

SACHARIDY

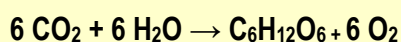
Sacharidy jsou sloučeniny uhlíku (C) s vodíkem (H) a kyslíkem (O), které mají v živých organismech nezastupitelnou strukturální a metabolickou funkci.

Funkce sacharidů v buňce:

- Pohotový zdroj energie (především glukóza). Energetická hodnota (fyziologické spalné teplo) 1 gramu sacharidů je 17.2 kJ (4.1 kcal).
- Zásobní forma energie (škrob v rostlinných hlízách a semenech, glykogen ve svalovině živočichů).
- Zpevnění a ochrana buňky (celulóza v rostlinách, chitin v houbách a vnější kostře bezobratlých).
- Složky řady biologicky důležitých látek.

Sacharidy tvoří cca 85-90% stavby těla rostlin, které je syntetizují z oxidu uhličitého a vody za pomoci sluneční energie (fotosyntézy).

Syntéza glukózy ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) z oxidu uhličitého (CO_2) a vody (H_2O) prostřednictvím fotosyntézy:




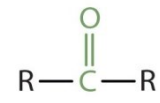
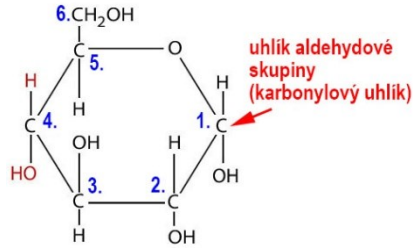
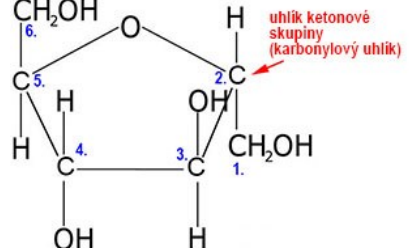
Odpadním produktem je kyslík (O_2).

Živočichové a houby nejsou schopni sacharidy sami syntetizovat. Živočichové přijímají sacharidy z rostlinné potravy nebo je získávají v procesu zvaném **glukoneogeneze** syntézou z aminokyselin, pyruvátu, laktátu či z glycerolu (rozkladem lipidů). Houby získávají sacharidy enzymatickým trávením z živých nebo mrtvých organismů, nebo symbiózou s řasami (za vzniku lišejníků) a rostlinami (tzv. mykorrhiza na rostlinných kořenech).

Dělení sacharidů

- Monosacharidy („jednoduché sacharidy“)** sestávají z jedné sacharidové molekuly. Jsou to bezbarvé, ve vodě dobře rozpustné a v pevném stavu krystalické látky.

Dělí se do pěti hlavních podskupin **podle počtu uhlíkových atomů** (3-triózy, 4-tetrózy, 5-pentózy, 6-hexózy, 7-heptózy). Monosacharidy s více uhlíky (8-októzy, 9-nonózy) jsou nestabilní a vyskytují se vzácně. Tyto podskupiny monosacharidů můžeme dále rozdělit do dvou hlavních kategorií (**aldózy** a **ketózy**) na základě přítomnosti **karbonylové skupiny (C=O)** a z ní odvozených karbonylových sloučenin: **aldehydů** a **ketonů**. Na základě kombinace těchto charakteristik můžeme např. glukózu zařadit mezi *aldohexózy* a ribózu mezi *aldopentózy*.

Klasifikace podle počtu uhlíkových atomů		Monosacharidy-aldózy: aldehydová skupina (R-CHO)		Monosacharidy-ketózy: ketonová skupina (R-CO-R)	
Triózy	C ₃ H ₆ O ₃	glyceraldehyd		dihydroxyaceton	
Tetrózy	C ₄ H ₈ O ₄	erythróza		erythrulóza	
Pentózy	C ₅ H ₁₀ O ₅	arabínóza, ribóza, xylóza		ribulóza, xylulóza	
Hexózy	C ₆ H ₁₂ O ₆	glukóza, galaktóza, mannóza		fruktóza	
Heptózy	C ₇ H ₁₄ O ₇	glyceromannoheptóza		sedoheptulóza, mannoheptulóza	
		 <p>Cyklická molekula glukózy (aldohexóza, pyranový kruh)</p>		 <p>Cyklická molekula fruktózy (ketohehexóza, furanový kruh)</p>	

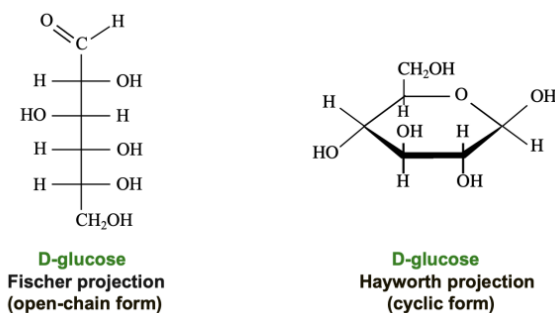
Molekula většiny důležitých sacharidů má v přírodě **cyklickou strukturu**, která vzniká reakcí hydroxylové skupiny -OH s aldehydovou či ketonovou skupinou na karbonylovém uhlíku. Ke znázornění této cyklické struktury se většinou používá tzv. **Haworthova projekce**, kdy se pohled na kruh zobrazuje ze strany v trojrozměrné perspektivě.

Cyklické molekuly sacharidů existují ve dvou variantách:

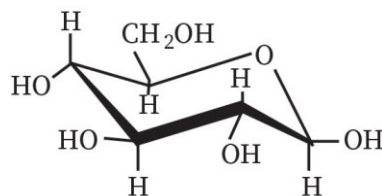
- pyranový kruh**, který definuje **pyranózy** (šestičlenné cyklické molekuly s pěti atomy uhlíku a jedním atomem kyslíku)
- furanový kruh**, který definuje **furanózy** (pětičlenné cyklické molekuly se čtyřmi atomy uhlíku a jedním atomem kyslíku).

Cyklická struktura se vyskytuje jen u monosacharidů s dostatečným počtem uhlíků: Pyranový kruh najdeme u aldóz s 5 a více uhlíky, a u ketóz s 6 a více uhlíky. Furanový kruh mohou tvořit jen aldózy se 4 a více uhlíky (např. erythróza, arabínóza, ribóza, xylóza), a ketózy s 5 a více uhlíky (fruktóza).

Cyklické monosacharidy mají i svoji **necyklickou** (otevřenou, lineárně řetězovou) variantu, která však tvoří jen malé procento všech monosacharidových molekul. Necyklické molekuly se zobrazují za pomoci tzv. **Fischerovy projekce**.



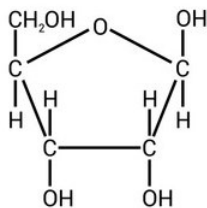
Pyranový kruh molekuly sacharidů však ve skutečnosti neleží v rovině a jeho tvar nejlépe vystihuje tzv. **židličková konformace**.



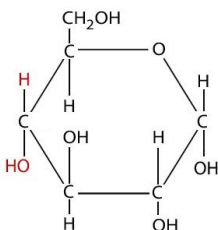
Židličková konformace molekuly glukózy.

Hlavní monosacharidy:

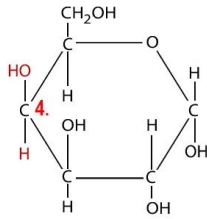
- **Ribóza** (C₅H₁₀O₅) je velmi důležitá pentóza. Je základní složkou nukleotidů, z nichž jsou složeny např. nukleové kyseliny (DNA, RNA), adenosintrifosfát (ATP) a určité koenzymy účastné při vnitrobuněčných energetických reakcích (NAD, NADP, aj.).



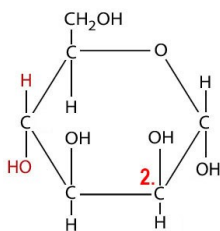
- **Glukóza** (C₆H₁₂O₆), známá také jako „krevní cukr“, je v přírodě nejhojněji se vyskytující monosacharid. Je to také hlavní metabolický zdroj energie v těle živočichů. Všechny ostatní sacharidy přijímané v potravě jsou využitelné jako energetický zdroj jen díky tomu, že se metabolizují na glukózu v játrech. Glukóza je hojně obsažena v medu a ovoci, nicméně častěji se vyskytuje ve formě polymerů (více sloučených molekul disacharidů a polysacharidů).



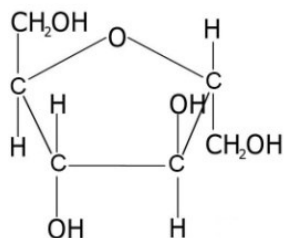
- **Galaktóza** ($C_6H_{12}O_6$) je monosacharid, který spolu s glukózou tvoří disacharid laktózu („mléčný cukr“). Je to tzv. epimer glukózy, od níž se liší jen jinou konfigurací hydroxylové skupiny $-OH$ na 4. uhlíku. V játrech se snadno metabolizuje na glukózu. Je složkou glykolipidů a glykoproteinů.



- **Mannóza** ($C_6H_{12}O_6$) je podobně jako galaktóza epimer glukózy (liší se jinou konfigurací hydroxylové skupiny $-OH$ na 2. uhlíku). Má velký metabolický význam v lidském těle, protože je složkou glykoproteinů. Může být syntetizována ze zkonsumované glukózy, polysacharidů a glykoproteinů.



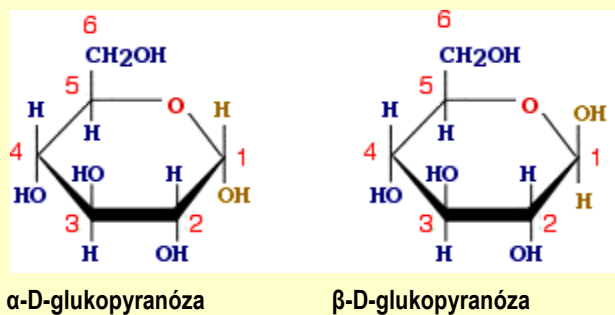
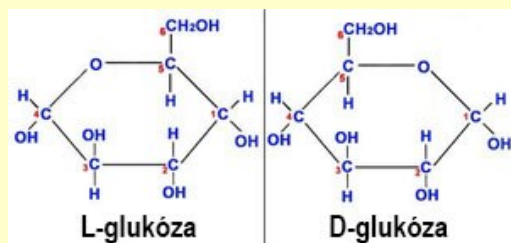
- **Fruktóza** ($C_6H_{12}O_6$) je vedle glukózy druhý nejvýznamnější monosacharid, který je konzumován živočichy jako zdroj energie. V játrech je metabolizován na glukózu. Spolu s glukózou je charakteristickou součástí sacharidů v medu a ovoci. Má stejný chemický vzorec jako glukóza, ale jiné prostorové uspořádání molekuly. Z běžných přírodních sacharidů je považována za zdaleka nejsladší.



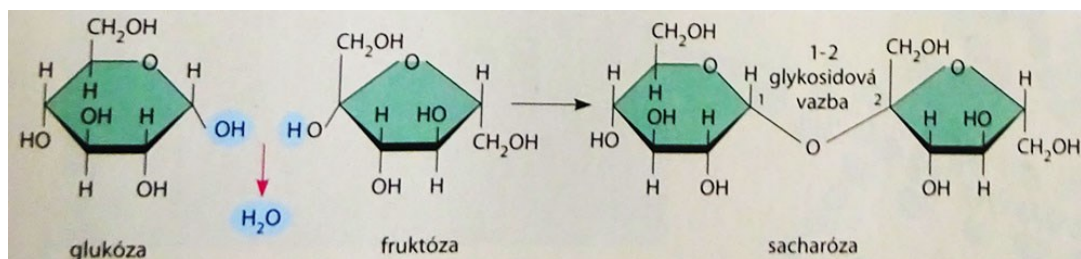
Monosacharidy se vyskytují v různých **izomerech** (různém strukturálním uspořádání molekuly), jejichž vzájemný poměr závisí na jejich skupenství a faktorech prostředí. Rozeznáváme tak:

- **D- a L- izomery neboli enantiomery** (zrcadlově převrácené formy molekuly). Lze je odlišit podle toho, jakým směrem se stáčí polarizované (lineárně usměrněné) světlo procházející roztokem s danou molekulou. D-izomery stáčí toto světlo doprava (po směru hodinových ručiček), zatímco L-izomery doleva. Přírodní monosacharidy se typicky vyskytují v D-formě (D-glukóza, D-galaktóza, D-fruktóza aj.).
- **epimery** (izomery s odlišnou konfigurací hydroxylových -OH skupin)
- **α - (alfa) a β - (beta) anomery** (speciální kategorie epimerů, které se liší konfigurací hydroxylových -OH skupin na karbonylovém neboli anomerním uhlíku)

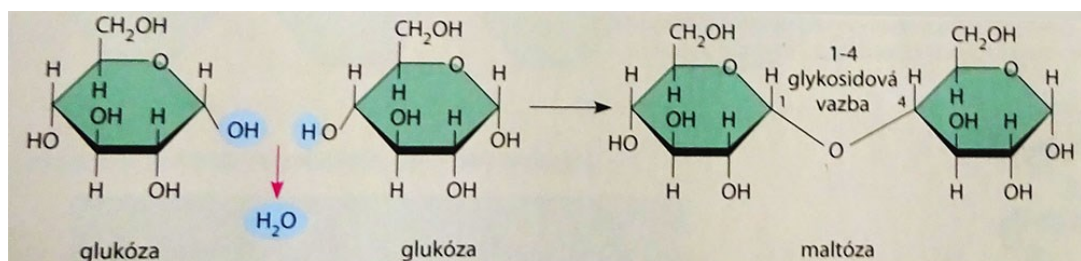
Běžnou přírodní formou glukózy je tzv. **D-glukóza (dextróza)** a její dvě strukturální varianty α -D-glukopyranóza a β -D-glukopyranóza, které se vyznačují jinou konfigurací -OH skupiny na 1. uhlíku.



2. **Disacharidy** jsou sloučeniny dvou molekul monosacharidů spojených **O-glykosidovou vazbou**. Tato vazba vzniká mezi hydroxylovou skupinou (-OH) na karbonylovém uhlíku jednoho monosacharidu a hydroxylovou skupinou (OH) druhého monosacharidu za odštěpení vody (H₂O). Vyskytuje se i u oligosacharidů a polysacharidů.



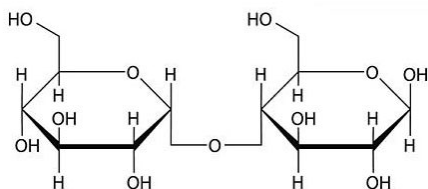
Syntéza sacharózy z glukózy a fruktózy



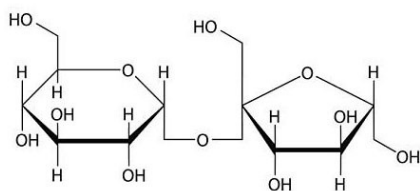
Syntéza maltózy ze dvou molekul glukózy

Hlavní disacharidy:

- **Maltóza (sladový cukr) (C₁₂H₂₂O₁₁)** je složena ze dvou molekul glukózy. Uvolňuje se ze škrobu v naklíčeném obilí (sladu) při výrobě piva a vzniká též při trávení škrobu ve střevě. β-anomerem maltózy je **celobióza**, která je stavební složkou polysacharidu celulózy.

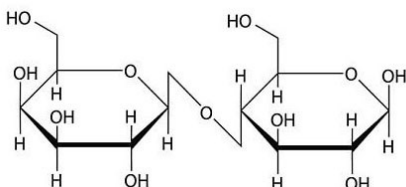


- **Sacharóza (sukróza) neboli řepný cukr (C₁₂H₂₂O₁₁)** je složena z molekuly glukózy a fruktózy. V rostlinách slouží jako transportní forma sacharidů. Má výraznou sladkou chuť. Průmyslově se vyrábí z cukrové třtiny nebo cukrové řepy. Vyskytuje se však i v ovoci (např. v pomerančích a ananasu je její obsah vyšší než obsah glukózy a fruktózy). Hydrolýzou sacharózy se vyrábí tzv. **invertní cukr**, směs glukózy a fruktózy, která je sladší než sacharóza a používá se jako sladidlo.



Derivátem sacharózy je **sukralóza**, která je mnohem sladší a používá se jako sladidlo.

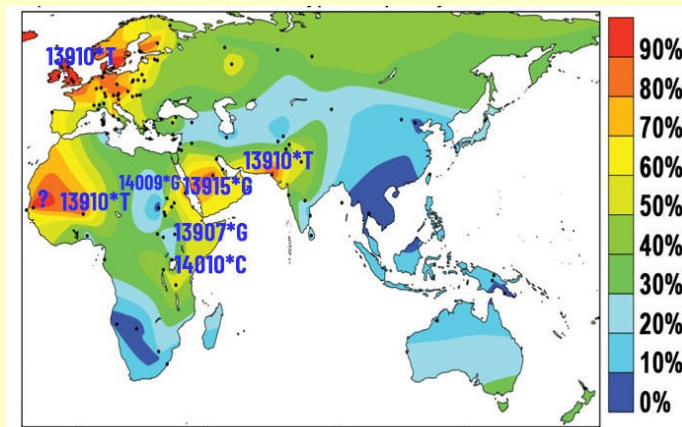
- **Trehalóza** je složena ze dvou molekul glukózy. Je obsažena v baktériích, rostlinách, houbách a hmyzu (jemuž slouží jako pohotový zásobní sacharid). Od maltózy se liší jinou formou glykosidové vazby mezi molekulami glukózy (mezi 1. a 1. uhlíkem, tj. 1-1). Lidský organismus je schopen ji štěpit pomocí enzymu *trehalázy*.
- **Laktóza** neboli **mléčný cukr** ($C_{12}H_{22}O_{11}$) je složena z molekuly glukózy a galaktózy. Je to sacharid obsažený v mléce (6.9% v mateřském, 4.8% v kravském, 4.5% v kozím). K rozkladu laktózy na glukózu a galaktózu je nutný enzym *laktáza*. Schopnost produkovat laktázu u savců s věkem rychle klesá a nestrávená laktóza v tlustém střevě vyvolává zažívací potíže v podobě průjmů a plynatosti.



Laktózová tolerance

Některé lidské populace (v Evropě, Arábii, Indii a africkém Sahelu) se vyznačují schopností **laktózové tolerance** (laktázové persistence) a jsou schopny produkovat laktázu dlouho do dospělosti. **Tato schopnost byla předmětem mimořádně silné a rychlé selekce, protože umožnila přístup k mléku jako k pohotovému zdroji živin, bez nutnosti zdlouhavé fermentace (která snižuje obsah laktózy v tvarohu, sýrech a jogurtu). Objevila se tudíž v různých regionech zcela nezávisle a je podmíněna různými alelami (formami genů).**

V Evropě je laktózová tolerance predikována alelou 13910*T na 2. chromozomu. Ve vzorku 885 Čechů (=1770 chromozomů) byla 13910*T detekována na 844 chromozomech (výskyt 47.7%). Mezi Čechy je přibližně 22.9% homozygotů (jedinců, kteří mají tuto alelu na obou chromozomech a jsou tudíž prakticky celoživotně schopni produkovat laktázu) a 49.5% heterozygotů (jedinců, kteří mají tuto alelu jen na jednom chromozomu a jejich schopnost laktózové tolerance může klesat s věkem). Cca 72.4% Čechů se tedy teoreticky vyznačuje větší či menší schopností trávit laktózu a 27.6% Čechů tuto schopnost postrádá. Nejvyšší výskyt laktózové tolerance najdeme v Irsku, na Islandu a ve Švédsku, kde více než 60% populace tvoří homozygoti a celkový podíl homozygotů a heterozygotů se blíží 100%.



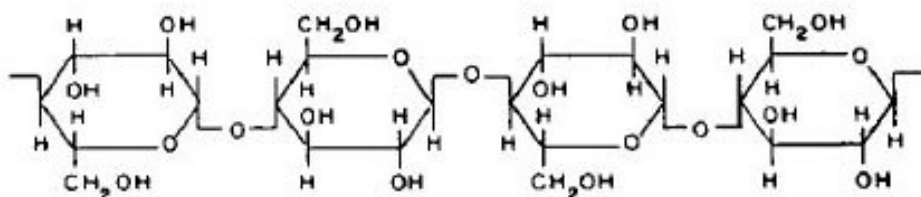
Procentuální výskyt fenotypové laktázové tolerance a hlavní zeměpisné rozšíření alel, které jsou s laktázovou tolerancí spojovány.

3. **Oligosacharidy** jsou sloučeniny 3-10 molekul monosacharidů. Definice tohoto pojmu však není zcela ustálena a někdy jsou mezi oligosacharidy řazeny i disacharidy.
- **Maltodextriny** se vyrábějí hydrolýzou z rostlinných škrobů. Obsahují typicky 3-17 molekul glukózy. Používají se jako přídavná látka v potravinách a nezřídka i jako součást sportovních nápojů, protože mají mimořádně vysoký glykemický index a rychle se tudíž v těle metabolizují. Tato charakteristika však vyvolává prudké vzestupy hladin glukózy i inzulínu, a zvyšuje tudíž riziko kardiometabolických chorob.
 - **Galaktooligosacharidy** jsou složené z krátkých řetězců galaktózy. Jsou obsaženy např. v lidském mléce, kde slouží jako stimulátor střevní mikroflóry kojeného dítěte. Nejznámějším rostlinným galaktooligosacharidem je **raffinóza**, trisacharid složený z glukózy, fruktózy a galaktózy, který je obsažen v luštěninách a zelenině. V lidském zažívacím traktu je nestravitelný a v tlustém střevě je fermentován baktériemi, což vede k nadýmání.
4. **Polysacharidy** jsou sloučeniny více než deseti molekul monosacharidů. Jsou typickými reprezentanty **polymerů**, tj. dlouhých organických makromolekul skládajících se z řetězce opakujících se stavebních jednotek (monomerů). Polysacharidy mají jednak funkci **strukturní** (mechanická stabilita buněk) a **zásobní** (energetická rezerva). Pokud jsou jejich stavební jednotky tvořeny jen jedním monosacharidem, nazývají se **homoglykany**. Pokud je tvoří sekvence vícera různých monosacharidů, označujeme je jako **heteroglykany**. Většina polysacharidů patří mezi tzv. **glukosany (glukany)**, tj. homoglykany tvořené molekulami glukózy, které jsou navzájem spojené glykosidickým řetězcem.

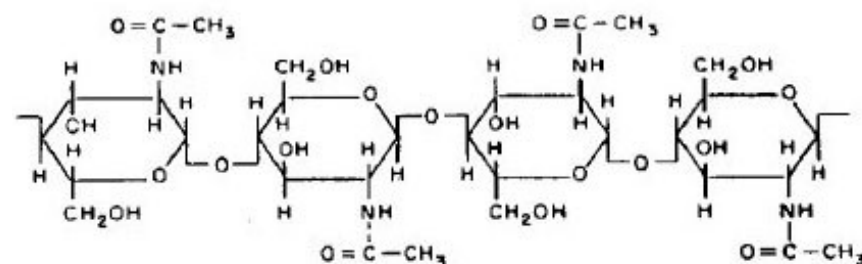
Hlavní polysacharidy:

- **Glykogen** („živočišný škrob“) je zásobní forma glukózy v játrech a svalech živočichů. Má řetězovitě větvenou strukturu. Ve srovnání s jinými polysacharidy má nižší schopnost absorbovat vodu, takže může být v buňkách uložen ve vyšším množství.
- **Škrob** je to nejdůležitější zásobní forma glukózy v přírodě, kterou najdeme hlavně v hlízách (brambory) a semenech (obiloviny, luštěniny). Má dvě hlavní složky: nevětvenou **amylózu** s helikální (šroubovicově stočenou) strukturou a řetězovitě větvený **amylopektin**. V lidském trávicím traktu je škrob štěpen enzymem *α-amylázou*, přičemž struktura amylózy se štěpí pomaleji než amylopektin. Amylóza je obsažena hlavně v luštěninách. Při průmyslové hydrolýze škrobu vznikají oligosacharidy – **dextriny**, které se využívají především jako pojiva a zahušťovadla.
- **Pektin** je tvořen lineárním řetězcem molekul kyseliny galakturonové (derivátu galaktózy). Je obsažen v malém množství ve slupkách ovoce a v zelenině. V lidském těle nemůže být stráven a je součástí vlákniny.

- **Inulin** je fruktan (polysacharid složený z molekul fruktózy) a v rostlinách slouží jako zásobní forma energie v hlízách a kořenech. Lidským zaživacím traktem prochází inulin jako nestravitelný a je tudíž součástí vlákniny. Až v tlustém střevě je metabolizován baktériemi za tvorby plynů.
- **Celulóza** je tvořena dlouhými rovnými řetězci velkého množství glukózových molekul (až 15 000) a je základní stavební jednotkou rostlinných buněčných stěn. Je obsažena hlavně v travách, luštěninách a dřevnatých rostlinách. Téměř čistou celulózou jsou tvořena vlákna semen bavlníku. Lidský organismus nedisponuje potřebnou enzymatickou výbavou na její trávení, takže celulóza je součástí nestravitelné vlákniny. Protože je to silně hydrofilní strukturální polysacharid (aby zabraňovala vysychání rostlinných tkání), ve střevě intenzivně absorbuje vodu, čímž zvětšuje objem stolice a urychluje trávení. Celulózu jsou schopni trávit jen někteří živočichové jako jsou např. určité druhy hmyzu, někteří měkkýši (hlemýžď zahradní) a přežvýkavci (kteří k tomu využívají symbiotické bakterie v zaživacím traktu).



- **Hemicelulóza (polyóza)** je podobně jako celulóza součástí rostlinných buněčných stěn. Na rozdíl od celulózy je však její struktura větvená, složená z kratších řetězců různých druhů sacharidů (xylóza, arabinóza, glukóza, mannóza, galaktóza, rhamnóza).
- **Chitin** je nejvýznamnější nerostlinný polysacharid a po celulóze je to druhý nejrozšířenější polysacharid v přírodě. Je součástí buněčných stěn v houbách a tvoří vnější kostru bezobratlých živočichů. V kombinaci s uhličitanem vápenatým vytváří mimořádně pevné schránky (ulity, mušle). Je tvořen molekulami *N*-acetylglukosaminu, které jsou spojené glykosidovými vazbami. *N*-acetylglukosamin je aminosacharid, derivát glukózy, který se od celulózy liší přítomností acetamidové skupiny (CH₃CONH₂) na 2. uhlíku, místo skupiny hydroxylové (-OH). Chitin je v lidském zaživacím traktu tráven za pomoci enzymu *chitinázy*.



- **Kyselina hyaluronová** je živočišný heteroglykan s lineárním řetězcem disacharidových jednotek obsahujících kyselinu glukuronovou a *N*-acetylglukosamin. Je základní součástí pojivových tkání.

Vzhledem ke své silné hydrofilitě pozitivně ovlivňuje hydrataci (zavodňování) kůže a chrupavek. Proto se hojně používá ve formě injekcí do kloubů a ve výživových doplňcích zaměřených na zdraví pohybového aparátu.

Deriváty sacharidů

- ❖ **Glykosidy** vznikají **glykosidovou vazbou** mezi hydroxylovou skupinou (-OH) na karbonylovém uhlíku monosacharidu a jinou sloučeninou. Glykosidová vazba může obsahovat kyslík (O), dusík (N), síru (S) nebo uhlík (C).

Pokud je druhou sloučeninou v glykosidové vazbě jiný monosacharid, označujeme ho jako tzv. **glykon** a výsledné sloučeniny se označují jako **homoglykosidy**. Podle této definice sem tedy patří i molekuly složených sacharidů (pokud je glykonem glukóza, sloučenina se označuje jako **glukosid**; pokud je glykonem galaktóza, jedná se o **galaktosid**).

Pokud není druhou složkou monosacharid, hovoříme o tzv. **aglykonu** a výsledné sloučeniny se označují jako **heteroglykosidy**. Podle chemické povahy aglykonu se heteroglykosidy dělí do řady podskupin jako jsou např. alkoholové glykosidy (salicin, substrát pro syntézu aspirinu), kumarinové glykosidy (kumarin), kyanogenní glykosidy (toxický amygdalin v jádrech meruněk), flavonoidní glykosidy (hesperidin, naringin), saponiny, aj.

- ❖ **Glykoproteiny (mukoproteiny)** jsou proteiny, které obsahují větvené nebo nevětvené oligosacharidy připojené nejčastěji O-glykosidovou nebo N-glykosidovou vazbou. Nacházejí se v buněčných membránách a patří mezi ně např. i gonadotropní hormony, které stimulují vývoj pohlavních orgánů a pohlavních buněk (folikulostimulační hormon-FSH, luteinizační hormon-LH, choriogonadotropin-hCG), lektiny (známé hlavně jako antinutriční látky v rostlinách), transportní molekuly (např. transferrin zprostředkující transport železa v krevní plazmě), sérové imunoglobuliny (hlavní imunitní protilátky) a sérový albumin (hlavní protein krevní plazmy).
- ❖ **Aminosacharidy (aminocukry)** či též **hexosaminy** obsahují molekulu sacharidu, v níž byla aspoň jedna hydroxylová skupina -OH nahrazena aminem -NH₂. Patří mezi ně glukosamin (častá součást kloubní výživy), N-acetylglukosamin (složka chitinu a kyseliny hyaluronové), galaktosamin (chondrosamin), N-acetylgalaktosamin nebo mannosamin. Aminosacharidy jsou i stavební součástí antibiotik (např. desosamin v erythromycinu).
- ❖ **Cukerné kyseliny** vznikají oxidací monosacharidů. Patří mezi karboxylové kyseliny, protože se vyznačují přítomností jedné nebo dvou karboxylových skupin (-COOH). Patří mezi ně např. kyselina glukonová, kyselina askorbová (vitamin C) a uronové kyseliny.
- ❖ **Cukerné alkoholy** vznikají redukcí monosacharidů (většinou pentóz a hexóz) a disacharidů. Obsahují na každém uhlíkovém atomu hydroxylovou skupinu -OH. (Proto jsou řazeny mezi tzv. **polyoly**.) Nejnámějšími průmyslově vyráběnými cukernými alkoholy jsou **mannitol** (derivát mannózy), **sorbitol** (derivát glukózy) a **xylitol** (derivát xylózy). V potravinářství se používají jako zahušťovadla a sladidla. Trojuhlíkatý **glycerol** je rovněž používán jako sladidlo, ale má navíc velmi významnou fyziologickou funkci, protože je komponentem **triglyceridů** neboli **triacylglycerolů** (zásobních a krevních lipidů) a **fosfolipidů** (klíčová stavební součást buněčných membrán).

- ❖ **Glykosaminoglykany (mukopolysacharidy)** jsou polysacharidy obsahující dlouhé, lineární řetězce disacharidů, které jsou složeny z molekuly aminosacharidu a cukerné kyseliny uronové (nebo galaktózy, v případě keratan sulfátu). V těle jsou pro svoji schopnost absorbovat vodu využívány jako lubrikanty. Patří mezi ně heparin (používaný v lékařství proti srážlivosti krve), chondroitin (stavební jednotka chrupavky), keratan sulfát (obsažený hlavně v chrupavce, kostech a rohovce) a kyselina hyaluronová. Spojením 1-2 řetězců glykosaminoglykanů s proteinovým jádrem vznikají **proteoglykany**, které jsou pro svoje hydrofilní schopnosti rovněž hojně využívány v tkáních.

Porovnání relativní sladkosti různých sacharidů a sladidel ve vztahu k sacharóze (100)

Pozn.: Sladkost je subjektivní záležitost, takže toto srovnání může být pouze orientační.

Výhodou sladidel oproti sacharidům je mnohem vyšší sladkost nebo (u cukerných alkoholů) nízký obsah využitelné energie.

	Relativní sladkost
Sacharidy	
Sukralóza	40 000–80 000
Fruktóza	80–180
Sacharóza	100
Glukóza	50–75
Galaktóza	54
Maltóza	30–50
Trehalóza	45
Laktóza	15–40
Sladidla	
Neotam	700 000–1300 000
Thaumatín	200 000–300 000
Sacharin	20 000–70 000
Steviosid	30 000
Acesulfam-K	13 000–20 000
Aspartam	12 000–20 000
Xylitol	90–100
Maltitol	80–90
Erythritol	50–80
Sorbitol	50–70
Mannitol	50–70
Lactitol	30–40

Zdroj: Starkey DE, Wang Z, Brunt K, Dreyfuss L, Haselberger PA, Holroyd SE, Janakiraman K, Kasturi P, Konings EJ, Labbe D, Latulippe ME. The challenge of measuring sweet taste in food ingredients and products for regulatory compliance: A scientific opinion. Journal of AOAC International. 2022 Mar 1;105(2):333-345.