

<i>Nyugat-magyarországi Egyetem Benedek Elek Pedagógiai Kar</i>	Tantárgy: Mérnöki anyagtudomány	Szak: mérnöktanár
Név: Makó Gábor <i>javítva: 2015-12-22</i>	Dátum: 2015-11-25	Tagozat: levelező

Mérnöki anyagtudomány

**A faanyag mint biokompozit jellemzése
(felépítés, anyagjellemzők)**

Tartalomjegyzék

1 Az anyag.....	4
2 A kompozit anyagok.....	4
3 Az anyagok tulajdonságai.....	5
4 A faanyag.....	6
4.1 A növényi sejt és a szövet.....	6
4.2 A szövetek típusa és a növekedés.....	7
4.2.1 Magassági növekedés.....	8
4.2.2 Vastagsági növekedés.....	8
4.3 A fa növényi sejtfala.....	9
4.4 A sejtfalban elhelyezkedő cellulóz váz.....	11
4.5 A sejtfal gödrözöttsége, vastagodása.....	12
4.6 A fatest kémiai összetétele.....	14
4.6.1 Alapelemek.....	14
4.6.2 Fontosabb vegyületek.....	15
4.6.2.1 Poliszacharidok.....	15
4.6.2.2 A lignin.....	15
4.6.2.3 A járulékos anyagok.....	16
4.6.2.4 Ásványi anyagok.....	16
4.6.3 A fatest mikroszkópos szerkezete.....	16
4.6.4 A fatest makroszkópos szerkezet.....	22
4.6.4.1 Az évgűrűszerkezet.....	24
4.6.4.2 A bél és a juvenilisfa.....	25
4.6.4.3 A geszt.....	26
4.6.4.4 A szijács.....	27
4.6.4.5 A kéreg.....	27
4.6.4.6 A háncs.....	28
5 A faanyag tulajdonságai.....	29
5.1 A nedvességtartalom.....	29
5.2 Dagadás-zsugorodás.....	31
5.3 A sűrűség.....	31
5.4 Elektromos tulajdonságok.....	32
5.4.1 Ellenállás, vezetőképesség.....	32
5.4.2 Dielektromos tulajdonság.....	33
5.4.3 Piezoelektromos hatás.....	34
5.4.4 Elektromos szilárdság.....	34
5.5 Mágnesezhetőség.....	35
5.6 Hőtechnikai, égési tulajdonságok.....	35
5.6.1 Hőtágulás.....	35
5.6.2 Fajhő.....	36
5.6.3 Hővezetés.....	36
5.6.4 Égési jellemzők.....	38
5.6.4.1 Égéshő, fűtőérték.....	38
5.7 Akusztikai jellemzők.....	39
5.7.1 Hangterjedés a fában.....	39
5.7.2 Hangelnyelés, hangszigetelés.....	40
5.8 Mechanikai tulajdonságok.....	40

5.8.1 Rugalmasság.....	40
5.8.2 Szilárdság.....	42
5.8.3 Hasítószilárdság.....	43
5.8.4 Keménység.....	43
6 Felhasznált szakirodalom.....	45

1 Az anyag

A technika és tudomány szempontjából a kompozitok fontos szerepet játszanak. Ehhez meg kell határoznunk az anyag fogalmát.

Az anyagnak több definíciója létezik. Az anyagtudomány szempontjából az egyik megfelelő meghatározása: környezetünkben megtalálható „dolog”, amit termékek elsődleges gyártási folyamata során használnak fel.

2 A kompozit anyagok

A kompozit anyagoknak azokat az anyagokat nevezzük, amelyek több (tehát legalább kettő) – különböző szerkezetű – anyagból épülnek fel. Ezek az építőelemek az alapanyagok.

A kompozitkészítés célja, hogy egy adott anyag előnyös tulajdonságait kiemeljük, a negatívot pedig csökkentjük. Tehát egy optimális anyagszerkezet elérése a végcél mesterséges úton.

A kompozitok létrehozásánál akár egy különleges kombinációjú, vagy egy adott tartományon belül folyamatosan változó tulajdonságú anyag előállítása is lehet a feladat.

A kompozitok alapanyaga az ún. **mátrix**. A másik komponens az **erősítő fázis**, melynek segítségével a pozitív tulajdonságo(ka)t növeljük. Ezek lehetnek szálak (rövid, hosszú) ill. részecske szerkezetűek.

A kompozit anyagok alapvetően az alábbi anyagokból építhetők fel:

- Fémek
- Műanyagok
- Kerámiák
- Üvegek

A kompozitok jellemzője, hogy nehezen, költségesen újrahasznosíthatóak, valamint biológiai úton való lebonthatóságuk rendszerint csak korlátozott módon lehetséges. Mátrix anyaguk általában nem megújuló erőforrásból kerül előállításra.

Ezen okok miatt az elmúlt évtizedekben jelentős kutatómunka indult a természetes, bio

alapanyagok, kompozitok előállítására. A **biokompozit** olyan anyag, amelyek természetes úton lebomló mátrix és erősítő fázisból áll.

A természetben megtalálható egyik legjelentősebb biokompozit anyag a fa.

3 Az anyagok tulajdonságai

Az anyagok részecskékből, atomokból, molekulákból épülnek fel. Ezek molekulacsoportokat képeznek, ami az anyag mikroszkópos szintje. A szabad szemmel is látható jellemzők a makroszkópos szint.

Az anyagot felépítő elemi részek típusa, kapcsolódása befolyásolja a tulajdonságait. Az anyagok jellemzésére, összehasonlításukra az alapvető anyagjellemzők szolgálnak:

- Fizikai (pl.:sűrűség)
- Mechanikai (pl.: szilárdság - rugalmasság)
- Kémiai (pl.: reakcióképesség)
- Elektromos (pl.: vezetőképesség)
- Hőtechnikai (pl: fajhő - hővezető képesség)
- Mágneses (pl.: mágneses permeabilitás)
- Optikai (pl.: törésmutató)
- Akusztikai.

4 A faanyag

A faanyag, mint biokompozit anyag tulajdonságainak megértéséhez ismernünk kell a felépítését. A fa alapvető tulajdonságait fajtától függő összetételben a ***lignin***, ***cellulóz*** és ***hemicellulóz*** határozza meg. Mint kompozit anyag *mátrix* anyaga a *lignin*. A cellulóz és a hemicellulóz az erősítő fázis. A fa – mint növény – sejtekből, szövetekből áll.

4.1 A növényi sejt és a szövet

A fa növényi sejtekből álló „vázszerkezet”. A sejtekből épül fel a szövet, melynek elsődleges feladata a vízszállítás a fotoszintézis során. A másik funkciója a mechanikai szilárdság biztosítása.

A növényi sejteket két alcsoportba sorolhatjuk:

1. ***parenchima*** sejtek:

A tér minden irányában közel azonos méretűek, sejtfaluk vékony és nehezen fásodik. Méretük 10-100µm. Ilyenek pl. az ún. bélsugársejtek.

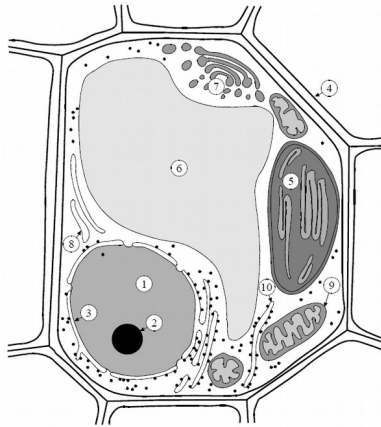
2. ***prozenchima*** sejtek:

Hosszúak formájúak, a hosszúság többszöröse a szélességnek (ill. vastagságnak). A sejtvégek hegyesedők, a sejtfaluk vastag. Korán fásodnak (sejtalba történő lignin berakódás erősíti a fa szerkezetét). Általában 4-5mm hosszúak, de az egybeolvadt ún. szállítóedények hossza a méteres nagyságot is elérheti. A kompozit anyag tekintetében ez fontos szerepet kap, hiszen a hosszúkás sejtek felülete nagyobb, erősebb kötést biztosítanak, ami jobb mechanikai tulajdonságokat jelent.

A sejt alkotórészei két csoportba sorolhatók:

- élő (aktív) részek: citoplazma, sejtmag, színtestek, sejtszervecskék,
- holt (passzív) részek: sejtfal, zárványok, sejtnedv.

A növényi sejt részei az 1. ábrán: 1. sejtmag, 2. magvacska, 3. magmembrán, 4. sejtfal, 5. színtest, 6. vakuólum, 7. Golgi-készülék, 8. sima felszínű endoplazmatikus retikulum, 9. mitokondrium, 10. durvafelszínű endoplazmatikus retikulum.



1. Ábra: A növényi sejt

A citoplazma bonyolult szerkezetű vizes kolloid, amelyet vízben oldott egyszerűbb szervetlen és szerves molekulák, valamint fehérjék, zsírok és egyéb molekulák alkotnak. A sejt alapállományát adja, benne helyezkedik el a sejtmag, valamint más sejszervecskék. Fontos feladata a sejtfal képzése.

A sejtmag az életműködés és az öröklés szempontjából alapvető jelentőségű sejtalkotó.

A színtesteknek 3 fő csoportját különítjük el: lehetnek zöldek, más színűek, és a színtelenek. A zöld színtesteknek élettani szempontból meghatározó szerepük van a fotoszintézis során.

A Golgi-készülék néhány lapos, egymással párhuzamos zsákból áll, melynek a végei kiszélesednek, és innen hólyagok válnak le. Cukrok és származékaik előállításában, valamint a lignifikációban vesz részt. Fontos szerepe van az osztódásban.

A sejtfalat a citoplazma hozza létre. Feladata a szilárdítás, meghatározza a sejtek alakját és közreműködik a folyadék- és tápanyagszállításban. A fa, mint biokompozit anyag felépítésében fontos szerepe van.

4.2 A szövetek típusa és a növekedés

A fa növekedését a sejtekből szerveződő szövetek, szövetrendszerek segítik.

A szöveteket az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- **Osztódó szöveteket**, melyek elhelyezkedésük alapján lehetnek:
 - csúcsmerisztémák,
 - kambiumok (oldalmerisztémák).

- **Állandósult szöveteket:**
 - *védő szövetrendszerek:* bőrszövetek és szilárdító (mechanikai) szövetek,
 - *anyagcsere szövetrendszerek:* felszívó-, szellőztető-, kiválasztó- és váladéktartó szövetek.

4.2.1 Magassági növekedés

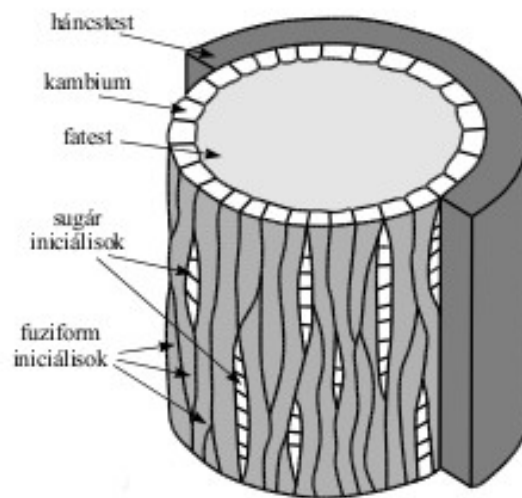
Az osztódó szövetek közül a csúcsmerisztémák felelnek a magassági növekedésért, ezen belül is az ún. szártenyésző kúp. A növekedés szakaszai:

- Sejtosztódási szakasz: a tenyészőkúp sejtjeinek osztódása eredményezi az új sejteket.
- Megnyúlási szakasz: a létrejött sejtek megnyújtása a cellulóz kötegek fellazítása révén.
- Differenciálódási szakasz: a belső differenciálódás során kialakul a sejtek mérete, a sejtfalak vastagodása. Itt történik a fásodás, azaz a cellulóz szálak közé lignin épül be. (Hasonlóan a vasbetonhoz – mint kompozit anyag – a beton a lignin, a vas pedig a cellulóz szerepét tölti be.)

4.2.2 Vastagsági növekedés

A fa vastagsági növekedését a kambiumok (oldalmerisztémák), mint osztódó szövetek végzik. A kambiumoknak több típusa létezik (gyökér oldalelágazásai – perikambiummal, sebzéseket benövő, kalluszt létrehozó sebkambiummal, a kéreg kialakulása parakambiummal), de a fatest vastagodásáért az ún. **prokambium** típusú szövet felel, ezen belül is a **nyaláb** és **nyalábközi kambium**. Két alapvető sejttypusból épülnek fel:

- **Orsó alakú iniciálisok:** hosszú, kihegyezett téglalap keresztmetszetűek.
- **Sugár iniciálisok:** négyzet, vagy rombusz keresztmetszetűek, a hosszuk meg nagyobb a szélességüknél, és a bélsugársejtek képzésében van szerepük.



2. Ábra: A kambium elhelyezkedése

A fa teljes ételciklusát tekintve kezdetben a magassági növekedés általában intenzívebb, és korábban fejeződik be.

4.3 A fa növényi sejtfa

A fatestet alkotó sejtek falában levő citoplazma gyorsan elpusztul és így csak a sejtfa marad fenn. A fatest az ipari felhasználás során gyakorlatilag egy sejtfa-rendszer. Fizikai, mechanikai, technológiai tulajdonságai három szinten alakulnak ki:

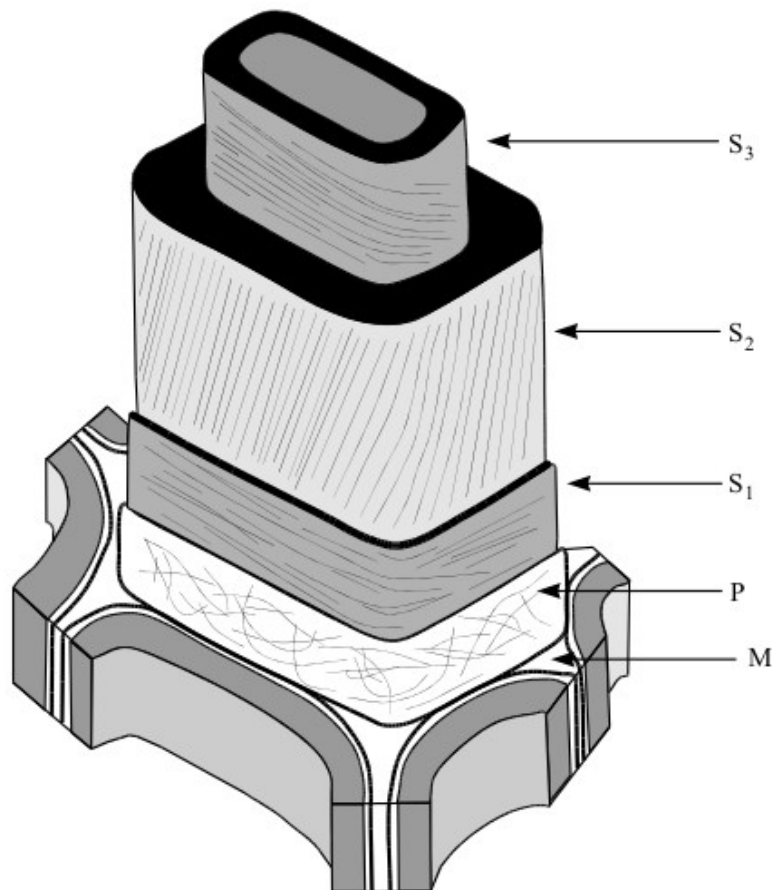
- **Szubmikroszkópikus struktúra:** sejtfa finomszerkezete, gödörkézettség, vastagodása.
- **Mikroszkópikus struktúra:** a sejtfa-lak által körülhatárolt sejtek, szövetek.
- **Makroszkópikus struktúra:** a sejtek, szövetek által létrehozott nagyobb fatestrészek, pl. évgyűrűszerkezet, geszt, szíjács, kéreg... stb.

A sejtfa fontos tulajdonsága, hogy réteges szerkezetű.

Ezek a rétegek a következők:

- **középlemez (M):** A sejtek közötti ragasztóréteg; pektinből és ligninből áll (amorf, izotróp jellegű anyag), vastagsága 0,2-2,0 μm .
- **elsődleges (primer) sejtfa (P):** A fejlődés első szakaszában kialakuló igen vékony réteg (kb. 0,1 μm), cellulózt csak kis mennyiségben (3-5%) tartalmaz. Többnyire hemicellulózból, pektinből és az idősebb sejteknél ligninből tevődik össze.

- **másodlagos (szekunder) sejtfal:** A sejtfal belső vastagodási folyamatában alakul ki. Ezt a sejtfalrészt is még további rétegekre szokták bontani (S_1 : külső, S_2 : középső, S_3 : belső réteg). A nagy cellulóz tartalom jellemző rá, valamint az egyes alrétegekben a cellulózsálak (fibrillák) adott szöget zárnak be a sejt hossz tengelyével.



3. Ábra: A réteges sejtfal

A másodlagos sejtfal kialakulása után előfordul, hogy egy **harmadlagos (tercier) sejtfal** is kialakul.

A fatest sejtei igen változatos módon vastagodnak meg. Az alapállományt képező szilárdító sejtekre jellemző, hogy a másodlagos fal bizonyos helyeken nem fejlődik ki. Az így kialakuló „gödörkék” lehetővé teszik a sejtek között egyes anyagok átszivárgását.

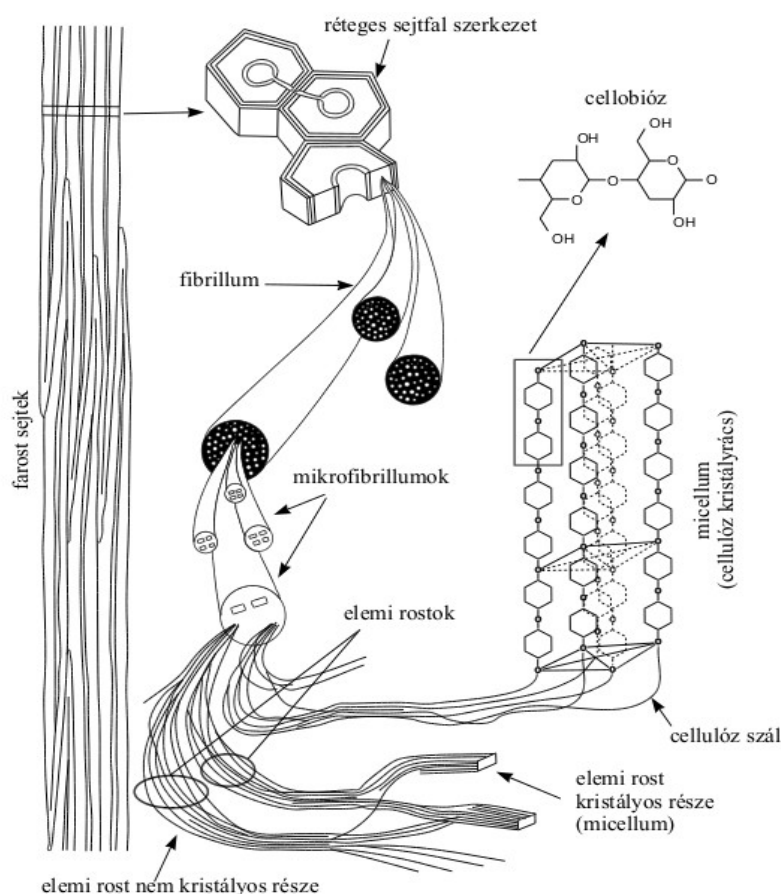
A gödörkézettség és a sejtfalvastagodás nagy szerepet tölt be a faanyag tulajdonságaiban (szárítása, telítése, ragasztása...stb. folyamán) és különböző mértékű az egyes fafajokban. A véglegesen kialakult sejtfal cellulóz vázába a lignin és egyéb járulékos anyagok rakódnak be. Ezt

az utólagos elváltozást a fatest sejtfaiban **elfásodásnak**, **lignifikációnak** nevezzük. A másodlagos sejtfa közepső rétegében (S_2) található a legtöbb lignin (kb. a teljes mennyiség 70%-a).

4.4 A sejtfaiban elhelyezkedő cellulóz váz

A sejtfaiban található cellulóz makromolekulák (fonalmolekulák) kristályos szerkezetűek, a párhuzamosan futó szálak (40-100db) alkotják a **micellákat** (elemi fibrillák).

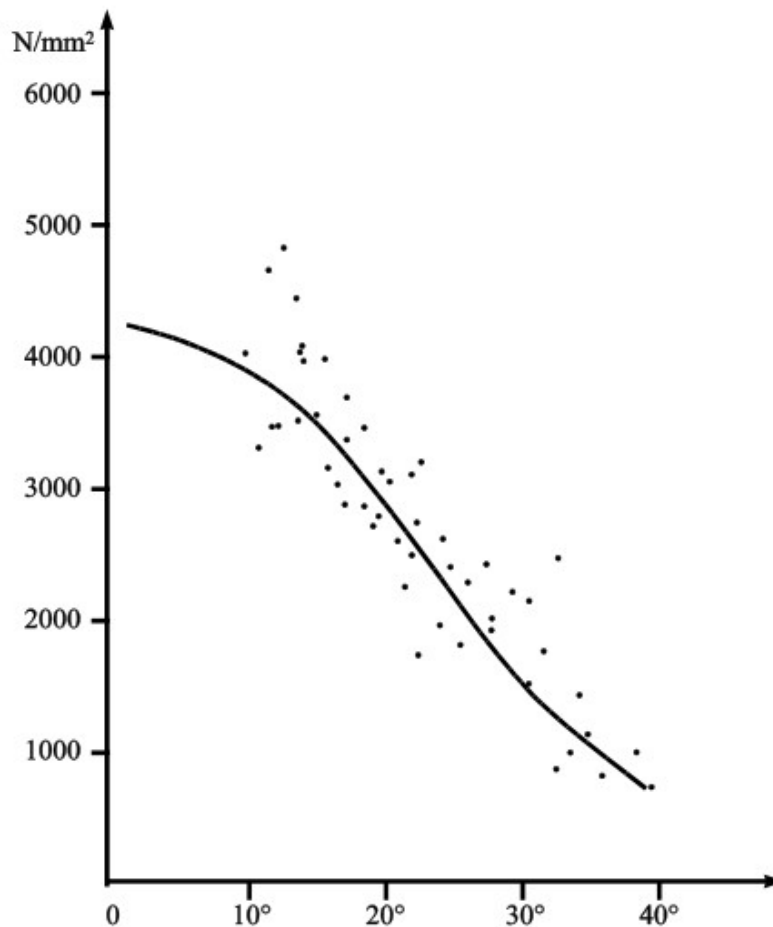
Egy cellulóz kötegben, elemi fibrillában a kristályos és amorf részek váltakoznak. Az elemi fibrillák (4-6db) képezik a mikrofibrillát. A mikrofibrillák ill. a micellák között üregek találhatók, méret nagyságuk kb. 1nm. Ezekbe a **intermicelláris rétegek**be tud a víz beférni. Az **interfibrilláris rétegek**ben (kb. 10nm) pedig hemicellulózok és lignin (valamint az extrakt anyagok) épülnek be.



4. Ábra: A sejtfaiban cellulóz váza

A szekunder sejtfa közepső rétegében (S_2) található mikrofibrillák csavarodása, a sejt hossz tengelyéhez viszonyított futási szöge összefüggést mutat a fa szilárdsági, rugalmassági

jellemzőivel. A kisebb futási szög kedvezőbb mechanikai jellemzőt biztosít.



5. Ábra: A húzórugalmassági modulusz és a mikrofibrilla szöge

A vízfelvétel (higroszkóposág) szempontjából is fontos szerepe van a cellulóz felépítésének és az intermicelláris, interfibrilláris üregeknek. Ezekbe az üregekbe bekerülő víz a faanyag zsugorodását, dagadását befolyásolja. Amikor a sejtfa üregei telítődnek vízzel, ezt nevezzük rosttelítettségi állapotnak.

A fa-víz kapcsolatra a későbbiekben kitérek, de érdemes itt megjegyezni, hogy 1g cellulóz felülete 100-1000m² jelent, melyben az ún. hidroxil csoportoknak (-OH) fontos szerepe van vízmegkötésben.

4.5 A sejtfa gödrözöttsége, vastagodása

A fatestet alkotó szövetekben a sejtek közötti anyagforgalom végzése céljából vannak olyan

hézagok, melyekre nem rakódott rá másodlagos (szekunder) sejtfalréteg. Ezeket a vékonyan maradt falrészeket a faanatómiában **gödörkének** nevezik.

A sejtfal gödörkézettségét **általános vastagodásnak** nevezik, mivel a másodlagos sejtfalvastagodás folyamán a sejtfalrétegek centripetálisan, egyenletesen rakódnak egymásra, és az elsődleges sejtfalra bizonyos területeken nem rakódik rá másodlagos sejtfal, azaz vermek, gödörkék képződnek a másodlagos sejtfalon.

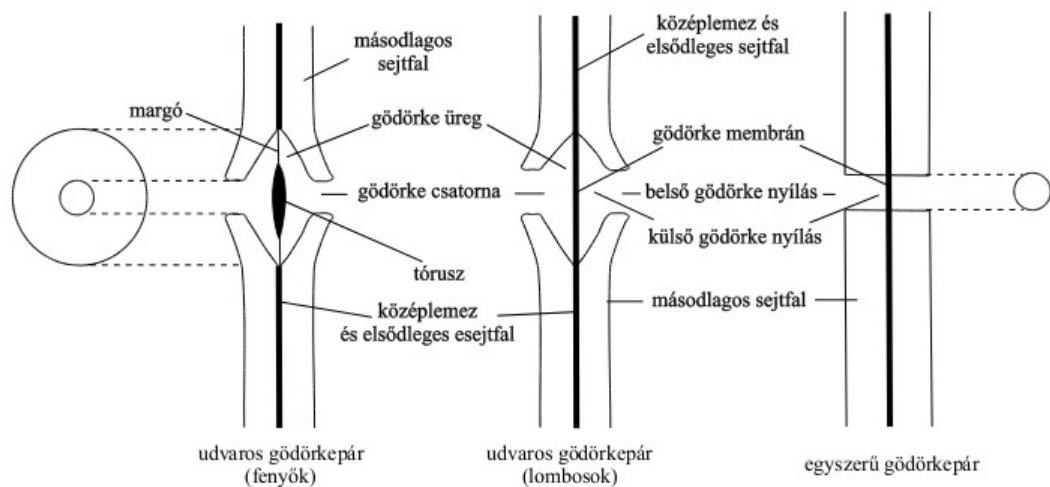
A gödörkézettségnek fontos szerepe van a szárítási, gőzölési, telítési technológiákban, valamint a mechanikai tulajdonságokat befolyásolják. Rendszerint a nagyobb gödörkék a sejtfalrepedések kiindulópontjai.

A gödörkék különböző formájúak lehetnek, de általános jellemzőjük, hogy a két szomszédos sejtnél egymással szemben helyezkednek el. Így gödörkepárt alkotnak.

Az alábbi gödörkepárokat különböztethetjük meg:

- **udvaros gödörkepár:** közöttük tórusz/margó szerkezettel az áledényekben (tracheidák), a fenyőknél.
- **udvaros gödörkepár:** közöttük membránnal az edényekben és a tracheidákban, a lombos fajoknál;
- **egyszerű gödörkepár:** a edényekben, faparenchimákban, farostokban;
- **féludvaros gödörkepár:** egy udvaros és egy egyszerű gödörkéből áll.

Az egyszerű gödörkénél a két nyílás közel azonos méretű. A fenyők udvaros gödörkéire jellemző, hogy a gödörkemembrán kialakulása során sajátos változáson megy át, melynek eredményeként egy külső, laza szerkezetű **margó**, és egy belső, megvastagodott, korongszerű **tórusz** jön létre.



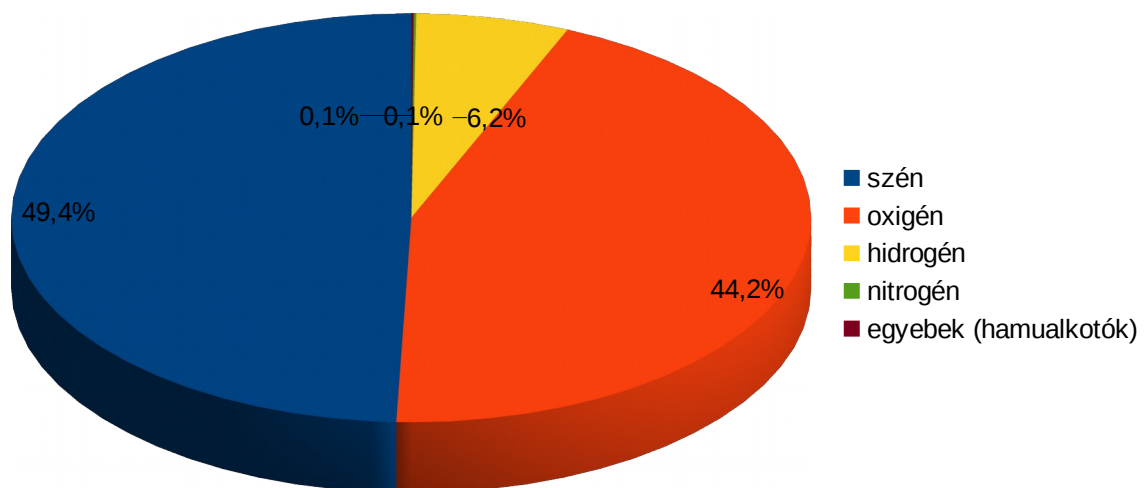
6. Ábra: Gödörkék típusai

4.6 A faest kémiai összetétele

4.6.1 Alapelemek

A fotoszintézis során a fa fejlődik, mely elemi összetételében is jelentkezik. A fa szerves anyagának összetétele fafajonként változik, de átlagosan az alábbiak szerint alakul:

szén	oxigén	hidrogén	nitrogén	egyebek (hamualkotók)
49,4%	44,2%	6,2%	0,1%	0,1%



7. Ábra: A fa elemi összetétele

4.6.2 Fontosabb vegyületek

A fatestet alkotó fontosabb vegyületek, a **cellulóz**, a **hemicellulózok** és a **lignin**. Kis mennyiségben járulékos (extrakt) anyagokat is tartalmaz.

4.6.2.1 Poliszacharidok

A fotoszintézis termékeként létrejövő glükóz és egyéb monoszacharidok (fruktóz, hexóz, mannóz ...stb.), valamint a cellulóz, hemicellulóz, pektin és keményítők.

A fa vázát az elfásodott sejtfalak adják, aminek a legfontosabb összetevői a cellulóz és a lignin. A cellulóz közé rakódik be a lignin a hemicellulózon keresztül.

A **cellulóz** kristályos szerkezetű anyag, a fatestben 40-55% mennyiségben megtalálható. Makromolekuláiban a β -D glükóz molekulák egymáshoz kapcsolódnak láncot alkotva. A polimerizációs fok elérheti a $n=8000$ -et is. Képlete:



A cellulóz a víznek és a legtöbb oldószernek ellenáll.

A **hemicellulóz** a cellulózhoz kapcsolódik, a molekulalánc rövidebb ($n=50-360$). Lombos fák esetén a pentózok a jellemzők, fenyőknél pedig a hexózok. Nem egyértelműen kristályos szerkezetűek (mint a cellulóz), parakristályos vagy amorf és könnyen oldódik vízben. A faanyagban mennyiségi arányuk kb. 20-35%. Egyik ismert hemicellulóz csoport a pektinek.

A hemicellulózok karboxilcsoportjaik révén ($-COOH$) nagyszámú vízmolekulákat tudnak megkötni. A fa vízfelvételében, dagadásában tehát nagy jelentősége van.

A tartalék tápanyagként érdemes megemlíteni még a **keményítőt**, mely a bélsugarakban fordul elő. Mennyisége nem jelentős a fatestben, max. 1-2%. A fenyők esetében inkább zsírokat találunk.

4.6.2.2 A lignin

A **lignin**, mint a faanyag mátrix komponense az egyik legjelentősebb aromás vegyület. Makromolekulák hálózatos, ill. amorf jellegűek. Három csoportja van: koniferil-, a szinapil és a p-kumaril alkohol. A fenyőkre a koniferil-, a lombos fákra a szinapil- és a koniferilalkohol jellemző.

A sejtfal elfásodása (lignifikáció) során a lignin a hemicellulózokon keresztül kitölti a cellulózváz interfibrilláris üregeit, növelve a nyomószilárdságot és a sűrűséget.

<i>A sejtfal fontosabb vegyületei</i>			
<i>Fafajcsoport</i>	<i>Cellulóz</i>	<i>Hemicellulóz</i>	<i>Lignin</i>
Tűlevelűek	48 – 56%	23 – 25%	26 – 35%
Lombosfák	46 – 48%	26 – 35%	15 – 28%

4.6.2.3 A járulékos anyagok

A járulékos anyagok nem épülnek be a sejtfalba, könnyen kioldhatók. Oldószerük a víz, benzol, alkohol. A kinyert anyagokat **extrakt anyagoknak** nevezik. Részarányuk általában nem jelentős, csak néhány százalék, de bizonyos fafajoknál elérheti a 30%-ot is (pl. erdei fenyő).

Három csoportjuk van:

- **fenolos gesztanyagok:** A sejtek belső falán védőanyagként rakóznak le. (Csersav, tannin)
- **gyanták, terpének:** A fenyőkben jellemző, ipari nyersanyagként használják fel.
- **egyéb járulékos anyagok:** A fa tulajdonságaira nincsenek hatással.

4.6.2.4 Ásványi anyagok

A fa elégetésekor a szervetlen (ásványi) anyagok döntő része különböző oxidok formájában visszamarad (hamuban). A nem jelentős mennyiségük elbomlik, illékonyságuk révén eltávozik. A fatestben az ásványi sók vagy oldatok formájában, a sejtmedvében, vagy kristályos formában, a sejtfalban, esetenként a sejtüregekben találhatók. Mennyiségük a fatest teljes szárazanyag tömegéhez viszonyítva nem éri el az 1%-ot.

A kristályos lerakódások (pl. SiO_2 , CaCO_3) növelik a faanyag tartósságát, de a szerszámok élkopásában nagy jelentőséggel bír.

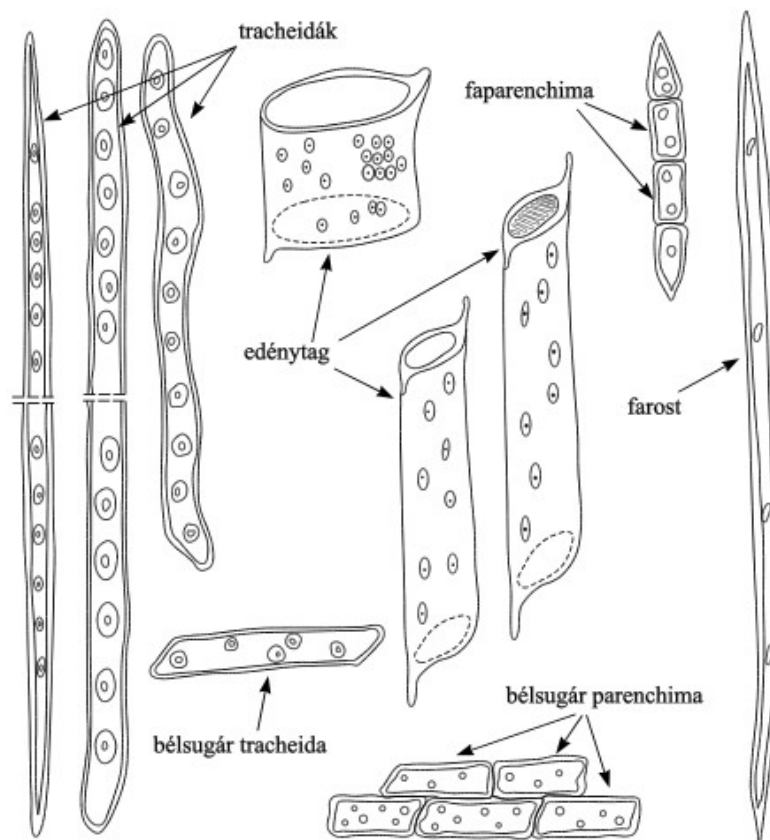
4.6.3 A fatest mikroszkópos szerkezete

A faanyag felépítésében különféle sejtípusokat figyelhetünk meg.

A sejteket három típusba sorolhatjuk:

- **szállító elemek:** tracheidák (áledények), edények (tracheák), edénytracheidák
- **szilárdító elemek:** farostok (libriformrostok), pótló- és rekeszes rostok, rosttracheidák
- **raktározó, (szállító) parenchimatikus elemek:** faparenchimák (hosszparenchimák),

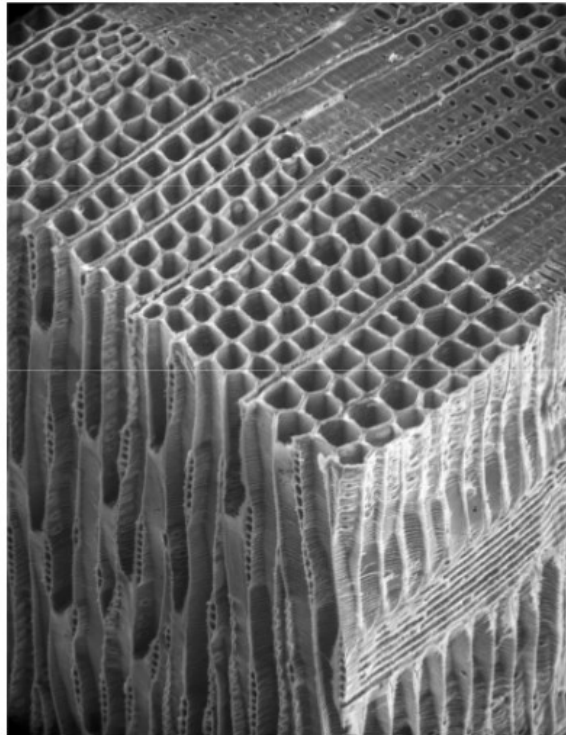
bélsugár parenchimák, építelsejtek.



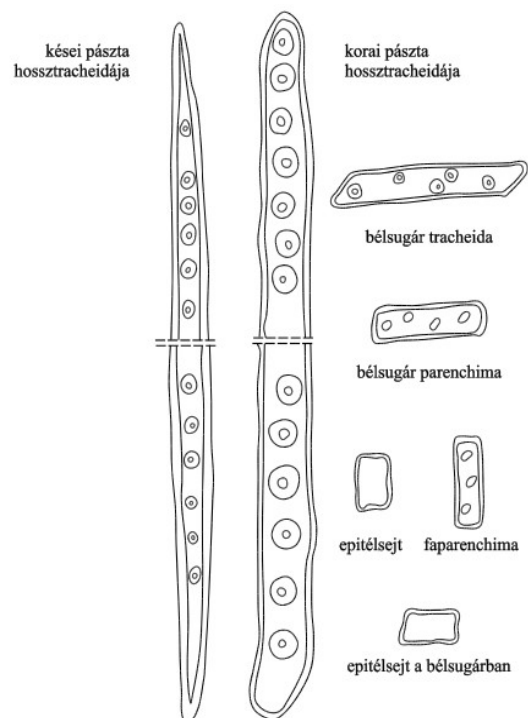
8. Ábra: A fatestben megtalálható sejtípusok

Az ipari felhasználásban számottevő fafajcsoport a **fenyők**. A lombos fafajokhoz viszonyítva a fenyők alacsonyabb fejlődési fokon álló, egyszerűbb szerkezetű fák. Alapvetően tracheidákból épülnek fel, ezek végzik a szilárdítást és a vízszállítást egyaránt. Parenchimatikus sejtek elsősorban a belsőgarakban vannak.

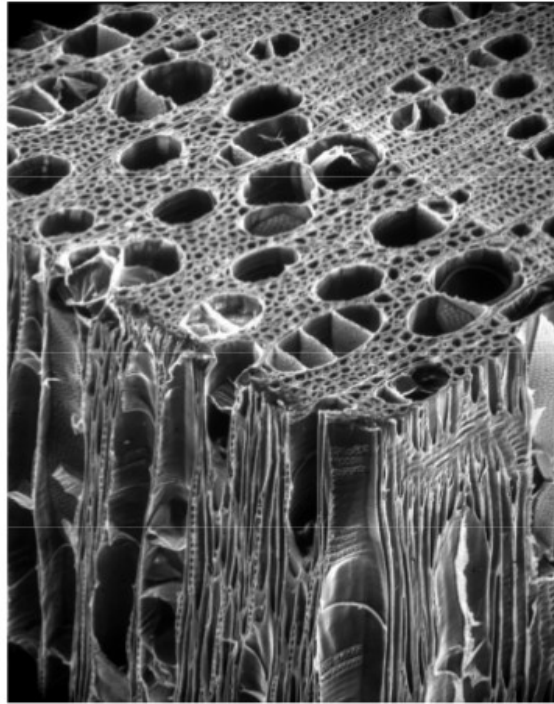
A **lombosfák** esetén a vízszállításban az edények (tracheák), a szilárdításban a libriform rostok játszik az elsődleges szerepet. Viszonylag nagy mennyiségben rendelkeznek faparenchimákkal. Belsőgaraiuk lehetnek 1 sejt sorosak, de gyakran szélesek, azaz többsejt sorosak, vagy halmozottak.



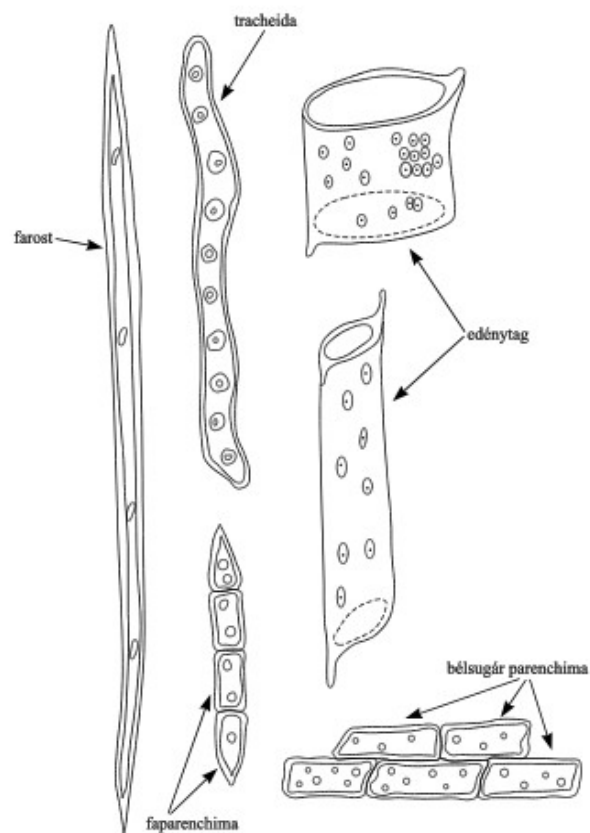
9. Ábra: A fenyők sejtes felépítése



10. Ábra: A fenyők sejtípusai



11. Ábra: A lombosok sejtes felépítése



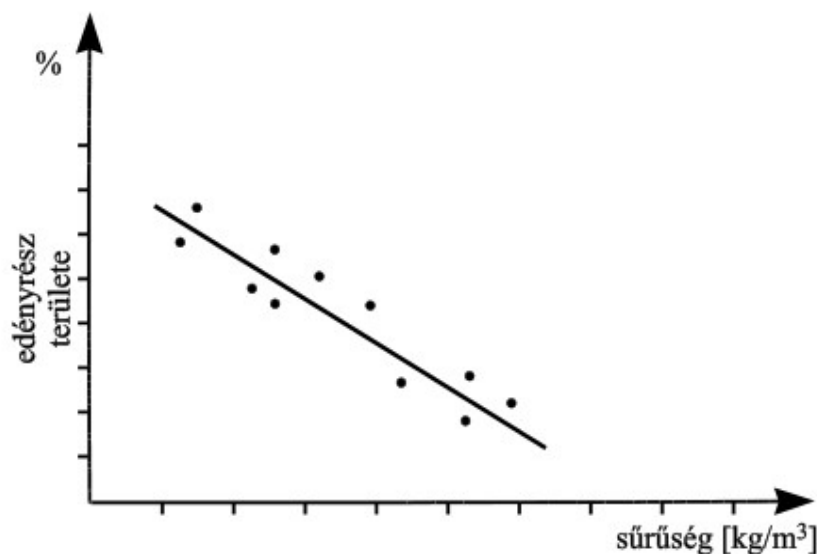
12. Ábra: A lombosok sejtípusai

Az **edények** (tracheák) csőszerű vízszállító elemek, nagy üregükkel élesen elkülönülnek a többi szöveti elemtől. Az évgyűrűszerkezetben a korai pásztában rövidebbek, a késői pásztában hosszabbak.

Az edények elrendeződése és mérete alapján két csoportot különböztetünk meg:

- gyűrűslikacsúak: az edények a korai pásztában nagyobb átmérőjűek és gyűrűszerű rendeződést mutatnak, a két pászta élesen elkülönül (tölgy, kőris, akác, szil, gesztenye... stb.),
- szórtlikacsúak: az edények átmérője nagyjából azonos és eloszlásuk is egyenletes (bükk, hárs, nyír, nyár, fűz, juhar... stb.).

Az edények méretaránya összefüggést mutat a sűrűséggel. Ahol kisebb az edények területaránya, ott nagyobb a sűrűség:



13. Ábra: Az egyes fafajok fatestének sűrűsége és edényterület aránya közötti összefüggés

Az **áledények** (tracheidák) nem csak vízszállításra specializálódtak, hanem a szilárdítás funkcióját is betölthetik (fenyőknél). Vízszállítási funkciójukat udvaros gödörkéken keresztül látják el, de a gödörkemembrán közel egyenletes vastagságú marad, azaz nem alakul ki a fenyő tracheidáira jellemző tórusz/margó szerkezet. Harántfalukon nincsen áttörés, ezért nevezzük csak áledénynek őket.

A **farostok** (libriform rostok) a lombosfák alapszövevei, funkciója a szilárdítás. Rövidebbek, mint

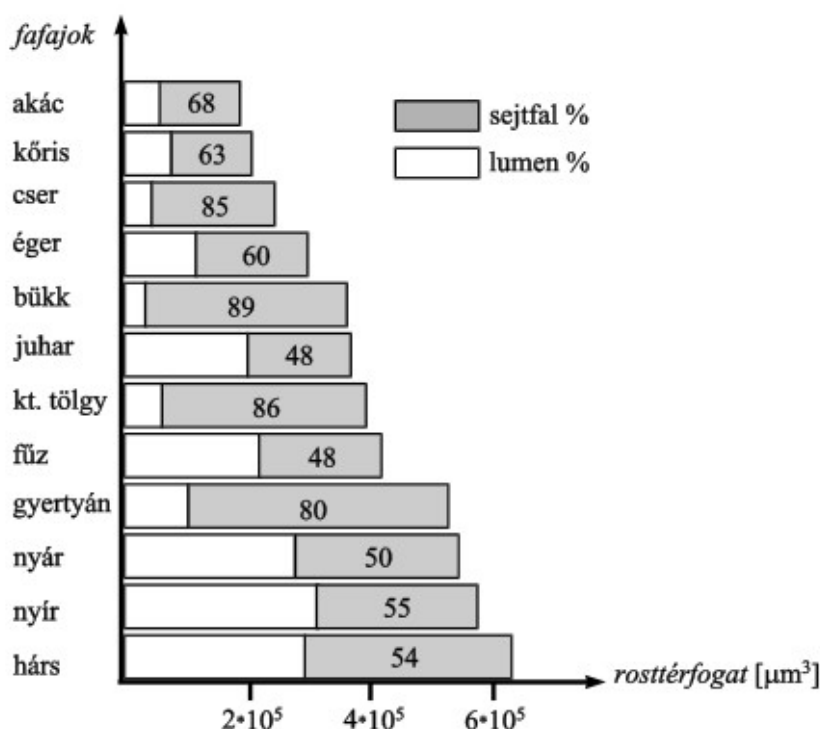
a tracheidák, átlagosan 1-2mm hosszúak. Hosszú, kihegyezett formájuk és vastag sejtfaluk van. A farostokat a sejtfal és sejtüreg (lumen) aránya, sejtfal vastagsága, térfogata és a rostok keresztmetszete jellemzi. Ezek meghatározzák a fa fizikai, mechanikai tulajdonságait.

Néhány fafaj fontosabb farostjellemzői:

<i>Fafaj</i>	<i>Hossz [μm]</i>	<i>Falvastagság [μm]</i>	<i>Lumenátmérő [μm]</i>	<i>Mennyiség a keresztmetszet %-ában</i>
Akác	1000	3,9	5,0	58,0
Magas kőris	875	3,6	15,0	62,4
Gyertyán	2320	10,1	7,0	66,0
Bükk	950	7,5	7,1	37,4
Kocsánytalan tölgy	880	4,2	12,5	Ko 44,3 Ké 58,1
Cser	1113	6,3	10,3	48,0
Közönséges dió	1300	4,7	17,0	63,8
Olasz nyár	800	2,6	17,3	56,3

A nagyobb rosttérfogat nem jelent egyértelműen szilárdabb, sűrűbb faanyagot, ha megnézzük pl. a bükk 40% alatti és a nyár 50% feletti értékét.

A faanyagok sűrűsége és a sejtfalak vastagsága, illetve a sejtfal-lumen arány között a lombosfák esetében nem lehet felállítani egyenes arányt:



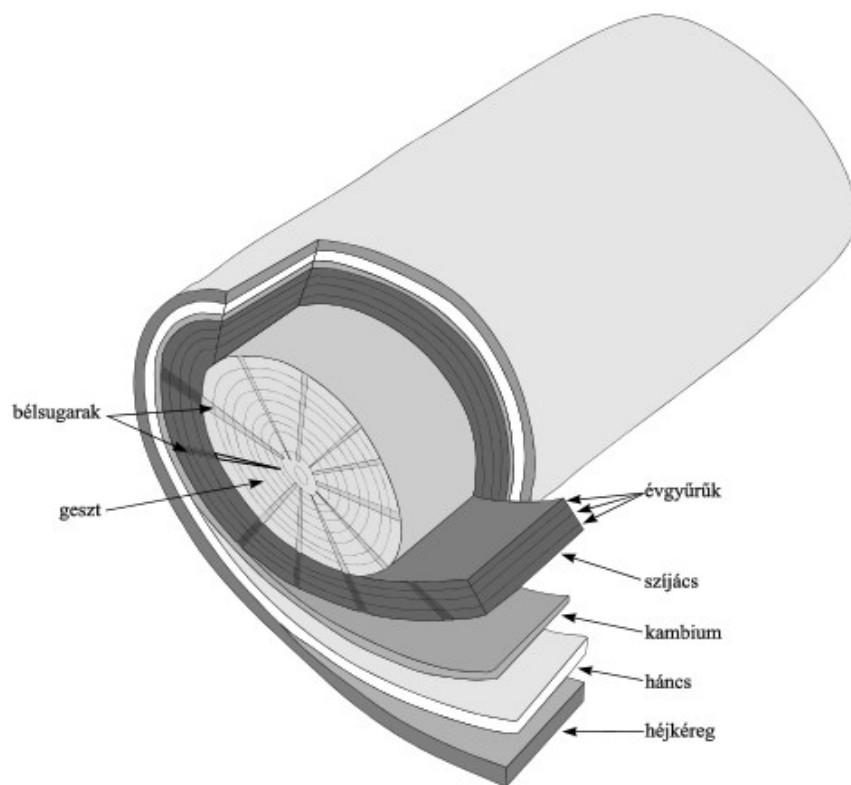
14. Ábra: A sejtfal és lumen térfogataránya néhány lombos fafaj esetén

A **faparenchimák** élnek a legtovább a fában, a hossz tengellyel párhuzamosan futnak. Gesztetesedésben, álgesztetesedésben (pl. tiliszképzés) és az élőfák különböző védekezési reakcióiban (pl. sebzési reakciók) van szerepük. Arányuk a fatestben általában 10% alatti.

A **bélsugarak** a faanyag hosszirányára merőleges, keresztirányú szövetei, csak parenchimasejtekből épülnek fel. Feladatuk a keresztirányú szállítás, raktározás. Megkülönböztethetünk *homogén bélsugarakat* (lombos fákban), melyek alak és méret szempontjából közel azonos sejtekből épülnek fel. A *heterogén bélsugarak* fekvő és álló sejtekből állnak. Műszaki szempontból jelentősen befolyásolják a faanyag repedékenységet, vetemedését, hajlíthatóságát.

4.6.4 A fatest makroszkópos szerkezet

A makroszkópos szerkezet a szabad szemmel látható részeket, szöveti elemeket jelenti.



15. Ábra: A fatest és a kéreg makroszkópos szerkezete

A faanyag szerkezetéből adódóan három fő anatómiai irányt különböztetünk meg:

- **keresztmetszet (bütümmetszet),**
- **sugármetszet,**
- **húrmetszet.**



16. Ábra: A fatörzs kereszt-, sugár-, húrirányú metszete

4.6.4.1 Az évgyűrűszerkezet

Az évgyűrűszerkezet a vaszkuláris kambium eredménye. A kambium téli időszakban nyugalmi állapotban van, azaz nem működik. A tavaszi időszakban kialakul egy nagy edényterületű, lazább szövetű, korai vagy tavaszi pászta, a nyári időszakban pedig egy tömöttebb, szilárdabb késői vagy nyári pászta. A pászták határozott elkülönülése azonban csak a gyűrűslikacsú lombosfáknál és a tűlevelűek egy részénél figyelhető meg.

A trópusi fafajoknál évgyűrűk nem alakulnak ki, mivel a kambium nem áll le teljesen.

A késői és a korai pászta közötti határvonal az évgyűrűhatár. A természetes faanyagok sűrűsége viszonylag szoros függvénykapcsolatban áll a szilárdsági, rugalmassági jellemzőkkel.

A sűrűség és az évgyűrűszerkezet kapcsolatainak elemzéséhez az évgyűrűszerkezet öt csoportját különböztetjük meg:

- a két pászta között fokozatos az átmenet (pl. luc-, simafenyő)
- a két pászta élesen elválik (pl. erdei-, vörösfenyő)
- pórusok (edények) gyűrűs elrendezésűek, a két pászta élesen elválik (pl. tölgy, akác, kőris)
- az évgyűrű nem választható pásztákra, a pórusok szórtak (pl. bükk, gyertyán, nyír, nyár)

- a pórusok félig gyűrűs elrendezésűek, a két pászta között fokozatos átmenet figyelhető meg (pl. madárcseresznye).

A fatest műszaki tulajdonságai szempontjából nagy jelentősége van a késői pászta arányának, amely néhány fenyőnél a következő értékű:

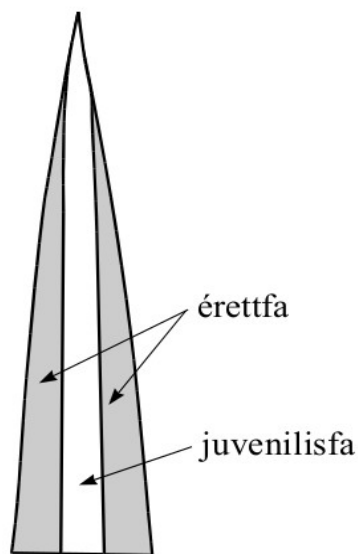
<i>Fafaj</i>	<i>Késői pászta aránya [%]</i>
simafenyő	10-15
luc-, jegenyefenyő	15-30
erdei-, feketefenyő	20-40
duglaszfenyő	25-45
vörösfenyő	30-45

De pl. az akác kiemelkedő szilárdsági tulajdonságai is a nagy, átlagosan 85%-os kései pászta aránnyal állnak összefüggésben.

4.6.4.2 A bél és a juvenilisfa

A legbelső évgyűrű által körülvett, az elsődleges szárból visszamaradt parenchimatikus alapszövet a **bél**. Fiatal korban szállító, később raktározó (keményítő, csersav, mészkristályok, stb.) szerepet lát el. A bél formája, nagysága jellemző az egyes fafajokra. Általában 1-2 mm átmérőjű, egyes fafajoknál elérheti a 10-15 mm-t is. Előfordul, hogy szabad szemmel nem is látható. Mérete folytán a bélnek közvetlen műszaki jelentősége nincs.

A geszt részének is szokták tekinteni a **juvenilisfát**, azonban attól eltérő tulajdonságokkal rendelkezik. A bél körüli első néhány évgyűrűt (5-20) jelenti. Fiatal korban a fák csak juvenilisfát tartalmaznak. Kortól függetlenül a fa csúcsának közelében, a törzs felső részén mindig képződik juvenilisfa:



17. Ábra: Az érettfa és a juvenilisfa elhelyezkedése

Jellemzője a sejtek, szövetek fokozatos méreti változása, később állandósulása. Szélesebb évgyűrűk az első években nagyobb arányú korai pásztával, ill. elmosódó pásztahatárokkal rendelkeznek. A faanyag sűrűsége és keménysége a juvenilisfában általában kisebb.

4.6.4.3 A geszt

A fatest belső holt része a **gestt**. A parenchimasejtek elhalásának két oka van, az egyik a kambiumtól, illetve a háncstól való növekvő távolság, a másik pedig az ún. időkontroll, azaz a sejtek programozott életkora. A gesztnek már nincs vízszállító funkciója, csak szilárdít. A szíjács gesztosodási folyamatában az alábbi változások jelennek meg:

- a víztartalom megváltozása,
- a parenchimasejtek sejtmagja degenerálódik,
- a nitrogéntartalmú anyagok mennyisége lecsökken,
- a keményítő mennyisége lecsökken,
- extrakt anyagok rakódnak le,
- a sejtfal gödörkéi aspirálódnak,
- néha tüliszemesedés történik.

A gesztelési folyamat során gesztelődő anyagok rakódnak le a sejtfalra, illetve a sejtüregben.

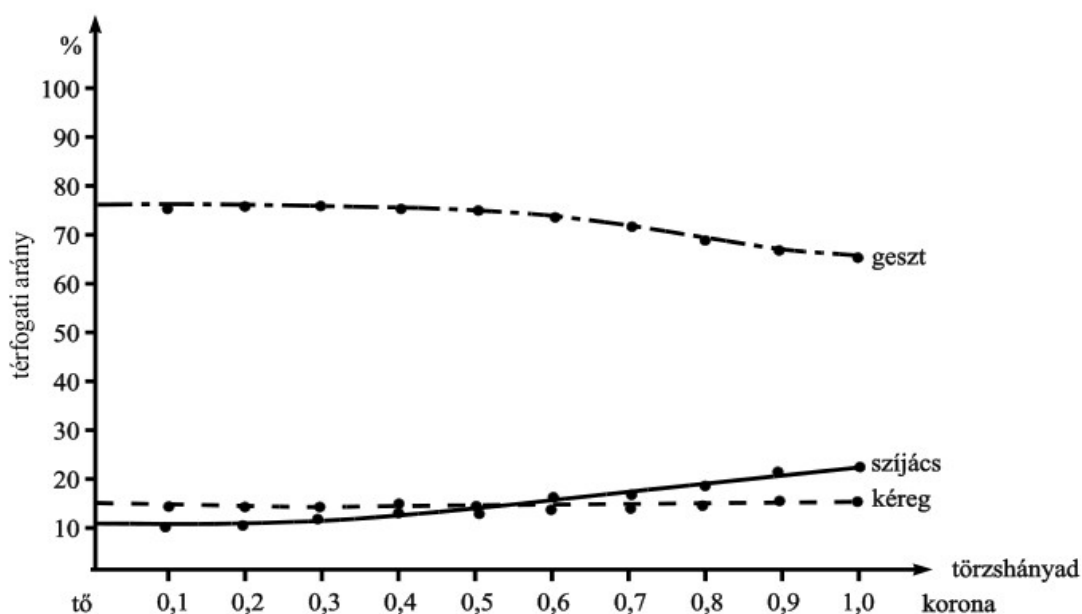
A geszt általában színben is eltérő, de egyes fajoknál megegyező színű a szíjáccsal. Így megkülönböztetünk színes gesztű és színes geszt nélküli fákat. Nincs színes gesztje pl. a luc-, jegenyefenyő, bükk, hár, éger, rezgőnyár, nyír, gyertyán, hegyi juhar stb. fafajainknak.

A szíjács és a színes geszt határa gyakran éles, jól elkülönülő (pl. akác, szil, tölgyek, vörösfenyők), más esetben pedig fokozatos az átmenet (pl. dió, fűz, feketenyár). A geszt határa minden esetben követi az évgyűrűk vonalát.

4.6.4.4 A szíjács

A szíjács vízszállító és szilárdító funkciót lát el. A károsítókkal szemben kevésbé ellenálló.

A szíjács aránya a fatestben változó:



18. Ábra: A geszt-, szíjács-, kéregarány változása

A különböző fafajok geszt-szíjács aránya jelentősen eltérhet.

4.6.4.5 A kéreg

A kéreg alatt általában a fatestet védő külső szövetrendszert értjük. Két fő részre bontható:

- hancs (floem), belső kéreg
- héjkéreg, külső kéregre (ritidóma).

A hánctest fontos szerepet tölt be a tápanyagok szállításával, raktározásával. Az elparásodott héjkéreg, melyet gyakran csak kéregként említünk, védi az élő fát a mechanikai sérülések, a vadrágás, a tűz és egyéb külső hatásokkal szemben. A kéreg vastagsága függ a fafajtól, a kortól és az ökológiai tényezőktől.

4.6.4.6 A háncs

A hánctest a vaszkuláris kambium működése révén alakul ki. Az évente létrejövő háncsrétegek 3-10-szer vékonyabbak az évgyűrűknél, és határozottan nem különülnek el. A kambium anyasejtek osztódásával létrejövő sejtek differenciálódásával fejlődnek ki a különböző háncssejtek. Egységes jellemzőjük, hogy nem lignifikálódnak.

A háncs általában a teljes kéreg térfogatának a felét sem éri el. Egyes fafajoknál (pl. bükk, dió, jegenyefenyő) azonban széles (4-15 mm), míg másoknál (pl. akác, erdei-, vörösfenyő) csak 2-4 mm szélességű.

5 A faanyag tulajdonságai

5.1 A nedvességtartalom

A fa, mint élő anyag, működése során vízre van szüksége. A kitermelt fa jelentős mennyiségű vizet tartalmaz. A nedvességtartalom összefüggései:

$$u_{bruttó} = \frac{m_n - m_0}{m_n} \cdot 100 \quad \%$$

$$u_{nettó} = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \%$$

m_n – nedves tömeg

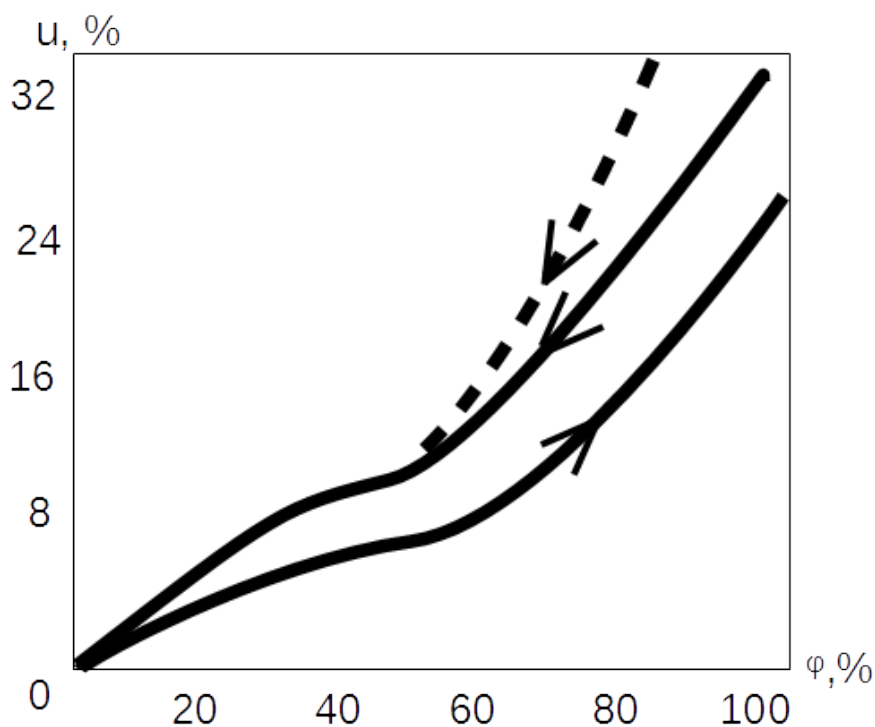
m_0 – száraz tömeg

A víz a fában kétféle formában van jelen, kötött víz (sejtfalban) és szabad víz (interfibrilláris üregekben, makroszkópos pórusokban) formában.

A nedvességtartalomnak több jellemző szintjét tudjuk elkülöníteni a fatestben:

<i>Megnevezés</i>	<i>Nedvességtartalom u, %</i>
Abszolút száraz	0
Túlszáritott	6
Szobaszáraz	8
Légszáraz (labor)	12
Légszáraz (üzemi)	18
Félszáraz	25
Rosttelítettség	~30
Félnedves	50
Élő nedves	~89
Abszolút nedves	~138

A faanyagra jellemző tulajdonság az ún. szorpciós histerézis, amikor az egyensúlyi fanedvesség száradáskor nagyobb, mint nedvesedéskor. Ezt egy R/D hányadossal is szokás jellemezni, aminek az átlagos értéke akár **0,8** is lehet. A jelenség oka a száradáskor és nedvesedéskor fellépő eltérő nagyságú és irányú belső feszültségek.



19. Ábra: A szorpciós histerézis duglászfenyő esetén ($t=40^{\circ}\text{C}$)

5.2 Dagadás-zsugorodás

A szorpciós jelenséggel összefüggő tulajdonsága a faanyagnak a zsugorodása, dagadása. A vízfelvétel hatására a fában dagadási nyomás lép fel (a rosttelítettségi határig), az anyag mérete megváltozik. Ez a sűrűségtől és nedvességtartalomtól függ.

Vonalas dagadási értékek számítása:

$$d_{hsr} = \frac{l_u - l_0}{l_u} * 100 \quad \%$$

Vonalas zsugorodási értékek számítása:

$$Z_{hsr} = \frac{l_u - l_0}{l_0} * 100 \quad \%$$

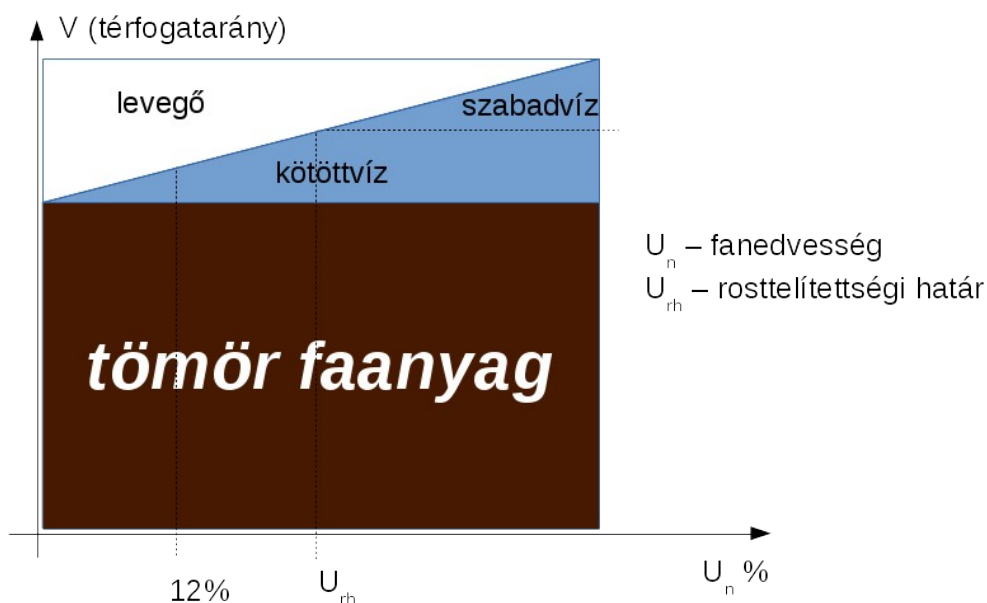
Néhány fafaj zsugorodási értékei:

<i>Fafaj</i>	<i>Zsugorodás, %</i>			
	<i>rost</i>	<i>sugár</i>	<i>húr</i>	<i>térfogati</i>
Erdeifenyő	0,4	4,0	7,7	12,1
Feketefenyő	0,3	3,1	4,6	8,0
Akác	0,4	3,9	5,8	10,1
Nyír	0,6	5,3	7,8	13,7
Bükk	0,3	5,8	11,8	17,9
Kocsányos tölgy	0,4	4,0	7,8	12,2

Ahogy látható, húr irányú méretváltozás a legnagyobb. A faanyag térfogatának változása tehát nem elhanyagolható. A korábban említett belső feszültségek okozzák az ún. vetemedést. A megfelelő (lassú) sebességű szárítással ezek a problémák elkerülhetők.

5.3 A sűrűség

A faanyag sűrűségét több tényező befolyásolja. Egyrészt fafajra jellemző, az eltérő felépítésből adódóan, valamint a víz és rostok közötti levegő mennyiségétől függ.



20. Ábra: A fa háromfázisú modell sémája

Az alábbi táblázat néhány fafaj jellemző sűrűségi adatait mutatja:

<i>Fafaj</i>	<i>Absz. száraz sűrűség [kg/m³]</i>	<i>Légszáraz sűrűség [kg/m³]</i>	<i>Bázissűrűség [kg/m³]</i>
Erdeifenyő	490	510	430
Lucfenyő	430	460	378
Duglászfenyő	470	500	414
Vörösfenyő	550	580	487
Bükk	680	710	558
Ktl. tölgy	650	680	570
Kőris	650	680	564
Akác	720	760	627

5.4 Elektromos tulajdonságok

5.4.1 Ellenállás, vezetőképesség

Az anyagok az elektromos árammal (egyenáram) szembeni viselkedését fajlagos ellenállással, fajlagos vezetőképességgel jellemezhetjük. Ez függ az anyag méretétől (keresztmetszet, hossz), de alapvetően minden anyagra jellemző értékű.

A faanyag esetében a fajlagos ellenállás függ a fafajtól, nedvességtartalomtól, hőmérséklettől, frekvenciától, sűrűségtől, egyéb kémiai védőanyagoktól, ill. az anizotrópia is befolyásolja. Az

egyik leglényegesebb ezek közül a nedvességtartalom. Ezt a tulajdonságot a fanedvességmérő műszerekben ki is használják. Összehasonlításként néhány példa:

<i>Fafaj</i>	<i>u, %</i>	<i>ρ (ohm cm)</i>		<i>ρ_s (ohm cm)</i>	
		<i>Rost. Párhuz.</i>	<i>Rost. Meről.</i>	<i>Rost. Párhuz.</i>	<i>Rost. Meről.</i>
Nyír	0,0	5,1*10 ¹⁶	-	-	-
	8,0	-	8,6*10 ¹¹	-	2,8*10 ¹²
	8,2	4,2*10 ¹⁰	-	4,0*10 ¹¹	-
	20,0	10*10 ⁸	-	-	-
Bükk	8,3	-	1,4*10 ¹⁰	-	7,9*10 ¹⁰
	9,2	1,7*10 ⁹	-	9,4*10 ¹⁰	-
Tölgy	7,9	-	1,3*10 ¹⁰	2,0*10 ¹⁰	5,5*10 ¹⁰
Juhar	0	3,3*10 ¹⁷	6,6*10 ¹⁷	-	-
Erdeifenyő	7,5	-	1,3*10 ¹¹	2,1*10 ¹¹	7,9*10 ¹¹
Lucfenyő	0	3,8*10 ¹⁶	7,6*10 ¹⁶	-	-
	7,8	-	6,4*10 ¹⁰	1,0*10 ¹¹	4,0*10 ¹¹
	16,0	1,0*10 ⁷	2,1*10 ⁷	-	-
Üveg: 5*10 ¹⁸ ohm cm					
Bakelit: 10 ¹² ohm cm					

5.4.2 Dielektromos tulajdonság

A dielektromos jellemzőnek váltóáram esetén van jelentősége. A **dielektromos állandó** megmutatja, hogy hányszorosra nő a kondenzátor kapacitása (a lemezek között) a vákuumhoz képest. A faanyag esetén az értékét befolyásolja a fafaj, nedvességtartalom, sűrűség, hőmérséklet, frekvencia. A fa és a víz dielektromos állandója között különbség megjelenik a mérési adatokban is:

<i>Fafaj</i>	<i>Dielektromos állandó, ε</i>		
	<i>u=0% nedvesség</i>	<i>u=30% nedvesség</i>	<i>u=80% nedvesség</i>
Vörösfenyő	1,9	7,5	20,0
Lucfenyő	1,7	3,5	7,0
Nyár	1,9	4,1	9,0
Rezgőnyár	1,7	4,1	10,2
Levegő: 1,0 Víz: 80,6 Üveg: 3,5 – 9,0			

5.4.3 Piezoelektromos hatás

A kristályos anyagok jellemzője az ún. **piezoelektromosság**, mely a fa esetében a cellulóz jelenléte következtében van jelen. A piezoelektromos modulusz (d) megadja, hogy a mechanikai erők hatására mekkora az indukált elektromos töltés.

$$d = \frac{dQ}{dF} \quad [\text{C/N}]$$

A faanyag esetén a piezoelektromosság függ az erő rostiránnyal bezárt szögével. A legnagyobb értéket 45°-os szög esetén tapasztalták. A másik fontos paramétere a jelenségnek a nedvességtartalom. A fa piezoelektromos modulusz értékei (d) a kvarckristályok értékének felét éri el:

Fafaj	Nedvességtartalom (u), %	Piezoelekt. modulusz (d), C/N
Lucfenyő	16,3	0,026-0,057
	39,7	0,8-1,35
Bükk	14,2	0,037-0,058
	30,6	1,1-2,3

A jelenségnek gyakorlati hasznosítása nem jellemző még.

5.4.4 Elektromos szilárdság

A faanyag elektromos (átütési) szilárdsága alapján nem tekinthető jó szigetelőanyagnak. Szárazon és nedvesen is elmaradnak az üvegtől, műanyagtól.

$$E = \frac{U_k}{h} \quad \text{kV/mm}$$

U_k : Átütési feszültség [kV]

h : vastagság [mm]

Az elektromos szilárdság fafajfüggő és a három anatómiai irányban más értéket mutat:

Fafaj		Elektromos szilárdság (E), kV/mm		
		sugár	húr	rost
Lucfenyő	u=0%	6,0	7,2	1,4
	u=33%	1,4	1,3	0,9
Erdeifenyő	u=0%	5,9	7,2	1,45
	u=33%	1,4	1,5	0,76
Nyír	u=0%	9,1	7,6	1,3

u=33%	1,4	1,2	0,5
Bükk u=9%	4,2	5,2	1,4
Tölgy u=9%	3,9	4,7	1,3
Egyéb anyagok:			
transzformátorolaj:	100		
üveg:	30-40		
bakelit:	20		
porcelán:	10		

5.5 Mágnesezhetőség

A fa mágnesezhetőség szempontjából nem jelentős. A kis mágnesezhetőség és a jó dielektromos jellemzői miatt antennatornyok kialakítására alkalmas.

5.6 Hőtechnikai, égési tulajdonságok

5.6.1 Hőtágulás

A vonalas *hőtágulási együttható* (α):

$$\alpha = \left(\frac{1}{l_0}\right) * \left(\frac{dl}{dt}\right) ; 1/K$$

l_0 : kezdeti hőmérsékletéhez tartozó hossz méret, m

dl : hőhatására bekövetkezett méretváltozás, m

dt : hőmérséklet-változás, K

A hőtágulási együttható értéke nedvességtartalomtól, fafajtól függ, de a fa sűrűségétől kevésbé:

Fafaj	Sűrűség (u=12%) kg/m ³	Hőtágulási együttható (α), 10 ⁻⁶ * α		
		húr	sugár	rost
Nyír	660	39,4	32,3	3,57
Nyár	430	33,9	23,3	3,17
Tölgy	690	41,0	29,3	3,60
Bükk	720	34,8	22,0	5,40
Lucfenyő	420	34,6	23,9	3,50
Erdeifenyő	520	29,0	15,0	4,20
Duglászfenyő	510	45,0	27,1	3,52

Hosszirányban a faanyag hőtágulása nem jelentős, ami az épületszerkezetek esetén előnyös.

Összehasonlításként néhány anyag hőtágulási értéke:

acél:	$1,2 \cdot 10^{-5}$
üveg:	$0,81 \cdot 10^{-5}$
bakelit:	$3,6 \cdot 10^{-5}$

5.6.2 Fajhő

A **fajhő** (C) az egységnyi tömegű anyag 1 fokkal történő felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség:

$$C = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \left(\frac{dQ}{dT}\right) \text{ , kJ/kg} \cdot \text{K}$$

m: anyag tömege

dQ: hőmennyiség

dT: hőmérséklet-változás

Átlagosan elmondható, hogy a $t=0^\circ\text{C}$ hőmérsékleten, $u=0\%$ nedvességtartalom mellett a faanyagok fajhője: $C=1,117\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. A vízhez képest nagyjából a negyede ($C_{\text{víz}}=4,1832$).

A hőmérsékleti tényezőt figyelembe véve:

$$C_t = 1,117 + 0,00487 \cdot t$$

A hőmérsékletet és nedvességtartalmat is figyelembe véve:

$$C_{(t,u)} = \frac{111,7 + 0,487 \cdot t + 4,1832 \cdot u}{100 + u}$$

5.6.3 Hővezetés

A hőáramlásnak (az anyagban való hőterjedésének) két jellemzője van:

- hővezetési tényező (λ)
- hődiffúziós tényező (a)

A **hővezetési tényező** az egységnyi idő (T) alatt, egy m^2 keresztmetszeten (A), egy méter távolságra (x) 1K hőmérséklet-különbség (t) mellett átáramló hőmennyiséget jelenti:

$$\lambda = \frac{Q \cdot dx}{A \cdot T \cdot dt} \text{ , W/mK}$$

Az érték függ a faanyagtól, sűrűségétől, nedvességtartalmától, rostiránytól és a hőmérséklettől.

Néhány jellemző hővezetési tényező érték:

Fafaj		Hővezetési tényező, W/mK
Tölgy	rosttal párhuzamos rostra merőleges	0,29 0,16 - 0,18
Kőris	rosttal párhuzamos rostra merőleges	0,31 0,16 – 0,18
Balza	rosttal párhuzamos rostra merőleges	0,04 0,048 – 0,077
Lucfenyő	rosttal párhuzamos rostra merőleges	0,22 0,10 – 0,11
Egyéb faanyag:		
	forgácslap	0,12 – 0,14
	kemény farostlemez	0,17
	alacsony sűrűségű farostlemez	0,048
	rétegeltlemez	0,14
Egyéb anyagok:		
	levegő	0,026
	víz	0,60
	beton	0,8 – 2,0
	réz	386
	acél	210
	polisztirol	0,035 – 0,05

A kisebb érték jobb hőszigetelést jelent.

A **hődiffúziós tényező** (a) a hővezetés sebességét jellemzi:

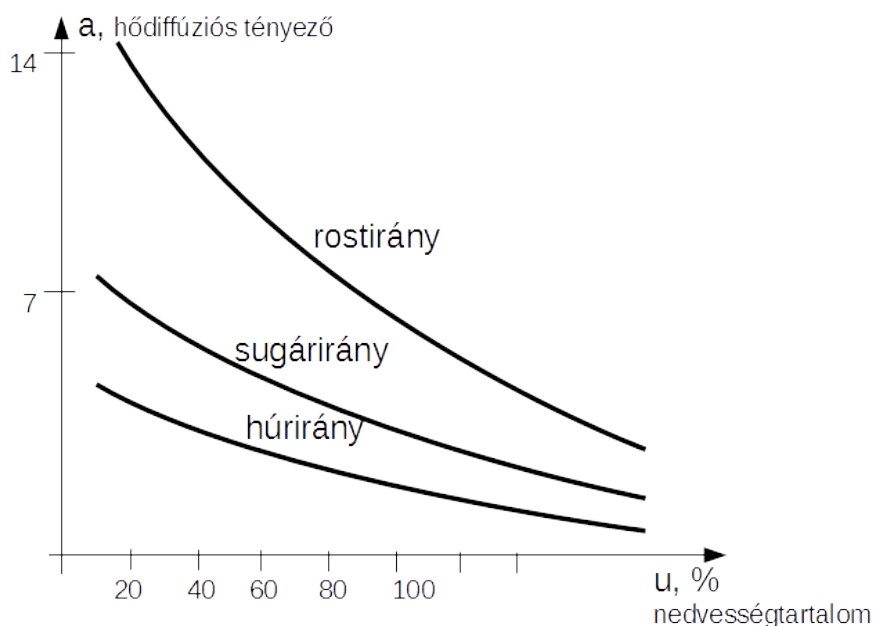
$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho_b}, \text{ m}^2/\text{h}$$

λ : hővezetési tényező

C : fajhő

ρ_b : bázissűrűség

Az értéke függ a nedvességtartalomtól, rostiránytól, sűrűségtől:



21. Ábra: A hődiffúziós tényező alakulása a nedvesség függvényében

5.6.4 Égési jellemzők

A fa égési tulajdonságai fontosak az energiakinyerés és a tűzvédelem szempontjából.

Az oxigén jelenlétének és az égés további feltételeinek megléte után az égésnek három szakasza különböztethető meg:

- felmelegedés, gyulladás
- égés
- utóizzás.

A fa felmelegedésekor (105°C után) gázok szabadulnak fel. 180-210°C között jelentős változás nem történik a faanyagban. 220-260°C-on a gázok lángra lobbannak (lobbanási pont). 260-290°C között a fa tartósan ég (égési pont). 350-470°C körül a gázok önmaguktól meggyulladnak (gyulladás pont).

Az égést befolyásolja a fa sűrűsége, nedvességtartalma és az alaki tényezők.

5.6.4.1 Égéshő, fűtőérték

Az egységnyi mennyiségű anyag elégetésekor keletkező hőmennyiséget nevezzük **égéshőnek**

(fűtőérték).

Néhány fontosabb fafaj fűtőértéke egységnyi tömegre és térfogatra vonatkoztatva:

<i>Fafaj</i>	<i>Fűtőérték, kJ/kg</i>	<i>Fűtőérték, kJ/m³</i>
Nyír	20070	14049
Akác	18617	13590
Cser	18133	13330
Gyertyán	16696	13190
Bükk	18419	12525
Juhar	20070	11841
Tölgy	17858	11608
Éger	17681	8841
Lucfenyő	19503	8386
Erdeifenyő	16745	8205
Nyár	16843	6400

5.7 Akusztikai jellemzők

5.7.1 Hangterjedés a fában

A hanghullámok terjedésére a következő összefüggés érvényes:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ m/s}$$

E: rostirányi rugalmassági modulusz

ρ: faanyag sűrűsége

A hang terjedési sebessége fában és más anyagokban:

<i>Fafaj</i>	<i>Sűrűség, kg/m³ u=12%</i>	<i>Rugalmassági modulusz, MPa</i>		<i>Hangsebesség, m/s</i>	
		<i>Rosttal párh.</i>	<i>Rostra mer.</i>	<i>Rosttal párh.</i>	<i>Rostra mer.</i>
Lucfenyő	470	11000	550	4790	1072
Erdeifenyő	520	12000	460	4760	932
Jegenyefenyő	460	11000	490	4890	1033
Hegyi juhar	630	9400	915	3826	1194
Bükk	730	16000	1500	4638	1420

Tölgy	690	13000	1000	4304	1193
Egyéb anyagok:					
Levegő (0°C)	332,8 m/s				
Víz	1435,0 m/s				
Parafa	430-530 m/s				
Acél	4981 m/s				
Beton	3700 m/s				
Tégla	2325 m/s				

5.7.2 Hangelnyelés, hangszigetelés

A faanyagban a hanghullámok a sejtfalba ütközve kétféle módon alakulnak át:

- rezgőmozgás révén hővé alakul
- és/vagy a sejtfallemezkék rezgésbe jönnek (rezonálnak).

A **hangelnyelés fokát** (α) a következő összefüggés adja:

$$\alpha = \frac{W_2}{W_1} * 100 \text{ , \%}$$

W_2 : hangforrás hangenergiája

W_1 : elnyelt energia

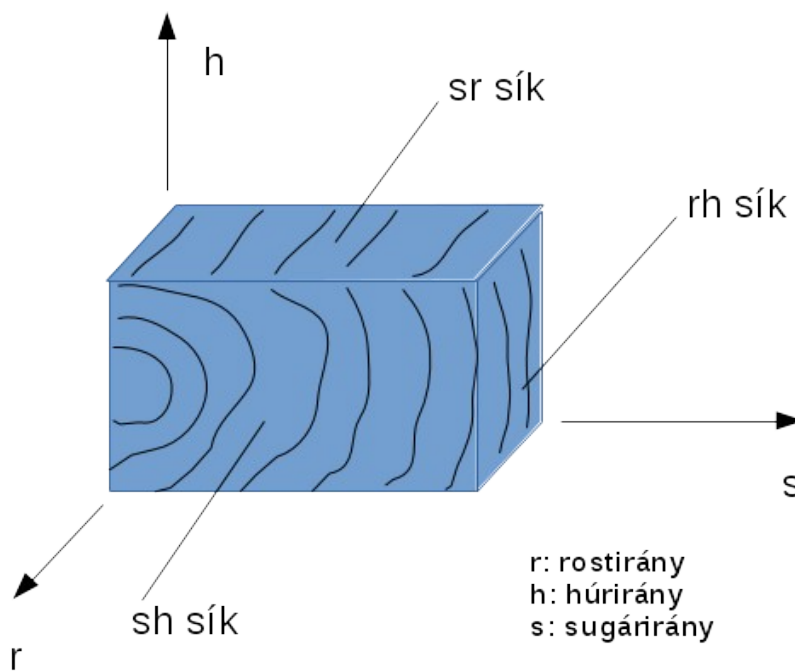
A faanyag hangelnyelése (500Hz) 3-20%, hangszigetelő képessége nem elegendő épületszerkezetekben.

A faanyag akusztikai tulajdonságait a hangszerkészítésben használják ki.

5.8 Mechanikai tulajdonságok

5.8.1 Rugalmasság

A faanyag anizotróp tulajdonságai miatt a rugalmasságát három fő anatómiai irányból származtatva célszerű megadni:



22. Ábra: A fa jellemző síkjai

Többféle rugalmassági modulusszal lehet jellemezni a faanyagot. Az egyik legismertebb a **Young-féle rugalmassági modulusz** (E), ami a rost-, sugár-, hűirányú feszültség (σ) értékét adja meg az egységnyi alakváltozásra vonatkoztatva:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ , MPa}$$

ahol a fajlagos alakváltozást (ϵ) az alábbi összefüggés mutatja:

$$\epsilon = \frac{dl}{l}$$

Néhány jellemző érték az alábbi táblázatban látható:

Rugalmassági jellemző	Lucfenyő	Korai nyár	Magas kőris	Tölgy
E_r [MPa]	13650	13938	15798	11778
E_s [MPa]	789	884	1875	2046
E_h [MPa]	289	349	1268	1028
Egyéb anyag:				
Üveg:	72000MPa			
Titán:	105000-120000MPa			
Vas, acél:	120000-210000MPa			

A rugalmassági moduluszt több tényező is befolyásolja. Ilyenek pl. a terhelésirány és rostirány

szöge, a nedvességtartalom, a hőmérséklet:

<i>Befolyásoló tényező</i>	<i>Rug. Modulusz (E), %</i>
Rost- és terhelésirány szöge	
0	100
2	97-98
6	85-90
10	60-80
Nedvességtartalom (%)	
0	100
5	95
10	85
20	75
30	70
>=30	70
Hőmérséklet, °C	
10	90
20	100
50	85
100	60

5.8.2 Szilárdság

A terhelés módja, ideje alapján többféle szilárdsági értékkel jellemezhető a faanyag. A jelentősebbek a húzó-, nyomó-, hajlítoszilárdság. Az általános összefüggés:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A}, \text{ N/mm}^2 \text{ v. MPa}$$

F_{max} : maximális terhelő erő,

A: próbatest keresztmetszete.

Néhány jellemző értéket az alábbi táblázat mutat:

<i>Fafaj, Termék</i>	<i>Szilárdsági értékek, MPa</i>				
	<i>Hajlítoszil. rostonal párh.</i>	<i>Húzószil.</i>		<i>Nyomószil.</i>	
		<i>rostonal párh.</i>	<i>rostra meről.</i>	<i>rostonal párh.</i>	<i>rostra meről.</i>
Forgácslap	15-25	8-10	0,35-0,40	8-16	-
Rétegeltlemez	50-130	37-80	20-60	20-50	10-35
Kemény farostlemez	40-60	20-24	0,8-1,0	20-40	-
Lucfenyő	78	90	2,7	43	5,8

Erdeifenyő	87	105	3,0	55	7,7
Nyárák	60	67	2,3	34	-
Tölgy	94	90	4,0	60	11
Kőris	120	165	7,0	52	11

5.8.3 Hasítószilárdság

A faanyag egyik jellemző szilárdsága a **hasítószilárdság**, ami az ék alakú szerszám ellen kifejtett ellenállását mutatja (pl. tűzifa). A nagy bélsugarak pozitívan hatnak a bélsugarakra. Néhány jellemző érték:

Hasítószilárdság, MPa u=12% nedvességtartalom		
Fafaj	Húrirány	Sugárirány
Lucfenyő	0,26	0,20
Feketeftenyő	0,46	0,45
Erdeifenyő	0,46	0,24
Simafenyő	0,77	0,45
Akác	1,12	0,62
Juhar	1,60	1,00
Kőris	1,60	0,69
Szil	0,74	0,60
Gyertyán	1,50	0,62
Bükk	0,45	0,35
Tölgy	0,45	0,43
Óriásnyár	0,53	0,39

A nedvességtartalom növekedésével nő a hasítószilárdság az u=12% nedvességtartalomig, ezután folyamatosan csökken. Azaz a frissen kitermelt, nedves fa könnyebben hasítható. A hasíthatóságot befolyásolják a fahibák.

5.8.4 Keménység

A fa keménységén azt az ellenállást értjük, amelyet a keményebb tárgy nyomásával szemben kifejt. Több keménységvizsgálati módszer létezik, egyik ilyen az ún. **Brinell-Mörath-féle keménység**.

Az eljárásnál használt összefüggés:

$$H_B = \frac{F}{D * \pi * h} , \text{ N/mm}^2$$

F: terhelőerő

D: benyomódó acélgolyó átmérője

h: benyomódás mélysége

Az alábbi táblázat tartalmaz néhány fafajra jellemző értéket:

Csoport, Fafaj	Keménység, N/mm²	
	Bütüfelület	Oldalfelület
Igen puha fák:	10-40	5-20
Hárs	38	16
Fűz	35	16
Óriásnyár	36	12
Puhafák:	20-60	10-30
Lucfenyő	32	12
Erdeifenyő	40	19
Vörösfenyő	53	19
Középkemény fák:	40-65	20-40
Szelídgesztenye	38	18
Tölgy(ek)	66	34
Bükk	72	34
Kőris	65	-
Hegyi juhar	62	27
Keményfák:	60-100	30-60
Akác	74	48
Gyertyán	71	36
Igen kemény fák:	100-130	50-80
Bukszús	114	59
Csontkeményfák:	120-200	70-140
Pockfa	161	86

Ahogy az értékekből látható, a bütüfelületen nagyobb keménységi érték mérhető, mint az oldalfelületeken.

6 Felhasznált szakirodalom

Molnár Sándor:	Faanyagismeret, Szaktudás Kiadó (2004)
Molnár Sándor, Peszlen Ilona, Paukó Andrea:	Faanatómia, Szaktudás Kiadó (2006)
Dr. Molnár Sándor:	Faipari kézikönyv I. (2000.)

Ábrajegyzék

1. Ábra: A növényi sejt.....	7
2. Ábra: A kambium elhelyezkedése.....	9
3. Ábra: A réteges sejtfa.....	10
4. Ábra: A sejtfa cellulóz váza.....	11
5. Ábra: A húzórugalmassági modulusz és a mikrofibrilla szöge.....	12
6. Ábra: Gödörkék típusai.....	14
7. Ábra: A fa elemi összetétele.....	14
8. Ábra: A fatestben megtalálható sejtípusok.....	17
9. Ábra: A fenyők sejt felépítése.....	18
10. Ábra: A fenyők sejtípusai.....	18
11. Ábra: A lombosok sejt felépítése.....	19
12. Ábra: A lombosok sejtípusai.....	19
13. Ábra: Az egyes fafajok fatestének sűrűsége és edényterület aránya közötti összefüggés.....	20
14. Ábra: A sejtfa és lumen térfogataránya néhány lombos fafaj esetén.....	22
15. Ábra: A fatest és a kéreg makroszkópos szerkezete.....	23
16. Ábra: A fatörzs kereszt-, sugár-, húrirányú metszete.....	24
17. Ábra: Az érettfá és a juvenilisfa elhelyezkedése.....	26
18. Ábra: A geszt-, szijács-, kéregarány változása.....	27
19. Ábra: A szorpciós hiszterézis duglászfenyő esetén ($t=40^{\circ}\text{C}$).....	30
20. Ábra: A fa háromfázisú modell sémája.....	32
21. Ábra: A hődiffúziós tényező alakulása a nedvesség függvényében.....	38
22. Ábra: A fa jellemző síkjai.....	41