polymerních či hydraulicky aktivních látek, nebo jako volně sypaný, případně stříkaný izolační materiál. Také lehké netkané textilie slouží jako vynikající zvuková izolace mezi stavební příčky nebo pro tlumení chůze pod dřevěnou či laminátovou podlahu. Tato rostlina je vynikající alternativou dřeva pro stavební materiály, které navíc v některých svých vlastnostech dřevo dokonce předčí. Dřevitý materiál ze stonku konopí dává možnost výroby lisovaných desek na výrobu nábytku, ale například i k výrobě sypkých směsí na omítky, podlahy či k výrobě tvárnic pro ztracené bednění. Další možností je využití konopí v konstrukčních cementokonopných deskách.

## 7.6 Rozdělení stavebních materiálů na rostlinné bázi

Na současném trhu stavebních materiálů můžeme již spatřit poměrně velké množství rozličných výrobků, které využívají výhodných vlastností rychleobnovitelných surovin. Jednotlivé stavební materiály na bázi přírodních organických surovin jako je dřevo, len, konopí aj. jsou popsány v následujících kapitolách.

### 7.6.1 Izolační materiály

Přírodní materiály jsou ve většině případů velmi dobrými tepelnými a zvukovými izolanty. Izolace z přírodních materiálů jsou ekologické, energeticky méně náročné na výrobu než např. skelná či minerální vata a mají velmi dobré tepelně-technické vlastnosti. Rovněž nedráždí pokožku ani plíce a práce s takovým materiálem je velmi příjemná. Vzhledem k povaze přírodních materiálů a jejich sklonu k degradaci vlivem zvýšené vlhkosti nejsou vhodné pro více exponovaná místa, ačkoliv vhodnou úpravou lze docílit také vyšší odolnosti vůči degradujícím vlivům, zejména vlhkosti.

**Izolační materiály vyráběné z přírodních surovin můžeme podle jejich využití rozdělit na \*:**

- Tepelně a zvukově izolační materiály (desky, vaty aj.)
- Filc (konopný, lněný) – izolace zejména vůči kročejovému hluku
- (Konopná a dřevěná) vlna – izolace, vyztužení omítek
- Těsnicí provazce – izolace oken, izolace mezi trámy roubených staveb
- Vata (koudel-konopná, lněná) – izolace spojů, oken, vyztužení omítek
- (jako snopy) – konopná, rákosová, slaměná



Obrázek 01: **Izolace: ovčí vlna, slaměné desky, korkové desky, dřevovláknité desky, ekopanely (slámokarton), lněná koudel, konopný filc, lněný těsnicí provazec**

Tepelně a zvukově izolační materiály na bázi rychleobnovitelných surovin se v současné době pomalu dostávají opět do popředí zájmu. Na českém trhu v současné době není příliš mnoho výrobců těchto materiálů. Proto jsou stavitelé často nuceni tyto materiály dovážet ze zahraničí, což poměrně výrazně prodražuje výslednou cenu produktu. Tyto izolace se dodávají v mnoha variacích ve formě sypané izolace, izolačních rohoží, fasádních izolací, ekopanelů (lisovaná sláma), rákosových panelů, izolačních desek z dřevní vlny a podobně.

V případě konopí se tepelně a zvukově izolace (pomineme-li sypanou izolaci) vyrábějí z vláken technického konopí, nejčastěji s obsahem 85% konopných vláken a 15% vláken z polyesteru, které se přidávají jako pojivo.

Produkcí těchto tepelně-izolačních materiálů, které mohou velice dobře konkurovat minerálním nebo skelným vatám (koeficient tepelné vodivosti  $\lambda = 0,004 \text{ W/mK}$ , objemová hmotnost  $\rho = 25-45 \text{ kg/m}^3$ ) se zabývá například francouzská firma La Chanvrière de l'Aube. V Německu se výrobou termoizolačních konopných rohoží zabývá například firma Hock GmbH & Co. KG, která vyrábí konopné izolace Thermo-Hanf. Současný materiál od zmíněné firmy se kromě konopí skládá z 15% polyesterových vláken pro kompaktnost a 3,5% sody jako ochrany před ohněm.

V ČR se výrobou přírodních izolací ze slámy, ale i z konopí zabývá firma EKOPANELY CZ s.r.o. z Přelouče.



# PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Izolační materiály organické							
	Tepelná vodivost	Objemová hmotnost	Faktor difúzního odporu	Stupeň hořlavosti DIN	Energetická náročnost výroby	Měrná tepelná kapacita	Oblast použití
	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m	*		c [J/kgK]	**
Celulóza	0,038 - 0,048	30 - 80	1 - 2	B1, B2	50 - 80	1700 - 2150	S, T, R
Dřevní vlákno	0,038 - 0,048	140 - 210	4 - 10	B1, B2	600 - 1500	2000 - 2400	P, S, T, R
Dřevní vlna	0,065 - 0,090	360 - 570	2 - 6	B1	170 - 250	2100	S, T, R
Korek	0,038 - 0,060	100 - 220	1,5 - 30	B2	65 - 450	1700 - 2100	P, S, T, R
Rákos	0,042 - 0,060	120 - 200	1 - 2	B2	30	1200	S, T
Konopí	0,039 - 0,043	22 - 85	1 - 2	B2	50 - 80	1300	P, S, T, R
Len	0,037 - 0,045	20 - 80	1	B2	30 - 80	1300	S, T, R
Sláma	0,046 - 0,060	90 - 150	1 - 2,5	B2	5		S, R
Kokosové vlákno	0,040 - 0,050	40 - 120	1 - 2	B2	95 - 200	1300 - 1500	P, S, T, R
Bavlna	0,036 - 0,040	20 - 60	1 - 2	B1, B2	90 - 100	840 - 1300	S, T, R
Ovčí vlna	0,037 - 0,042	13 - 138	1 - 2	B2	40 - 80	960 - 1300	T, R

\* *Třída hořlavosti dle DIN: **A1** - nehořlavý, P, **A2** - nehořlavý, S, **B1** - těžce hořlavý, T, **B2** - normálně hořlavý, R.*

\*\* *Oblast použití: **P** - podlaha, **S** - stěna, **T** - strop, **R** - střecha.*

Izolační materiály anorganické							
	Tepelná vodivost	Objemová hmotnost	Faktor difúzního odporu	Stupeň hořlavosti DIN	Energetická náročnost výroby	Měrná tepelná kapacita	Oblast použití
	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	m	*		c [J/kgK]	**
Keramzit	0,080 - 0,100	275 - 700	2 - 8	A1	300 - 450	1000	P, T
Perlit	0,045 - 0,070	40 - 90	1 - 4	A1	90 - 160	100	P, S, T, R
Vermikulit	0,060 - 0,080	60 - 180	3 - 4	A1	60 - 80	850 - 1050	P
Pemza	0,060 - 0,080	175 - 285	4	A1	200	1000	P
Minerální pěna	0,040 - 0,050	90 - 140	3 - 6	A1, A2		1000	S, T
Pěnové sklo	0,040 - 0,060	100 - 166	parotěsné	A1	750 - 1600	840 - 1600	P, S, T, R
Minerální vlna	0,035 - 0,045	22 - 200	1 - 2	A1, A2	150 - 400	840	S, T, R
Skelná vata	0,035 - 0,045	20 - 153	1 - 2	A2	250 - 500	840 - 1000	S, T, R
Polystyren EPS	0,035 - 0,040	10 - 100	20 - 100	B1	200 - 760	1500	P, S, T, R
Polystyren XPS	0,035 - 0,045	80 - 200	80 - 200	B1	450 - 1000	1500	P, S
Polyuretan	0,020 - 0,030	35 - 50	30 - 150	B2	800 - 1500	1200 - 1400	P, S, T, R

\* Třída hořlavosti dle DIN: **A1** - nehořlavý, **P**, **A2** - nehořlavý, **S**, **B1** - těžce hořlavý, **T**, **B2** - normálně hořlavý, **R**.

\*\* Oblast použití: **P** - podlaha, **S** - stěna, **T** - strop, **R** - střecha.

## 7.6.2 Střešní krytina

V minulosti se využívaly různé druhy přírodních střešních krytin. Použití určitého materiálu bylo dáno zejména jeho lokální dostupností, tzn. jaký materiál se v dané lokalitě vyskytoval, takový se pak používal jako střešní krytina. Jedním z nejstarších a výborných materiálů je kámen. Kámen, zejména břidlice, se v různých formách využíval a využívá jako střešní krytina, ovšem jeho nevýhodou je jeho hmotnost.

Mezi rychleobnovitelné přírodní materiály používané k zastřešení domů patří například rákos, konopí, sláma a jim podobné rostliny. Ty se vázaly do snopů a usazovaly se jako střešní krytina, tzv. došková střecha. Dále se využívá dřevěných šindelů jako velmi dobré střešní krytiny. V dnešní době se pokládá tato krytina vzhledem k ceně a celkové náročnosti zejména na historické objekty (roubené stavby většinou v horských oblastech). Jako střešní krytina se rovněž využívalo mechových drnů (zelené střechy).



Obrázek 02: Šindelová, došková střecha a zelená střecha



Obrázek 03: břidlicová střešní krytina a cementem pojené střešní tašky, plněné dřevěnými třískami (střecha v kalifornii)

## 7.6.3 Pomocné materiály

Přírodní materiály rostlinného původu mají mnoho využití. Zejména konopí je velice dobrou surovinou pro výrobu tisíce druhů produktů využívaných napříč všemi obory, stavební průmysl nevyjímaje. Kromě stavebních výrobků se využívají ve stavebnictví výrobky, jako jsou například různé druhy lan a provazových materiálů, lešení, oleje nebo pracovní oděvy.



Obrázek 04: Bambusové lešení, přírodní lana a provazy

## 7.6.4 Výplňové (izolační) materiály z pazdeří

Mezi izolační materiály můžeme také zařadit izolační výplňové materiály, které jsou vyráběny z pazdeří. V těchto stavebních materiálech plní pazdeří funkci plniva, pojivem bývají většinou pojiva na bázi vápna. Toto pazdeří neplní pouze funkci izolační, ale v kombinaci s pojivem se podílí na výsledných fyzikálně mechanických vlastnostech

materiálu. Tyto materiály se využívají velmi často ve spojení s dřevěnou hrázděnou konstrukcí, která plní nosnou funkci. V případě vhodného dávkování mohou dosáhnout i velmi dobrých mechanických vlastností a je možné tyto materiály klasifikovat i jako materiály konstrukční. Mezi největší producenty těchto materiálů patří Francie a Anglie. V ČR se prozatím tyto materiály i přes jejich nesporné výhody nevyrábí a musí se dovážet. Nejznámějšími firmami, které se zabývají výrobou materiálů na bázi konopí a vápenných plniv jsou Lhoist UK Ltd a Chanvre & Techniques (Technichanvre), La Chanvrière de l'Aube, Chenevotte Habitat aj.



Obrázek 05: **Příklad výplňové hmoty a bloku vyrobeného z konopného pazdeří pojeného vápnem s pucolány a cementem. (*Hempcrete, chanvriblock*)**

### 7.6.5 Hliněné materiály

Dalšími materiály, které se dodnes využívají, i když již v menší míře, jsou materiály jílové s přidávkou přírodních vláken. Nejčastěji se aplikují jako tzv. vepřovice – nepálené jílové cihly. Tento materiál má velice dobré vlastnosti vzhledem k zajištění celkové uživatelské pohody v interiéru konstrukce, která je z tohoto materiálu vystavěna. Hlína na sebe váže velké množství vodní páry a ta se do obytných prostor opět odpařuje při sušším vnitřním klimatu. Velmi podstatnou nevýhodou hliněných materiálů je závislost mechanických vlastností na vlhkosti, což významně omezuje oblast použití těchto materiálů. Nejčastěji se jako výztuž používá pazdeří nebo vlákna konopí, sláma nebo dřevěné třísky a hobliny. Jílovo-konopné cihly se skládají z 75 % jílu a 25% konopného pazdeří. Na českém trhu již několik let existuje sortiment sypkých hliněných směsí vyráběných pro stavební využití. Tyto omítkové a zdící směsi se aplikují čím dál častěji do konstrukcí, jak nových, tak i starších domů a památek.

### 7.6.6 Konopné pazdeří jako plnivo vhodné pro pojení asfaltem

Materiál, který vyrábí například německá firma MEHA, se využívá ve formě desek či zásypů, zejména na vyrovnávky podlah.



### 7.6.7 Konstrukční materiály

Mezi konstrukčními materiály jsou rozšířeny zejména výrobky vyráběné z dřevních třísek a cementu. Tyto stavební materiály dosahují velmi dobrých fyzikálně mechanických vlastností, proto se využívají nejčastěji jako ztracené bednění, příčky, tvarovky, fasády, podlahové systémy, půdní vestavby nebo pro protipožární systémy. Kromě dřevních třísek se využívají, případně se vyvíjí nové konstrukční materiály plněné již zmíněnými stonkovými materiály (sláma, konopí, len aj.)



Obrázek 06: OSB desky, dřevo cementové (pazdeřo-cementové) desky a dřevocementové ztracené bednění



## DOPLŇUJÍCÍ LITERATURA

KHESTL, F. *Modification of cement bonded particleboard characteristics and durability improvement by secondary raw materials application*. Brno, 2011. 236 s. Doctoral thesis. Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Technology of Building Materials and Components.

SVOBODA, L. a kolektiv, 2013. *Stavební hmoty*. 3. Vydání. Praha. ISBN 978-80-260-4972-2. Online: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>.

CALLISTER, WILLIAM D. 2007. *Materials Science and Engineering: an introduction*, ISBN 978-0-471-73696-7.

EDWARD ALLEN, JOSEPH IANO. 2013. *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods, 6th Edition*. 1024 pages ISBN: 978-1-118-13891-5.

Kratochvíl, B., Švorčík, V., Vojtěch D. 2005. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko technologická v Praze. Praha. 190 stran. ISBN 80-7080-568-4.