

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra chemie**



**Vitamin E v cereáliích a cereálních výrobcích**

**Bakalářská práce**

**Autor práce: Vendula Benediktová**

**Obor studia: Výživa a potraviny**

**Vedoucí práce: Ing. Zora Kotíková, Ph.D.**

© 2019/2020 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vitamin E v cereáliích a cereálních výrobcích" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne (datum odevzdání)

\_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Zoře Kotíkové, Ph.D. za ochotu, vstřícný přístup a odborné vedení mé bakalářské práce, Ing. Barboře Burešové za příležitost účastnit se laboratorních prací k mému tématu a také své rodině za podporu během celého studia.

# Vitamin E v cereáliích a cereálních výrobcích

## Souhrn

Vitamin E je nepostradatelná mikroživina potřebná pro normální funkce organismu člověka, zvířat i rostlin. Pro člověka je esenciální, a proto ho musíme dodávat tělu v potravě. Na vitamin E je bohatá především rostlinná strava. Celosvětově zaujímají první místo ve spotřebě potravin cereálie a výrobky z nich, a proto je můžeme pokládat za jeden z nejvýznamnějších zdrojů, co se týče příjmu vitamínu E.

Vitamin E se řadí do skupiny lipofilních vitaminů, spolu s vitaminy A, D a K. Je vázaný v tucích, a proto ho nalezneme převážně v částech rostlin s většími obsahy lipidů. Existuje osm forem vitamínu E, jmenovitě  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -tokoferol a  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -tokotrienol, souhrnně nazývané tokoly. Nejběžnější a pro člověka nejprístupnější formou je  $\alpha$ -tokoferol. Pro správné vstřebávání vitamínu E v tenkém střevě je potřeba současné konzumace tuků, na které se vitamin naváže a s jejich pomocí prostoupí přes lumen střeva do krevního řečiště. Hlavní funkcí vitamínu E v organismu je jeho antioxidační schopnost, tzn. vychytávání nežádoucích volných kyslíkových radikálů. Mezi další funkce se řadí ochrana buněčných membrán, vliv na různé genové procesy a dělení buněk, prokazuje karcinogenní účinky a napomáhá správnému srážení a průtoku krve.

V potravě můžeme vitamin E přijímat z různých zdrojů, ale největší hladiny jsou obsaženy v rostlinných olejích. V dnešní době jsou dostupné i jeho syntetické formy, jakožto doplňky stravy ve formě tablet. Tato bakalářská práce je zaměřena na vitamin E obsažený v obilovinách, a to konkrétně v pšenici (jednozrnce, dvouzrnce, seté, tvrdé, špaldě a barevných odrůdách), ječmeni, žitu, ovsu, tritikale a tritordeu. Nejvyšší hladiny tokolů se dle dostupné literatury nachází v pšenici jednozrnce (78–84,5 mg/kg SH), dvouzrnce (70 mg/kg SH) a v ječmeni setém (75 mg/kg SH).

Dalším cílem bakalářské práce bylo popsat stabilitu vitamínu E při různých typech technologického zpracování zrna. Ve zpracovaných cereáliích na konečné produkty se obsah vitamínu E výrazně mění a převážně snižuje. Toto ovlivňují jednotlivé technologické procesy, jimž jsou obilná zrna vystavena v průběhu zpracování. V této práci jsou podrobněji popsány degradace tokolů při procesech mletí, sladování, pečení, extruze a pufování. Největší vliv na ztrátu tokolů má proces mletí, při kterém jsou obilná zrna zbavována otrubových a zárodečných frakcí, které jsou na obsah tokolů nejbohatší. Dále má významný vliv působení vysokých teplot nebo tlaků a oxidace v průběhu procesu hnětení těsta.

**Klíčová slova:** tokoferoly, tokotrienoly, zdravotní účinky, cereálie, technologické zpracování, stabilita

# Vitamin E in cereals and cereal products

## Summary

Vitamin E is an indispensable micronutrient, which is important for normal functions in human body, animals and plants. We aren't able to synthesize this vitamin, so we are depend on food intake. Mainly the plant diet is rich in vitamin E. Cereals and cereal products are the most consumed foods in the world. Because of that, we can consider them as one of the most important source in terms of vitamin E intake.

Vitamin E is the lipid-soluble vitamin, together with vitamins A, D and K. It is bound in lipids, therefore it can be found primarily in parts of plants with higher lipid contents. There are eight forms of vitamin E, namely  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -tocopherol and  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -tocotrienol, collectively called tocols. The most common and most accessible form for humans is  $\alpha$ -tocopherol. For the right absorption of vitamin E in the small intestine, it is necessary to eat the lipids in the same time too. The vitamin connects to fats and thanks them it is able to penetrate through lumen of the intestine into the bloodstream. The main function of vitamin E in human body is an antioxidant activity, i.e. scavenging of toxic free oxygen radicals. Other functions include the cell membranes protection, the role in various gene processes and cell division, anticancer activity and promoting of proper blood clotting and circulation.

We can intake vitamin E from various food sources, but the highest levels of tocols are found in vegetable oils. Nowadays, also the synthetic forms are available as dietary supplements in tablet forms.

This bachelor's thesis is focussed on vitamin E contained in cereals, specifically in wheat (einkorn, emmer, bread wheat, durum wheat, spelt and colored-grain wheats), barley, rye, oat, triticale and tritordeum. According to available literature, the highest level of tocols is found in einkorn (78–84.5 mg/kg DM), emmer (70 mg/kg DM) and barely (75 mg/kg DM).

The another goal of the bachelor's thesis was to describe the stability of vitamin E during different types of technological processing of grain. The content of vitamin E in processed cereals to final products is significantly changed and mostly decreased. These changes are influenced by the individual technological processes, which the cereal grains are exposed during processing. In this bachelor's thesis, there is closely described the degradation of tocols during process of: milling, malting, baking, extrusion and puffing. The greatest influence on the loss of tocols has the milling process, in which cereal grains are stripped of their bran and germ fractions, which are the tocol-richest fractions. Also, the other technological processes, like high temperature or pressure and oxidation during the dough kneading process, have significant effect on tocols.

**Keywords:** tocopherols, tocotrienols, health effects, cereals, technological processing, stability

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Cíl práce.....</b>	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Vitamin E .....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Obecná charakteristika vitaminů .....	10
3.1.2 Charakteristika vitamínu E .....	12
3.1.2.1 Chemická struktura vitaminů skupiny E.....	12
3.1.2.2 Biologická aktivita jednotlivých forem vitamínu E.....	13
3.1.2.2.1 Tokoferoly .....	13
3.1.2.2.2 Tokotrienoly .....	14
3.1.3 Biosyntéza vitamínu E .....	15
3.1.4 Biodostupnost a nutriční význam vitaminů skupiny E pro člověka .....	17
3.1.4.1 Dostupnost v potravě.....	17
3.1.4.2 Trávení, rozpustnost a absorpce vitamínu E .....	18
3.1.4.3 Vliv na fyziologické procesy v těle člověka .....	20
3.1.4.3.1 Antioxidační schopnost vitamínu E .....	22
3.1.4.4 Doporučení pro příjem vitamínu E .....	23
3.1.4.5 Projevy nedostatku / nadbytku vitamínu E .....	24
<b>3.2 Vitamin E v cereáliích.....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Výskyt a funkce v rostlinách .....	26
3.2.2 Obsah vitamínu E obilovinách.....	27
3.2.2.1 Distribuce v zrně .....	27
3.2.2.2 Zastoupení vitamínu E v různých druzích cereálií.....	28
3.2.2.2.1 Pšenice.....	28
3.2.2.2.2 Ječmen setý .....	31
3.2.2.2.3 Oves setý .....	32
3.2.2.2.4 Žito seté.....	33
3.2.2.2.5 Triticale .....	33
3.2.2.2.6 Tritordeum.....	34
3.2.3 Vliv technologického zpracování cereálií na obsah vitamínu E.....	35
3.2.3.1 Mletí .....	35
3.2.3.2 Sladování.....	36
3.2.3.3 Pečení .....	36
3.2.3.4 Extruze .....	37
3.2.3.5 Pufování .....	38

<b>4 Závěr.....</b>	<b>40</b>
<b>5 Literatura.....</b>	<b>41</b>

## Úvod

V potravě přijímáme velká množství různých druhů živin. Přestože některé potřebuje náš organismus jen v nepatrných množstvích, i tak jsou pro náš život nepostradatelné. Mezi tyto živiny řadíme, mimo jiné, i skupinu vitaminy. Konkrétně vitamin E, na který je tato práce zaměřena, má spoustu příznivých vlivů a nepostradatelných funkcí pro lidský organismus. Jeho nejvýznamnější schopností je jeho antioxidační aktivita, díky které je tělo ušetřeno mnoha nepříznivým vlivům přítomných volných kyslíkových radikálů. Je tedy velmi důležité dbát na jeho správný příjem. Doporučený denní příjem pro vitamin E je 13 mg/den pro muže, 11 mg/den pro ženy a 5–13 mg/den pro děti (v závislosti na věku) (Galli et al. 2017).

Vitamin E se vyskytuje celkem v osmi formách hromadně nazývaných tokoly. Jedná se o čtyři formy tokoferolu ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) a čtyři formy tokotrienolu ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ). Všechny tokoly jsou syntetizovány v rostlinách, přesněji v jejich cytoplasmě a plastidech. Vitamin E v rostlinách zastává funkci už zmíněného antioxidantu, kde zabraňuje peroxidaci lipidů buněčných membrán (Muñoz & Munné-Bosch 2019).

Mezi nejvýznamnější zdroje vitamínu E v naší stravě patří obiloviny. Nejvíce konzumovanou obilovinou je pšenice zpracovaná na mouky, pečivo a další produkty. Než se však z cereálií stanou konečné potraviny prochází řadou technologických úprav a zpracování, během kterých bohužel ztrácí výrazná množství vitamínu E. Jsou zbavovány svých obalových vrstev, zahřívány na vysoké teploty, oxidovány, vystavovány vysokým tlakům atd. Po těchto a dalších technologických procesech mohou zpracované obiloviny přijít až o 90 % původního obsahu vitamínu E (Gupta 2019). I přes velkou konzumaci cereálních výrobků tedy nepřijmeme tak významné množství vitamínu E, jaké bychom mohli přijmout ze surových obilovin.

## **1 Cíl práce**

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat literární rešerši zaměřenou na výskyt vitamínu E v cereáliích a cereálních výrobcích. Popsat obsah a zastoupení vitamínu E v různých druzích obilovin. Charakterizovat vliv vitamínu E na organismus člověka, popsat jeho jednotlivé formy, biologickou aktivitu, stabilitu a osud při různých typech technologického zpracování zrna.

## 2 Literární rešerše

### 2.1 Vitamin E

#### 2.1.1 Obecná charakteristika vitaminů

Vitaminy jsou organické nízkomolekulární sloučeniny, které mají důležitou roli v mnoha fyziologických funkcích nezbytných pro živé organismy. Vyskytují se v malých množstvích v běžných potravinách a v dnešní době se vyrábí i synteticky. Nedostatky vitaminů u člověka i zvířat způsobují specifické poruchy, kterým lze zabránit podáváním chybějícího vitamínu (Azzi 2019). V této době je vitamínem nazýváno 13 látek nebo skupin látek (viz tabulka 1) (Combs & McClung 2017).

Spolu s minerály se vitaminy řadí do skupiny mikroživin (Combet & Buckton 2019). Mikroživiny jsou látky, které potřebujeme přijímat jen v malých množstvích, ale i tak jsou pro náš život nepostradatelné (Stampfer 2008). Na rozdíl od jiných nutrientů, jako jsou tuky, sacharidy a bílkoviny, neslouží vitaminy ke strukturálním funkcím a jejich katabolismus neposkytuje významnou energii (Combs & McClung 2017). Vitaminy jsou nezbytné pro správné buněčné a molekulární funkce, pro růst a udržování tělesných tkání (Sivaprasad et al. 2019). Zapojují se do celé řady enzymatických pochodů jako katalyzátory enzymatických reakcí, jako kofaktory enzymů (např. vitaminy A, K, C, thiamin, niacin, riboflavin, vitamin B6, biotin aj.), nebo i přímo vstupují do metabolických procesů (vitaminy E, K, C, niacin, riboflavin a kyselina pantothenová). Jiné vitaminy fungují jako biologické antioxidanty (vitaminy A, E a C) tím, že dokáží z těla vychytávat volné radikály kyslíku, které jsou pro něj toxické (Fajfrová & Pavlík 2013; Combs & McClung 2017).

Člověk, na rozdíl od rostlin a mikroorganismů, si nedokáže vitaminy syntetizovat (Asensi-Fabado & Munné-Bosch 2010; Quin & Schmidt-Dannert 2014). Jsou pro nás esenciální, a tudíž musí být přijímány potravou (Combet & Buckton 2019). Běžné potravinové formy většiny vitaminů vyžadují určitou metabolickou aktivaci na jejich funkční formy. Při jejich nedostatečné koncentraci v organismu může dojít k hypovitaminose, nebo při úplné absenci vitamínu až k avitaminose (Combs & McClung 2017).

Na základě své rozpustnosti jsou vitaminy rozděleny do dvou hlavních skupin: vitaminy rozpustné ve vodě – hydrofilní a vitaminy rozpustné v tucích – lipofilní. Do hydrofilních skupiny patří vitaminy skupiny B (B1, B2, B3, B5, B6, B9 a B12), vitamin H (biotin) a vitamin C (kyselina askorbová). Mezi lipofilní se zařazují vitamin A (retinolu), vitamin E (tokoferoly a tokotrienoly), vitamin D (kalciferolu) a vitamin K (fylochinonu). Vitaminy rozpustné ve vodě ovlivňují především metabolismus sacharidů, lipidů a bílkovin, také mají důležitou fyziologickou roli při udržování zdravých svalů, kůže, očí, vlasů a jater. Vitaminy rozpustné v tucích se podílejí mimo jiné na kostním metabolismu, vidění a koagulaci krve. Z důvodu jejich vaznosti na tuk, jsou na rozdíl od hydrofilních méně účinně vylučovány z těla, a tak je pravděpodobnější jejich kumulace v organismu. Lipofilní vitaminy mají také důležitou roli v prevenci nebo bránění oxidačnímu poškození biomolekul DNA, proteinů a membránových

lipidů. Dále působí v boji proti oxidačnímu stresu, který je spojen s řadou chorob, jako je rakovina, neurodegenerativní choroby nebo ateroskleróza (Melfi et al. 2018).

**Tabulka 1:** Vitaminy a jejich fyziologické funkce (Combs & McClung 2017)

Skupina	Vitaminy	Fyziologická funkce
Vitamin A	Retinol Retinal Kyselina retinová	Pigment účastnící se procesu vidění, diferenciace epitelových buněk
Vitamin D	Cholekalciferol (D3) Ergokalciferol (D2)	Homeostáze vápníku, metabolismus kostí
Vitamin E	$\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -, $\delta$ -Tokoferol $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -, $\delta$ -Tokotrienol	Membránový antioxidant
Vitamin K	Fylochinon (K1) Menachinon (K2) Menadion (K3)	Srážení krve, metabolismus vápníku
Vitamin C	Kyselina askorbová Kyselina dehydroaskorbová	Redukční činidlo, hydroxylace při tvorbě kolagenu a karnitinu a při metabolismu léčiv a steroidů
Vitamin B1	Thiamin	Kofaktor pro dekarboxylaci 2-oxokyselin (např. pyruvátu) a transketolace
Vitamin B2	Riboflavin	Kofaktor v redoxních reakcích mastných kyselin a cyklu trikarboxylové kyseliny (TCA)
Niacin (Vitamin B3)	Kyselina nikotinová Nikotinamid	Kofaktor pro některé dehydrogenasy
Vitamin B6	Pyridoxol Pyridoxal Pyridoxamin	Kofaktor v metabolismu aminokyselin
Vitamin B9	Kyselina listová Polyglutamyl folaciny	Kofaktor v metabolismu uhlíku
Vitamin H	Biotin	Kofaktor pro karboxylaci
Vitamin B5	Kyselina pantothenová	Kofaktor v metabolismu organických kyselin
Vitamin B12	Kobalamin	Kofaktor v metabolismu propionátu, aminokyselin a uhlíkových jednotek

## 2.1.2 Charakteristika vitamínu E

Vitamin E je esenciální živina, jejíž nejvýznamnější funkcí je její antioxidační účinek v biologických systémech člověka, zvířat i rostlin. Byl objeven na počátku dvacátých let 19. století H. M. Evansem a K. S. Bishopem jako živina potřebná pro normální reprodukci samice krysy (Vodrážka 2002). Následně bylo zjištěno, že nedostatek vitamínu může způsobit různé negativní fyziologické projevy (degeneraci varlat, svalovou dystrofii, anémii, encefalomalacii a další). Funkce vitamínu E jakožto buněčného antioxidantu a jeho chemická struktura byly definovány velmi brzy po jeho izolaci v roce 1935. Za nejdůležitější v tučích rozpustný biologický antioxidant v těle byl však vitamin E uznán až o 50 let později, kdy jeho schopnost zachycovat volné radikály skrze svůj antioxidační účinek byla uznána jako jeho primární biochemická funkce. V nedávné době byla zdokumentována jeho úloha při posilování imunitní odpovědi a odolnosti vůči chorobám u různých živočišných druhů (Azzi 2019).

Termín vitamin E je souhrnný název pro molekuly s antioxidační aktivitou, zahrnující všechny deriváty skupiny tokoferolů a tokotrienolů (Zemleni et al. 2014). Existují čtyři hlavní formy u obou skupin vitamínu E, jmenovitě  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a  $\delta$ . Odlišují se přítomností methylových skupin v pozicích 5, 7 nebo 8 chromanového kruhu (obrázek 1).  $\alpha$ -Tokoferol je forma s největší biologickou aktivitou (Azzi 2019). V roce 2000 americká rada pro potraviny a výživu (Food and Nutrition Board) definovala  $\alpha$ -tokoferol jako jedinou formu, která splňuje požadavky na „lidský“ vitamin E. Bylo totiž prokázáno, že pouze tato forma odvrací příznaky nedostatku vitamínu E u člověka. Na rozdíl od většiny ostatních vitamínů není chemický  $\alpha$ -tokoferol, syntetizovaný kondenzací trimethylhydrochinonu s isofytolem, totožný s přirozeně se vyskytující formou RRR- $\alpha$ -tokoferolem (Zemleni et al. 2014).

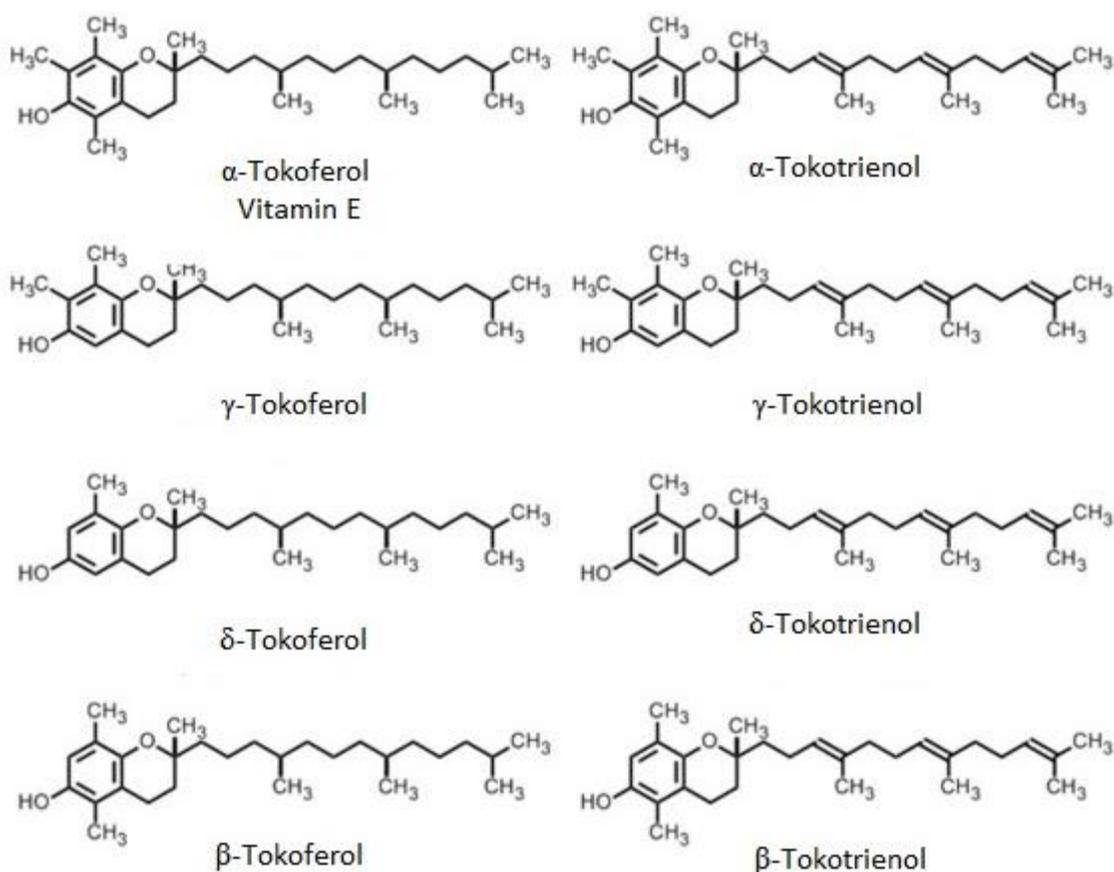
### 2.1.2.1 Chemická struktura vitamínů skupiny E

Tokoferoly a tokotrienoly mají společnou chemickou strukturu odvozenou od tokochromanolů – zkráceně tokolů. Tokol je složen z chromanového jádra se substitucí v polohách 2 a 6. Methylová skupina a isoprenoidní postranní řetězec jsou vázány na C-2, zatímco hydroxylová funkční skupina na C-6, kde je k dispozici pro esterifikaci. Tokol není sám o sobě považován za E-vitamin, ale sdílí s ním některé charakteristické vlastnosti, zejména co se týče antioxidační role. Vyskytuje se přirozeně jen v nízkých koncentracích (Woollard & Indyk 2003).

Vitamíny skupiny E se skládají z hydrochinonového jádra a isoprenoidního postranního řetězce. Tokoferoly a tokotrienoly se od sebe liší v počtu a pozicích methylových skupin na svém chromanovém kruhu a v nepřítomnosti nebo přítomnosti dvojných vazeb v isoprenoidním postranním řetězci. Strukturální rozdíly mezi tokotrienoly a tokoferoly ovlivňují jejich biologické aktivity (Watson 2014). Charakteristické je, že tokotrienoly mají oproti tokoferolům nenasycený postranní řetězec obsahující tři dvojně vazby v polohách 3', 7' a 11' (Azzi 2019). Všechny tokoferoly a tokotrienoly jsou amfipatické molekuly, což znamená, že ve své struktuře obsahují jak polární (hydrofilní), tak nepolární (hydrofobní/lipofilní) část. Hydrofobní isoprenoidní postranní řetězec interaguje s lipidy na membránách a polární hydrochinonové jádro je vystaveno povrchu membrány (Hofius & Sonnewald 2003).

### 2.1.2.2 Biologická aktivita jednotlivých forem vitaminu E

Tokoferoly mají na základě standardních testů aktivity vitaminu E větší biologickou aktivitu než tokotrienoly.  $\alpha$ -Tokotrienol však vykazuje mnohem větší antioxidační aktivitu v *in vitro* podmínkách než  $\alpha$ -tokoferol. To zjevně souvisí s jeho vyšší recyklační účinností, rovnoměrnějším rozložením v dvojvrstvě lipidů a účinnějším interakcím s lipidovými radikály (Vodrážka 2002). Jednotlivé typy tokoferolů a tokotrienolů mají často odlišné buněčné účinky. Například  $\beta$ -tokoferol má podobné antioxidační vlastnosti jako  $\alpha$ -tokoferol, ale neinhibuje buněčnou proliferaci (zrychlené mitotické množení buněk), genovou expresi a je 10× méně aktivní než  $\alpha$ -tokoferol při inhibici trombinem indukované aktivity proteinkinasy C (PKC).  $\beta$ - a  $\gamma$ -tokoferoly působí silně proti funkci intracelulárního enzymu tyrosinasy, což zase není ve schopnostech  $\alpha$ -tokoferolu (Azzi 2019).



**Obrázek 1:** Chemická struktura tokoferolů a tokotrienolů (Azzi 2019)

#### 2.1.2.2.1 Tokoferoly

Tokoferoly (T) jsou látky rozpustné v tucích, olejích, ve většině organických rozpouštědlech a nerozpustné ve vodě. Jsou přítomné hlavně v rostlinách (klíčky obilovin, rostlinné oleje, zelenina, luštěniny, ořechy atd.), ale i v másle a vejcích. Na rozdíl od vitaminů A a D nejsou přítomné v rybím tuku. V surové formě se vyskytují jako světle žluté viskózní oleje a při teplotách pod bodem mrazu mohou i krystalizovat. Teplota tání  $\alpha$ -tokoferolu je 2,5–3,5 °C. Každý tokoferol obsahuje tři asymetrické atomy uhlíku, což umožňuje vznik celkem osmi

optických isomerů (Woollard & Indyk 2003). Obecně jakékoli strukturální modifikace  $\alpha$ -T, včetně nenasycení postranního řetězce, změny délky postranního řetězce, oxidace chromanového kruhu a ztráty jakékoli methylové skupiny, výrazně snižují jeho biologickou aktivitu.  $\beta$ - a  $\gamma$ -tokoferolové isomery (respektive 5,8- a 7,8-dimethyltokoly) mají sníženou biologickou aktivitu na 30 % a 12 % a  $\delta$ -T (8-methyltokol) vykazuje pouze 1% biologickou aktivitu oproti  $\alpha$ -T. Jejich účinnost tedy klesá v pořadí  $\alpha$ - >  $\beta$ - >  $\gamma$ - >  $\delta$ -tokoferol. Je známo, že se vyskytují i jiné mono- a di- methyltokoly, buď jako minoritní přírodní složky nebo jako syntetické vedlejší produkty. Ty však nejsou klasifikovány jako E-vitaminy, protože nemají žádnou měřitelnou fyziologickou odezvu (Vodrážka 2002; Woollard, & Indyk 2003; Polin et al. 2017).

#### **2.1.2.2.2 Tokotrienoly**

Tokotrienoly mají obdobné chemické vlastnosti jako tokoferoly. Stejně jako u jedlých olejů s vysokým obsahem polynenasycených mastných kyselin, dává i tokotrienolům přítomnost dvojných vazeb větší tekutost a usnadňuje i jejich začlenění do buněčných membrán. V přírodě nejrozšířenější vyskytující se formou tokotrienolu je  $\alpha$ -tokotrienol (5,7,8-trimethyltokotrienol), následovaný  $\gamma$ -tokotrienolem (7,8-dimethyltokotrienol),  $\delta$ -tokotrienolem (8-methyltokotrienol) a v neposlední řadě  $\beta$ -tokotrienolem (5,8-dimethyltokotrienolem). Tokotrienoly (T3) mají sníženou biologickou aktivitu vzhledem k  $\alpha$ -tokoferolu:  $\alpha$ -T3 má biologickou aktivitu 25 %,  $\beta$ -T3 5 %,  $\gamma$ -T3 a  $\delta$ -T3 méně než 1 % (Watson 2014).

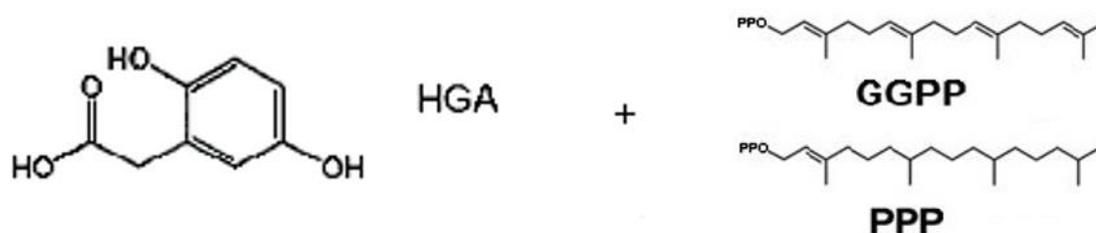
Tokotrienoly jsou přítomny v rostlinných olejích, jako je například palmový olej nebo olej z rýžových otrub. Ječmenné, ovesné, palmové a rýžové otruby obsahují více než 70 % vitamínu E ve formě tokotrienolů (Watson 2014). V dnešní době probíhá mnoho výzkumů, co se týče tokotrienolů a jejich antihyperlipidemických (snižujících koncentraci plasmatických lipidů), antidiabetických, protizánětlivých, protirakovinných a imunitně podpůrných účinků. Ve studiích na lidech a zvířatech bylo prokázáno, že tokotrienoly snižují pravděpodobnost vzniku cukrovky nebo jejích příznaků a utlumují neuropatickou bolest (bolest, vznikající v důsledku postižení centrálního nebo periferního nervového systému) (Rakel David 2018).

### 2.1.3 Biosyntéza vitamínu E

Vitamin E je syntetizován zejména rostlinami, řasami, sinicemi nebo různými fotosyntetizujícími mikroorganismy (Hofius & Sonnewald 2003). Existují však i výjimky, jako je například parazit *Plasmodium falciparum* způsobující malárii, který není fotosyntetickým organismem, ale i přesto syntetizuje jak  $\alpha$ -, tak  $\gamma$ -tokoferoly během svých intraerythrocystických fází (fází množení se v lidských červených krvinkách) z důvodu zabránění oxidačnímu stresu (Mène-Saffrané 2018).

Biosyntéza tokolů je zahájena v cytoplasmě rostliny. Všechny další kroky jejich biosyntézy probíhají v plastidech, kde jsou k dispozici potřebné enzymy lokalizované ve vnitřní membráně nebo v globulárních útvech obsahujících lipidy - plastoglobulech (Fritsche et al. 2017).

Tokoly vznikají kondenzací dvou biosyntetických prekurzorů: polární kyseliny homogentisové (HGA, obrázek 2) a lipofilního polyprenyldifosfátu odvozeného od isopentenylidifosfátu (IPP). IPP je prekurzorem fityldifosfátu (PPP, obrázek 2) a geranylgeranyldifosfátu (GGPP, obrázek 2), z nichž jsou odvozeny postranní řetězce tokoferolů a tokotrienolů. (Mène-Saffrané & DellaPenna 2010; Fritsche et al. 2017).

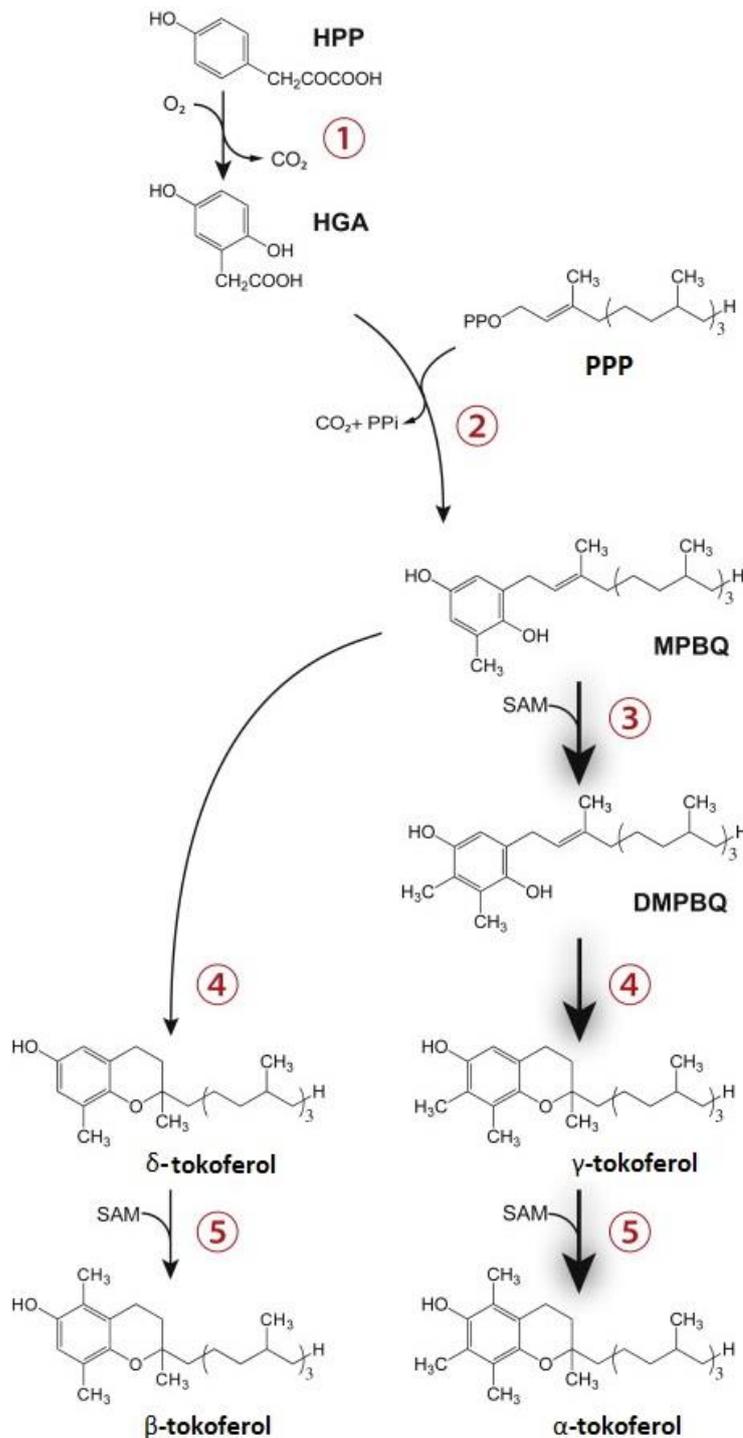


**Obrázek 2:** Prekurzory syntézy tokolů (Pellaud & Saffrané 2017; Kimura et al. 2018)

Syntéza všech tokolů je zahájena přeměnou kyseliny p-hydroxyfenylpyruvové (HPP) na HGA katalyzovanou enzymem HPP dioxygenasou (HPPD). Reakce spočívá v oxidační dekarboxylaci postranního řetězce 2-oxokyseliny, poté následuje přesun acetylu do polohy 2 aromatického kruhu a hydroxylace v poloze 1 (obrázek 3, reakce 1). Biosyntetická dráha tokoferolů a tokotrienolů se liší v kroku, ve kterém je polyprenylový postranní řetězec navázán na HGA, podle toho, zda se váže PPP nebo GGPP. Kondenzací HGA a PPP (obrázek 3, reakce 2) vznikne 2-methyl-6-fytyl-1,4-benzochinon (MPBQ), meziproduct všech tokoferolů. Tato reakce je katalyzována enzymem fityltransferasou kyseliny homogentisové (HPT). V následujícím kroku dochází buď k přímé cyklizaci MPBQ za pomoci tokoferolcyklasy (TC) a tím k vytvoření  $\delta$ -tokoferolu (obrázek 3, reakce 4), nebo k methylaci MPBQ v poloze C-3 chromanového kruhu za pomoci MPBQ methyltransferasy na 2,3-dimethyl-6-fytyl-1,4-benzochinon (DMPBQ; obrázek 3, reakce 3). Ten je poté za pomoci TC cyklizován na  $\gamma$ -tokoferol (obrázek 3, reakce 4). Enzymatickou reakcí, katalyzovanou  $\gamma$ -tokoferol

ethyltrasferasou, jsou  $\delta$ - a  $\gamma$ -tokoferoly methylovány v poloze C-5 za vzniku  $\beta$ - a  $\alpha$ -tokoferolů (obrázek 3, reakce 5) (Mène-Saffrané & DellaPenna 2010; Fritsche et al. 2017).

Biosyntéza tokotrienolů zahrnuje reakce obdobné reakcím při biosyntéze tokoferolů. Jediný rozdíl je v tom, že během reakce č. 2 dojde k navázání nenasyceného GGPP, jakožto postranního řetězce, namísto PPP (Yang et al. 2011).



**Obrázek 3:** Biosyntéza vitamínu E (Mène-Saffrané & DellaPenna 2010)

## 2.1.4 Biodostupnost a nutriční význam vitaminů skupiny E pro člověka

### 2.1.4.1 Dostupnost v potravě

Člověk není schopný si sám vyrábět vitamin E v těle, a proto musí být přijímán potravou. Vitamin E dokážou syntetizovat, s pár výjimkami, pouze fotosyntetické organismy. Předpokládá se, že u těchto organismů vitamin E funguje jako ochranný antioxidant při klíčení, adaptaci na sucho a chlad. Všechny vyšší rostliny obsahují  $\alpha$ -tokoferol, a to převážně v listech a jiných zelených částech. Díky tomu, že je  $\alpha$ -tokoferol obsažen hlavně v chloroplastech rostlinných buněk (zatímco  $\beta$ -,  $\gamma$ - a  $\delta$ -vitaminy se obvykle nacházejí mimo tyto orgány), mívají zelené rostliny vyšší obsah vitaminu E než rostliny žluté (Combs & McClung 2017). Tokotrienoly se ve srovnání s tokoferoly v rostlinách objevují v mnohem menší míře. Nachází se převážně v semenech jednoděložných rostlin a jejich přítomnost ve fotosyntetických částech rostlin je velmi vzácná (Mène-Saffrané & DellaPenna 2010).

Nejaktivnější forma vitaminu E, tedy  $\alpha$ -tokoferol, je zároveň i nejpotřebnější forma vitaminu v lidské stravě. Obecně se vyskytuje ve vysokých koncentracích v rostlinných olejích, jako je slunečnicový, sójový, pšeničný, světlicový nebo řepkový olej, anebo v jiných zdrojích s vysokým obsahem tuků, jako jsou ořechy, různá semena nebo zrna. Potravinářský kanolový olej nebo řepkový olej typu 00 mají vysoce kvalitní nutriční složení podobné složení olivového oleje a tokoferoly jsou jednou z hlavních nutričně významných složek. Přes velký význam vitaminu E v lidské stravě dietetické studie ukazují, že doporučený denní příjem se často nepodaří dodržet. Proto je kladen důraz na zlepšení jeho množství a složení při šlechtění konzumovaných plodin (Fritsche et al. 2017).

Bez ohledu na to, jakou formu vitaminu E konzumujeme, dominantní zastoupení v tkáních má  $\alpha$ -tokoferol. Živočišné tkáně mají tendenci zadržovat malá množství  $\alpha$ -tokoferolu, přičemž nejvyšší hladiny se vyskytují v tukových tkáních. Tyto hladiny se liší podle velikosti obsahu přijímaného vitaminu v potravě. Protože se vitamin E přirozeně vyskytuje v tucích a olejích, lze očekávat, že při jejich snížené konzumaci se může snížit i příjem vitaminu E (Combs & McClung 2017).

Nejvýznamnějšími zdroji vitaminu E v lidské stravě jsou rostlinné oleje. Pšeničné, slunečnicové a světlicové oleje jsou bohaté na  $\alpha$ -tokoferol, zatímco oleje kukuřičné a sójové obsahují převážně  $\gamma$ -tokoferol. Některé rostlinné tkáně, zejména otruby a klíčky, obsahují vitamin E převážně ve formě tokotrienolů. Na rozdíl od tokoferolů, které existují pouze jako volné alkoholy, tokotrienoly mohou být v rostlinách přítomny i v esterifikované formě. Dominantní dietní formy vitaminu E jsou  $\alpha$ -tokoferol (v Evropě) a  $\gamma$ -tokoferol (v Americe) (Combs & McClung 2017). Další potravinové zdroje vitaminu E a jejich obsahy jsou znázorněny v tabulce 2.

Pšeničný olej je nejbohatším zdrojem  $\alpha$ -tokoferolu ze všech olejů, a to s koncentrací 0,9–1,3 mg/g, tj. cca 60 % z celkového obsahu tokoferolů. Největší množství tokotrienolů je přítomno v rýžovém otrubovém oleji, se zastoupením vyšším než 80 %, a poté v palmovém oleji, kde tvoří 70 % z celkového množství vitaminu E. V obilninách jsou tokotrienoly přítomny jen v malých koncentracích (Combs & McClung 2017).

**Tabulka 2:** Potravinové zdroje vitamínu E (Miyazawa et al. 2011)

	Tokotrienoly (mg/kg)				Tokoferoly (mg/kg)			
	$\alpha$ -	$\beta$ -	$\gamma$ -	$\delta$ -	$\alpha$ -	$\beta$ -	$\gamma$ -	$\delta$ -
Cereálie	0,61	1,22	1,11	0,11	4,78	1,36	6,52	1,07
Brambory	0,07	–	–	–	7,32	0,59	–	–
Ořechy a semena	0,76	0,10	0,38	0,20	42,83	1,21	91,28	2,08
Zelenina	0,20	–	–	–	10,2	0,23	5,94	0,05
Ovoce	0,19	–	0,03	0,03	6,16	0,07	1,21	–
Algea (mořská řasa)	0,09	0,03	–	–	10,44	0,11	–	–
Mořské plody	0,54	–	–	–	13,65	0,17	2,25	0,04
Maso	0,28	–	0,03	–	6,83	–	0,54	–
Vejce	–	–	–	–	18,11	–	1,67	–
Mléčné výrobky	0,51	–	–	–	6,26	–	0,29	0,02

Potraviny s obsahem rostlinných olejů (např. margaríny, pečené výrobky) se značně liší v obsahu vitamínu v důsledku rozdílných typů použitých olejů a teplotní stabilitě přítomných forem vitamínu E. Zpracování potravin může odstranit výrazné množství vitamínu. Ztráty mohou nastat v důsledku vystavení vitamínu peroxidovaným lipidům (vznikajícím při oxidačním žluknutí tuků) a jiným oxidačním podmínkám, jako je sušení za přítomnosti slunečního záření a vzduchu, přidávání organických kyselin, ozáření a konzervování. Během mletí obilovin může dojít ke snížení obsahu vitamínu E odstraněním otrub a zárodečných frakcí bohatých na tokoly. Některé potraviny (např. mléko a mléčné výrobky) vykazují výrazné sezónní výkyvy v obsahu vitamínu E, což má souvislost se změnami ve složení krmných dávek zvířat (příjem vitamínu E je největší při konzumaci čerstvého krmiva nebo jaderného krmiva s vyšším obsahem tuku) (Combs & McClung 2017).

Mimo jiné můžeme vitamin E konzumovat i v synteticky vyráběné formě, přidávaný jako aditivum do některých potravin, nebo jako doplněk stravy ve formě tablet (používá se forma  $\alpha$ -tokoferol). Synteticky vyráběný vitamin E je připravovaný ze směsi všech osmi diastereoisomerů, tj. vitamerů, častěji označovaných s předponou all-rac- v neesterifikovaných (all-rac- $\alpha$ -tokoferol) a esterifikovaných (all-rac- $\alpha$ -tokoferylacetát) formách. Další komerčně používané formy mohou být all-rac- $\alpha$ -tokoferylsukcinát a all-rac- $\alpha$ -tokoferyl polyethylenglykol-sukcinát (Combs & McClung 2017).

#### 2.1.4.2 Trávení, rozpustnost a absorpce vitamínu E

Primárním místem absorpce vitamínu E je střední část tenkého střeva (jejunum). Jeho absorpce ze střevního lumenu je závislá na procesech nezbytných pro trávení tuků a na absorpci do střevních epiteliálních buněk (enterocytů). Esterifikované formy vitamínu E jsou hydrolyzovány duodenální mukózní esterázou. Převažujícími absorbovanými formami jsou

formy volných alkoholů. Většina studií však neprokázala velké rozdíly v účinnosti absorpce acetátového esteru a forem volného alkoholu ani rozdíly v absorpci různých forem tokoferolů a tokotrienolů. Vyšší příjem vitamínu E, bez ohledu na jeho formu, vede k vyšším rychlostem absolutní absorpce, ale zároveň k absorpci s nižší účinností = frakční absorpce. Při nutričně významných příjmech byly zjištěny různé absorpční účinnosti (obecně 20–70 %), přičemž velká část požitého vitamínu E se objevila ve stolici (Zempleni et al. 2014; Combs & McClung 2017).

Vitamin E je, stejně jako jiné hydrofobní látky, absorbován pasivní difuzí závislou na micelární rozpustnosti, a tedy na přítomnosti žlučových solí a pankreatické šťávy. Je zřejmé, že střevní absorpce vitamínu E závisí na přiměřené absorpci lipidů. Proces vyžaduje přítomnost tuku v lumen střeva, jakož i sekreci pankreatických esteráz pro uvolňování volných mastných kyselin z potravinových triacylglycerolů, žlučových kyselin pro tvorbu smíšených micel a esteráz pro hydrolytické štěpení tokoferylacetátu. Vždy záleží na typu konzumované formy vitamínu. U jedinců, kteří nejsou schopni produkovat pankreatickou šťávu nebo žluč (např. pacienti s biliární obstrukcí, cholestatickým onemocněním jater, pankreatitidou, cystickou fibrózou) lze očekávat, že budou vykazovat zhoršenou absorpci vitamínu E, jakož i dalších živin rozpustných v tucích, které jsou závislé na micelární difuzi. Absorpce vitamínu E závislá na micelách zahrnuje potřebu esenciálního tuku, který usnadňuje tento proces. Tedy konzumace vitamínu E v doplňcích stravy není účinná, pokud není užíván zároveň s jídlem obsahujícím lipidy. Enterická absorpce  $\alpha$ -tokoferolu u lidí je narušena hladinami tuku v potravě nižšími než cca 10 % (tj. 21 % z celkového doporučeného denního energetického příjmu) (Combs & McClung 2017).

Vitamin E je ve střevě balen do micel, které jsou epitelem střevní stěny přijímány prostřednictvím receptorů. Enterocyty využívají pro vstřebávání vitamínu E dvě cesty. Buď je vitamin E zabudován do vznikajících chylomikronů, což je hlavní cesta absorpce vitamínu E, anebo do HDL (lipoprotein s vysokou hustotou) pomocí ATP-vazebného transportéru. Protože HDL snadno přenáší vitamin E i na jiné lipoproteiny, je nově absorbovaný vitamin E distribuován do všech cirkulujících lipoproteinů. Navázaný na chylomikrony nebo na HDL vstupuje vitamin E do krevního řečiště. Prostup  $\alpha$ -tokoferolu do krve vykazuje dominanci ve srovnání s ostatními typy vitamínu E (Anwar et al. 2007; Combs & McClung 2017; Galli et al. 2017).

V krvi vitamin E přesně sleduje transportní cestu lipidů a je transportován do depotního tuku, svalů, dělohy, varlat, nadledvin nebo do jater. V nejvyšších koncentracích se v lidských tkáních nachází  $\alpha$ -tokoferol, následuje  $\gamma$ -tokoferol, zatímco tokotrienoly se v tkáních obvykle nenalézají vůbec. V játrech prochází vitamin E několika třídícími kroky, které směřují různé formy vitamínu E buď ke katabolické cestě nebo k navázání na lipoproteiny prostřednictvím různých mechanismů.  $\alpha$ -Tokoferolový transportní protein ( $\alpha$ -TTP), jaterní cytosolický protein usnadňující přesun  $\alpha$ -tokoferolu do játry sekretovaných plasmatických lipoproteinů, upřednostňuje mezi různými formami vitamínu E právě  $\alpha$ -tokoferol. Chrání ho před nadměrným katabolismem a vylučováním. Příčinou upřednostňování  $\alpha$ -tokoferolu jsou rozdílné relativní vazebné afinity  $\alpha$ -TTP pro různé formy tokoferolů ( $\alpha$ -tokoferol vykazuje 100% afinitu,  $\beta$ -tokoferol 38%,  $\gamma$ -tokoferol 9% a  $\delta$ -tokoferol 2%) (Zempleni et al. 2014; Galli

et al. 2017). Játry vyloučený vitamin E je do plasmy distribuován v lipoproteinech s velmi nízkou hustotou (VLDL). Na rozdíl od jiných vitaminů rozpustných v tucích, které mají specifické plasmatické transportní proteiny, se vitamin E v plasmě přenáší nespecificky v lipoproteinech. Jeho koncentrace v plasmě převážně závisí právě na zmíněné sekreci  $\alpha$ -tokoferolu z jater (Zempleni et al. 2014).

Více než 90 %  $\alpha$ -tokoferolu lidského těla se nachází v tukové tkáni. Analýza obsahu  $\alpha$ -tokoferolu v tukové tkáni je proto velmi užitečným odhadem dlouhodobého stavu vitamínu E. Za určitých metabolických podmínek, jako je například při těžkém popálení kůže, tuková tkáň může uvolňovat a poskytovat vitamin E vzhledem k jeho zvýšeným nárokům (Zempleni et al. 2014).

Metabolizovaný vitamin E může být, podobně jako xenobiotika (cizorodé látky v organismu), sulfatován nebo glukuronizován a poté vyloučen močí nebo žlučí. Hlavní cestou vylučování požitého nemetabolizovaného vitamínu E je vylučování stolicí. Touto cestou je vyloučeno asi 60-70 % přijatého vitamínu. Na rozdíl od jiných druhů vitaminů je vitamin E v těle uchováván jen po krátkou dobu, stejně jako vitamin B a C. Jeho množství i aktivita se vyjadřuje v mezinárodních jednotkách I.U., kdy jedna I.U. odpovídá 1 mg vitamínu (Mindell 2004).

### **2.1.4.3 Vliv na fyziologické procesy v těle člověka**

Různé typy vitamínu E mají odlišné účinky na lidský organismus.  $\alpha$ -Tokoferol má, kromě antioxidačního účinku (viz kapitola 3.1.4.3.1), vliv i na jiné procesy v organismu. Ovlivňuje například signální transdukcii, transkripční regulaci, dráhy apoptózy (buněčné smrti) a geny spojené s regulací buněčného cyklu u T-lymfocytů ve slezině. Také může potlačovat cholesterogenesi (syntézu cholesterolu). Tokoferoly  $\alpha$ - a  $\gamma$ -, lišící se pouze methylovou skupinou na chromanovém kruhu, mají v zásadě stejné antioxidační vlastnosti, ale na každý reagují přednostně jiné geny.  $\gamma$ -tokoferol oproti  $\alpha$ -tokoferolu vykazuje protizánětlivé, protinádorové a další účinky.  $\beta$ -tokoferol má také podobné antioxidační vlastnosti, ale je 10× méně aktivní než  $\alpha$ -tokoferol v inhibici aktivity proteinkinasy C, neinhibuje buněčnou proliferaci (bujení buněk) ani genovou expresi.  $\delta$ -Tokoferol je odpovědný za protizánětlivé reakce podněcované reaktivními druhy kyslíku, zabraňuje vývoji rakoviny prsu závislé na hormonech, karcinogenesi tlustého střeva, růstu plicních tumorů a nádorových buněk při rakovině prostaty. Dále má antiangiogenní účinky (potlačování tvorby nádorových cév) a snižuje agregaci (hromadění) tuků v organismu (Galli et al. 2017; Azzi 2019).

Co se týče tokotrienolů, ty prokazují hlavně protirakovinné účinky (většinou v důsledku potlačení angiogeneze), pomáhají proti vzniku kardiovaskulárních chorob a proti neurodegenerativním onemocněním (zpoždění stárnutí mozku, snížení rizika rozvoje Alzheimerovy choroby).  $\alpha$ -Tokotrienol působí především neuroprotektivně, zatímco  $\delta$ - a  $\gamma$ -tokotrienoly protirakovinně (Galli et al. 2017; Azzi 2019). Tokotrienoly se také využívají v potravinářském průmyslu, kosmetické a klinické dermatologii, a to díky jejich fotoprotektivním a antioxidačním vlastnostem (Trela & Szymańska 2019).

Protirakovinné vlastnosti vitamínu E zahrnují různé procesy. Zachytává volné radikály, včetně reaktivních molekul dusíkatých látek, které způsobují mutace v řetězcích deoxyribonukleové

kyseliny (DNA) a maligní (zhoubné) změny v buňkách. Snižuje funkci cyklinů, proteinů řídících průběh buněčného cyklu, čímž zastavuje vývoj rakovinných buněk a zabraňuje tak jejich bujení. Rovněž cíleně spouští řadu drah apoptózy indukujících smrt nádorových buněk a vykazuje antiangiogenní účinek, čímž zabraňuje nádorovým buňkám v potřebném příjmu živin. Dalším protirakovinným procesem je zastavení aktivace proteinkinasy B (PKB) (enzym katalyzující mnoho buněčných procesů důležitých pro přežití buňky, jako je metabolismus glukosy, fosforylace aminokyselin, buněčná proliferace, transkripce a migrace buněk) přitahováním PKB do stejné oblasti buňky, kde byl vitamin E absorbován, tedy v buněčné membráně bohaté na tuk. Tam je zahájena chemická reakce inaktivace PKB, což znemožní udržet rakovinné buňky naživu (Rizvi et al. 2014; Zhou et al. 2019).

Jeden z dalších významných účinků vitamínu E je zvyšování uspořádanosti lipidových vrstev membrán, což způsobuje těsnější strukturu membrány a tím i větší stabilitu buňky. Vitamin E je nezbytný pro udržení správné homeostázy kosterního svalstva. Díky zásobování myocytů (svalových buněk)  $\alpha$ -tokoferolem jsou snadněji a účinněji opravovány jejich plasmatické membrány. Toho je zapotřebí proto, že membránové fosfolipidy jsou významnými cíli oxidantů a vitamin E (především  $\alpha$ -tokoferol), poté co se spojí s membránou, dokáže účinně bránit jejich účinku peroxidace lipidů. Naopak, v nepřítomnosti  $\alpha$ -tokoferolového zásobení, působení oxidantů na buňky výrazně inhibuje jejich schopnost opravy. Vitamin E tedy podporuje membránovou opravu tím, že brání tvorbě oxidovaných fosfolipidů, které by teoreticky mohly zasahovat do správných fúzních membránových procesů (Rizvi et al. 2014).

Také bylo zjištěno, že zvýšená koncentrace  $\alpha$ -tokoferolu v endoteliálních buňkách inhibuje agregaci krevních destiček – trombocytů a uvolňuje prostacyklin z endotelu (Rizvi et al. 2014). Prostacyklin je látka ze skupiny prostaglandinů tvořená cévními stěnami, která rozšiřuje cévy, brání shlukování krevních destiček, jejich přilnutí ke stěnám cév a tím i srážení krve včetně vzniku trombózy. Můžeme tedy říci, že  $\alpha$ -tokoferol má příznivý vliv na srážení a průtok krve (Zoppo 2007; Rizvi et al. 2014).

Kardiovaskulární komplikace vznikají v zásadě v důsledku oxidace LDL přítomných v těle a následného zánětu. Tokoferoly zlepšují kardiovaskulární funkce svou antioxidační funkcí a také zvýšením aktivity enzymu syntasy oxidu dusnatého (NO), který produkuje NO způsobující vazodilataci (rozšíření cév). Zachycují molekuly reaktivních dusíkatých látek, čímž se zlepšují endoteliální funkce. Bylo zjištěno, že doplňováním  $\gamma$ -tokoferolu 100 mg denně u lidí vede ke snížení několika rizikových faktorů pro průtok krve cévami, jako je agregace trombocytů nebo cholesterolu. Kromě tokoferolů mají na cévní systém vliv také tokotrienoly, které inhibují biosyntézu cholesterolu potlačením funkce enzymu 3-hydroxy-3-methylglutaryl-CoA (HMG-CoA) reduktasy, což má za následek, že jaterní buňky produkují méně cholesterolu (Rizvi et al. 2014).

Vitamin E vykazuje účinky rovněž v souvislosti s imunitním systémem. Stimuluje obranyschopnost těla, zvyšuje humorální a buněčné imunitní reakce a zvyšuje fagocytární funkce. Má výrazný účinek u infekčních nemocí, kterým se tělo brání imunitní fagocytózou. Bylo zjištěno, že zvýšený denní příjem vitamínu E zlepšuje protilátkovou odpověď organismu na různé vakcíny a také zvyšuje odolnost vůči virovým onemocněním (Rizvi et al. 2014).

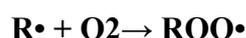
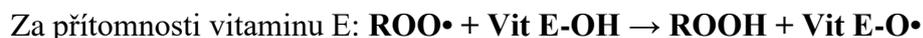
### 2.1.4.3.1 Antioxidační schopnost vitamínu E

Vitamin E je účinný „vychytávač“ volných kyslíkových radikálů, čímž chrání primárně polynenasycené mastné kyseliny (PUFA) ve fosfolipidech biologických membrán a v plasmatických lipoproteinech (Zempleni et al. 2014).

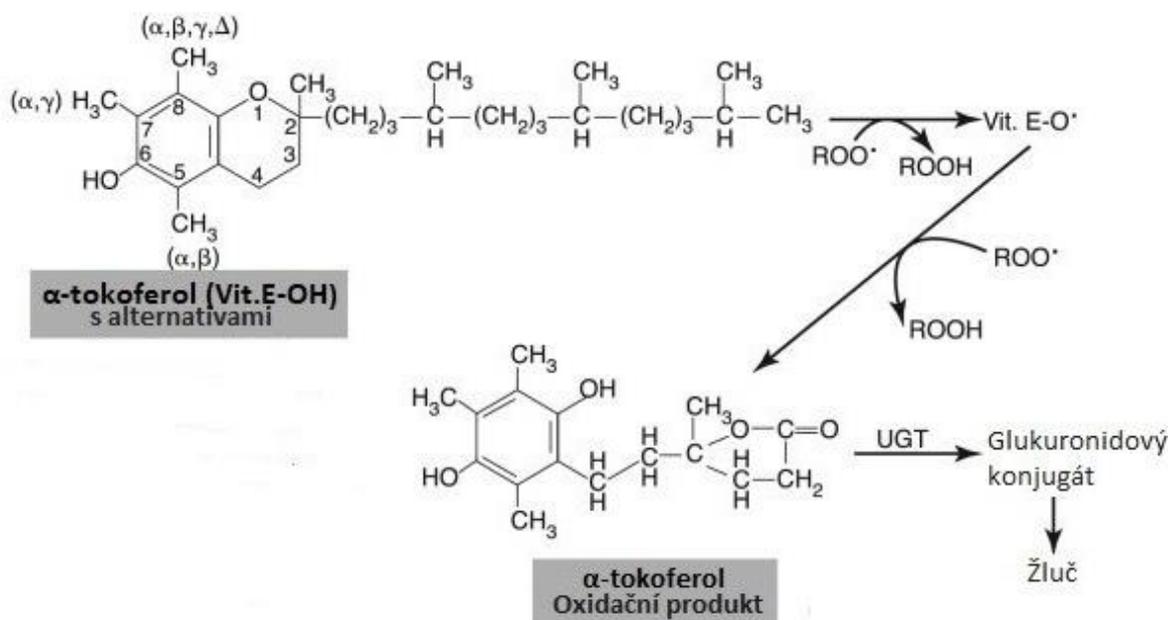
Tokoferoly jsou jedním z nejcennějších antioxidantů díky jejich pozoruhodnému chemickému způsobu působení. Interagují s polynenasycenými acylovými skupinami a chrání polynenasycené mastné kyseliny před peroxidací lipidů odstraňováním lipidových peroxidových radikálů a potlačováním reaktivních forem kyslíku produkovaných např. fotosystémem II a během peroxidace lipidů v membráně. Během tohoto procesu tokoferoly darují svůj fenolický vodík peroxylovým radikálům, čímž neutralizují radikál, ukončují autokatalytické procesy peroxidace lipidů a chrání buněčné membrány. Výsledné tokoferolové radikály jsou stabilnější a méně reaktivní (Fritsche et al. 2017).

Další důležitou vlastností vzniklých tokoferolových radikálů je schopnost, díky které se dovedou zpětně převést na odpovídající tokoferol reakcí s jinými antioxidanty, jako je askorbát nebo glutathion. To umožňuje každému tokoferolu účastnit se mnoha antioxidačních reakcí před tím, než je degradován. Tento jev, kdy je vitamin E obnovován jinými antioxidanty, je také nazýván jako „recyklace vitamínu E“. Souhrnně tyto vlastnosti činí tokoferoly jako antioxidanty vysoce účinné (Fritsche et al. 2017).

Když jsou lipidové hydroperoxydy oxidovány na peroxylové radikály ( $\text{ROO}^\bullet$ ), reagují radikály 1000× rychleji s vitamínem E (Vit E-OH) než s PUFA (RH). Chromanová hydroxylová skupina reaguje s peroxylovým radikálem za vzniku hydroperoxidu a  $\alpha$ -tokoferoxylového (chromanoxylového) radikálu (Vit E-O $\bullet$ ):



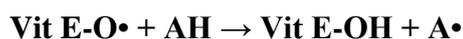
Touto schopností přenášet vodík fenolové skupiny na volný peroxylový radikál peroxidované polynenasycené mastné kyseliny působí vitamin E jako přerušovač řetězové reakce peroxidace lipidů (obrázek 4).  $\alpha$ -Tokoferoxylový radikál může následně reagovat s dalším peroxylovým radikálem za vzniku  $\alpha$ -tokoferyl chinonu, zbaveného nepárového elektronu, který může být po redukci na hydrochinon konjugován s glukuronidem. Glukuronid může být vylučován žlučí nebo dále degradován v ledvinách na kyselinu  $\alpha$ -tokoferolovou, která je vyloučena močí. Byly také popsány další oxidační produkty, včetně dimerů, trimerů a dalších (Zempleni et al. 2014).



**Obrázek 4:** Antioxidační funkce vitamínu E při peroxidaci lipidů (Engelking 2015)

Kromě vychytávání kyslíkových a peroxylových radikálů jsou tokoferoly schopné deaktivovat vysoce reaktivní singletový kyslík ( $^1\text{O}_2$ ), který mimo jiné oxiduje membránové lipidy, proteiny, aminokyseliny, nukleové kyseliny, nukleotidy a sacharidy. Chemická reakce tokoferolů s  $^1\text{O}_2$  vede k odpovídajícím tokoferolovým chinonům (a dalším derivátům), z nichž některé se ukázaly jako silné antioxidanty (Fritsche et al. 2017).

Jak už bylo psáno, vitamin E má také schopnost interakce s jinými antioxidanty, aby si zpět zajistil neoxidovanou formu.  $\alpha$ -Tokoferoxylový radikál (Vit E-O•) reaguje s vitaminem C (nebo s jinými redukčními činidly sloužícími jako donory vodíku – AH), oxiduje další antioxidant a sám přechází zpět v redukovanou formu Vit E-OH.



Protože  $\alpha$ -tokoferoxylový radikál lze snadno redukovat na  $\alpha$ -tokoferol, je množství recyklovaného vitamínu E pravděpodobně mnohem větší než množství, které je dále oxidováno (Zempleni et al. 2014).

#### 2.1.4.4 Doporučení pro příjem vitamínu E

Vitamin E je pro člověka nezbytnou mikroživinou a při dosažení jeho optimálního příjmu se předpokládá zvýšení příznivých zdravotních výsledků. Doporučení pro příjem vitamínu E v potravě jsou stanovena v mnoha zemích po celém světě a vztahují se k jeho důležité úloze jako antioxidantu k zachování integrity buněčných membrán. Současná doporučení týkající se příjmu vitamínu E se v různých zemích liší v závislosti na věku osoby v rozmezí 3 až 15 mg/den. V USA je doporučený denní příjem (DDP) pro vitamin E 15 mg  $\alpha$ -tokoferolu u mužů i žen s minimálním věkem 14 let. Evropský úřad pro bezpečnost potravin (EFSA) nahradil DDP pro vitamin E nově definovaným přiměřeným příjmem (PP), kde je doporučeno množství 13 mg/den pro muže, 11 mg/den pro ženy a 5–13 mg/den pro kojence/děti

(v závislosti na věku). Tento přístup, založený na hodnocení příjmu vitamínu v populacích EU bez zjevného nedostatku  $\alpha$ -tokoferolu, však nezohledňuje různé požadavky na vitamín E v závislosti na věku, na relativním množství tělesného tuku u žen nebo na skutečnosti, že jiné formy vitamínu E, než je  $\alpha$ -tokoferol nejsou tak dobře rozeznávány pomocí  $\alpha$ -TTP. Další typ hodnocení při určování optimálního příjmu a stavu vitamínů vychází z jejich koncentrace v séru. Koncentrace  $\alpha$ -tokoferolu v séru 30  $\mu\text{mol/l}$  nebo vyšší má prokazatelné příznivé účinky na lidské zdraví a koncentrace pod 12  $\mu\text{mol/l}$  séra se označuje jako deficit (Galli et al. 2017).

Vitamín E je silně závislý na vitamínu C, vitamínu B3, selenu a glutathionu. Strava s vysokým obsahem vitamínu E nemůže mít optimální účinek, pokud není také bohatá na potraviny, které poskytují tyto další živiny. Interakce byly také nalezeny mezi thioley, tokoferoly a jinými sloučeninami, které zvyšují účinnost buněčných antioxidačních obranných systémů (Rizvi et al. 2014).

#### **2.1.4.5 Projevy nedostatku / nadbytku vitamínu E**

Ačkoli je vitamín E přítomen v mnoha jedlých rostlinných produktech, jeho příjem je obecně nízký ve všech regionech po celém světě. Podle nedávného systematického přehledu je příjem  $\alpha$ -tokoferolu a jiných forem vitamínu E u velké části populace nižší, než je DDP a nutriční průzkumy prováděné v chudých zemích ukázaly, že významná část populace vykazuje až velmi závažné nedostatky, způsobující převážně u těhotných žen zdravotní problémy. Ukázalo se například, že 23 % metropolitní populace v Soulu vykazuje plasmatické koncentrace  $\alpha$ -tokoferolu pod 12  $\mu\text{mol/l}$  séra. Dalším příkladem je venkovský Nepál, kde asi 1/3 těhotných žen trpí závažným nedostatkem vitamínu E ( $< 10 \mu\text{mol/l}$ ), což může mít negativní vliv na plod, a situace je ještě horší v Bangladéši, kde nedostatkem trpí téměř 2/3 žen v časném těhotenství ( $< 9,3 \mu\text{mol/l}$ ). (Galli et al. 2017; Hofius & Sonnewald 2003; Shamim et al. 2015).

Bylo prokázáno, že nízká koncentrace plasmatického vitamínu E je silně spojena s potratem během prvního trimestru těhotenství ženy. V souvislosti s tím bylo zjištěno, že doplňování stravy vitamínem E snížilo potratovost těhotných žen přibližně o 50 %. Souhrnně tyto výsledky ukazují na důležitost adekvátního příjmu vitamínu E pro správnou reprodukci. Klinické příznaky hypovitaminosy se projevují také například u dětí s nízkou porodní váhou, u kterých se může nedostatek vitamínu projevit neurologickým onemocněním, svalovou dystrofií, hemolytickou anémií nebo krvácením. Nedostatek vitamínu E ve stravě také může vést ke zvýšenému poškození lipidů peroxidací, neboť v těle není dostatečné množství antioxidačních látek, které tomu zabraňují, a také k inhibici protizánětlivé reakce organismu na infekci. Užíváním výživových doplňků vitamínu E v terapeutických dávkách (tj. 100 až 1 000 mezinárodních jednotek, I.U.) můžeme předejít nepříznivým vlivům hypovitaminosy na lidské zdraví nebo je i částečně léčit. Tyto hladiny vitamínu E však výrazně překračují doporučené denní dávky ( $\sim 40 \text{ I.U.}$ ) a nelze je získat z běžné lidské rostlinné stravy. Proto je v současné době zaměřeno velké úsilí na identifikaci genů zapojených do biosyntézy tokoferolů za účelem zlepšení hladin vitamínu E v kulturách rostlin metabolickým inženýrstvím (Hofius & Sonnewald 2003; Fajfrová & Pavlík 2013; Shamim et al. 2015; Galli et al. 2017; Mène-Saffrané 2018). Pouze  $\alpha$ -tokoferol, žádný jiný typ vitamínu E, dokáže zvýšeným příjmem ochránit tělo člověka před deficitem vitamínu E (Azzi 2019).

I nadměrný přísun vitamínu E však u některých osob může způsobovat zdravotní problémy. Studie *in vitro* prováděné na lidských buněčných kulturách a zvířecích modelech naznačují, že příliš vysoký příjem vitamínu E může zvýšit jaterní produkci cytochromu P450, enzymatického systému zodpovědného za přeměny cizorodých látek (například léčiv) v organismu. Větší produkce cytochromu P450 indukovaná vitamínem E by mohla potenciálně snížit účinnost jakéhokoli léku metabolizovaného právě tímto cytochromem. Mezi další problémy týkající se hypervitaminosy patří nepříznivý účinek  $\alpha$ -tokoferolu na krevní tlak u vysoce rizikových populací – starých nebo nemocných lidí (Clarke 2008).

## 2.2 Vitamin E v cereáliích

Rostliny a rostlinná strava obsahují značné množství prospěšných biologicky aktivních látek. Mezi tyto látky patří mimo jiné i přírodní antioxidanty, jako jsou tokoly. Vitamin E zastává v rostlinách mnoho důležitých funkcí jak pro samotné rostliny, tak později i pro člověka v rostlinné stravě (Asensi-Fabado & Munné-Bosch 2010; Trela & Szymańska 2019).

Obiloviny představují z ekonomického a agronomického hlediska nejdůležitější skupinu plodin pro rostlinnou výrobu. Jsou konzumovány ve velkém měřítku a jsou cenným zdrojem živin v lidské stravě (Čurná & Lacko-Bartošová 2017). Celosvětově se konzumace obilovin odhaduje na 60–70 % z celkové stravy lidí (Bajerová et al. 2016).

### 2.2.1 Výskyt a funkce v rostlinách

Vitamin E je syntetizován převážně fotosyntetickými organismy, jako jsou rostliny, řasy a sinice. Obsahy a formy tokolů jsou u jednotlivých druhů rostlin a jejich tkání značně odlišné. Například extrémně nízké hladiny jsou v hlízách brambor a velmi vysoké hladiny nalezneme v olejnatých semenech. Rostliny hromadí tokoly hlavně v olejnatých semenech a plodech nebo v mladých tkáních, které podléhají intenzivnímu dělení buněk. Listy akumulují jen nízké hladiny tokolů, zatímco semena jich dokáží nahromadit 10× až 20× více (Hofius & Sonnewald 2003; Trela & Szymańska 2019). Celkový obsah vitamínu E u rostlin a zastoupení jeho jednotlivých forem se za různých podmínek silně mění. Vliv má například oxidační stres rostlin, úroveň a délka světla, zasolení půdy, sucho nebo nízké teploty. Také růst a vývoj rostlin ovlivňují koncentraci a zastoupení tokolů, jež se mění například během stárnutí, přeměny chloroplastů na chromoplasty, zrání ovoce a vývoje semen (Fritsche et al. 2017).

Z tokoferolů zastává  $\alpha$ -tokoferol převládající formu ve fotosyntetických tkáních, konkrétněji je lokalizován hlavně v plastidech. Mezi vnitřní chloroplastovou obálkou (kde se vyskytuje několik enzymů biosyntézy vitamínu E), granálními thylakoidy (kde působí  $\alpha$ -tokoferol jako antioxidant a chrání fotosyntetický aparát) a plastoglobuli (kde se  $\alpha$ -tokoferol akumuluje), dochází k nepřetržité výměně vitamínu E.  $\alpha$ -Tokoferol se v rostlině hromadí v reakci na řadu environmentálních stresů. Obohacení chloroplastových membrán o tokoferoly pravděpodobně souvisí převážně s jejich schopností potlačit nebo zachytit reaktivní kyslíkové formy a lipidové peroxidové radikály. Tímto způsobem může být fotosyntetický proces rostlin chráněn před kyslíkovou toxicitou a peroxidací lipidů (Hofius & Sonnewald 2003; Muñoz & Munné-Bosch 2019; Trela & Szymańska 2019).

Ačkoli jsou tokoly spojovány především s fotosyntetickými tkáněmi, k hromadění tokoferolů a tokotrienolů dochází i v několika nefotosyntetických tkáních. V těchto nefotosyntetických orgánech bylo identifikováno několik genů souvisejících s vitamínem E, a to zejména v semenech, kde byla popsána téměř celá jeho biosyntetická dráha. Stále však existují určité otázky týkající se toho, jak mohou být formy vitamínu E nebo jejich prekurzory syntetizovány v jiných než chloroplastových tkáních a několik pokusů o biofortifikaci vitamínu E v těchto tkáních selhalo kvůli fyziologickým omezením. V nefotosyntetických tkáních často převládá zastoupení  $\gamma$ -tokoferolu, který se podílí například na prevenci autooxidace polyneenasycených

mastných kyselin. Tokotrienoly jsou méně rozšířené než tokoferoly a vyskytují se většinou v semenech konkrétních druhů rostlin, a to především u rostlin jednoděložných. V některých tkáních, např. v endospermu semen pšenice nebo rýže, mohou tokotrienoly tvořit až polovinu celkového množství vitamínu E (Hofius & Sonnwald 2003; Muñoz & Munné-Bosch 2019; Trela & Szymańska 2019).

Amfipatická molekulární struktura tokoferolů a tokotrienolů je ideální k fúzi v lipidových dvojvrstvách na rozhraní voda-lipid, kde hrají tokoly velmi důležitou roli při udržování integrity a stability membrány. Jak už bylo řečeno, jednou z hlavních funkcí vitamínu E u rostlin je jeho ochranný účinek proti peroxidaci lipidů v membráně darováním protonu z hydroxyly jeho chromanolového kruhu (viz kapitola 3.1.4.3.1 Antioxidační schopnost vitamínu E). Vitamin E touto reakcí dokáže zamezit šíření peroxidace lipidů. Bez této reakce by lipidové peroxylové radikály mohly velmi rychle oxidovat i jiné mastné kyseliny (Muñoz & Munné-Bosch 2019).

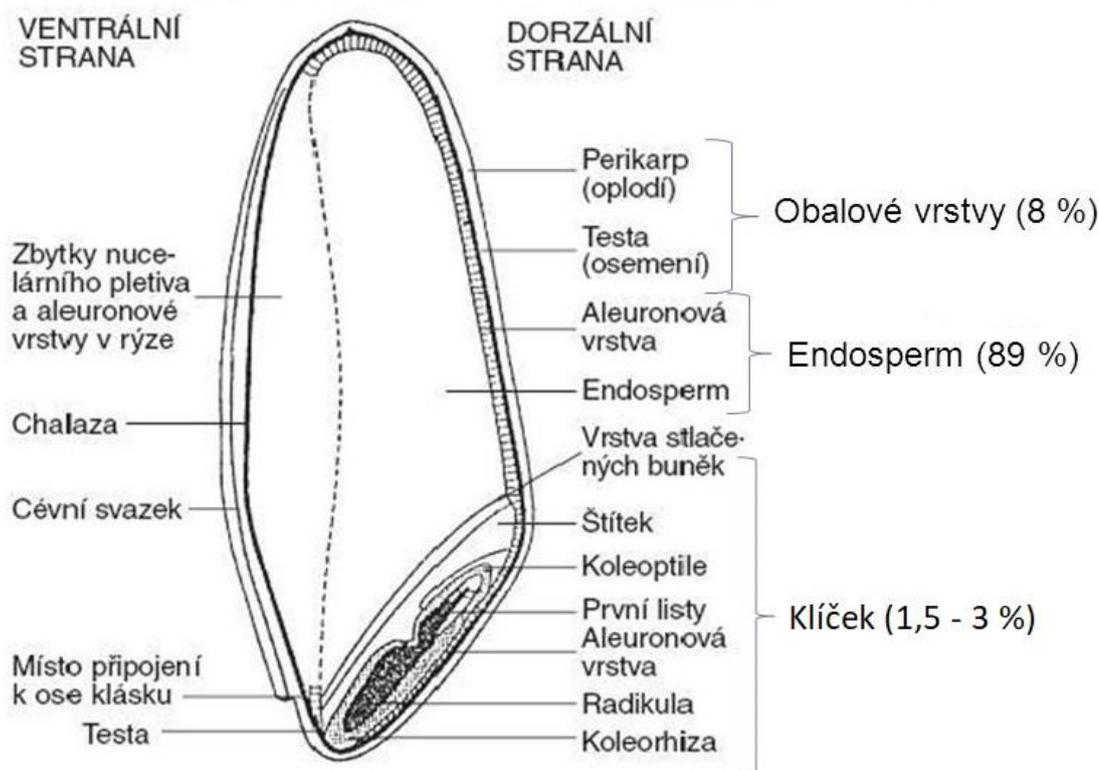
Další funkcí, která souvisí s místem ukládání vitamínu E v rostlinách, je detekování a signalizace stresu. Různé stresové faktory z vnějšího prostředí jsou v rostlině signalizovány pomocí intracelulární komunikace mezi chloroplastem a jádrem buněk prostřednictvím signálů vycházejících z chloroplastů. Aktivní obrana rostlin, která omezuje negativní dopad stresorů, vede ke spuštění řetězce změn, označovaných jako stresové reakce. Tato schopnost může být spojena s jeho rolí ve fotoprotekci rostlin a v zabraňování peroxidaci lipidů v tylakoidních membránách (Ehrenbergerová et al. 2011; Muñoz & Munné-Bosch 2019).

## **2.2.2 Obsah vitamínu E obilovinách**

Obiloviny patří mezi krytosemenné jednoděložné rostliny z řádu lipnicovitých (*Poaceae*). Vitamin E, ve formě tokoferolů a tokotrienolů, se vyskytuje v obilovinách v mírných hladinách, mnohem nižších, než jsou například u zeleniny nebo jiných rostlin. Jeho zastoupení v obilovinách je však velmi důležité, protože se konzumují celosvětově ve velmi vysokých měřících (Badea et al. 2018).

### **2.2.2.1 Distribuce v zrně**

V obilných zrnech jsou tokoferoly přítomny hlavně v zárodečných částech – v klíčku, zatímco tokotrienoly jsou přítomny převážně ve frakcích perikarpu (oplodí), v aleuronové vrstvě a endospermu (obrázek 5) (Ehrenbergerová et al. 2011; Lachman et al. 2018), kde se hromadí během vývoje zrna. Úroveň akumulace tokolů v zrně je ovlivněna genotypem, prostředím, agronomickými vstupy a vzájemnou interakcí těchto faktorů (Tiwari & Cummins 2009).



**Obrázek 5:** Stavba obilného zrna (Kosař & Procházka 2000)

### 2.2.2.2 Zastoupení vitamínu E v různých druzích cereálií

V obilovinách patří tokoly (spolu s karotenoidy) mezi hlavní lipofilní sekundární metabolity s antioxidačními vlastnostmi. Jejich největší koncentrace najdeme v zrnech. Tokolické složení obilovin zahrnuje tokoferoly ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\delta$ - a  $\gamma$ -tokoferol) a tokotrienoly ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\delta$ - a  $\gamma$ -tokotrienol). Obiloviny většinou obsahují všech osm isomerů vitamínu E, přičemž  $\alpha$ -formy jsou dominantní. U malozrnných obilovin, jako je oves, ječmen a některé druhy pšenice, jsou tokotrienoly dominantní formou vitamínu E a jejich koncentrace se pohybují mezi 40 a 60 mg/kg suché hmotnosti (SH), v závislosti na druhu a odrůdě obilovin (Ehrenbergerová et al. 2011; Lachman et al. 2018). Obsahy tokolů v obilovinách se při zkoumání v různých letech často velmi liší, což je nejspíše zapříčiněno proměnlivými nejednotnými podmínkami pěstování, rozdíly v genomu jednotlivých výsadeb nebo vlivy environmentálními.

Na světě existuje mnoho druhů obilovin s vyššími či nižšími obsahy vitamínu E. Kromě druhů vypsanych podrobněji v této kapitole se tokoly vyskytují také například v kukuřici, prosu nebo rýži (Bajerová et al. 2016).

#### 2.2.2.2.1 Pšenice

Rod pšenice (*Triticum*) zahrnuje velký počet druhů. Mezi nejvýznamnější druhy pro zemědělství a potravinářství patří pšenice setá (*Triticum aestivum*) a pšenice tvrdá (*Triticum durum*) (Cirusová 2017).

#### Pšenice jednozrnka

Pšenice jednozrnka (*Triticum monococcum*) (obrázek 6), diploidní pšenice se 14 chromosomy ( $2n = 14$ ) (Pazderů et al. 2018), má obsah vitamínu E kolem 78 až 84,5 mg/kg SH (Hidalgo et al. 2006; Hidalgo & Brandolini 2010). Nejhojněji zastoupeným tokolem je  $\beta$ -tokotrienol následovaný  $\alpha$ -tokotrienolem,  $\alpha$ -tokoferolem a  $\beta$ -tokoferolem (Lachman et al. 2018).

### Pšenice dvouzrnka

U pšenice dvouzrnky (*Triticum dicoccum*) (obrázek 7), tetraploidní pšenice s 28 chromosomy ( $2n = 28$ ) (Pazderů et al. 2018), může být obsah vitamínu E podle studie Čurné a Lacko-Bartošové (2017) až 70 mg/kg SH. Zde převažuje forma  $\alpha$ -tokotrienol následovaná  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokoferolem (Lachman et al. 2013).



**Obrázek 6:** Pšenice jednozrnka (Riplinger 2012)



**Obrázek 7:** Pšenice dvouzrnka (Hermansen 2014)

### Pšenice tvrdá

Pšenice tvrdá (*Triticum durum*) (obrázek 8) patří mezi dvě světově nejdůležitější obilniny (Cirusová 2017). Pěstuje se asi na 10 % z celkových světových pšeničných oblastí, většinou v západní Asii, severní a východní Africe, severoamerických pláních, Indii nebo ve východní a středomořské Evropě (Kabbaj et al. 2017). Jde o tetraploidní pšenici s 28 chromosomy ( $2n = 28$ ) (Kabbaj et al. 2017). Tokoly jsou zde zastoupeny v rozsahu mezi 33–61 mg/kg SH (Hidalgo & Brandolini 2010; Lachman et al. 2018). Převažující formou vitamínu E je zde  $\beta$ -tokotrienol, poté  $\alpha$ -tokoferol a  $\alpha$ -tokotrienol (Irakli et al. 2011).



**Obrázek 8:** Pšenice tvrdá (Moudrý et al. 2011)

### Pšenice setá

Nejhojněji pěstovanou pšenicí jak v České republice, tak i ve světě, je pšenice setá (*Triticum aestivum*) (obrázek 9). Je hojně využívána v potravinářství a v krmivech pro hospodářská zvířata (Zelenka 2014). Jedná se o hexaploidní pšenici se 42 chromosomy ( $2n = 42$ ) (Pazderů et al. 2018). Obsah tokolů většinou kolísá mezi 63 a 74 mg/kg SH (Hejtmánková et al. 2010; Hidalgo & Brandolini 2010), ale například v roce 2018 bylo naměřeno Lachmanem et al. pouze 36,85 mg/kg SH. Převažujícími tokoly jsou zde  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokoferol (Lachman et al. 2013).



**Obrázek 9:** Pšenice setá (Harald 2015)

### **Pšenice špalda**

Pšenice špalda (*Triticum spelta*) (obrázek 10) je hexaploidní druh pšenice se 42 chromosomy ( $2n = 42$ ). Od ostatních druhů pšenic se liší tím, že její obilky jsou pluchaté (Pazderů et al. 2018). Je pěstována na krmění hospodářských zvířat a také je využívána v pekárenství a pro výrobu cereálních výrobků. Ačkoli byla ve středověku jednou z nejdůležitějších plodin v Evropě, nyní je do značné míry nahrazena pšenicí setou. Špalda je obecně méně náročná na hnojení než ostatní pšenice, a proto se stala populární plodinou pro moderní ekologické zemědělství (Petruzzello 2019).

V pšenici špaldě se obsah tokolů pohybuje v rozmezí od  $28,9 \pm 3,47$  mg/kg (Hussain et al. 2012) až po  $41,7 \pm 3,0$  mg/kg SH. Dominantní formou je zde  $\beta$ -tokotrienol zaujímající 55–60 % celkových tokolů, následovaný  $\alpha$ -tokoferolem, který zaujímá 21–27 % (Ziegler et al. 2016).



**Obrázek 10:** Pšenice špalda (Moudrý et al. 2011)

### **Barevné odrůdy pšenice**

Jak už bylo řečeno, obiloviny obsahují množství různých biologicky aktivních látek. Mezi ně patří i látky zvané anthokyany. Anthokyany jsou fenolové látky řadící se mezi flavonoidy, které udávají barvu plodů, květů, pletiv a listů rostlin. Jsou obsaženy ve vakuolách rostlinných buněk a tvoří různé barevné odstíny od oranžové po červenou, fialovou a modrou. Některé z těchto anthokyanů mohou výrazně ovlivnit i zbarvení zrna obilovin, což je zřejmé u některých druhů pšenice. Nejčastěji se jedná o purpurové a modré zbarvení. Purpurová barva je způsobena anthokyanem kyanidinem přítomným ve vrstvě perikarpu a modrá barva delfinidinem v aleuronové vrstvě. Za žlutou barvu endospermu v obilných zrnech jsou zodpovědné karotenoidy (Cirusová 2017; Lachman et al. 2017). Zrno barevné pšenice je považováno za dobrý zdroj vlákniny, fenolů, tokoferolů a karotenoidů (Varga et al. 2013).

U odrůd pšenice s barevným zrnem byl průměrný obsah tokolů nalezen u jarních odrůd vyšší ( $34,52 \pm 4,96$  mg/kg SH) než u odrůd ozimých ( $24,48 \pm 4,44$  mg/kg SH). Dominantní zastoupení v purpurové a modré pšenici jarní zaujímá  $\alpha$ -tokoferol (průměrně 14,11 mg/kg SH) a  $\beta$ -tokotrienol (12,74 mg/kg SH). Stejně tak tomu je u ozimých odrůd barevné pšenice, kde jsou však průměrné hladiny  $\alpha$ -tokoferolu a  $\beta$ -tokotrienolu o něco nižší (10,29 a 9,10 mg/kg SH) (Lachman et al. 2018). V porovnání s ostatními odrůdami pšenice, je zde obsah vitamínu E menší až o polovinu.

#### 2.2.2.2 Ječmen setý

Ječmen setý (*Hordeum vulgare*) (obrázek 11) byl pěstován pro své zrno už od starověku a používá se k mnoha účelům. Část sklizeného ječmene je využívána pro lidskou stravu, část jako krmivo pro hospodářská zvířata, avšak majoritní zastoupení zaujímá jako surovina pro pivovarnický průmysl (Badea et al. 2018).

Množství vitamínu E v obilkách ječmene bývá nejvyšší ze všech obilných druhů (Ehrenbergerová et al. 2011). Avšak v roce 2018 Lachman et al. během analýzy naměřili množství tokolů u ječmene nižší než u jarní pšenice a tritordea. Tyto odlišnosti mohou být způsobeny různými aspekty, jak environmentálními, tak i genetickými u konkrétní výsadby ječmene. V ječmeni se vyskytuje všech osm známých forem vitamínu E s celkovým obsahem okolo 75 mg/kg SH, přičemž většinu zastupují tokotrienoly (76 %). Z tokotrienolů má nejvyšší zastoupení forma  $\alpha$ - (11,84 mg/kg SH) a stejně tak je tomu i u tokoferolů, kde je dominantní  $\alpha$ -forma zastoupena obsahem 10,68 mg/kg SH (Badea et al. 2018; Lachman et al. 2018).



**Obrázek 11:** Ječmen setý (Augustyn et al. 2019)

### 2.2.2.2.3 Oves setý

Oves setý (*Avena sativa*) (obrázek 12) je jednou z nejoblíbenějších obilovin díky svým vynikajícím vlastnostem podporujícím zdraví, jako je vysoký obsah rozpustné vlákniny, vyšší obsah  $\beta$ -glukanů, antioxidantů včetně tokolů a další.

Koncentrace tokolů v ovsu je uváděna v rozmezí od 13,6 do 36,1 mg/kg SH. Na rozdíl od ječmene obsahuje oves pouze tokoly ve formách  $\alpha$ - a  $\beta$ -, přičemž  $\alpha$ -tokotrienol převládá v celkovém podílu tokolů (57–69 %). Díky tomu, že se oves obecně konzumuje především ve formě celých zrn (například jako mačkané ovesné vločky), neztrácí výrazný podíl vitamínu E, jako je tomu u jiných obilovin, které se většinou zbavují otrub pro další zpracování (Tiwari & Cummins 2009).



**Obrázek 12:** Oves setý (Paladias 2014)

#### 2.2.2.2.4 Žito seté

Žito seté (*Secale cereale*) (obrázek 13) patřilo v minulosti v České republice k nejvíce využívaným kulturním plodinám pro lidskou výživu. V porovnání s jinými obilninami je žito odolnější vůči chorobám, zaplevelení a škůdcům. Má také menší nároky na teplotu a kvalitu půdy. Dnes se pěstuje převážně pro potravinářský průmysl, v menší míře ke krmení zvířat nebo pro lihovarnictví (Cirusová 2017).

V žitném zrně se obsah tokolů pohybuje od 22 do 67 mg/kg SH, přičemž  $\alpha$ -tokotrienoly a  $\alpha$ -tokoferoly jsou hlavními formami ve všech odrůdách, které v průměru přispívají 38 a 32 % z celkových tokolů. Průměrný podíl všech tokotrienolů je 59,6 % z celkového množství tokolů (Tiwari & Cummins 2009; Irakli et al. 2011).



**Obrázek 13:** Žito seté (Vinterová 2013)

#### 2.2.2.2.5 Tritikale

Tritikale, česky žitovec, je uměle vytvořený hybrid vyvinutý kombinací genomů pšenice naduřelé (*Triticum turgidum*) a pšenice seté (*Triticum aestivum*) a genomu žita setého (*Secale cereale*). Tato obilovina byla vytvořena proto, aby kombinovala vysoký výnosový potenciál a dobrou kvalitu zrna pšenice s dobrou odolností žita vůči chorobám a jeho nižším nárokům na životní podmínky. Během posledních několika desetiletí se tritikale stalo komerční plodinou pěstovanou v různých světových podmínkách. Tradičně se využívá jako součást krmiva pro zvířata, ale také při výrobě obnovitelné energie a jen velmi málo v potravinářském sektoru (Fraš et al. 2016).

Obsah tokolů se v tritikale pohybuje kolem 33 mg/kg SH (Lachman et al. 2018), přičemž dominantní formou je zde  $\beta$ -tokotrienol, který následuje  $\alpha$ -tokoferol spolu s  $\alpha$ -tokotrienolem (Irakli et al. 2011).



**Obrázek 14:** Tritikale (Cirusová 2017)

#### 2.2.2.2.6 Tritordeum

Tritordeum (obrázek 15) je nový hexaploidní hybrid odvozený z křížení mezi jihoamerickým divokým ječmenem (*Hordeum chilense*) a pšenicí tvrdou (*Triticum durum*) (Lachman et al. 2018). V tritordeu byly identifikovány pouze 4 formy vitamínu E,  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokotrienol spolu s  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokoferolem. Průměrný obsah tokolů je zde  $30,26 \pm 3,32$  mg/kg SH. Stejně jako u pšenice jednozrnky byly i u odrůd tritordea analyzované nejvyšší hladiny  $\beta$ -tokotrienolu (11,67–13,30 mg/kg SH) následované  $\alpha$ -tokoferolem (7,53–11,07 mg/kg SH). Poměr tokotrienolů a tokoferolů u tritordea je odhadnut v průměru na 1,611 (Lachman et al. 2018).



**Obrázek 15:** Tritordeum (Agrodiariohuelva 2017)

### 2.2.3 Vliv technologického zpracování cereálií na obsah vitamínu E

Obiloviny jsou pěstovány, šlechtěny a využívány primárně pro jejich semena (zrna). Ta jsou v lidské výživě spotřebovávána buď celá (naklíčená obilná zrna, rýže, vločky, zápary, obroušené kroupy atd.), nebo mohou být umleta na mouky s různými granulacemi a odlišným chemickým složením (bílé, celozrnné mouky) (Bajerová et al. 2016). Cereálie a potraviny na bázi cereálií (snídaňové cereálie, chléb, sušenky, extrudované produkty atd.) jsou běžné a široce konzumované ve všech částech světa (Tiwari & Cummins 2009).

Zpracování obilných zrn se postupem času vyvíjelo, aby uspokojilo potřeby dnešního spotřebitele a také aby vyhovělo rostoucím požadavkům trhu, zejména aby poskytovalo rozmanité, chutné a zdravé obilné potraviny. Zpracování obilovin lze rozdělit do dvou kategorií: primární zpracování, jako je mletí, pearling, sladování a další. Druhá kategorie neboli druhotné zpracování zahrnuje řadu technologií zpracování, jako je například pečení, extrudování nebo pufování. Během těchto procesů dochází k mnoha změnám, které ovlivňují výživové a funkční vlastnosti obilných výrobků. Do těchto změn spadá, mimo jiné, odbourávání bioaktivních sloučenin, které mají důležitou roli v lidském zdraví a výživě. Mezi tyto konkrétní bioaktivní sloučeniny se řadí i tokoly (Guine & Correia 2016). Dostupná literatura ukazuje, že hladina tokolů v hotovém produktu velmi závisí na provedených operacích zpracování potravin (Tiwari & Cummins 2009).

Každá obilnina má jiné obsahy různých forem vitamínu E a také jiné fyzikální a chemické vlastnosti. To se odráží ve výsledcích při zkoumání ztrát vitamínu v jednotlivých fázích technologického zpracování (Leenhardt et al. 2006). Zpracování obilovin má hlavní vliv na výsledný obsah tokolů (Tiwari & Cummins 2009). V obilném zrnu jsou tokoly nejhojněji zastoupeny v klíčku, perikarpu a nejméně v endospermu (Hidalgo & Brandolini 2010). Klíčky, otruby nebo aleuronová vrstva jsou však, jakožto nejbohatší zdroje tokolů, často během zpracování oddělovány od výrobku a odváděny jako vedlejší produkty. Ty mohou později hrát důležitou roli při vývoji výživných „funkčních potravin“ na bázi obilovin, o které je v dnešní době velký zájem (Tiwari & Cummins 2009).

#### 2.2.3.1 Mletí

Obecně se mletím rozumí transformace zrn na jemnější primární produkty, které se využívají pro sekundární zpracování. Pro obiloviny se používají dva typy mletí: suché a mokré. Suché mletí je proces, při kterém se oddělují otruby a klíčky od škrobnatého endospermu za účelem výroby rafinované bílé mouky, která se dále používá pro výrobu pekařských produktů. Vrstvy oplodí, osemení a aleuronu se tak dostanou z frakce mouky. Protože většina bioaktivních složek je přítomna ve vnějších vrstvách zrna, využívá se suchého mletí také k rozdrctování celých obilek za vzniku celozrnných mouk využívaných na výrobu celozrnných potravin. Mletí za mokra se používá k rozdělení zrna na velké chemické složky (škrob, proteiny, vlákninu a oleje) (Guine & Correia 2016).

Pearling je technologie obrousování a tření, která vede k účinnému odstranění pouze otrubových vrstev z obilných zrn, což umožňuje výživným částem, jako je aleuronová vrstva, zůstat v neporušených zrnech. Při aplikaci tohoto postupu před mletím je průkazně zlepšen výtěžek

z mletí. Pearling ovlivňuje způsob, jakým se obilná zrna během mletí lámou a tím vede ke zlepšení kvality a množství mouky (Guine & Correia 2016).

Většina obilovin se ve světě zpracovává na bílou mouku nebo semolinu k přípravě pečiva, sušenek nebo těstovin (Hidalgo et al. 2009). Pro mletí bílé mouky jsou však otruby a zárodečné frakce ze zrn odstraňovány, čímž je zbavena velkého množství tokolů (Leenhardt et al. 2006). Například při výrobě bílé mouky z pšenice špaldy (*Triticum spelta*) se obsah vitamínu E snižuje v důsledku odstranění otrub a klíčků přibližně o 50–65 % (Hidalgo et al. 2009). Při využití celozrnných mouk, nezravených otrub a klíčků, vznikají ztráty jen v jednotkách procent (Hidalgo & Brandolini 2010). Vzhledem k příznivým účinkům vitamínu E z obilovin na lidské zdraví se doporučuje používat celozrnnou mouku spíše než moukou rafinovanou (bílou), a to z důvodu vyššího obsahu tokolů v celozrnné mouce právě díky obsahu zárodečných a otrubových frakcí (Tiwari & Cummins 2009). Také použití bělicích činidel (např. kyseliny chlorné) pro zlepšení pekařských vlastností mouky při rafinaci může vést k redukcii obsahu vitamínu E (Combs & McClung 2017). Hladina tokolů v konečném produktu je silně závislá na použitém způsobu mletí (Tiwari & Cummins 2009).

### 2.2.3.2 Sladování

Sladování je proces, kterým se obilná zrna klíčí kontrolovaným způsobem namočením ve vodě, aby se zvýšila aktivita enzymů potřebných k modifikaci škrobu a proteinu. Klíčení může být ukončeno zvýšením teploty, po kterém následuje další tepelné zpracování v tzv. vysoušecí peci k vytvoření požadované chuti a barvy (Guine & Correia 2016). Jednotlivé druhy obilovin, jako je ječmen, žito, čirok nebo proso, jsou sladovány pro výrobu různých druhů potravin. Sladová zrna se používají k výrobě piva, whisky, sladových koktejlů, sladového octa nebo některých pečených výrobků, jako je sladový bochník, a další. Mletá sladová zrna jsou známá jako tzv. „sladká mouka“ (Guine & Correia 2016).

Sladování nemá téměř žádný vliv na obsah tokolů, protože tuky, ve kterých jsou tokoly vázány, nejsou během sladování extrahovány. U sladového ječmene bylo pozorováno pouze mírné a nevýznamné snížení celkových tokolů (Gupta 2019).

### 2.2.3.3 Pečení

Pečení je běžný proces používaný ke zvýšení nutriční hodnoty a přijatelnosti zpracovaných obilovin. Chléb a jiné druhy pečiva jsou nedílnou součástí lidské stravy a mohou významně přispět k příjmu vitamínu E. Hladinu tokolů v pečených výrobcích ovlivňují různé faktory řídicí proces pečení, jako je doba míchání těsta, pH a teplota pečení (Tiwari & Cummins 2009).

Je pozorováno 20 až 60% snížení tokoferolů a tokotrienolů během procesu výroby těsta (Tiwari & Cummins 2009). Při procesu hnětení těsta dochází k velkému okysličování a s tím souvisejícímu výraznému poklesu obsahu vitamínu E v rozmezí 10-37 % v závislosti na druhu obiloviny a délce hnětení těsta (Hidalgo & Brandolini 2010). 21 % tokolů bylo ztraceno během 2-3 minut hnětení těsta na pšeničný chléb a 28 % bylo ztraceno během 2-3 minut hnětení těsta pro přípravu sušenek (také z pšeničné mouky). Při výrobě sušenek dochází k vyšší rychlosti degradace než u výroby chleba, protože v těstě na sušenky chybí kvasinky. Kvasinky „soutěží“

s enzymem lipoxygenasou o kyslík, a proto omezují oxidaci nenasycených mastných kyselin. Obiloviny s vyšším obsahem karotenoidů (např. pšenice jednozrnka) vykazují během pečení nižší ztráty tokoferolů a tokotrienolů. Je tedy možné, že karotenoidy mají roli při ochraně tokoferolů před lipoxygenasou (Becker 2013). Během fáze kynutí (u kynoucích těst) také může docházet ke ztrátám tokolů (v řádu jednotek procent), zde vše závisí na délce kynutí těsta a také na koncentraci přítomných kvasinek (Hidalgo & Brandolini 2010). Po fázi pečení dochází k dalším ztrátám vitamínu E až o 30 % (Leenhardt et al. 2006). Roli ve ztrátách tokolů během pečení může hrát jeho délka a velikost teploty. Během měření De a kol. (2012) se obsah  $\alpha$ -tokoferolu s dobou pečení téměř nezměnil, pokud byla pšenice zpracovávána při nižších teplotách pečení. Jakmile však teplota dosáhla 190 °C, doba pečení měla na ztrátu  $\alpha$ -tokoferolu významný vliv (De et al. 2012).

Konkrétně, např. při výrobě chleba z celozrnné mouky, celkové ztráty vitamínu E činí kolem 25-40 % (Hidalgo & Brandolini 2010) a při výrobě sušenek, od fáze hnětení těsta (včetně), se ztráty pohybují kolem 37 % u sušenek vyrobených z pšenice seté a 20 % při výrobě sušenek z pšenice jednozrnky (Hidalgo & Brandolini 2010).

Ztráta tokoferolů během procesu pečení je přičítána především přímé oxidaci nebo enzymatické oxidaci katalyzované enzymem lipoxygenasou, ke které dochází při hnětení těsta (Tiwari & Cummins 2009). Leenhardt a kol. (2006) však pozorovali minimální rozdíl v obsahu tokolů mezi odrůdami během procesu hnětení, a to i přes velké odrůdové rozdíly co se týče aktivity lipoxygenasy. Proto došli k závěru, že ztráty tokolů během výroby chleba lze přičíst především začlenění vzduchu během výroby těsta a poté jejich destrukci vysokými teplotami během pečení. Oxidační degradaci tokolů by mohla částečně zabránit krátká doba míchání a hnětení těsta. Zvýšení hladiny vitamínu E v konečných produktech by se dalo také zajistit začleněním vedlejších produktů mletí, jako jsou například klíčky (Tiwari & Cummins 2009). Klíčky by měly být stabilizovány, aby bylo zabráněno oxidačnímu žluknutí tuků (Leenhardt a kol., 2006).

#### **2.2.3.4 Extruze**

Extruze je proces, který kombinuje operace míchání, vaření, tvarování a formování za účelem výroby potravin, jako jsou snídaňové cereálie, různé svačtinové pochutiny (Gupta 2019), nebo (za využití nízkotlaké extruze) i některé druhy těstovin (Brennan et al. 2011). Tyto křupavé produkty se připravují většinou z kukuřice nebo pšenice. Podmínky zpracování při extruzi, jako je tlak, teplota v sudu, obsah vody, rychlost posuvu a rychlost šneku vytlačujícího těsto, ovlivňují fyzikálně-chemické a nutriční vlastnosti obilných složek, včetně škrobu, bílkovin, lipidů a vlákniny spolu s důležitými bioaktivními látkami, včetně tokolů. Pro extrudované výrobky se používají obilná zrna zbavená otrub. Použití extruze k produkci obilných produktů obohacených otrubami je náročné, protože vysoký obsah vlákniny vede ke snížené expanzi, vysoké hustotě, tvrdé a méně křupavé struktuře a tím ke špatnému smyslovému vnímání spotřebitele (Moisio et al. 2015).

Jde o krátkodobý vysokoteplotní proces za vysokého tlaku, který inaktivuje mikroorganismy a enzymy a snižuje vodní aktivitu produktu, ale zachovává si své výživové a senzorické vlastnosti (Gupta 2019). Extruze může probíhat buď za vakuových nebo nevakuových

podmínek (Hidalgo & Brandolini 2010). Jak již bylo řečeno, během extruze existují různé faktory, které mohou ovlivnit degradaci tokolů. Patří mezi ně teplota, čas, tlak, vystavení světlu a oxidačním podmínkám. Jsou zaznamenány větší ztráty vitamínu E během extruze se zvyšující se teplotou od 110 do 140 °C (Tiwari & Cummins 2009).

Podle studie Gupty (2019) celkový proces extruze způsobuje významné snížení hladiny tokoferolů a tokotrienolů, a to v rozmezí od 63 do 94 %. Nejméně odolný vůči hydrotermálnímu zpracování se prokázal  $\alpha$ -tokoferol a  $\alpha$ -tokotrienol. Poměr tokotrienolů vůči tokoferolům se ale po extruzním zpracování zvýšil, což značí, že tokotrienoly jsou hlavními zbytkovými isomery vitamínu E. Také Fratianni a kol. (2015) pozoroval pokles celkových tokolů v průběhu zpracování těstovin. Dlouhá fáze hnětení vykazovala vysoké ztráty vitamínu (až 44,2 %), zatímco krok přímé extruze vedl k průměrnému poklesu o 3,7 % za vakuových podmínek a o 29,7 % v podmínkách bez vakua. Z toho plyne, že použití vakuové extruze výrazně snižuje ztráty vitamínu E během výroby těstovin. Krok sušení ani v jedné studii nevykazoval významné změny. Pokud jde o celkový výrobní proces, tak podle výzkumu Fratianniho a kol. (2015) byly průměrné ztráty tokolů 41,0 % (při vakuové extruzi) a 55,7 % (při extruzi bez vakua). Pšenice jednozrnka vykazovala lepší konzervaci a dodávala do konečných produktů více tokolů než pšenice tvrdá nebo pšenice setá.

#### **2.2.3.5 Pufování**

Pufování je nejjednodušší, levný a nejrychlejší tradiční způsob aplikace suchého tepla pro přípravu takzvaných „ready to eat“ potravin (potravin pro přímou spotřebu), jako jsou například pufované rýžové, pšeničné nebo kukuřičné chlebičky. Explozní nafouknutí náhlým uvolněním a expanzí vodní páry je relativně dobře známý a široce používaný proces (Mishra et al. 2014). Díky tomu, že proces pufování trvá jen několik sekund a že výchozí produkty jsou často připravovány z celých zrn, nepřichází výrobky o příliš mnoho nutričně významných látek, které obiloviny přirozeně obsahují (Hidalgo et al. 2016). Ačkoli se pro pufování může používat široká škála obilovin, jen málo z nich vykazuje ideální výsledky. Důvodem mohou být faktory ovlivňující jejich „praskající“ vlastnosti, jako je období sklizně, odrůdové rozdíly, charakteristiky zrna (vlhkost, složení, fyzikální vlastnosti, typy endospermu) a další. Mezi nejpoužívanější obiloviny pro pufování patří pšenice, rýže a v neposlední řadě i kukuřice (Mishra et al. 2014).

Pufování je proces, při kterém se provádí řízená expanze jádra obilných zrn díky několikasekundovému vystavení vysokým teplotám za vysokého tlaku (Mishra et al. 2014). Endosperm (např. pšeničný), je bohatý na škrobová zrna, tvořená lineárními molekulami amylosy (asi 30 %) a rozvětvenými molekulami amylopektinu (asi 70 %). Ve škrobových zrnech je amylopektin tvarován do dvojité šroubovice, což umožňuje systému vysokokapacitní zadržování molekul vody, a tím pádem možnost rychlé expanze. Během pufování přehřátá pára, vyprodukovaná z molekul vody uvnitř zrn okamžitým zahříváním, vaří zrno a jakmile se perikarp rozbije, endosperm jím expanduje. Pára mezitím unikne mikropóry zrna (Hidalgo et al. 2016). Pufování dodává výrobkům zvětšený objem, přijatelnou chuť a žádoucí vůni (Mishra et al. 2014).

Během výzkumu Hidalgo a kol. (2016) bylo zjištěno, že po procesu pufování některých druhů pšenic, došlo k mírnému navýšení hladin tokolů. Z původního obsahu  $60,28 \pm 1,84$  mg/kg SH v pšenici seté a  $62,49 \pm 0,55$  mg/kg SH v pšenici jednozrnce byly zvýšeny hladiny tokolů na  $65,04 \pm 0,63$  mg/kg a  $65,54 \pm 1,06$  mg/kg SH. V obilovinách jsou tokoly esterifikovány na mastné kyseliny a jiné molekuly. Drastické tepelné podmínky, jaké nastávají během pufování, mohou rozbít vazby a tím zvýšit množství volných tokolů extrahovatelných metodou tepelného zmýdelnění. Díky velmi krátké době vystavení vysoké teplotě uvolněné tokoly nestihnou zdegradovat a proto se nesníží jejich obsah v konečném produktu, jako tomu bylo u jiných předešlých technologických zpracování.

### 3 Závěr

Tato literární rešerše byla sepsána jako ucelený souhrn informací o vitamínu E z pohledů chemických, biologických, fyziologických i potravinářských. Vitamin E spadá do skupiny lipofilních vitaminů, tedy rozpustných ve vodě. Všechny jeho formy, jak tokoferoly, tak tokotrienoly jsou syntetizované v rostlinách, se svou primární funkcí antioxidantu. Těto funkce využívají jak samotné rostliny, tak i lidé po konzumaci na vitamin E bohatých potravin.

Jeden z největších zdrojů, ze kterého přijímáme vitamin E, jsou konzumované cereálie a cereální výrobky. Proto byla tato práce dále zaměřena právě na obsah vitamínu E v jednotlivých druzích obilovin. Podrobněji charakterizováno bylo 11 druhů obilovin. Z informací uvedených v dostupné literatuře byly zjištěny a sepsány průměrné obsahy vitamínu E v jednotlivých obilovinách takto: pšenice jednozrnka 78–84,5 mg/kg SH, pšenice dvouzrnka 70 mg/kg SH, pšenice tvrdá 33–61 mg/kg SH, pšenice setá 63–74 mg/kg SH, pšenice špalda 28–41 mg/kg SH, barevné odrůdy pšenice 24–34 mg/kg SH, ječmen setý 75 mg/kg SH, oves setý 13,6–36,1 mg/kg, žito seté 22–67 mg/kg SH, tritikale 33 mg/kg SH a tritordeum 30,26 mg/kg SH. Z těchto údajů vyplývá, že nejbohatší na vitamin E je pšenice jednozrnka, poté pšenice setá, ječmen setý a pšenice dvouzrnka. Naopak nejmenší obsah tokolů byl nalezen v ovsu setém, barevných odrůdách pšenice, tritordeu nebo v triticales. V jednotlivých literárních zdrojích se informace o koncentracích tokolů v obilovinách často různí. Nejběžněji vyskytující se formy vitamínu E v obilovinách jsou  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokotrienoly spolu s  $\alpha$ - a  $\beta$ -tokoferoly.

Obsahy vitamínu E v obilovinách však nejsou směrodatné, neboť jeho přijímané množství z následných obilných produktů se může v porovnání s původním obsahem velmi lišit. Bylo zjištěno, že technologické potravinářské úpravy velmi ovlivňují koncentrace tokolů v konečných produktech. Při základním zpracování obilného zrna na mouku – mletím, se po odstranění obalových a zárodečných frakcí a následném mletí hladina tokolů snížila až o 65 %. Procesem hnětení těsta bylo díky výrazné oxidaci degradováno 10–37 % tokolů v závislosti na délce jeho trvání, pečením docházelo ke ztrátám až o 30 % a extruzí za vakuových a nevakuových podmínek poklesl obsah o 3,7 a 29,7 %. Při zkoumání hladin vitamínu E po procesu pufování byl zjištěný naopak lehký nárůst obsahu vitamínu E, a to v jednotkách procent (o 2–5 %). U procesu sladování, oproti ostatním, nebyly zjištěny žádné významné změny obsahů vitamínu E.

Ze zjištěných informací je patrné, že vlivem většiny různých technologických zpracování se ochuzujeme o nezanedbatelná množství vitamínu E, která nám poté mohou v denním příjmu chybět. Je proto důležité se tímto tématem dále zabývat a hledat nové postupy a technologie, které by těmto nutričním ztrátám zamezily.

## 4 Literatura

- Agrodiariohuelva. 2017. Agrodiariohuelva. Espagnol. Available from [www.agrodiariohuelva.es](http://www.agrodiariohuelva.es) (accessed March 2020)
- Anwar K, Iqbal J, Hussain MM. 2007. Mechanisms involved in vitamin e transport by primary enterocytes and in vivo absorption. *Journal of Lipid Research* **48**:2028–2038.
- Asensi-Fabado MA, Munné-Bosch S. 2010. Vitamins in plants: Occurrence, biosynthesis and antioxidant function. *Trends in Plant Science* **15**:582–592.
- Augustyn A, Bauer P, Duignan B, Eldridge A, Gregersen E, McKenna A, Petruzzello M. 2019. Encyclopedia Britannica. Encyclopædia Britannica inc, GB. Available from <https://www.britannica.com/plant/barley-cereal>.
- Azzi A. 2019. Tocopherols, tocotrienols and tocomonoenols: Many similar molecules but only one vitamin E. *Redox Biology* **26**:101259.
- Badea A, Carter A, Legge WG, Swallow K, Johnston SP, Izydorczyk MS. 2018. Tocols and oil content in whole grain, brewer's spent grain, and pearling fractions of malting, feed, and food barley genotypes. *Cereal Chemistry* **95**:779–789.
- Bajerová E et al. 2016. Obiloviny v lidské výživě. Česká technologická platforma pro potraviny, Praha.
- Becker F. 2013. Tocopherols in wheat and rye [BSc. Thesis]. Swedish University of Agricultural Sciences, Upsala.
- Brennan C, Brennan M, Derbyshire E, Tiwari BK. 2011. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science and Technology* **22**:570–575.
- Cirusová M. 2017. Vitaminy v obilovinách [bakalářská práce]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Combet E, Buckton C. 2019. Micronutrient deficiencies, vitamin pills and nutritional supplements. *Medicine (United Kingdom)* **47**:145–151.
- Čurná V, Lacko-Bartošová M. 2017. Chemical composition and nutritional value of emmer wheat (*Triticum dicoccon schrank*): A review. *Journal of Central European Agriculture* **18**:117–134.
- De H, Cun-she C, Tian-tian Z, Ying Z. 2012. Determination and analysis of  $\alpha$ -tocopherol in baking wheat germ. *Science and Technology of Food Industry*. Available from [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-SPKJ201218014.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-SPKJ201218014.htm).
- Ehrenbergerová J, Pluháčková H, Bradáčová M, Březinová Belcredi N, Benešová K, Vaculová K. 2011. Změny v obsahu a aktivitě vitamínu E jako reakce na abiotický stres odrůd ječmene jarního. *Kvasny Prum.* **7–8**:196–202.
- Engelking LR. 2015. Textbook of Veterinary Physiological Chemistry. Academic press, USA.
- Fajfrová MJ, Pavlík MV. 2013. Vitaminy , jejich funkce a využití. *Medicína pro praxi* **10**:81–

- Fraś A, Gołębiowska K, Gołębiowski D, Mańkowski DR, Boros D, Szczówka P. 2016. Variability in the chemical composition of triticale grain, flour and bread. *Journal of Cereal Science* **71**:66–72.
- Fратиани A, Panfili G, Cubadda R. 2015. Carotenoids, Tocols, and Retinols during the Pasta-Making Process. Pages 309-317 in Preedy V, editor. *Processing and Impact on Active Components in Food*. Academic press, Oxford.
- Fritsche S, Wang X, Jung C. 2017. Recent advances in our understanding of tocopherol biosynthesis in plants: An overview of key genes, functions, and breeding of vitamin E improved crops. *Antioxidants* **6**: 20-37
- Galli F, Azzi A, Birringer M, Cook-Mills JM, Eggersdorfer M, Frank J, Cruciani G, Lorkowski S, Özer NK. 2017. Vitamin E: Emerging aspects and new directions. *Free Radical Biology and Medicine* **102**:16–36.
- Guine R de PF, Correia PM dos R. 2016. *Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products*. CRC Press, Boca Raton.
- Gupta A. 2019. Processing Effect on the Bioactive Compounds of Cereals. Pages 25-49 in Prasad VM, Gupta A, Singh B, Mishra N, Mani A, editors. *Trends & Prospects in Food Science & Processing Technology*. Satish serial publishing house, Delhi.
- Hejtmánková K, Lachman J, Hejtmánková A, Pivec V, Janovská D. 2010. Tocols of selected spring wheat (*Triticum aestivum* L.), einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.) and wild emmer (*Triticum dicoccum* Schuebl [Schrank]) varieties. *Food Chemistry* **123**:1267–1274.
- Hidalgo A, Brandolini A. 2010. Tocols stability during bread, water biscuit and pasta processing from wheat flours. *Journal of Cereal Science* **52**:254–259.
- Hidalgo A, Brandolini A, Pompei C. 2009. Kinetics of tocopherols degradation during the storage of einkorn (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) and breadwheat (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) flours. *Food Chemistry* **116**:821–827.
- Hidalgo A, Brandolini A, Pompei C, Piscozzi R. 2006. Carotenoids and tocopherols of einkorn wheat (*Triticum monococcum* ssp. *monococcum* L.). *Journal of Cereal Science* **44**:182–193.
- Hidalgo A, Scuppa S, Brandolini A. 2016. Technological quality and chemical composition of puffed grains from einkorn (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*) and bread wheat (*Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum*). *LWT - Food Science and Technology* **68**:541–548.
- Hofius D, Sonnwald U. 2003. Vitamin E biosynthesis: Biochemistry meets cell biology. *Trends in Plant Science* **8**:6–8.
- Hussain A, Larsson H, Olsson ME, Kuktaite R, Grausgruber H, Johansson E. 2012. Is organically produced wheat a source of tocopherols and tocotrienols for health food? *Food Chemistry* **132**:1789–1795.
- Irakli MN, Samanidou VF, Papadoyannis IN. 2011. Development and validation of an HPLC

- method for the simultaneous determination of tocopherols, tocotrienols and carotenoids in cereals after solid-phase extraction. *Journal of Separation Science* **34**:1375–1382.
- Zempleni J, Suttie JW, Gregory JF III, Stover JP. 2014. *HANDBOOK OF VITAMINS*. CRC Press, Boca Raton.
- Kabbaj H, Sall AT, Al-Abdallat A, Geleta M, Amri A, Filali-Maltouf A, Belkadi B, Ortiz R, Bassi FM. 2017. Genetic diversity within a global panel of durum wheat (*Triticum durum*) landraces and modern germplasm reveals the history of alleles exchange. *Frontiers in Plant Science* **8**:1–13.
- Kimura E, Abe T, Murata K, Kimura T, Otoki Y, Yoshida T, Miyazawa T, Nakagawa K. 2018. Identification of OsGGR2, a second geranylgeranyl reductase involved in  $\alpha$ -tocopherol synthesis in rice. *Scientific Reports* **8**:1–8.
- Kosař K, Procházka S. 2000. *Technologie výroby sladu a piva*. Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Praha.
- Lachman J, Hejtmánková A, Orsák M, Popov M, Martinek P. 2018. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley. *Food Chemistry* **240**:725–735.
- Lachman J, Hejtmánková K, Kotíková Z. 2013. Tocols and carotenoids of einkorn, emmer and spring wheat varieties: Selection for breeding and production. *Journal of Cereal Science* **57**:207–214.
- Leenhardt F, Lyan B, Rock E, Boussard A, Potus J, Chanliaud E, Remesy C. 2006. Wheat lipoxygenase activity induces greater loss of carotenoids than vitamin E during breadmaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **54**:1710–1715.
- Melfi MT, Nardiello D, Cicco N, Candido V, Centonze D. 2018. Simultaneous determination of water- and fat-soluble vitamins, lycopene and beta-carotene in tomato samples and pharmaceutical formulations: Double injection single run by reverse-phase liquid chromatography with UV detection. *Journal of Food Composition and Analysis* **70**:9–17.
- Mène-Saffrané L. 2018. Vitamin E biosynthesis and its regulation in plants. *Antioxidants* **7**:1–17.
- Mène-Saffrané L, DellaPenna D. 2010. Biosynthesis, regulation and functions of tocochromanols in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* **48**:301–309.
- Michael W. Clarke JRB & KDC. 2008. Vitamin E in Human Health and Disease. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences* **45**:417–450.
- Mindell E. 2004. *Earl Mindell's New Vitamin Bible*. Warner Books, New York.
- Mishra G, Joshi DC, Kumar PB, Joshi DC. 2014. Popping and Puffing of Cereal Grains: A Review. *Journal of Grain Processing and Storage* **1**:34–46. Available from <https://www.researchgate.net/publication/283355236>.
- Miyazawa T, Nakagawa K, Sookwong P. 2011. Health benefits of vitamin E in grains, cereals and green vegetables. *Trends in Food Science and Technology* **22**:651–654. Elsevier Ltd. Available from <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2011.07.004>.

- Moisio T, Damerou A, Lampi AM, Partanen R, Forssell P, Piironen V. 2015. Effect of extrusion processing on lipid stability of rye bran. *European Food Research and Technology* **241**:49–60. Springer Berlin Heidelberg. Available from <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-015-2433-y>.
- Moudrý J a kol. 2011. *Alternativní plodiny*. Profi press, Prague.
- Muñoz P, Munné-Bosch S. 2019. Vitamin E in Plants: Biosynthesis, Transport, and Function. *Trends in Plant Science* **24**:1040–1051.
- Pazderů K a kol. 2018. *Pěstování rostlin - cvičení*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Prague.
- Pellaud S, Saffrané LM. 2017. Metabolic origins and transport of vitamin E biosynthetic precursors. *Frontiers in Plant Science* **8**:1–8.
- Quin MB, Schmidt-Dannert C. 2014. Designer microbes for biosynthesis. *Current Opinion in Biotechnology* **29**:55–61.
- Rakel David. 2018. *Integrative Medicine*. Elsevier, Philadelphia.
- Polin RA, Rowitch DH, Abman SH, Benitz WE, Fox WW. 2017. *Fetal and Neonatal Physiology*. Elsevier, Philadelphia.
- Rizvi S, Raza ST, Ahmed F, Ahmad A, Abbas S, Mahdi F. 2014. The role of Vitamin E in human health and some diseases. *Sultan Qaboos University Medical Journal* **14**:157–165.
- Shamim AA et al. 2015. First-trimester plasma tocopherols are associated with risk of miscarriage in rural Bangladesh. *American Journal of Clinical Nutrition* **101**:294–301.
- Sivaprasad M, Shalini T, Reddy PY, Seshacharyulu M, Madhavi G, Kumar BN, Reddy GB. 2019. Prevalence of vitamin deficiencies in an apparently healthy urban adult population: Assessed by subclinical status and dietary intakes. *Nutrition* **63–64**:106–113.
- Tiwari U, Cummins E. 2009. Nutritional importance and effect of processing on tocopherols in cereals. *Trends in Food Science and Technology* **20**:511–520.
- Trela A, Szymańska R. 2019. Less widespread plant oils as a good source of vitamin E. *Food Chemistry* **296**:160–166.
- Vodrážka Z. 2002. *BIOCHEMIE*. Academia, Prague.
- Watson RR, Preedy VR, Zibadi S. 2014. *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health*. Elsevier, London.
- Woollard DC, Indyk HE. 2003. Tocopherols - Properties and Determination. Pages 5789–5796 in Trugo L, Finglas PM editors. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* 2. Elsevier BV, Amsterdam.
- Yang W, Cahoon RE, Hunter SC, Zhang C, Han J, Borgschulte T, Cahoon EB. 2011. Vitamin E biosynthesis: Functional characterization of the monocot homogentisate geranylgeranyl transferase. *Plant Journal* **65**:206–217.
- Zelenka J. 2014. *Výživa a krmení drůbeže*, 1st edition. Agripint, Olomouc.

- Zhou Y, Yu F, Luo B, Luo H, Liu C. 2019. Cytrarabine (Ara-c)promotes cell apoptosis by inhibiting the phosphorylation of Protein Kinase B (AKT/PKB). *Process Biochemistry* **82**:144–152.
- Ziegler JU, Schweiggert RM, Würschum T, Longin CFH, Carle R. 2016. Lipophilic antioxidants in wheat (*Triticum* spp.): A target for breeding new varieties for future functional cereal products. *Journal of Functional Foods* **20**:594–605.
- Zoppo GJ. 2007. Central nervous system ischemia. Pages 657–683 in Michelson AD editor. *Platelets*. Elsevier BV, Massachusett.