



# PŘÍRUČKA PRO KOMPOSTOVÁNÍ



EVROPSKÁ UNIE  
Evropský zemědělský fond pro rozvoj venkova  
Evropa investuje do venkovských oblastí  
Program rozvoje venkova



PROGRAM ROZVOJE VENKOVA





## Úvod

V době, kdy některá minerální hnojiva začínají být pro zemědělce nedostupná (fosfor) a zároveň je nutné do půdy dostávat organickou hmotu, je kompost jedním z nejdůležitějších zdrojů živin pro rostliny a také vzácným regulátorem půdních podmínek. Kompost je přírodní zdroj živin a humusu.

V návaznosti na tuto příručku je koncipován Manuál kvality kompostárny jako standardizovaná dokumentace programu kvality procesu a kvality kompostu pro posouzení shody praxe kompostárny s požadavky národní legislativy – kvalitativní parametry kompostu a účinnosti hygienizace procesu kompostování. Manuál kvality podává základní požadavky a zásady managementu kvality procesu kompostování, podle kterých se provoz kompostárny řídí a monitoruje (příprava kompostárny, vlastní proces kompostování a kvalita kompostu). Obsahuje informace pro standardizaci produkce trvale vysoké kvality kompostu s doporučením pro jeho konkrétní využití ve vazbě především na zemědělské půdy, specificky na půdy degradované (eroze) a na půdy v oblastech ochrany podzemních a povrchových vod. Ověřená kvalita kompostu zajistí jeho využití v rámci půdoochranných technologií – zdroj organické hmoty a živin ve stabilních formách:

- významným příspěvkem pro zlepšování kvality půdy
- nezpochybnitelným kvalitním hnojivem (komplex živin) pro zdravý vývoj rostlin
- bezpečným organickým hnojivem

Tyto materiály vznikly na základě skutečně zjištěných dat pracovištěm ZERA s doplněním o informace českých a zahraničních institucí a praxe:

- byly stanoveny parametry včetně metodologie pro hodnocení kvality procesu kompostárny a kvality kompostu – staly se podkladem pro aktualizaci ČSN 465735 Průmyslové komposty nově Kompostování
- byl proveden sběr dat stanovených parametrů kvality procesu kompostárny, k tomu byl vypracován dotazník (zpráva o terénním a dokumentačním poradenství s ohledem na technickou a technologickou úroveň kompostárny), který byl v rámci komunikace s provozovateli kompostáren vyplňován a slouží jako základní dokumentace pro tvorbu procesního modelu kompostárny
- na navštívených kompostárnách byly odebrány vzorky hotového kompostu a provedeny testy – index stability metodou NIRS včetně analýz obsahu minerálních forem dusíku, výsledky testů byly zpracovány do formy protokolu a hodnotící zprávy, kterou obdržely navštívené kompostárny s doporučením – interpretace výsledků analýz
- výsledky sběru dat procesu kompostárny a hodnotící zpráva testů kvality kompostu byly průběžně zpracovávány a tím zpřesňovány dosažitelnosti a skutečné úrovně praxe

Příručka pro kompostování je materiál pro vedení kompostárny coby přirozeného biologického procesu, pro který byla aktualizována ČSN 465735 Kompostování – norma, která na základě nejnovější praxe a výzkumu deklaruje monitoring procesu a kvality kompostu pro jeho správné využití v praxi. Příručka se zaměřuje na jeden druh kompostování: horké kompostování. Dalším druhům, jako je studené kompostování nebo vermikompostování, se zde věnovat nebudeme, protože pro produkci velkého množství kompostu se zatím používají zřídka

## 1 Oblast působnosti

Příručka je rozdělena do kapitol dle následujících oblastí:

- začíná stručným přehledem vlastností různých vstupních surovin, které mohou být v procesu kompostování použity a pojednává zejména o obsahu živin různých druhů zdrojů surovin
- pojednává o mikrobiologii procesu kompostování. Týká se nejdůležitějších skupin mikroorganismů v tomto procesu zapojených. Vstupní suroviny, které jsou pro tvorbu kompostu používány, určují dostupnost energie ve formě různých organických sloučenin a přítomnost živin, zejména dusíku. Jsou diskutovány role různých mikroorganismů v přeměně organických sloučenin a dusíku v různých fázích procesu kompostování. Podrobně se zaobírá různými fázemi horkého procesu kompostování, včetně úlohy specifických bakterií a hub. Definiuje konečnou stabilitu a zralost a vysvětluje rozdíly mezi nimi.
- je popsáno řízení procesu kompostování z hlediska parametrů, které jsou pro kontrolu produkce nezbytné, včetně teploty, obsahu vlhkosti, obsahu kyslíku a dostupného dusíku. Úroveň zralosti procesu kompostování lze určit několika testy. Poslední část této kapitoly pojednává o nejdůležitějších aspektech finálního produktu kompostování. Patří mezi ně obsah živin, hodnota pH, obsah solí, obsah těžkých kovů, intenzita zbarvení extraktů a přítomnost patogenů a plevele
- popisuje hygienizační aspekty kompostování. Zahrnuje to nejen rostlinné patogeny a plevele, ale také živočišné a lidské patogeny. Jsou popsány mechanismy, skrze které jsou patogeny v průběhu procesu kompostování eradikovány a diskutovány relevantní aspekty rizikových patogenů. Další část kapitoly pojednává o hlavních vstupních místech rostlinných a lidských patogenů ve vstupních surovinách kompostu. V poslední části jsou popsány zásadní aspekty procesu kompostování, ve kterém může nesprávná manipulace vést k selhání inaktivace patogenů.

## 2 Druhy kompostů, vstupní suroviny a způsoby kompostování

### Souhrn kapitoly:

- *Druhy kompostů jsou charakterizovány vstupními surovinami, kompostovacími procesy a jeho vyzrálostí.*
- *Vstupní suroviny pro kompostování se velmi liší v obsahu uhlíku a živin, ve vlhkosti a salinitě.*
- *Pro získání dobré kvality kompostu je nutné smíchat různé vstupní suroviny. U výchozích materiálů není důležité zvážit pouze poměr C/N, ale také poměry C/P a N/P.*
- *Z různých vstupních surovin vznikají také různě kvalitní surovinové skladby a to především z hlediska obsahu vlhkosti a struktury, které jsou důležité pro dobré provzdušnění v průběhu kompostovacího procesu.*
- *Bylo vyvinuto široké spektrum metod kompostování. Používaných technologií existuje široká škála, např. s nebo bez mechanického provzdušnění a zda je systém otevřený nebo uzavřený vůči prostředí.*
- *Důležitou vlastností kompostu je stupeň jeho stability a zralosti který je určen řízením a trváním fáze dozrávání.*

## 2.1 Druhy kompostu

Kompost je výsledkem aerobních procesů přeměny. Má různé chemické a biologické vlastnosti. Jednotlivé druhy budou mít po promísení s půdou rozdílný přínos organické hmoty. Kompost má obecně více charakter pomocné půdní látky, čerstvý (nestabilní kompost) má důležitou složku vyživující rostliny (hnojivý efekt).

Organické suroviny, které byly kompostovány stimulují život v půdě jiným způsobem než čerstvá organická hmota. Nejdůležitějším omezením pro použití čerstvých zbytků plodin místo těch kompostovaných je v možné kontaminaci rostlinnými patogeny. Pro určení toho, jaký typ organické hmoty použít, neexistují žádná obecná pravidla.

### *Poznamenejme si:*

*O nejvhodnější volbě vhodnosti kvality kompostu rozhodují biologické, chemické a fyzikální vlastnosti půdy a zkušenosti zemědělece. Kompost dodává do půdy více účinné organické hmoty ve srovnání s původní surovinou. Důležitou roli v konečném rozhodnutí může hrát také místní dostupnost kompostu nebo ostatních zdrojů organické hmoty (hnoje, atd.).*

## 2.2 Vstupní suroviny

Různé vstupní suroviny do kompostu dodají odlišné množství uhlíku (energie) a živin. V navrhování správné výchozí surovinové skladby pro kompostovací proces mohou být nápomocny základní znalosti o typech zdrojů organické hmoty. Složení organické hmoty se velmi liší podle typu technologie, v jaké suroviny vznikají (obsahy a poměr živin, organické hmoty, rizikových prvků, nebezpečnost – mikrobiální, fytochorob, semena plevelných rostlin).

### *Poznamenejme si:*

*Důležitými faktory v množství úniku emisí (ztráty organické hmoty, živin a energie) jsou dále podmínky uložení a jeho délka, dále opatření týkající se vstupní skladby surovin, vlastní zpracování, provzdušňování a případně používání aditiv.*

*Tabulka 1 Relativní důležitost vstupních surovin, procesu řízení a zralosti v konkrétních vlastnostech kompostu*

Vlastnosti kompostu	Vstupní suroviny	Proces řízení	Zralost/stabilita
Celkový obsah živin	+++	+	-
Dostupný dusík	++	+++	+++
Salinita	+++	(+)	+
pH	++	+	+++
Obsah humusu	++	+	+++
Obsah stabilního humusu	++	+	+++
Fytotoxicita	+	++	+++
Potenciál suprese (potlačení) chorob v půdě	++	+++	++

*- téměř žádný vliv; + malý vliv; ++ střední vliv; +++ silný vliv*

## 2.3 Výchozí surovinová skladba

Volba vstupních surovin ovlivňuje kompostovací proces a výslednou kvalitu kompostu. Pro dosažení vysoké kvality kompostu je důležitá především vysoká kvalita organických vstupních surovin. Neměly by obsahovat žádné škodlivé látky a další nežádoucí materiály, jako jsou plasty, kov nebo sklo. V případě komunálního odpadu, který je tříděn u zdroje, je produkován vysoce kvalitní kompost.

### *Poznamenejme si:*

*Aby byl zaručen správný proces kompostování musí mít výchozí surovinová skladba odpovídající poměr C/N mezi 25 a 35, vlhkost 40 – 65 %. Tato směs by měla mít také vhodnou strukturu, aby bylo umožněno optimální oksylichování materiálu bez nadměrné ztráty teploty. Čím vyšší je zakládka, tím hrubší strukturu musí směs mít.*

Suroviny bohaté na lignin mohou být uchovávány po dlouhou dobu, aniž by došlo ke ztrátě živin. Naopak suroviny bohaté na N musí být spotřebovány co nejdříve, aby nedošlo ke snížení kvality skrze plynné emise a zápach. Dodání organických vstupních materiálů do kompostu se často významně liší v průběhu roku. Suroviny bohaté na lignin jsou na kompostárnu přijímány většinou na podzim a v zimě, zatímco suroviny bohaté na N převažují na jaře nebo v létě. Z toho důvodu je důležitý management využívání surovin bohatých na lignin v průběhu celého roku, aby byla vyvážená surovinová skladba.

### *Poznamenejme si:*

*Mělo by se uchovávat odpovídající množství materiálů bohatých na lignin, aby ve chvíli, kdy jsou dostupná velká množství materiálů bohatých na N, bylo možné vytvořit vhodnou výchozí surovinovou skladbu.*

Užitečným pravidlem pro přípravu výchozí surovinové skladby je:

- 1/3 dřevní hmoty (např. drcené dřevo, větve, nadsítná frakce z kompostu, kůra)
- 1/3 středně jemného, vláknitého materiálu (např. sláma, listí, okrasné trávy)
- 1/3 jemného materiálu (kuchyňský odpad, posečená tráva, hnůj, zeleninový odpad)

Pro zlepšení procesu kompostování lze přidat jíly, jako jsou zeolity (5-10 kg/m<sup>3</sup> výchozí surovinové skladby) nebo půdu bohatou na jíl (3-5 % výchozí skladby). Tyto materiály pufrují proces kompostování, snižují emise zápachu a zlepšují tvorbu stabilních částí během zrání kompostu. Důležitou roli v rozkládání surovin hraje také technická příprava vstupních surovin. Toto platí zejména pro dřevo. Pokud je dřevo nasekáno na kousky, mikrobiální kolonizace není účinná a kapacita dřeva jako materiálu, který napomáhá struktuře z důvodu zlepšení provzdušnění zakládky, je nízká. Pokud je dřevo správně rozdrveno a jsou narušena vlákna, mikroorganismy mají k materiálu dobrý přístup a výrazně se zvyšuje provzdušnění zakládky (obrázek 1). Zásadní je také to, aby výchozí surovinová skladba obsahovala dostatečné množství vlhkosti a byla tak umožněna aktivita mikroorganismů.



Obrázek 1 Kousky dřeva (vlevo) nemohou být dostatečně rozloženy mikroorganismy v kompostu, jak je tomu u rozvlákněného dřeva (vpravo). Výsledkem rozvlákněného dřeva je lepší struktura zakládky a umožnění lepšího provzdušnění.

Tabulka 2 Poměr C/N různých organických surovin (ideální C:N surovinové skladby 30-35)

Surovina	C/N	Surovina	C/N
Bioodpad z ovoce	25-40	Kuchyňský bioodpad	15-25
Drůbeží hnůj	8-10	Zahradní odpad	20-35
Zbytky jídla	14-17	Dřevo (piliny)	200-500
Posečená tráva	9-25	Kravsý hnůj	15-20
Seno	15-25	Ořechové skořápky	35
Vyzrálý kompost	12-15	Listí	40-70
Čerstvý kompost	15-18	Sláma	50-100

## 2.4 Technologie kompostování

V průběhu času bylo vyvinuto mnoho technologií (systémů) kompostování. Česká republika má v tomto oboru velkou tradici již z dob první republiky. Postupný vývoj technik a technologií vedl až k automatizaci.

Metoda mechanické/ termofilní kompostování není stejný proces jako metoda vermikompostování, ačkoli oba produkty se nazývají „komposty“. Vermikompostování je biooxidativní proces, ve kterém jsou při rozkládání organického materiálu zapojeny povrchové (epigeické) detritické druhy žížal. Žížaly zde hrají klíčovou roli, jelikož štěpí organickou hmotu a zvyšují povrch, ale skutečný rozklad provádí mikrobiální organismy v jejich trávicím traktu a výměšcích. Vlastnosti vermikompostu jsou těmito procesy spojenými s trávením a vyměšováním pravděpodobně velmi ovlivněny.

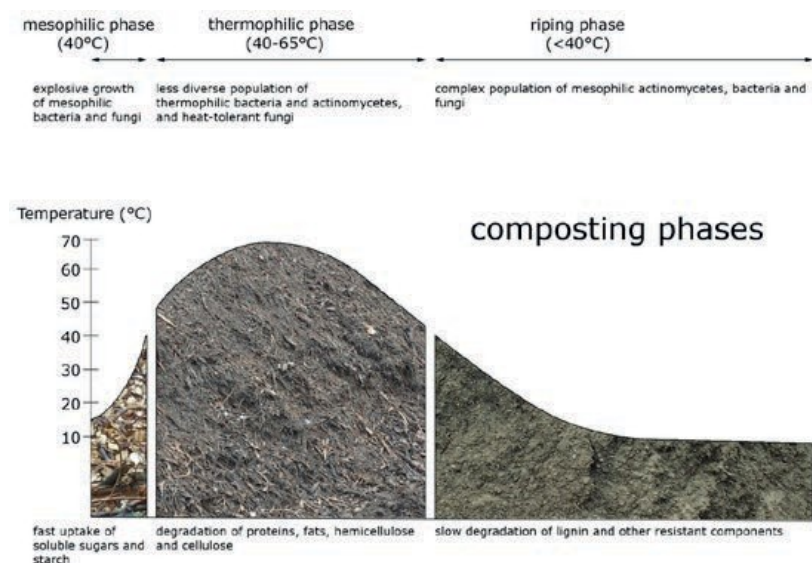
Ve vermikompostování lze rozlišit dvě fáze: (i) aktivní fáze, ve které žížaly zpracovávají odpad fyzickým rozměňováním, trávením a mikrobiálním rozkladem a (ii) fáze dozrávání, kdy se žížaly pohybují do čerstvějších vrstev nestráveného bioodpadu a mikroby je prováděn další rozklad. Proces vermikompostování se od kompostování liší v tom, že teplota zůstává v mezofilním rozmezí. Zvyšuje se tak možnost přežívání patogenů.

### *Poznamenejme si:*

*Volba preferované metody nebo systému kompostování závisí na množství (objem výroby) a kvalitě vstupního materiálu, geografické a klimatické situaci a na preferencích výrobce kompostu, i s ohledem na požadavky na pracovní sílu. Mezi důležité aspekty patří také stupeň automatizace a náročnost práce se systémem kompostování.*

*Rozdíl v produkci kompostu o vysoké nebo nízké kvalitě je určen řízením procesu kompostování. Klíčovým faktorem je přizpůsobení hospodaření podle daného systému. Jednoduchým příkladem je velikost*

kompostovací hromady. Čím vyšší hromada, tím hrubší musí být struktura výchozí směsi. Na obrázku 2 je jednoduchý přehled procesu kompostování ve třech fázích. Doba trvání těchto tří teplotních fází se bude lišit podle metody kompostování. V příloze 7.1 je přehled nejběžnějších systémů kompostování v Evropě. Seznam není kompletní, ale dává představu o rozsahu možností kompostování.



Obrázek 2 Obecný přehled tří kompostovacích fází a rozkladných procesů. Délka různých fází se bude lišit podle používané metody kompostování (zdroj: BIOGREENHOUSE)

## 2.5 Zralost kompostu

Jeden z hlavních faktorů, který ovlivňuje druh kompostu je stupeň jeho zralosti. Během fáze zrání se mění několik vlastností kompostu, které významně ovlivňují účinky kompostu na růst rostlin a úrodnost půdy. Kompost se považuje za „čerstvý“ na konci termofilní fáze a „zralý“ na konci fáze dozrávání. Je nutno poznamenat, že zralost kompostu nelze vyjádřit v týdnech nebo měsících. Čas nutný k dosažení konkrétního stupně zralosti se velmi liší v závislosti na vstupním materiálu a procesu řízení. Účinnou úroveň zralosti lze určit poměrem  $N-NH_4 / N-NO_3$  (viz kapitola 4).

*Poznamenejme si:*

**V čerstvém kompostu** už nejsou rozeznatelné rozložitelné organické materiály (tráva, listy), ale stále lze rozlišit vlákna a kousky dřeva. Většina mineralizovaného dusíku je přítomna ve formě amonia ( $NH_4-N$ ). Pokud vstupní materiál obsahuje významné množství komplexních sloučenin uhlíku (lignin), takový kompost může imobilizovat dusík dostupný v půdě na kratší či delší dobu. Tento druh kompostu stále obsahuje fyto toxické molekuly (meziprodukty tvořené rozkladným procesem) a může být aplikován pouze v menším množství, pokud jsou pěstovány citlivé rostliny nebo v dostatečném předstihu před setím nebo sázením.

**Ve zralém kompostu**, je rozklad organických materiálů dokončen (kromě velkých kusů dřeva, které by měly být odstraněny) a tvoří se drobná struktura, ve které jsou jasně viditelné organické a minerální materiály. Většina mineralizovaného dusíku je přítomna ve formě dusičnanu ( $NO_3-N$ ). Vyzrálý kompost je kompatibilní s růstem rostlin a lze jej použít ve velkém množství. Za předpokladu, že není příliš vysoké salinity je vyzrálý kompost vhodný jako složka substrátu (obrázek 2).

V tabulce 3 jsou shrnuty vlivy různé vlastnosti kombinací vstupních surovin (vstupních surovin bohatých na uhlík nebo dusík) na stabilitu a zralost. Konečným faktorem určující volbu kompostu je jeho cena. Vyzrálý kompost podstupuje delší proces zrání než kompost čerstvý, což obvykle obecně souvisí s jeho vyšší cenou. Při rozhodování by měly být zvaženy konkrétní požadavky na kvalitu kompostu proti jeho ceně.



Tabulka 3 Vliv kombinace vstupních surovin (bohatých na N nebo C) a zralosti (stability) na vlastnosti kompostu

Vlastnosti kompostu	Vstupní suroviny bohaté na dusík		Vstupní suroviny bohaté na uhlík	
	čerstvý	vyzrálý	čerstvý	vyzrálý
Obsah živin	vysoký	vysoký	nízký	nízký
Riziko imobilizace N v půdě	nízký	žádný	vysoký	žádný
Riziko fytotoxicity	vysoký	nízký	vysoký	nízký
Obsah stabilních huminových kyselin	nízký	vysoký	nízký	velmi vysoký
Riziko salinity	vysoký	vysoký	nízký	nízký
Riziko ztrát průsakovou vodou	střední	nízký	vysoký	nízký

### 3 Mikrobiologie v procesu kompostování

#### **Souhrn:**

- Kompostování je proces přeměny organické hmoty na stabilní látky podobné humusu.
- Tento proces provádí mikroorganismy (bakterie a houby).
- Nejčastějším procesem je termofilní kompostování. Aby byl tento proces optimální, musí projít fází, ve které teplota v kompostovací zakládce dosáhne po určenou dobu úrovně nad 60 °C. Za těchto podmínek je také vyhubena většina rostlinných i lidských patogenů.
- Mikroorganismy rozkládají organickou hmotu za tvorby CO<sub>2</sub>, vody a energie.
- V každé fázi kompostování a uchovávání kompostu jsou aktivní jiné skupiny bakterií a hub, za tvorby cílového produktu: kompostu.

#### 3.1 Proces kompostování

Kompostování je přirozený proces, ve kterém je čerstvá organická hmota (hnůj, zbytky jídla, bioodpad tříděný u zdroje, zemědělský odpad atd.) přeměněna na stabilnější látky podobné humusu, živiny jsou „recyklovány“ a vzniká energie. Proces by měl být aerobní a část je prováděna v termofilních podmínkách. Důkladným kompostováním organických surovin je dosaženo řady důležitých cílů. Vylučuje se fytotoxicita, ničí se patogeny a semena plevelů (viz kapitola 5), a materiál se stabilizuje s ohledem na požadavky N a kyslíku, předchází se tak imobilizaci N půdní biotou, která s rostlinami o omezené zdroje N soupeří. Kompostováním se získá materiál, který se snadno aplikuje a může být využit pro zlepšení půdy a jako složka hnojiva či pomocná půdní látka.

#### *Průběh kompostovacího procesu:*

Po několika dnech počáteční fáze se teploty zvyšují nad 60 °C, pokud jsou kontrolovány. Trvá tak dlouho, dokud veškerá rozložitelná organická hmota není rozložena. Pro stejnoměrné kompostování je důležité, aby byl veškerý materiál vystaven podobným teplotám. To splňují mnohé systémy technologií tím, že do kompostovací zakládky je pravidelně dodáván vzduch. Pokud se u technologie (např. otevřené rošty s ventilací) neprovádí překopávka, může být problematické dosáhnout stejné teploty v rámci celé zakládky. V návrhu technologie kompostárny by měly být zváženy způsoby homogenizace (příprava surovinové sklady). Jakmile je snadno rozložitelná hmota rozložena, teplota se začne snižovat a když klesne pod 40 °C, kompost osídlí mezofilní mikroorganismy, včetně nitrifikačních bakterií.

Poslední fáze aktivního kompostování umožňuje období dozrávání, kdy kompost dozrává a je připraven k použití.

#### *Poznamenejme si:*

*Kompostování se využívá po staletí. První zmínka, která podporuje hypotézu, že jde o biologický proces, byla ale získána teprve před sto lety. Mikroorganismy v tomto procesu hrají hlavní roli, protože jsou odpovědné za rozklad organické hmoty.*

### 3.2 Co jsou mikroorganismy?

Mikroorganismy jsou malé živé organismy. Nacházejí se téměř všude: v půdě, ve vodě i ve vzduchu. Jsou hojně přítomny v trávicím traktu člověka i živočichů, na lidské kůži atd.

Dvěma hlavními skupinami mikroorganismů, které jsou důležité v procesu kompostování, jsou bakterie a houby. Bakterie jsou velmi malé a pouhým okem neviditelné. Můžeme je vidět pouze ve formě kolonií na miskách s umělým médiem (příklad na obrázku 3). Některé bakterie mohou tvořit skupiny nebo filamenta (vlákna, jako aktinomycety). Ačkoli jsou vzhledem k houbám malé, jejich síla je v počtu. Snadno dostupnou organickou hmotu, jako jsou cukry, obvykle rozkládají rychleji než houby. Jsou proto důležité v prvních fázích kompostování, kdy jsou ve vstupních surovinách dostupné vysoké hladiny karbohydrátů.

*Aktinomycety* jsou specifickou skupinou bakterií, která byla dříve klasifikována jako samostatná mikrobiální skupina. *Aktinomycety* mohou nezkušenému pozorovateli připadat spíše jako houby, protože tvoří filamenta (vláknité struktury). Tato skupina má ve srovnání s dalšími bakteriemi trochu odlišné požadavky na výživu. Mohou rozkládat komplexnější molekuly, jako je hemicelulóza, škrob nebo dokonce lignin. Vyskytují se více v pozdějších fázích kompostování, kdy většina snadno rozložitelného substrátu už byla vyčerpána.

*Houby* jsou skupinou větších organismů. Často tvoří hyfy, což jsou vlákna buněk viditelná pouhým okem. Proto si lidé původně mysleli, že v kompostovacím procesu jsou zapojeny pouze houby. Houby bývají důležitější v pozdějších fázích kompostování, kdy jsou rozkládány odolnější látky, jako je hemicelulóza, lignin a pektin. Příklady toho, jak vypadají bakterie a houby izolované z kompostu, jsou na obrázku 3.



Obrázek 3 Příklady bakterií a hub izolovaných z kompostu a pěstovaných v umělém médiu na Petriho misce (zdroj: BIOGREENHOUSE)

### 3.3 Odkud mikroorganismy v kompostu pocházejí?

Každý druh organické hmoty, který se používá jako vstupní surovina pro kompostování, obsahuje nepřeberné množství bakterií a hub. Zobecnit informace ohledně přítomnosti mikroorganismů v různých vstupních kompostovacích surovinách je obtížné. Jaké skupiny mikroorganismů a v jakém množství se vyskytují, je ovlivněno řadou faktorů. Patří mezi ně druh organické hmoty, obsah vody a teplota. Počet mikroorganismů a jejich identita se bude zcela jistě jiná u dřevěné štěpky než u dobytčího hnoje.

Různorodost mikroorganismů ve vstupních surovinách je pro proces kompostování přínosná, jelikož různé organismy mohou rozkládat jiné druhy organických molekul. Tento proces je mikroorganismy

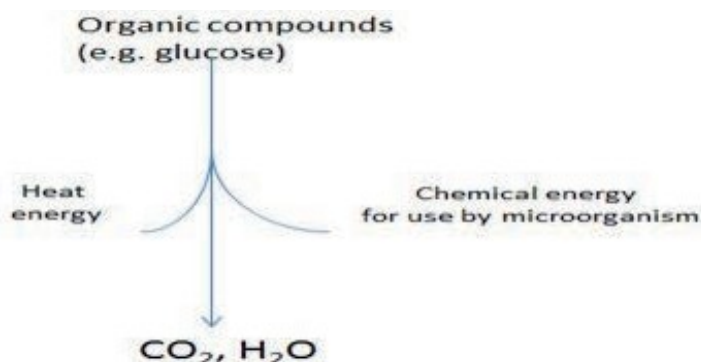
započat a jejich vlastní aktivita mění vlastnosti organické hmoty, která je jim dostupná. To následně způsobuje změny v mikrobiální komunitě a v daném čase procesu kompostování převládají konkrétní fyziologické skupiny nad jinými.

### 3.4 Proč to mikroorganismy dělají?

Mikroorganismy jsou živé. Ke svému životu potřebují energii a živiny stejně jako lidé, živočichové nebo rostliny. Bakterie a houby tedy potřebují „potravu“. Některé bakterie vytvářejí energii pouze z anorganických látek. Jiné ke svému růstu potřebují organické uhlíkaté (C) sloučeniny. Takové mikroorganismy se nazývají heterotrofy. Organické vstupní suroviny využívané v kompostování jsou bohaté na organickou hmotu, kterou mohou mikroorganismy rozkládat. Kompostování surovin živočišného původu (dále jen ŽP) je účinným způsobem řešení problému ohnisek infekčního onemocnění, který je přátelský vůči prostředí. Kompostování odpadů ŽP je vynikajícím způsobem, jak recyklovat tento odpad bohatý na živiny. Je potřeba poznamenat, že rostlinný odpad (dále jen RP) je často příliš objemný. Materiál by měl být nejdříve rozdrčen na malé části, aby se podpořil vstup bakterií do substrátu a urychlil se proces kompostování. Drcení také zlepšuje manipulaci s materiálem a usnadňuje předběžnou kontrolu a míchání (homogenizaci). Vstupní suroviny obsahují vysoké množství cukrů, karbohydrátů, bílkovin, celulózy, hemicelulózy a ligninu. Tyto sloučeniny slouží pro růst bakterií a hub jako snadno dostupný zdroj energie.

#### *Poznamenejme si:*

*Mikroorganismy tvoří během aerobního rozkladu (v přítomnosti kyslíku) organických sloučenin oxid uhličitý, vodu a energii. Tomuto procesu se říká respirace (obrázek 4).*



Obrázek 4 Schéma aerobního rozkladu (v přítomnosti kyslíku) organických sloučenin: mikroorganismy tvoří oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), vodu a energii. (zdroj: BIOGREENHOUSE)

Mikroby, podobně jako lidé, nevyužívají energii plně. Významné množství energie vytvořené během respirace se ztratí ve formě tepla. V přírodních podmínkách (např. les nebo zemědělská půda) to nevede k výraznému zvýšení teploty prostředí, jelikož většina generovaného tepla se rozptýlí do okolí.

#### *Poznamenejme si:*

*Při kompostování je ale organická hmota uložena do zakládek nebo uzavřených boxů a rozptýlení tepla je omezeno. Proto se teplota kompostovacích zakládek mikrobiální aktivitou zvyšuje. Stupeň zahřívání je během procesu kompostování určen rozložitelností a obsahem energie vstupních surovin, spolu s dostupností kyslíku a vlhkosti. Mikrobiální aktivita je regulována generovaným teplem a kvalitou organické hmoty, která v kompostovací hromadě zbývá. Tyto faktory ovlivňují také to, které mikroorganismy jsou v každé fázi kompostování přítomny.*

## 3.5 Co mikroorganismy ke své práci potřebují?

### 3.5.1 Živiny

Už jsme zmínili výše, že většina mikroorganismů potřebuje organické uhlíkaté sloučeniny (C), ale pouze z uhlíku žít nemohou. Jako každý jiný živý organismus potřebují dodávat makroživiny (jako je N, P, K, Mg, S) a mikroprvky.

Jedním z nejdůležitějších prvků, které mikroorganismy kromě uhlíku potřebují, je pravděpodobně dusík (N). Je nezbytný pro syntézu proteinů, aminokyselin a DNA. Mikroorganismy potřebují z hmotnostního hlediska výrazně více N než rostliny. Poměr C: N u bakterií je asi 10, zatímco u některých rostlinných tkání může dosahovat hodnoty až 100.

Pokud je přísun N omezen, proces kompostování se zpomaluje. V praxi je proto u kompostování velmi důležité vytvářet dobrou směs vstupních surovin s optimálním poměrem C:N. Bylo ověřeno, že optimální poměr C:N pro kompostování je v rozmezí 25 až 35. Pokud má výchozí materiál poměr C:N menší než 25, může být rozložen příliš rychle, a je tedy produkováno příliš mnoho tepla, které způsobuje tvorbu anorganických látek. N pak bude rozptýlen ve formě amonného (NH<sub>3</sub>) plynu. Pokud je poměr C:N nad 35, rozklad organické hmoty se může výrazně zpomalit. Pokud je hodnota vyšší, rychlost rozkladu bude pomalá a výsledný kompost nemusí být správně stabilizován. Vysokých teplot za těchto podmínek nelze dosáhnout a semena i rostlinné a lidské patogeny mohou přežívat. Poměr C:N se během procesu sám snižuje, protože část uhlíku se rozptýlí jako plyný CO<sub>2</sub> mikrobiální respirací, zatímco většina N je zadržována v systému.

Požadovaného poměru C:N může být dosaženo analýzou vstupních surovin a úpravou obsahu C a N. Zelený odpad může mít poměr C:N typicky mezi 45-50 a s cílem produkce vyhovujícího kompostu je tedy nutné kombinovat ho s materiálem s vysokým obsahem N, jako jsou zbytky jídla nebo drůbeží podestýlka. Obsah N se měří jako celkový N, zatímco obsah C může být stanoven z obsahu spalitelných látek pomocí rovnice:

$$\% C = \frac{\% \text{ spalitelných látek}}{2}$$

#### *Poznamenejme si*

*Měli bychom poznamenat, že zatímco poměr C:N se jako indikátor „kompostovatelnosti“ běžně používá, v biologické rozložitelnosti různých organických materiálů jsou významné rozdíly, které s poměrem C:N nesouvisí. Jak je zmíněno výše, poměr C:N během tvorby kompostu klesá, tvoří se CO<sub>2</sub> a jako jeden z indikátorů zralosti / stability kompostu je obecným cílem koncová hodnota okolo 15.*

#### Mineralizace / termofilní fáze

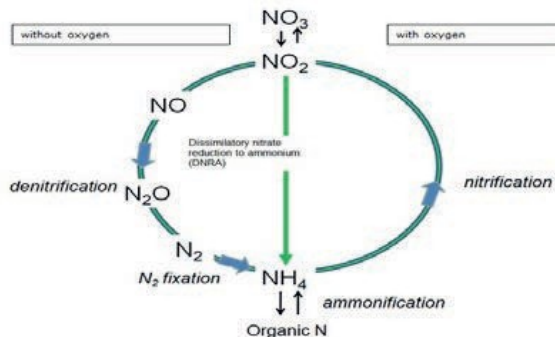
Dusík obsažený ve vstupních surovinách kompostu je většinou v organické formě. Během prvních kroků kompostování vede rozklad aminokyselin ke tvorbě amonia (NH<sub>4</sub>). Díky své relativně nízké rozpustnosti může být amonný plyn (NH<sub>3</sub>) brzo rozptýlen ve vzduchu. Rozpustnost NH<sub>3</sub> ve vodě je při normálních hladinách pH nízká. Ačkoli se rozpustnost NH<sub>3</sub> zvyšuje, se snížením pH na hodnotu 6 je možné uchovat více dusíku.

#### Nitrifikace / mezofilní fáze

Pro zachování N v systému mineralizuje speciální skupina bakterií, zvaná jako nitrifikační bakterie, plyn NH<sub>3</sub> přes dusitan (NO<sub>2</sub>) na dusičnan (NO<sub>3</sub>). K tomu, aby byly tyto bakterie schopny provést tuto přeměnu, potřebují kyslík. Naneštěstí jsou ale výhradně mezofilní, takže se NH<sub>3</sub> během termofilní fáze zcela jistě ztratí. Nitrifikace začíná ve chvíli, kdy proces kompostování produkuje méně tepla. Za začátku je pomalá a své plné kapacity dosahuje během fáze zrání. Rostliny mohou NO<sub>3</sub> využít později jako zdroj N.

### Dozrívání kompostu

Poměr mezi  $\text{NO}_3\text{-N}$  a  $\text{NH}_4\text{-N}$  je často využíván jako indikátor zralosti kompostu (viz kapitola 4). Ve zralém kompostu je většina rozpustného anorganického dusíku přítomna ve formě dusičnanů, které už nemohou být dále oxidovány. Cesty přeměny dusíku v průběhu kompostování a uchovávání kompostu jsou uvedeny na obrázku 5.



Obrázek 5 Cyklus dusíku v průběhu kompostování (upraveno po Maeda a kol., 2011).

### 3.5.2 Kyslík

Kompostování by neprobíhalo bez dostatečného přísunu kyslíku ( $\text{O}_2$ ). Pokud je kyslíku nedostatek, aerobní mikroorganismy jsou nahrazeny těmi, které dokážou přežít bez kyslíku. Tyto anaerobní mikroorganismy začnou rozkládat organickou hmotu procesem, kterému se říká fermentace. Tento druh přeměny vede k nekompletní oxidaci organických sloučenin na  $\text{CO}_2$ , vodu a teplo. Výsledkem je tvorba nežádoucích organických sloučenin, jako jsou těkavé mastné kyseliny, které způsobují nepříjemný zápach a kompost se mění na fytotoxický. Dobré provzdušnění je zapotřebí také pro dokončení nitrifikačního procesu (oxidace  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$  na  $\text{NO}_3$ ) uvedeného v kapitole 3.5.1. Dusitany ( $\text{NO}_2$ ) se z prvního kroku nitrifikace bez dostatku kyslíku mohou hromadit. Pro mnohé mikroorganismy a rostliny jsou dusitany toxické.  $\text{NO}_2$  se mohou hromadit také během uchovávání nedostatečně provzdušněného kompostu.  $\text{NO}_3$  je následně redukován přes  $\text{NO}_2$  na plynný dusík ( $\text{N}_2$ ) procesem, kterému se říká denitrifikace, prováděným anaerobními bakteriemi.

Ačkoli je kompostovací hromada především aerobním prostředím, mohou se v ní vyskytovat také zóny s malým nebo žádným množstvím kyslíku. Tvoří se v místech, kde je tak vysoká mikrobiální aktivita, že kyslík není dostatečně rychle doplňován.

#### *Poznamenejme si:*

*Je proto důležité nezapomenout hromadu často převracet a umožnit tak správné provzdušnění. Je také nutno pamatovat na to, že bakteriální aktivita v kompostu na konci kompostovacího procesu nezaniká. V kompostu jsou bakterie stále přítomny a pro zaručení jeho dobré kvality musí být kompost správně uchováván (provzdušňován, ne příliš suchý). Jen tak je možné zetrátám dusičnanů skrze denitrifikaci a zahnívání kompostu.*

### 3.5.3 Voda

Kromě živin a kyslíku potřebují mikroorganismy také vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ). V suchém prostředí nejsou schopny fungovat. Houby jsou na nedostatek vody méně citlivé. Bakterie však ke svému přežití vodu potřebují. Mohou přežít ve vodním filmu na površích.

Obsah vlhkosti je tedy pro kompostování velmi důležitým faktorem. Pokud je hromada příliš suchá, proces kompostování nenastane. Za minimální obsah vlhkosti je často považováno 40 % a obsah vlhkosti v rozmezí 40–65 % je v průběhu termofilní fáze optimální hodnotou. Je však důležité, aby kompostovací hromada nebyla převlhčena. Vysoký obsah vlhkosti znesnadňuje difúzi kyslíku do hlubších částí hromady. Výsledkem je to, že kyslík je vyčerpán a místo kompostování začnou mikroorganismy organickou hmotu fermentovat.

#### *Poznamenejme si:*

*Klíčem tedy je, aby kompostovací zakládka byla stále vlhká, ale ne příliš mokrá. Převlhčení může způsobit také vyplavování živin a znečištění prostředí. Optimální obsah vlhkosti je zásadní také pro správné chlazení kompostu, aby nedošlo k jeho přehřátí a tvorbě anorganických látek*

### 3.6 Jak mikroorganismy pracují?

Mikrobiální populace se v rámci kompostovací zakládky v průběhu času mění. Už jsme zmínili dříve, že mikrobiální komunity se v různých vstupních surovinách liší. Platí to jak pro začátek kompostování, ale také po zahájení tohoto procesu se mikrobiální populace rychle mění. Nakonec všechny kompostovací zakládky procházejí specifickými fázemi, které jsou spojeny s konkrétními metabolickými procesy. Jak a proč se to děje bude vysvětleno níže.

Zaměříme se na jeden druh kompostování: horké kompostování. Dalším druhům, jako je studené kompostování nebo vermikompostování, se zde věnovat nebudeme, protože pro produkci velkého množství kompostu se zatím používají zřídka.

#### 3.6.1 Zahřívací fáze (první mezofilní fáze 25–40 °C)

Po úpravě vstupních surovin a optimalizaci obsahu vlhkosti (40-65 %) – homogenizace, začne teplota se zvýšením mikrobiologické aktivity stoupat.

Rozklad organické hmoty během počáteční fáze kompostování rychle postupuje. Organická hmoty je charakterizována vysokým procentem snadno rozložitelných sloučenin, jako jsou cukry a bílkoviny. Bakterie jsou v boji o snadno rozložitelné zdroje uhlíku úspěšnější a rychle tak vytlačí houby. Zahřívací fáze trvá obvykle krátkou dobu, zabere pouze několik dní. Mikroorganismy jsou tak aktivní, že svým metabolismem vytvářejí mnoho tepelné energie, což vede k rychlému zvýšení teploty. V této fázi jsou často přítomny bakterie jako *Lactobacillus* a *Acetobacter*. Produkují organické kyseliny, jako je kyselina mléčná a octová. Během prvních několika dní kompostování může dokonce docházet k přechodné akumulaci těchto kyselin. Tyto organické kyseliny jsou rychle rozkládány jinými druhy bakterií, které jsou v kompostovací hromadě přítomny. Teplota dále stoupá a některé bakterie už v tomto prostředí nejsou schopny fungovat. Mikroorganismy přizpůsobené vyšším teplotám postupně nahrazují mezofilní bakterie a houby. Tím začíná druhá fáze.

#### 3.6.2 Termofilní fáze (40–65 °C)

Během této fáze proces rozkladu rychle postupuje a vede k tvorbě více tepelné energie. Teplota v základu kompostovací hromady může dosahovat až 65 a 70 °C. Rozkládaná organická hmoty je nyní komplexnější jako celulóza, lignin a tuky. Díky vysokým emisím amoniaku z bílkovin je také vyšší hodnota pH. Termofilní bakterie jako *Bacillus* a *Actinomyces* převládají nad mikrobiální komunitou v termofilní fázi. Houby při teplotách nad 55 °C běžně aktivní nejsou, s výjimkou několika termofilních druhů. Výjimkou je kompostování substrátů, které jsou bohaté zejména na celulózu a lignin. V těchto případech jsou houby v rozkládání v celém procesu důležité.

### 3.6.3 Ochlazovací fáze (druhá mezofilní fáze (25 -45°C))

Mikrobiální rozklad se výrazně zpomaluje, jelikož začíná být omezena dostupnost téměř všech organických substrátů. Je tedy produkováno i méně tepelné energie a teplota kompostovací zakládky klesá. Kompost je kolonizován bakteriemi, které upřednostňují teploty kolem 25 – 40 °C. Během zahřívací fáze v mikrobiální komunitě převládají organismy, které rozkládají cukry, oligosacharidy a bílkoviny. V ochlazovací fázi převládají mikroorganismy s podobnou tepelnou tolerancí, ale s odlišnou metabolickou aktivitou. Chemické vlastnosti kompostovací zakládky se před a po horké fázi výrazně liší. Po horké fázi obsahuje kompostovací zakládka pouze komplexní organické sloučeniny. Hojně jsou proto přítomny mikroorganismy, které jsou schopny je rozložit. Během ochlazovací fáze mohou kompost kolonizovat mnohé bakterie, které rozkládají celulózu. Možnost růstu v kompostu získávají houby, jako je *Aspergillus*. Kompost je kolonizován také bakteriemi a houbami, které jsou přínosné pro růst a zdraví rostlin, jako jsou mykoparazitické druhy *Trichoderma*. Omezená dostupnost snadno rozložitelného uhlíku vede k tomu, že mikroorganismy k jeho získání zavádějí jiné strategie. Jednou z nich je tvorba antibiotik *Aktinomycety*, které jsou namířeny proti houbám. Tyto sloučeniny mohou být později účinné proti rostlinným patogenním houbám.

### 3.6.4 Fáze dozrávání

Kompost po ochlazovací fázi neobsahuje pro heterotrofní bakterie mnoho životaschopných zdrojů energie. Mikrobiální komunita je proto postupně pomalu přeměňována. Nyní kompost kolonizují druhy bakterií, které jsou na snadno dostupném organickém uhlíku méně závislé. Začíná se dařit také houbám, protože jsou pro využití zbývajícího substrátu, jako jsou ligniny, lépe vybaveny. Mikroorganismy v kompostu zůstávají aktivní, ale změny chemických vlastností kompostu, způsobené jejich aktivitou, nejsou tak zjevné jako v průběhu termofilní fáze kompostování.

### 3.6.5 Zralost (stabilita) kompostu

Stabilita a zralost kompostu jsou ve vztahu k jeho využití důležitými vlastnostmi (především pro ekologické zemědělství). Pojem stabilita znamená stav, kdy teplota klesá na úroveň prostředí, zatímco zralost se vyznačuje připraveností podporovat růst rostlin bez známek fytotoxicity, nadbytečné spotřeby O<sub>2</sub> nebo imobilizace N. Pokud po jeho začlenění do půdy pokračuje aktivní rozklad, růst rostlin bude ovlivněn negativně z důvodu snížené hladiny dostupného O<sub>2</sub> a N a/nebo přítomnosti fytotoxických sloučenin.

#### *Poznamenejme si:*

*Pro hodnocení stability / zralosti/fytotoxicity kompostu bylo vyvinuto několik testů. Běžné testy stability a zralosti jsou respirometické, založené na spotřebě O<sub>2</sub> a vzniku CO<sub>2</sub>, nebo testy samozahřívání. Jako velmi citlivé měření zralosti kompostu je navrhováno testování míry produkce tepla pomocí mikrokalorimetrie. Inovační technologie stanovení stupně stability metodou NIRS – infračervená spektroskopie (ZERA, BFA) nebo Inbar et al. použil pro určení stupně kompostování nukleární magnetickou rezonancí pevného C a infračervenou spektroskopii.*

*Pro hodnocení zralosti kompostu se používají chemické testy, jako je poměr NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub>, poměr C:N a obsah těžkých organických kyselin fytotoxické testy jsou založeny na biologickém hodnocení, které kontroluje negativní vlivy na klíčení semen a růst rostlin.*

## 4 Kontrolní opatření pro produkci a použití kompostu

### **Souhrn:**

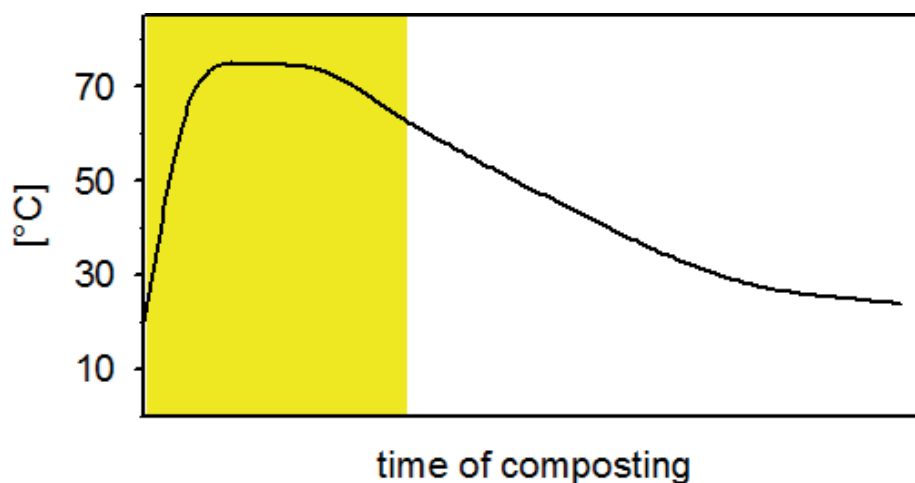
- Řízení procesu kompostování závisí na pravidelné kontrole teploty, obsahu vlhkosti a koncentrace kyslíku.
- Určení množství amonia ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), dusitanů ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) a dusičnanů ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) v kompostu umožňuje hodnocení jeho zralosti, kvality procesu kompostování a uchování produktu, a riziko imobilizace N nebo jeho uvolnění do půdy.
- Zralost a kvalitu produkovaného kompostu mohou hodnotit testy rostlinné fytotoxicity.
- Volba vhodného kompostu, strategie jeho aplikace a použití by měla být řízena analýzami hodnot pH, salinitou, intenzitou zbarvení extraktu a obsahu živin.

Jak je popsáno v kapitole 2, existují různé systémy / technologie kompostování, stejně jako druhy kompostu. Biologický proces, popsáný v kapitole 3, je však podobný a je závislý na použité technologii. Příslušné parametry, které umožňují kontrolovat proces kompostování a kvalitu produkovaného kompostu jsou tedy pro všechny systémy v zásadě podobné. Tyto parametry jsou, v kombinaci s několika dalšími, důležité pro stanovení kvality produkovaného kompostu a volbu správného kompostu pro různé aplikace. Tento proces tedy jeho parametry je důležité monitorovat (vést evidenci zakládky).

### 4.1 Opatření / parametry pro kontrolu / monitoring výroby / produkce kvalitního kompostu

#### 4.1.1 Teplota

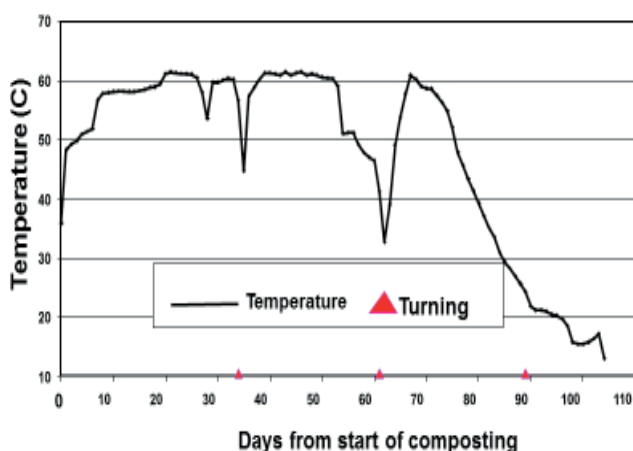
Díky velmi intenzivní mikrobiologické aktivitě na počátku procesu kompostování se zvyšuje teplota v základce až na 60 °C a více (obrázek 6). Po nějakém čase teplota znovu klesá a proces kompostování přechází z fáze rozkladu (obrázek 6, žlutá část) do fáze zrání (obrázek 6, bílá část).



Obrázek 6 Teoretický vývoj teplot v kompostovacích hromadách v průběhu procesu kompostování (graf: Ulrich Galli).



Temperature course within an aerated pile + 3 turnings  
(Separated cattle manure + tomato plants, set-point=60°C).  
Active period: 90 days



Obrázek 7 Vývoj teplot v kontrolované kompostovací hromadě v průběhu klasického procesu kompostování (graf: Michael Raviv).

#### Poznamenejme si:

Dosažená úroveň teploty závisí na reaktivitě výchozí směsi a kontrolních / monitorovacích prostředcích. Optimálně by teplota měla dosáhnout 60–65 °C. Pro lepší biologickou kvalitu kompostu není vyžadována teplota až 70 nebo 80 °C. To nastává, když je výchozí směs příliš bohatá na N v kombinaci s dostatečným množstvím kyslíku a nedostatečným obsahem vlhkosti. Velmi vysoké teploty v hromadě omezují diverzitu mikroorganismů v kompostovaném materiálu a snižují míru rozkladu.

Zvýšení teploty během procesu kompostování a její udržení po danou dobu je zásadní pro zajištění zániku plevele a patogenů, které jsou běžně přítomny ve výchozí surovinové skladbě (viz kapitola 5). Z toho důvodu musí teplota dosáhnout hodnot (tab. č. 4) a kompostovací zakládka je potřeba v tomto období alespoň dvakrát převrátit.

Nedostatečně vysokou teplotu lze pozorovat u výchozích směsí obsahujících příliš mnoho uhlíku, u příliš suchých, příliš mokrých směsí nebo v případě nedostatečného množství kyslíku v zakládce. Dosažení vhodné teploty by se správným řízením systému nemělo být problémem.

Tabulka 4 Časově – teplotní limity pro kompostovací proces

Teplotní limit	Časový interval
≥ 70 °C	souvisle po dobu min. 3 dny
≥ 65 °C	souvisle po dobu min. 5 dní
≥ 60 °C	souvisle po dobu min. 7 dní
≥ 55 °C	souvisle po dobu min. 14 dní

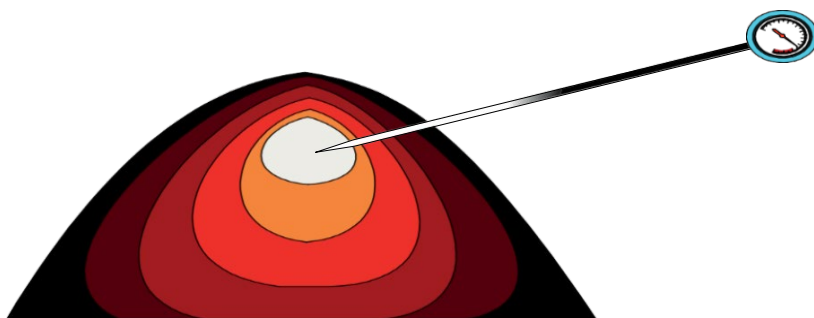
Řízení obsahu vlhkosti v zakládce je důležitým faktorem, který do jisté míry ovlivňuje vývoj teploty (viz níže). Vývoj teploty je zásadním indikátorem kvality procesu kompostování. Na začátku procesu se běžně teplota zvyšuje relativně rychle a následně pomalu klesá. Po provzdušnění zakládky kompostu teplota klesne a ihned se opět zvyšuje. Provzdušňování totiž způsobí přerozdělení molekul mezi produkty rozkladu, optimalizuje rozdělení kyslíku v hromadě a spouští tak biologickou aktivitu uvnitř zakládky.

### *Poznamenejme si:*

Vývoj průměrných teplot je relativně stabilní, pokud se proces kompostování vyvíjí dobře. Prudký pokles teploty je známkou toho, že něco v procesu funguje špatně, např. nedostatečná nebo naopak nadměrná vlhkost, nebo omezená přítomnost dostupného dusíku.

Vývoj teploty musí být zaznamenáván pravidelně, nejlépe každý den nebo alespoň třikrát týdně. Je důležité měřit teplotu správně: v horkém místě (v hloubce 40-50 cm, viz obrázek 8) na 3 až 10 místech v zakládce (v závislosti na velikosti zakládky). Tato data jsou důležitá, protože poukazují na správnou přirozenou hygienizaci kompostu (viz kapitola 5). U větších zakládek kompostu by teploměry (nebo lépe senzory propojené se zapisovačem dat) měly být vkládány do středu zakládky v polovině její výšky.

**Doba trvání procesu kompostování není jako parametr kvality relevantní. Dokončení procesu může trvat mezi 10 týdny až 6 měsíci v závislosti na vstupním materiálu, kompostovacím systému a intenzitě řízení procesu.**



Obrázek 8 Teplota hromady kompostu musí být měřena ve středu (graf: Ulrich Galli)

#### 4.1.2 Obsah vlhkosti

Jak vysvětluje kapitola 3, mikroorganismy jsou aktivní pouze tehdy, pokud je k dispozici dostatečná vlhkost. Na druhé straně ale nadměrná vlhkost může vést k nežádoucím anaerobním procesům, které mohou proces kompostování dokonce i zastavit. Odpařování vody ze zakládky je důležité z toho důvodu, aby se zabránilo příliš vysokým teplotám a optimalizovala se mikrobiální aktivita. Množství potřebné vody se pro udržení optimální vlhkosti v zakládce kompostu v průběhu procesu mění. Toto odpařování se zvyšuje intenzivním překopáváním kompostu nebo aktivním provzdušňováním zakládky. V této fázi je proto klíčové, aby byl zachován optimální obsah vlhkosti. Později během fáze zrání je ztráta vody mnohem menší a její nadměrná dodávka může rychle vést k příliš vysokým hladinám vlhkosti v kompostu. Rozložení vlhkosti v zakládce musí být pro stejnoměrnou kvalitu kompostu homogenní. To je dalším důvodem pro pravidelné překopávání zakládky kompostu.

#### *Poznamenejme si:*

Obsah vlhkosti je ve vnější vrstvě zakládky kompostu obecně jiný (0-20 cm) než v jiných částech. Měl by proto být určen pomocí testovacích vzorků z vnitřních částí hromady (typicky 40-50 cm hluboko).



Obrázek 9 Pěstní zkouška pro kontrolu vlhkosti kompostu v průběhu procesu kompostování. Zleva doprava: příliš mokrá, optimální a příliš suchý.

Optimální obsah vlhkosti pro proces kompostování zhruba odpovídá asi 50 % obsahu suché hmoty. Obsah vlhkosti lze určit pomocí takzvané pěstní zkoušky (obrázek 9): vezměte plnou hrst kompostu a co nejsilněji ji zmáčkněte. Pokud z ní vytéká voda, je kompost příliš mokrá. Rozevřete prsty. Pokud se materiál kompostu sám rozpadá, kompost je příliš suchý. Pokud zůstává materiál kompaktní, vlhkost kompostu je optimální.

#### 4.1.3 Obsah kyslíku

Pro optimální proces kompostování musí být obsah kyslíku v zakládce kompostu alespoň 3 až 5 %. Důležité je také věnovat pozornost rozložení kyslíku v zakládce a ujistit se, že každý kousek suroviny ho má dostatek. Zde je potřeba vyhnout se zejména tvorbě hrud prostřednictvím překopávání zakládky kompostu s vysokou vlhkostí – v těchto kusech nastanou anaerobní podmínky. Zajištění aerobních podmínek v celé zakládce lze ověřit měřením přítomnosti methanu (obsah  $\text{CH}_4$  v zakládce – to lze provést pomocí přenosného plynového analyzátoru). Nepřítomnost  $\text{CH}_4$  je indikátorem homogenní distribuce kyslíku. Dále měřidly na obsah kyslíku (speciální sondy, mobilní přístrojová měřidla).

#### *Poznamenejme si:*

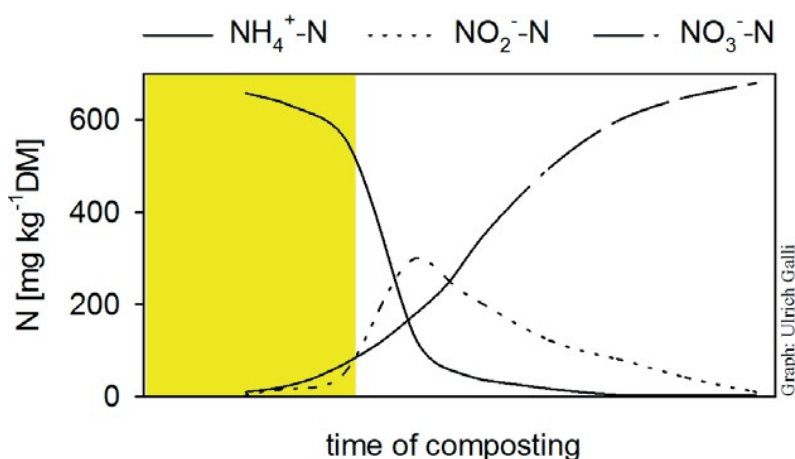
Požadavky na přítomnost kyslíku jsou mnohem významnější v termofilní fázi procesu kompostování. Později se snížením mikrobiologické aktivity prudce klesají i požadavky na kyslík, až k nízkým hladinám. Důležité je neustále udržovat minimální hladinu kyslíku v kompostu, aby byla zajištěna vysoká biologická kvalita, a to i během uchovávání vyzrálého produktu (například oddělení strukturního materiálu – až před vlastní použitím/aplikací).

#### 4.1.4 Dostupný dusík

Dusík (N) je v kompostu přítomen především v organické formě, která je pro rostliny méně, v půdě postupně dostupná. Největší část N přijatého rostlinami je však ve formě minerální. V kompostu jsou významné tyto formy minerálního dusíku: ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), dusitany ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) a dusičnany ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Během procesu kompostování se hodnotí koncentrace těchto tří forem (obrázek 10 a kapitola 3).

- $\text{NH}_4\text{-N}$  je první formou mineralizovaného dusíku, která se v kompostu nachází, když je rozkládán organický materiál.
- $\text{NH}_4\text{-N}$  je rozpustný ve vodě a v případě příliš nízkého obsahu vlhkosti je rozptýlen za tvorby plynného  $\text{NH}_3$  (amoniak).

- $\text{NO}_3\text{-N}$ . Během fáze zrání dochází k nitrifikaci a  $\text{NH}_4\text{-N}$  se přeměňuje na  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Pokud ve fázi zrání nebo uchovávání dojde k vyčerpání kyslíku, bakterie ho dokážou získat z  $\text{NO}_3$  a ten přeměnit zpátky na dusitan ( $\text{NO}_2$ ; toxický pro rostliny) nebo oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ; silný skleníkový plyn).
- Meziproduktem je  $\text{NO}_2\text{-N}$ , fytotoxický produkt vznikající během nitrifikace. Může být také výsledkem denitrifikačního procesu z nedostatku kyslíku na konci fáze zrání nebo z uchovávání kompostu.



Obrázek 10 Vývoj mineralizovaných forem dusíku v hromadě kompostu v průběhu procesu kompostování (graf: Ulrich Galli).

#### Poznamenejme si:

Pokud je surovinová skladba bohatá na uhlík nebo pokud je proces kompostování řízen nesprávně (např. nízký obsah vlhkosti), v kompostu se nemusí nacházet žádný minerální N. Je imobilizován v mikrobiální komunitě nebo rozptýlen jako  $\text{NH}_3$ . V tomto případě se proces kompostování může zastavit z důvodu nedostatku dostupného N. Pokud je takový kompost aplikován, je také možné, že k imobilizaci N dojde na poli a pokud není přidán jiný zdroj dusíku, zastaví se růst rostlin. Hodnoty mineralizovaných forem N jsou tedy na jedné straně klíčovými parametry pro řízení procesu kompostování a identifikaci vhodného použití kompostu na straně druhé.

$\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  a  $\text{NO}_2\text{-N}$  lze snadno analyzovat pomocí různých rychlých testů v 0,01 M CaCl nebo KCl extraktech kompostu. Vysvětlení výsledků měření je popsáno v tabulce 5. Nejdůležitější nejsou absolutní hodnoty, ale vztah mezi různými formami mineralizovaného dusíku.

Tabulka 5 Vysvětlení významu množství různých forem mineralizovaného dusíku v kompostu

Přítomnost formy $\text{N}_{\text{min}}$			Vysvětlení
$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	
--	--	--	Žádný dostupný N. Směs je příliš bohatá na uhlík nebo byl veškerý $\text{NH}_4\text{-N}$ rozptýlen z důvodu nedostatku vlhkosti. Pokud je kompost bohatý na uhlík: riziko imobilizace dusíku na poli. Doporučení: přidejte do směsi materiál bohatý na N (digestát, čerstvou travní hmotu, drůbeží podestýlka atd.).
++ / +++	--	--	Mladý kompost (nebo digestát). Nitrifikace ještě nezačala. Doporučení: udržujte dostatečnou vlhkost směsi, abyste se vyhnuli ztrátám $\text{NH}_4\text{-N}$ a umožnili nitrifikaci.

++ / +++	++	+ / ++	Začátek nitrifikačního procesu. Doporučení: udržujte směs dostatečně vlhkou, abyste se vyhnuli ztrátám NH <sub>4</sub> -N; zajistěte trvalý dostačující přísun kyslíku do směsi.
+	+ / ++	++ / +++	Nitrifikační proces pokračuje. Doporučení: zajistěte trvalý dostačující přísun kyslíku do směsi.
--	--	++ / +++	Nitrifikační proces je dokončen. Doporučení: zajistěte trvalý dostatečný přísun kyslíku do směsi. Kompost je zralý a připraven k použití.
--	++	++ / +++	Problém s vyčerpáním kyslíku. Doporučení: zvýšit provzdušňování kompostu

Vysvětlivky k tabulce č. 5:

--: žádný (< 10 mg N/kg SH); +: malé množství (10-50 mg N/kg SH); ++: střední množství (50-200 mg N/kg SH);

+++ : vysoké množství (> 200 mg N/kg SH)

#### 4.1.5 Úroveň zralosti / stability

Informace o úrovni zralosti / stability kompostu poskytuje několik parametrů. Vyzrálý / stabilní kompost je ve srovnání s čerstvým kompostem převážně stabilní a biologicky méně aktivní. Znamená to, že teplota kompostu po jeho provzdušňování už neroste a respirační aktivita je také nízká. Poměr C/N je ve vyzrálém / stabilním kompostu okolo 15.

Spolehlivým indikátorem úrovně zralosti kompostu je poměr NH<sub>4</sub> / NO<sub>3</sub>. Jak je popsáno výše, čerstvý kompost obsahuje jako mineralizovaný N především ve formě NH<sub>4</sub>. Vyzrálý kompost obsahuje jako mineralizovaný N pouze NO<sub>3</sub>. Tyto analýzy by měly být provedeny před použitím kompostu a krátce po vzorkování.

Stabilita je parametrem ukončení kompostovacího procesu, indikuje stabilitu biologické aktivity a je měřena několika metodami. Níže jsou uvedeny některé z těchto metod.

##### 4.1.5.1 Solvita test

Index zralosti Solvita se zjišťuje na základě stejnojmenného rychlotestu Solvita, který vyvinuly laboratoře Woods End Laboratories, USA, k posouzení stability a zralosti. V rámci tohoto testu se měří koncentrace oxidu uhličitého a amoniaku, která vzniká ve vzorku po čtyřech hodinách v uzavřené nádobě.

##### 4.1.5.2 Řeřichový test

Jde o biologickou metodu hodnocení fytotoxicity výluhu vzorku indexem klíčivosti (IK) citlivé rostliny (řeřicha setá). Metoda je založena na výpočtu indexu klíčivosti citlivé rostliny (řeřicha setá) v prostředí vodního výluhu kompostu. Velikost fytotoxicity, která je přímým odrazem obsahu toxických meziproductů, vznikajících při aerobním rozkladu organických odpadů, umožňuje kvalitativní ohodnocení intenzity rozkladu, kdy nepřítomnost fytotoxinů (IK kolem 80–100 %) je ukazatelem zralého kompostu.

##### 4.1.5.3 Samozahřívací test

Samozahřevný test měří zvýšení teploty kompostu ve standardních podmínkách v termonádobě, která zajistí pro všechny vzorky stejné podmínky. Kompost v nádobě je následně zahříván na laboratorní teplotu, následně jedno teplotní čidlo snímá teplotu kompostu a druhé okolní teplotu. Výsledkem testu je pak rozdíl mezi nejvyšší naměřenou teplotou kompostu a okolí, test obvykle trvá 5-9 dní.

##### 4.1.5.4 Spotřeba kyslíku

Tato metoda je založena na stanovení míry absorpce kyslíku v průběhu teplot kompostovacího procesu, jednotkou je spotřeba kyslíku na kg sušiny za hodinu.

#### 4.1.5.5 Index zralosti NIRS

Některé výše uvedené metody byly využity pro vývoj integrovaného bodu zralosti kompostu, označovaného jako „index zralosti“. Tyto indexy zralosti byly vyvinuty ve společnosti Bioforschung Austria a slouží jako referenční hodnoty modelu NIRS. Tato metoda je velmi vhodná a rychlá pro využití v praxi, v ČR je již dostupná na pracovišti ZERA, z.s.

Pro možnost srovnání a interpretace jsou uvedeny limitní hodnoty vybraných metod stanovení zralosti/stability v souhrnné tabulce (tab. 6), v prvním sloupci jsou uvedeny vypočítané indexy zralosti pro model NIRS.

Tabulka 6 Stupnice hodnocení zralosti kompostu (zdroj: ZERA, z.s., 2017)

Index zralosti NIRS	Popis	Hodnocení kompostu	Spotřeba mmol O <sub>2</sub> /kg OM/h <sup>-1</sup>	Solvita test (třída)	Řeřichový test (hodnota IK)
8 a více	neaktivní, vysoce zralý, podobný půdě, žádné omezení k použití	zralý	pod 5	V	100
7	dobře zralý, stabilní				80-100
6	snížená potřeba areace	stabilní			
5	kompost se pohybuje za aktivní fázi rozkladu, je připraven k dozrávání, snížená potřeba intenzivní manipulace	aktivní	5-10	IV	60-80
4	kompost je ve středně až středně aktivním stadiu rozkladu, vyžaduje průběžné řízení procesu		10-15	III	
3	aktivní kompost – suroviny v čerstvém stavu, potřeba intenzivního monitoringu	hodně aktivní			pod 60
2	velmi aktivní čerstvý kompost, vysoké požadavky na potřeby kyslíku, intenzivní překopávka nebo provzdušňování	surový kompost	15 - 25	II	
1	čerstvý, surový kompost typický pro čerstvou surovinovou směs, extrémně vysoký stupeň rozkladu, silné emise – je cítit		nad 25	I	

## 4.2 Použití kontrolních opatření

### 4.2.1 Úroveň zralosti a fytotoxicita

Při správném procesu kompostování indikují úroveň zralosti kompostu různé parametry: snížení teploty v hromadě, snížení spotřeby kyslíku a změna zápachu z NH<sub>3</sub> k zemitému, který je podobný lesní půdě. Způsobuje to geosmin, sloučenina tvořena aktinomycety. Kromě smyslového pozorování kompostu (zápach, struktura atd.) lze doporučit analýzy dvou parametrů: stanovení poměru NH<sub>4</sub>/NO<sub>3</sub> (viz 4.1.5) a test fytotoxicity. Charakteristiku těchto dvou parametrů lze provést přímo na kompostárně a získaná informace je potřebná zejména pro praktické využití kompostu.

#### 4.2.2 Poměr NH<sub>4</sub> a NO<sub>3</sub>

Jak je popsáno výše, mineralizované formy N jsou hodnoceny během procesu zrání. Dobrým indikátorem účinné zralosti kompostu je tedy poměr NO<sub>4</sub>/NO<sub>3</sub> a poskytuje důležitou informaci o možném využití kompostu. Hodnota tohoto poměru je důležitým předpokladem toho, zda bude kompost rostlině poskytovat dusík nebo jej naopak imobilizovat v půdě. Pomocí této hodnoty mohou pěstitelé vyvinout strategii pro dusíkaté hnojení:

- Poměr NH<sub>4</sub> / NO<sub>3</sub> <0,2: čerstvý kompost s rizikem imobilizace dusíku na poli, pokud je důležitý obsah uhlíku (např. kompost bohatý na lignin). Nedoporučuje se pro rostliny s vysokou potřebou N. V některých případech může být využit jako materiál k mulčování.
- Poměr mezi 0,2 a 0,8: kompost je ve fázi zrání. Lze použít v zemědělství.
- Poměr >0,8: vyzrálý kompost. Lze využít v zemědělství, také jako substrát.

#### 4.2.3 Testy fytotoxicity

Vysoký obsah soli v surovinové skladbě může způsobovat fytotoxicitu (viz 4.2.1). V první fázi rozkladu organického materiálu mohou být navíc tvořeny další toxické sloučeniny. Výsledkem toho je čerstvý kompost zpočátku fytotoxický. V průběhu fáze zrání jsou tyto toxické molekuly přeměněny na neškodné sloučeniny a kompost se stává s rostlinami více slučitelný. Pokud však fáze zrání nebo uchovávání není řízena optimálně (většinou z důvodu nedostatku kyslíku), mohou se tvořit toxické sloučeniny a kompost se stává znovu fytotoxickým. Míra fytotoxicity závisí také na rostlině, která má být v dané obohacené půdě pěstována: některé druhy jsou velmi citlivé, zatímco jiné druhy méně. Pro některé rostliny může být fytotoxický také vysoký obsah soli.

##### *Poznamenejme si:*

*Nejlepším způsobem, jak charakterizovat riziko fytotoxicity je proto provádění testů pomocí rostlin.*

#### 4.2.4 Těžké kovy/ rizikové prvky

Těžké kovy (rizikové prvky) jsou v prostředí přítomny a mohou být také absorbovány rostlinami. V kompostu je proto přijatelná přítomnost malého množství těžkých kovů. Množství těžkých kovů v kompostu ale závisí na kvalitě vstupního materiálu. Limitní hodnoty rizikových prvků v kompostu pro využití v zemědělství a ekologickém zemědělství jsou uvedeny v tabulce 7.

*Tabulka 7 Limitní hodnoty v kompostu dle ČSN465735 Kompostování (zemědělství, uvádění do oběhu) a dle Nařízení EU 2019/2164 o ekologické produkci (ekologické zemědělství)*

Rizikový prvek	Maximální hodnota [mg/kg v sušině]	
	Zemědělství, uvádění do oběhu	Ekologické zemědělství
Arsen (As)	30	30
Kadmium (Cd)	2	0,7
Chrom (Cr)	100	70
Měď (Cu)	150	70
Rtuť (Hg)	1	0,4
Nikl (Ni)	50	25
Olovo (Pb)	100	45
Zinek (Zn)	600	200

#### 4.2.5 Obsah živin

Obsah živin vstupního materiálu se může velmi lišit. Dřevnaté materiály mají obecně mnohem méně živin než materiály chudé na lignin. Obsah živin se tedy v různých kompostech může lišit. Při používání kompostu je zásadní obsah živin v konkrétním kompostu analyzovat, aby bylo možné vypočítat rovnováhu živin a průměrné hodnoty uváděné v literatuře použít jako orientační (viz kapitoly 1 a 2).

#### 4.2.6 Hodnota pH

Hodnota pH kompostu je obvykle poměrně vysoká (6,5 až 8,5) a je ovlivněna procesem kompostování. Na začátku procesu je pH relativně nízké z důvodu přítomnosti organických kyselin a následně se zvyšuje kvůli obsahu  $\text{NH}_4$ . Čerstvý kompost má tedy hodnotu pH vysokou (nad 8). V průběhu nitrifikace se pH snižuje. Hodnota pH zralého kompostu je obvykle pod 8. Z důvodu dynamiky hodnot musí být pH pravidelně měřeno, pH běžného kompostu je nad 7. Používání kompostu tedy není vhodné pro acidofilní rostliny (např. borůvky nebo rododendrony). Při používání kompostu v substrátech je ke snížení hodnoty pH substrátu možné využít elementární síru (S). Další možností je využití výrazné frakce kyselých vstupních surovin.

#### 4.2.7 Obsah soli

Obsah soli se stejně jako obsah živin může u různých druhů kompostu výrazně lišit. Je velmi ovlivněn vstupními surovinami, ale také procesem kompostování. Je výsledkem mineralizace organické hmoty a stavby sloučenin humusu.

Obsah soli může být v závislosti na druhu pěstované plodiny limitujícím faktorem. Je to obecný termín, který pokrývá velké množství látek. Některé z nich nejsou pro rostliny zásadní a mohou být spíše škodlivé než užitečné jako NaCl (kuchyňská sůl). Jiné soli, jako jsou mineralizované formy N, jsou pro růst rostlin užitečné. Důležité je nejen samotné množství soli, ale také množství solí, které jsou relevantní pro rostliny, jako je  $\text{NH}_4\text{-N}$  a  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Při interpretaci obsahu solí v kompostu je potřeba brát v potaz způsob extrakce pro její určení a stejně tak jednotky daného měření. V některých případech je salinita vyjádřena jako elektrická vodivost extrakčního roztoku a jindy se přepočítává jako ekvivalentní g KCl na množství kompostu (Poznamenejme si na g v sušině). Při interpretaci obsahu soli v kompostu je naprosto nutné toto hledisko brát v úvahu.

#### 4.2.8 Patogeny a plevel

Vstupní organický materiál může obsahovat patogeny a semena plevelných rostlin. Dobře řízeným procesem kompostování jsou však hubeny. Před použitím kompostu je zcela klíčové, aby byla zajištěna účinná inaktivace (hygienizace) těchto patogenů a semen plevelných rostlin, aby se předešlo riziku kontaminace půdy, ve které je kompost využíván. Pro přírodní sanitaci organického odpadu během procesu kompostování jsou důležité tři parametry: teplota, meziprodukty chemických látek vyplývající z rozkladu organického odpadu, které jsou pro patogeny toxické, a biologická kontrola patogenů prospěšnými mikroorganismy.

Praktickým řešením je kontrola hygienizace v procesu kompostování monitoringem vývoje teploty a vlhkosti, zaručit řádné řízení provozu, které zamezí rekontaminaci zralého kompostu infikovanými čerstvými surovinami, aplikací vod ze záchytné jímky po uplynutí hygienizace nebo používáním kontaminované neočistěné manipulační techniky.

Závěrem lze uvést, že kompost, který prošel některým z teplotních režimů uvedených v tabulce č. 4, je z hygienického hlediska považován za neškodlivý s tím, že základka kompostu je promíchána v tomto časovém úseku alespoň dvakrát, aby bylo zajištěno, že každá část materiálu je nejméně jednou



vystavena vyšším teplotám. Provozovatel musí vést přesnou evidenci procesu kompostování, aby mohla být ověřena fáze hygienizace.

### 4.3 Shrnutí

Pro produkci kvalitního kompostu, volbu finální úpravy kompostu a strategii pro jeho aplikaci je potřeba několik kontrolních opatření. Kontrolní opatření popsána výše jsou pro zavedení relativně jednoduchá. Dle použitých vstupních surovin a množství vyrobeného kompostu jsou určeny četnosti a rozsah pro kontrolu kvality kompostu (laboratorní analýzy), následně musí být tyto parametry kvality kompostu správně interpretovány za účelem volby správného kompostu pro zamýšlené použití a optimální strategii jeho aplikace.

## 5 Hygienizační aspekty kompostování

### Souhrn:

- *Používání kompostu v zemědělství sebou vždy nese riziko zavlečení rostlinných či lidských patogenů*
- *Základ procesu hygienizace je v teplotě, obsahu vlhkosti a chemických sloučeninách, které jsou tvořeny v průběhu kompostování*
- *Kompost produkovaný správným kompostováním, tj. procesem, který zahrnuje vysoké teploty po dostatečně dlouhou dobu termofilní fáze, může být bezpečně aplikován*
- *Zemědělci a provozovatelé kompostáren by měli udržovat dobré vztahy*

Jedním z hlavních důvodů kompostování biologicky rozložitelných surovin je inaktivace rostlinných patogenů a semen plevelných rostlin, které jsou v těchto surovinách běžně přítomny, a v případě surovin živočišného původu jde také o inaktivaci (hygienizaci) patogenů živočišných nebo lidských. Proces hygienizace je v průběhu kompostování založen na teplotě a době jejího trvání, chemických sloučeninách a biologických mechanismech. Teplo produkované v průběhu procesu kompostování musí být dostatečně vysoké a termofilní fáze dlouhá tak, aby došlo k inaktivaci velké většiny potenciálně rizikových organismů. Dobré řízení procesu kompostování je tedy předpokladem k tomu, aby se minimalizovalo riziko spojené s těmito patogeny.

V této kapitole se zaměříme na tato rizika a na možnosti, jak je mohou kompostáři a zemědělci řešit. Dobrá strategie řízení kompostovacího procesu zahrnuje:

- správnou výchozí surovinovou skladbu
- zvýšení teploty na počátku procesu
- dostatečnou délku trvání termofilní fáze (vlastní doba hygienizace)
- provzdušňování zakládky kompostu během termofilní fáze
- vyvarování se rizika kontaminace (obecná organizace pracovního prostředí)
- správné uchování vyzrálého a stabilního kompostu.

Proces by měl být v zájmu provozovatele i zemědělce monitorován a zaznamenán v evidenci (datum založení zakládky, teplotní režim v čase, záznam o provzdušnění, data závlahy a kvalita požití vody).

### 5.1 Osud patogenů v průběhu kompostování

Základem hygienizačního procesu je dostatečně vysoká teplota spojená s obsahem vlhkosti, pH, tvorbou toxinů a antibiotik a také aktivních antagonistů. Organismy představující riziko jsou patogeny,

kteře jsou schopny takovým podmínkám vzdorovat. Patogeny se v organických surovinách (bioodpadech) vyskytují zcela běžně, ale velká většina z nich, je v průběhu termofilní fáze inaktivována (hygienizována). Mechanismy hygienizace jsou aktivní také během přehřívání a fáze dozrávání kompostu; během termické fáze kompostování ale převažují vysoké teploty, které většinu patogenů inaktivují.

Mezi další fytosanitární rizika patří některé vysoce perzistentní půdní patogeny. Některé z nich jsou během správného kompostování zcela inaktivovány, zatímco jiné mohou v průběhu kompostování přežívat. Na první pohled se používání kompostu může zdát příliš riskantní, jak ale ukážeme, s těmito riziky se lze správně vypořádat.

Obecně řečeno, patogeny, které jsou schopny přežít v teplotách kompostování >60 °C lze považovat za rizikové. Pouhá existence rizikových patogenů neznamená, že použití kompostu vede k fytosanitárním problémům. Pravděpodobnost výskytu těchto problémů musí být založena na místních podmínkách.

Přítomnost rizikových patogenů tedy závisí na kontextu daného místa a technologie vzniku odpadu. Kvalitní vedení kompostovacího procesu však může zajistit eliminaci těchto patogenů a tedy hygienizaci daných biologicky rozložitelných surovin/odpadů. V případě potřeby (např. gastroodpady, apod) lze před proces kompostování zařadit další stupeň hygienizace, jako např. pasterizační jednotku.

## 5.2 Riziko patogenů a semena plevelných rostlin přítomných v surovinách určených ke kompostování

Fytosanitární rizika neexistují, pokud vstupní suroviny neobsahují žádné patogeny nebo semena plevelných rostlin. Není to běžným případem, jelikož se patogeny a plevele vyskytují téměř všude a některé persistentní půdní patogeny jsou také běžné nebo dokonce velmi obvyklé. Hlavním přírusem lidských patogenů do materiálu vstupních surovin je přidávání surovin živočišného původu. Spektrum potenciálních zoonotických organismů se liší u různých druhů hospodářských zvířat a závisí také na národních předpisech.

Identifikace sanitárních rizik kompostování je závislá na předcházející úpravě vstupních surovin. Pokud je nutné řešit předem neupravené rizikové vstupní suroviny, existují tři možnosti:

- neumožnit takovému materiálu vstoupit do procesu kompostování
- provést další úpravu pro inaktivaci patogenů
- validace technologie, která deklaruje spolehlivost dané kompostárny pro hygienizaci těchto vstupních surovin (odpadů)

Evropské právní předpisy (ES 1069/2009; ES 1774/2002; EU 142/2011) ohledně příslušného živočišného odpadu nebo vedlejších živočišných produktů vstupujících do procesu kompostování hovoří jasně. *Salmonella* nesmí být v jakémkoli vzorku koncového produktu detekována a průměrný počet živých buněk *E. coli* nebo *Enterococcaceae* izolovaných z pěti reprezentativních vzorků by neměl překročit 1000 KTJ; pouze jeden z pěti vzorků může obsahovat 1000-5000 buněk pro kultivaci (KTJ – kolonie tvořící jednotky). Odkaz na *E. coli* v takových kontrolních programech znamená pro organismus biologický indikátor a nikoli patogenní sérotyp *E. coli*. Přítomnost enterohemoragické *E. coli* není přijatelná, kvůli velmi nízké infekční dávce (<100 buněk). Jelikož lidské patogeny mohou být v kompostu nerovnoměrně rozloženy, výrobci kompostu si musí dávat pozor na celkovou míru kontaminace v surovém živočišném vstupním materiálu, uvažovat o postupu získání reprezentativních vzorků a významu negativních výsledků.

### 5.3 Kvalita procesu kompostování

K selhání hygienizace mohou přispívat také nesprávné postupy v procesu kompostování. Těmi nejdůležitějšími jsou:

- Nesprávné a málo časté provzdušňování kompostu, včetně vazby na správné složení surovinové skladby
- Okrajové části kompostu neprojdou teplotním režimem. Provzdušňování kompostu proto musí provádět školený pracovník, aby bylo zajištěno, že organický materiál na okrajích zakládky kompostu je po překopání umístěn do středu a vystaven vysokým teplotám.
- Nesprávné použití techniky:
  - Manipulační a další technika by neměla být používána zároveň pro vstupní suroviny a kompost po fázi hygienizace, neboť může docházet k druhotné kontaminaci patogeny. Tomuto lze předcházet důkladným čištěním.
- Rekolonizace vyzrálého kompostu patogeny:
  - Riziko se zvyšuje s délkou doby uložení hotového kompostu a obzvláště v případě, kdy je kompost uložen ve venkovním prostředí, kdy do kompostu mohou vstoupit zejména živočišné patogeny ptačího původu. Takto uložený kompost může také obsahovat plevevná semena v důsledku náletů těchto semen.

Kompostování je možné provádět s různou technologickou úrovní a kapacitou. Vždy je nutné zajistit podmínky pro správný proces kompostování.

Pokud je provozovatelem zemědělec a používá vlastní kompost na svých vlastních polích, nedochází k přenosu nových patogenů z jiných míst. Je zde ale možnost šíření vlastních patogenů na více polí, což snižuje fytosanitární účinek při dodržení správných osevních postupů.

### 5.4 Shrnutí

Na první pohled se zdá jednoznačné, že pro kompostování je potřeba odmítnout jakoukoliv vstupní surovinu, pokud u ní existuje jen malé fytosanitární riziko. Tento přístup je ale zbytečně opatrný, protože by mohl znamenat, že většina, ne-li všechny, vstupní suroviny jsou pro kompostování nevhodné. Takový přístup tedy není žádoucí, jelikož aplikace kompostu je jednou z mála možností, jak pozitivně ovlivnit zemědělskou kvalitu půdy. Jak zde vysvětlujeme, většinu rizik lze řešit dodržáním správného postupu kompostování. Je proto důležité, aby byla zvážena skutečná rizika a existoval jasný technologický postup pro hygienizaci a celkový management provozu kompostárny.



Obrázek 11 Technika může způsobit kontaminaci, pokud je přesouvána přímo od manipulace s čerstvými zbytky k vyzrálému kompostu; tato špatná praxe však není na obrázku znázorněna. Fotografie: Paula van Ommen.)

## 6 Kvalita kompostu / program kvality

V rámci podpory využití kompostu v zemědělské praxi je vytvořen program kvality, který definuje a zároveň ověřuje kvalitu procesu a kvalitu kompostu. Jako schéma základních požadavků a zásad managementu kvality procesu kompostování, podle kterých se provoz kompostárny řídí a monitoruje (příprava kompostárny, vlastní proces kompostování a kvalita kompostu). Obsahuje informace pro standardizaci produkce trvale vysoké kvality kompostu s doporučením pro jeho konkrétní využití ve vazbě především na zemědělské půdy, specificky na půdy degradované (eroze) a na půdy v oblastech ochrany podzemních a povrchových vod. Ověřená kvalita kompostu zajistí jeho využití v rámci půdoochranných technologií – zdroj organické hmoty a živin. Kompost tak bude:

- významným příspěvkem pro zlepšování kvality půdy
- nezpochybnitelným kvalitním hnojivem (komplex živin) pro zdravý vývoj rostlin
- bezpečným organickým hnojivem

Program kvality s přidělením „Pečetě kvality“ stanovuje požadavky na kvalitu kompostu pro využití na zemědělské půdy. Dále zahrnuje požadavky na analýzy, vyhodnocení procesního řízení, prohlášení o kvalitě kompostu a doporučení pro jeho správné použití.

Program kvality definuje běžné kompostovací standardy, které zahrnují minimální kritéria kvality kompostu. Za tímto účelem je kompost specifikován a definován zatím pro zemědělské potřeby s jakým potenciálem úrovně dostupnosti živin nebo zdroje uhlíku

Program kvality stanovuje minimální požadavky na proces zpracování, které musí být splněny, aby bylo dosaženo nezbytné úrovně aerobní biologické aktivity. Aktuální úroveň aerobní biologické aktivity je deklarována stanovením stupně stability kompostu, včetně použité analytické metody.

Česká legislativa má pro hodnocení kvality kompostu a jeho využití vyhlášku č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady a vyhl.č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva.

### 6.1 Kritéria kvality kompostu

#### 6.1.1 Základní vlastnosti kompostu

Kvalita kompostu pro využití v zemědělství či uvádění do oběhu musí vždy splňovat podmínky zákona č. 156/1998 Sb. o hnojivech. Parametry stanovené v programu kvality „Pečeť kvality“ jsou nadstandardními k této kvalitě a parametry bez uvedení mezních hodnot budou definovány podle skutečně dosažené kvality.

Tabulka 8 Limitní hodnoty pro povinné kvalitativní parametry kompostu pro použití

Parametr	Jednotka	Hodnota	Skutečná hodnota šarže
Vlhkost	% hm.	30 – 65	
Spalitelné látky	% hm. v sušině	min. 20	
Celkový dusík	% hm. v sušině	min. 0,6	
Poměr C:N	max.	30	
pH	-	6-9	

Nerozložitelné příměsi > 20 mm	% hm. ve vzorku	< 3,0
Nežádoucí příměsi > 5 mm	% hm. ve vzorku	< 0,5
Klíčivá semena v 1l kompostu	ks	≤ 3

POZNÁMKA 1 Skutečnou hodnotu stanovených parametrů šarže vyplní zpracovatel.

POZNÁMKA 2 Při porovnání výsledku zkoušek na klíčivá semena s limitní hodnotou uvedenou v příslušné tabulce se nezohledňuje nejistota měření.

Tabulka 9 Hodnoty pro volitelné kvalitativní parametry kompostu

Parametr	Jednotka	Hodnoty
N-NO <sub>3</sub>	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
N-NH <sub>4</sub>	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
K <sub>2</sub> O	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
MgO	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
Na	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
S	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	Informativní
Vodivost	mS.cm <sup>-1</sup>	Informativní
Index stability	--	min. 6 stupňů
Test fytotoxicity na řeřiše seté	%	>80
Plasty > 2 mm	% hm. v sušině	podle rozsahu použití kompostu
Plasty > 20 mm	% hm. v sušině	podle rozsahu použití kompostu

POZNÁMKA 1 Uvedené hodnoty jsou volitelné a nejsou limitovány, uvádí se pouze pro informaci zákazníka.

POZNÁMKA 2 Při porovnání výsledku zkoušek růstu na řeřiše seté s limitní hodnotou uvedenou v příslušné tabulce se nezohledňuje nejistota měření.

### 6.1.2 Limitní hodnoty rizikových látek a prvků

Limitní hodnoty rizikových prvků a látek kompostu stanovované pro informování spotřebitele a pro ochranu životního prostředí jsou obsah těžkých kovů a hygienické aspekty.

Tabulka 10 Limitní hodnoty vybraných rizikových prvků v kompostu pro použití na zemědělské půdě

Parametr	Jednotky	Nejvyšší přípustné množství
As	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	30
Cd	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	2
Cr	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	100
Cu	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	150
Hg	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	1,0
Ni	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	50
Pb	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	100

Zn	mg.kg <sup>-1</sup> sušiny	600
----	----------------------------	-----

Tabulka 11 Limitní hodnoty indikátorových organismů ve vlhkém vzorku kompostu

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Nález	
<i>Salmonella</i> sp.	nález v 50 g	Negativní	
<i>Escherichia coli</i> nebo enterokoky	KTJ <sup>a)</sup> v 1 gramu	1*	< 5.10 <sup>3</sup>
		4*	< 10 <sup>3</sup>
Geohelminți <sup>b)</sup>	nález ve 150 g	Negativní	

a) KTJ – kolonie tvořící jednotku

b) pouze pro balené komposty a u kompostu určeného pro parky, parčíky, sídlištní zeleň, zeleň dětských hřišť a sportovních areálů

\*s odebraných 5 ti vzorků musí minimálně stanovený počet vyhovět předepsaným limitům

### 6.1.3 Způsoby využití kompostu

Rozhodující pro využití kompostu je charakter kompostu, tedy stupeň stability a zralosti (viz. kapitola 4.1.5).

Dále jsou v tabulce 12 uvedeny způsoby využití kompostu dle normy ČSN 465735 Kompostování.

Tabulka 12 Způsoby využití kompostu

Účel použití	Sledované parametry	Sledované mikrobiologické parametry podle bodu 6.4	Plasty (viz poznámka 2)	
			> 2 mm	> 20 mm
Balený kompost určený k užití v domácnostech	v rozsahu tabulky 2 až 3 (4) <sup>5)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>5)</sup>	negativní nález	negativní nález
Přimíchávání do balených zemin a substrátů k rekultivacím	v rozsahu tabulky 2 až 3 (4) <sup>6)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>6)</sup>	negativní nález	negativní nález
Parky, parčíky, sídlištní zeleň, zeleň dětských hřišť a sportovních areálů	v rozsahu tabulky 2 až 4 nebo rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	v rozsahu tabulky 5 nebo rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	0,2 % hm. v sušíně vzorku	0,02 % hm. v sušíně vzorku
Využití v zemědělství jako organické hnojivo	v rozsahu tabulky 2 až 3 <sup>5)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>5)</sup>	0,2 % hm. v sušíně vzorku	0,02 % hm. v sušíně vzorku
Využití na povrchu terénu ostatní nezemědělské půdy	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	0,2 % hm. v sušíně vzorku	0,02 % hm. v sušíně vzorku
Terénní úpravy - rekultivační vrstvy	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	0,4 % hm. v sušíně vzorku	0,04 % hm. v sušíně vzorku
Rekultivační vrstva skládky	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	-	-

Přimíchávání do zemín a substrátů využitých v zemědělství	v rozsahu tabulky 2 až 3 <sup>5)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>5)</sup>	0,2 % hm. v sušíně vzorku	0,02 % hm. v sušíně vzorku
Lesní školky	v rozsahu tabulky 2 až 3 <sup>5)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>5)</sup>	-	0,02 % hm. v sušíně vzorku
Biofiltry	rozsah rozborů je stanoven jiným právním předpisem <sup>6)</sup>	v rozsahu tabulky 5 <sup>6)</sup>	nestanovuje se	nestanovuje se

POZNÁMKA 1 Stanovení geohelmitů podle tabulky 5 v rámci stanovení mikrobiologických parametrů se provádí pouze u baleného kompostu a kompostu určeného pro parky, parčíky, sídlištní zeleň, zeleň dětských hřišť a sportovních areálů.

POZNÁMKA 2 Stanovení plastů se provádí v souladu s normou ČSN 465735 Kompostování jako dobrovolně stanovovaný parametr

Poznámka k doporučenému účelu použití: všechny předpokládané účely využití vždy musí odpovídat požadavkům národní legislativy (vyhl. č. 273/2021 Sb., zákon č. 156/1998 Sb.), týkající se minimálně limitním obsahům rizikových prvků.

#### 6.1.4 Monitoring kvality kompostu

Program kvality zahrnuje pravidelné vzorkování a analýzy kompostu, které provádí nezávislé laboratoře. Z důvodu dlouhých let zkušeností je doporučeno, aby byly vzorky odebrány akreditovanou osobou (proškolenou osobou) nebo laboratoří. Četnost analýz kompostu a odběru vzorků je uvedena v tabulce 13.

Tabulka 13 Četnost kontrol kompostu

Roční produkce kompostů (t)	Četnost kontrol výstupu
do 150 - malé zařízení	1 × za rok
0 – 2 000	1 × za rok
2001 – 10 000	2 × za rok
10 001 – více	4 x za rok

## 6.2 Procesní model

Procesní model představuje souhrn základních kroků v procesu kompostování a správné kompostářské praxe.

Správná kompostářská praxe		
Procesní kroky		Zajištění kvality a dokumentace procesu
1	<b>vstupní materiály</b> (informace o zdroji odpadů pro posouzení vhodnosti v souladu se schválenou dokemntací)	odmítnutí a separace nečistot, dokumentace
2	<b>přijetí skladování, předúprava</b> (drcení, prosévání, míchání)	
3	<b>tvorba zakládky</b> (homogenizace, vytvořené zakládky)	dokumentace způsob značení zakládky a zahájení kompostovacího procesu
4	<b>řízení zakládek</b> (systém provzdušňování, zvlhčování, monitoringu)	dokumentace
4.a	<b>hygienizace</b> (v souladu s teplotním režimem)	řízení teplot, dokumentace
4 b	<b>dozrávání, ukončení</b> kompostovacího procesu	řízení teplot, dokumentace
5	<b>finální úprava a skladování</b> (prosévání, klasifikace kompostu)	vzorkování a kontrola kompostu (inspekce třetí stranou)
6	<b>interpretace skutečné kvality</b> kompostu a doporučení jeho využití	dokumentace materiálového toku (množství každého kvality kompostu)



## 7 Přílohy

### 7.1 Technologie kompostování

#### *Přehled běžných systémů kompostování v Evropě*

#### Kompostování na okraji pole

- Způsob vhodný pro zemědělce s omezeným množstvím vstupních surovin (do 150 tun ročně a 20 t/1 zakládka – pokud bude přijímat bioodpad).
- Tímto způsobem může být zpracován jak vlastní bioodpad rostlinného původu
- Není zde jasné oddělení kompostu od prostředí, a je tedy obtížné zaručit kompost bez plevele.
- Relativně nízké investiční náklady, ale náročné na pracovní sílu.



#### Malé zakládky (do výšky 2 m, 3-4 m široké)

- Způsob vhodný pro zpracování odpadu do 5000-6000 tun ročně.
- Jasné oddělení kompostu od prostředí / vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Každá zakládka může být řízena jednotlivě (výchozí směs, stupeň zralosti), je tedy možné produkovat různé komposty pro rozdílná použití.
- Střední investiční náklady. Relativně náročné na pracovní sílu. Potřeba relativně velké plochy.



#### Velké zakládky (do výšky 3,5 m, neomezeně široké)

- Způsob vhodný pro zpracování velkého množství surovin nad 5000 t / rok
- Pro zajištění dobré cirkulace vzduchu v zakládce je potřeba suroviny s dostatečně hrubou strukturou.
- Je možné zavést mechanické / nucené pomocí ventilátoru provzdušňování.
- Jasné oddělení kompostu od prostředí / vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Nejasné oddělení mezi různými zakládkami kompostu.
- Relativně vysoké investiční náklady, ale nízké požadavky na pracovní sílu ve srovnání s menšími zakládkami



### Velké zakládky pod střechou (do výšky 3,5 m, 5-6 m široké)

- Způsob vhodný pro zpracování 5-6000 tun ročně. Pro zajištění dobré cirkulace vzduchu v zakládce je potřeba surovin s dostatečně hrubou strukturou.
- Mechanické provzdušňování.
- Jasně oddělení kompostu od prostředí / vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Jasně oddělení mezi různými poli kompostu.
- Vysoké investiční náklady a relativně náročné na pracovní sílu (hromady se musí převracet kolovým nakladačem).



### Tunelové kompostování (výška cca 2,5 m, šířka 5 m)

- Způsob vhodný pro zpracování velkého množství odpadu. Cca nad 10 000 t / rok
- Převrácení kompostu je řízeno automaticky.
- Je možné zavést mechanické provzdušňování / nucené za pomoci ventilátorů
- Jasně oddělení kompostu od prostředí / vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Jasně oddělení mezi různými poli kompostu.
- Četnost převrácení kompostovacích polí je pevná (dána systémem)
- Vysoké investiční náklady. Nízká náročnost na pracovní sílu.



### Kompostování v boxech (výška cca 3,5 m, šířka 6 m, délka 20 m)

- Způsob vhodný pro zpracování velkého množství odpadu, nad 10 000 t / rok
- kombinace systému technologií automatické převrácení kompostu, mechanické provzdušňování a kontrola vlhkosti.
- Jasně oddělení kompostu od prostředí/ vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Jasně oddělení kompostovacích zakládek
- Rozdělení materiálu musí být na začátku procesu rovnoměrné; v opačném případě se vývoj kompostovacího procesu bude v rámci jednoho boxu v různých částech lišit.
- Vysoké investiční náklady. Nízká náročnost na pracovní sílu. Ekonomické využití dostupného prostoru.



### Kompostování v halách (výška cca 3,5 m, šířka 20 m)

- Způsob vhodný pro zpracování velkého množství odpadu, nad 10 000 t / rok
- Automatické překopávání kompostu, mechanické provzdušňování a kontrola vlhkosti.
- Jasně oddělení kompostu od prostředí/ vodohospodářsky zabezpečená plocha



- Nejasné oddělení mezi různými zakládkami kompostu.
- Vysoké investiční náklady. Nízká náročnost na pracovní sílu.

---

Kompostování v kontejnerech (výška cca 2,5 m, šířka 2,5 m, délka 12 m)

- Způsob vhodný pro zpracování 5000-10000 tun odpadu ročně.
- Souběžně se používá několik kontejnerů. Náplň jednoho kontejneru odpovídá jednomu kompostovací zakládce
- Materiál není během procesu překopáván.
- nezbytné vytvoření další kapacit pro dozrávání
- Jasně oddělení kompostu od prostředí/ vodohospodářsky zabezpečená plocha
- Vysoké investiční náklady a relativně náročné na pracovní sílu, ale flexibilní systém, které je relativně nezávislý na umístění.



---

## 7.2 Literatura

Van der Wurff, A.W.G., Fuchs, J.G., Raviv, M., Termorshuizen, A.J. (Editors) 2016: **Handbook for Composting and Compost Use in Organic Horticulture**, BioGreenhouse COST Action FA 1105, [www.biogreenhouse.org](http://www.biogreenhouse.org), ISBN: 978-94-6257-749-7, DOI (Digital Object Identifier): <http://dx.doi.org/10.18174/375218>

Tato příručka vznikla v rámci podpory Státního zemědělského intervenčního fondu

Program	Program rozvoje venkova
Opatření	Vzdělávací akce / Akce zaměřené na prioritu 4 – zemědělství
Název projektu	Informační akce – 1.1 e Zemědělství
Rok vydání	2021



EVROPSKÁ UNIE  
Evropský zemědělský fond pro rozvoj venkova  
Evropa investuje do venkovských oblastí  
Program rozvoje venkova



PROGRAM ROZVOJE VENKOVA

