

47 Metabolismus sacharidů

Glukosa obsažená v celulóse, škrobu a oligosacharidech nebo volná je nejrozšířenější organickou sloučeninou v přírodě. Pro chemotrofní organismy jsou sacharidy hlavní živinou, přičemž v potravě člověka je převažujícím sacharidem škrob. Glukosa je dále přijímána ve formě sacharosy (cukr, kterým sladíme), laktosy (mléčný cukr). V potravě, zejména ovoci a medu je přijímána fruktosa, která se může v játrech na glukosu přeměnit anebo může glukosu v metabolismu částečně nahradit.

Obsah škrobu v potravinách

Potravina	Škrob (%)
Pudinkový prášek	80
Mouka pšeničná	75
Rýže	75
Těstoviny	70
Rohlík	60
Luštěniny	60
Chléb	50
Celozrnné pečivo	40
Brambory	15
Banán	15

Obsah celulosy v potravinách

Potravina	% celulosy
Otruby	44
Ovesné vločky	10
Rybíz	9
Celozrnné pečivo	7
Luštěniny	6
Ořechy	6
Broskve, švestky	4-5
Chléb	4
Mrkev	3
Rohlík	1

Trávení škrobu je zahájeno v ústech a je dokončeno v tenkém střevě. Ve slinách i v pankreatické šťávě je obsažen enzym α -amylasa, který katalyzuje štěpení $\alpha(1\rightarrow4)$ glykosidové vazby mezi glukosovými podjednotkami. Škrob je nejprve štěpen na kratší jednotky zvané dextriny, konečnými produkty jeho štěpení působením α -amylasy jsou maltosa, isomaltosa, D-glukosa a malé množství tzv. limitních dextrinů. Ve štěpení disacharidů včetně laktosy a sacharosy z potravy pak pokračují specifické disacharidasy, které jsou lokalizovány v kartáčovém lemu enterocytů. Monosacharidy jsou po té transportovány do portální žíly.

Celulosa není na rozdíl od škrobu a glukagonu štěpena α -amylasou a prochází trávicím traktem nezměněna. Je to hlavní složka potravinové vlákniny.

Vláknina

- angl. dietary fibre
- směs celulosy a dalších polymerů sacharidových i nesacharidových
- vyskytuje se výhradně v rostlinné stravě
- nepatří mezi živiny, je však důležité ji přijímat v dostatečném množství
- dělí se na rozpustnou a nerozpustnou

Vláknina není metabolizována ani resorbována v **tenkém** střevě. V **tlustém** střevě je většina rozpustné vlákniny zkvašena. Nerozpustná vláknina prochází nerozložena. K nerozpustné vláknině se řadí celulosa, lignin, hemicelulosa ad., rozpustnou vlákninu představují např. pektiiny, gummy, slizy, rozpustná hemicelulosa.

Význam vlákniny:

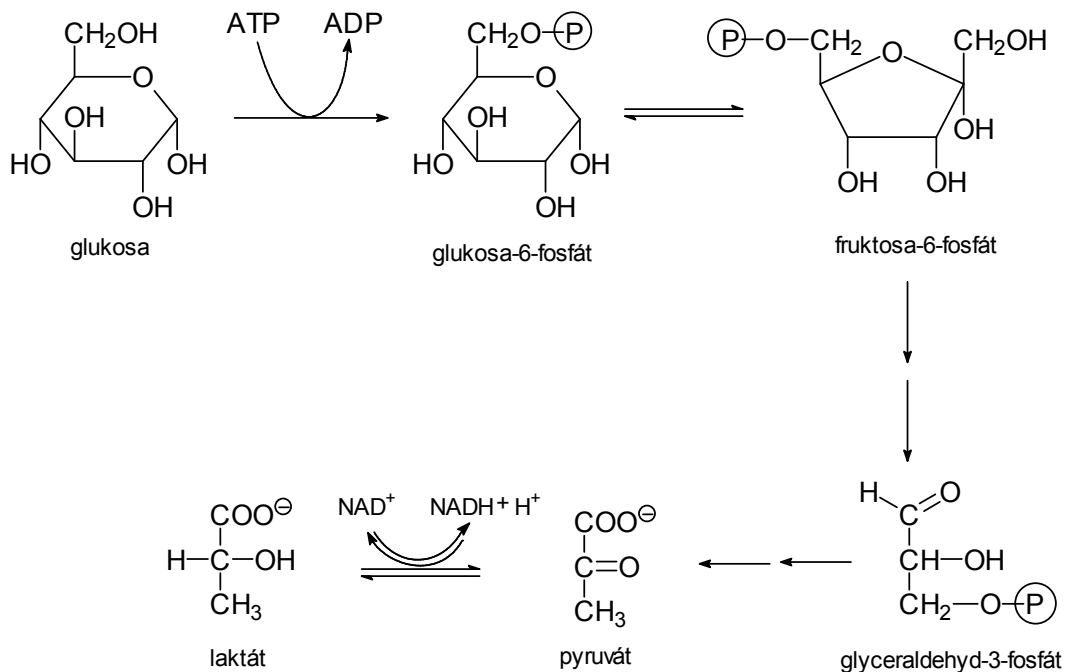
- podporuje střevní peristaltiku, zvětšuje objem stolice
- váže žlučové kyseliny - nepřímá exkrece cholesterolu
- podporuje sacharolytické (kvasné) procesy ve střevě
- zpomaluje střevní absorpci požitých sacharidů (zplošťuje glykemickou křivku)
- zpomaluje resorpci i jiných živin
- nadbytek vlákniny však může škodit (zmenšená resorpce minerálů, vitamínů apod.)

Obsah vlákniny v pečivu:

Druh pečiva	Škrob (%)	Vláknina (%)
Rohlík	60	1
Chléb (běžný)	50-55	3-5
Celozrnné (graham)	35-45	6-10

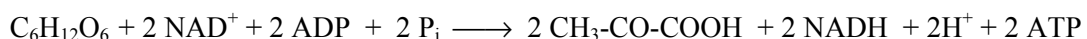
Metabolismus glukosy

Glukosa podléhá v buňkách řadě metabolických přeměn. Hlavní cestou jejího odbourávání je **glykolýza**. Probíhá v cytoplazmě téměř všech buněk a slouží jako zdroj energie. Může probíhat za přítomnosti nebo nepřítomnosti kyslíku (aerobní nebo anaerobní glykolýza).



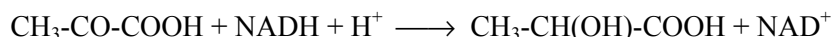
Glykolýza je zahájena přeměnou glukosy na glukosa-6-fosfát. Ten izomeruje na fruktosa-6 fosfát, který je v další reakci fosforylován na fruktosa-1,6-bisfosfát. Při obou fosforylačních reakcích je spotřebováno ATP. Fruktosa-1,6-bisfosfát se štěpí na dvě tříuhlíkaté sloučeniny - glyceraldehyd-3-fosfát a dihydroxyacetonfosfát, které jsou v rovnováze. Glyceraldehyd-3-fosfát podléhá sérii přeměn, při nichž vzniká redukovaný pyridinový nukleotid (NADH) a 2 ATP. Konečným produktem je **pyruvát**. V důsledku posunu rovnováhy mezi triosami se na pyruvát přemění postupně i dihydroxyacetonfosfát.

Souhrnně může být přeměna glukosy na pyruvát, která je společná pro aerobní i anaerobní glykolytické odbourání, popsána sumární rovnicí:



Za anaerobních podmínek je pyruvát redukován na laktát. Tento děj se ve značné míře uplatňuje v buňkách intenzívně namáhaného kosterního svalu. V klidu nebo při mírné práci jsou svalové buňky dostatečně zásobeny kyslíkem, a proto NADH vznikající v první fázi glykolýzy může být dehydrogenován v dýchacím řetězci. Při intenzivní práci sval není kyslíkem dostatečně rychle zásoben, v buňkách se hromadí NADH. Je zde naopak nedostatek NAD^+ , který je potřebný k tomu,

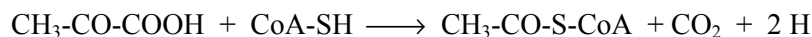
aby glykolýza mohla kontinuálně pokračovat. V tomto případě se NAD^+ regeneruje reakcí pyruvátu s NADH za vzniku laktátu. Reakce je katalyzována enzymem laktátdehydrogenasou (LD).



Uvedený způsob získávání energie pro svalovou buňku se označuje jako **práce na kyslíkový dluh** a může probíhat jen po omezený, velmi krátký časový úsek (doba záleží na trénovanosti jedince a dalších faktorech). Hromadění laktátu v buňkách a jeho přesun do krve vyvolá acidózu, která se projeví svalovou bolestí a vyčerpáním. Po ukončení nebo zmírnění intenzity svalové práce, kdy sval je opět dostatečně zásoben kyslíkem, se část laktátu přemění zpět na pyruvát a NADH je reoxidováno v dýchacím řetězci.

Anaerobní glykolýza probíhá rovněž v erytrocytech. Příčinou je, že erytrocyty nemají mitochondrie a chybí jim proto dýchací řetězec, v němž je za aerobních podmínek oxidováno NADH . Laktát je uvolňován do krve a reoxidován na pyruvát v játrech. Tvorba kyseliny mléčné z glukosy je rovněž charakteristická pro mléčné kvašení, které probíhá u řady mikroorganismů, zejména u mléčných bakterií (laktobacily, laktobakterie).

Za aerobních podmínek je pyruvát **oxidačně dekarboxylován** na acetyl-CoA. Jedná se o složitý proces, katalyzovaný multienzymovým komplexem. Jeho součástí jsou kofaktory thiamindifosfát (TDP), kyselina lipoová, koenzym A, FAD a NAD^+ . Děj probíhá v matrix mitochondrií a sumárně jej lze popsat rovnicí:



Dva vodíkové atomy, které se při reakci získají, jsou vázány ve formě NADH , který může být reoxidován v dýchacím řetězci. Acetyl-CoA vstupuje do citrátového cyklu. Na jednu molekulu glukosy jsou tedy v této fázi získány 2 NADH (2×3 ATP v dýchacím řetězci) a 2 acetyl-CoA. Každý z acetyl CoA poskytne při oxidaci v citrátovém cyklu 12 ATP. Připočteme-li 2 NADH (6 ATP) a 2 ATP získané v počáteční fázi glykolýzy, je maximální energetický zisk při odbourání 1 molu glukosy 38 ATP.

Úplné odbourání glukosy aerobní glykolýzou lze charakterizovat sumární rovnicí:



Všimněte si shody s rovnicí spalování glukosy v prostředí kyslíku, kde se ovšem veškerá energie uvolní jako teplo.

Syntéza a odbourání glykogenu

Je-li do buněk přiváděno dostatečné množství glukosy, může být její část, která není bezprostředně oxidována, ukládána ve formě glykogenu. Značnou kapacitu syntetizovat glykogen mají u savců především jaterní a svalové buňky. Syntéza je podporována účinky inzulínu. Při syntéze glykogenu

dochází k postupnému vytváření polysacharidového řetězce z aktivovaných molekul glukosy (UDP-glukosa). Glykogen se shromažďuje ve formě granul v cytozolu buněk.

V období nedostatečného přívodu glukosy je zásobní glykogen opět štěpen. Štěpení probíhá za přítomnosti anorganického fosfátu (fosforolytické štěpení), produktem je glukosa-1-fosfát. Glykogenolýza je stimulována účinky adrenalinu, noradrenalinu a v játrech též glukagonu.

Glukoneogeneze

Glukosa není esenciální složkou potravy. Pomocí glukoneogeneze může být v organismu syntetizována i z necukerných zdrojů. Jsou to pyruvát, laktát, glycerol a tzv. glukogenní aminokyseliny. Většina pochodů glukoneogeneze je katalyzována stejnými enzymy jako glykolýza, pouze tři reakce jsou energeticky příliš náročné a probíhají jiným mechanismem. Pro syntézu 1 molu glukosy z pyruvátu je potřeba 12 molů ATP. Hlavním místem glukoneogeneze u savců jsou jaterní buňky.

Pentosový cyklus

Další metabolickou cestou, kterou se glukosa může přeměňovat je pentosový cyklus. Nezískává se při něm energie, avšak slouží k produkci NADPH potřebného pro syntetické pochody v buňkách a je rovněž zdrojem ribosafosfátu pro syntézu nukleových kyselin a nukleotidů. Enzymy pentosového cyklu jsou u savců lokalizovány především v jaterních buňkách.

Hormonální regulace metabolismu glukosy

U člověka je hladina glukosy v krvi udržována ve velmi úzkém rozmezí (3-6 mmol/l), bez ohledu na to, zda je glukosa bezprostředně dostupná v potravě či není. To je potřeba především pro zajištění činnosti mozkových buněk, pro něž je glukosa prakticky jediným zdrojem energie. Na regulaci hladiny glukosy v krvi se podílí řada hormonů, z nichž největší význam mají pankreatické hormony inzulin a glukagon.

Inzulin je polypeptid obsahující 51 aminokyselin. Je produkován β -buňkami Langerhansových ostrůvků při zvýšení hladiny glukosy v krvi. Má řadu metabolických účinků, všechny z nich mají anabolický charakter. Hlavním efektem je snižování hladiny glukosy v krvi, které je výsledkem ovlivnění několika různých metabolických dějů. Inzulin např. usnadňuje transport glukosy do některých typů buněk, stimuluje glykolýzu, inhibuje glukoneogenesi a zvyšuje produkci glykogenu v játrech a ve svalech. Kromě toho působí i na metabolismus lipidů a proteinů. Nedostatek inzulinu, jak absolutní tak i relativní, vyvolává diabetes mellitus (cukrovku).

Antagonistou inzulinu je **glukagon** produkován α -buňkami Langerhansových ostrůvků. Sekrece obou protichůdných hormonů je ve vzájemné vazbě: snížení hladiny glukosy v krvi, byť velmi nepatrné, je účinným stimulem pro sekreci glukagonu, zvýšení hladiny glukagonu je současně provázeno snížením sekrece inzulinu a naopak. Glukagon zvyšuje odbourávání glykogenu v játrech a podporuje glukoneogenesi - oba tyto účinky se projevují zvýšením hladiny glukosy v krvi. Působí i na metabolismus lipidů.

Z další hormonů, které se podílejí na regulaci hladiny glukosy v krvi, je třeba jmenovat tzv. stresové hormony kortisol, adrenalin a noradrenalin (viz kapitoly 39, 58).

Metabolismus fruktosy

V běžné stravě přijímáme denně kolem 7 g fruktosy, většinou ve formě disacharidu sacharosy. Fruktosa se ve střevě velmi rychle vstřebává a metabolizuje se v játrech. Zde se přeměňuje se na fruktosa-1-fosfát, který se svým metabolismem napojuje převážně na proces glykolýzy. První fáze přeměny fruktosy není závislá na inzulinu, a proto je velmi rychlá. Fruktosa je proto rychlým zdrojem energie.

Metabolismus galaktosy

Galaktosu přijímáme hlavně ve formě mléčného cukru - disacharidu laktosy. Galaktosa z něj uvolněná se rychle vstřebává do portální žíly a metabolizuje se v játrech převážně na aktivovanou formu glukosy (UDP-glukosa). Tato látka se zapojuje do metabolismu glukosy. Galaktosa může být rovněž zabudovaná do struktury glykoproteidů, glykosaminoglykanů a glykolipidů. U kojících matek slouží k syntéze laktosy.