

Mendelova univerzita v Brně  
Agronomická fakulta

## TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II

**Ing. Petr Junga, Ph.D.**  
**doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.**  
**doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D.**  
**Mgr. Milan Geršl, Ph.D.**

**Mendelova univerzita v Brně  
Agronomická fakulta**

# **TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II**

**Ing. Petr Junga, Ph.D.  
doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.  
doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D.  
Mgr. Milan Geršl, Ph.D.**

**Brno, 2015**



**INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ**



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



*Tato publikace je spolufinancována z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.*

*Byla vydána za podpory projektu OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0302 Inovace studijních programů AF a ZF MENDELU směřující k vytvoření mezioborové integrace.*

© Petr Junga, Tomáš Vítěz, Monika Vítězová, Milan Geršl, 2015

ISBN

ISBN (soubor)

ISBN (I. díl)

## OBSAH

<b>1. ZÁKLADNÍ BIOLOGICKÉ PRINCIPY VYUŽÍVANÉ V RÁMCI ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ.....</b>	<b>15</b>
1.1 Mikroorganismy a jejich aktivity při zpracování a využívání bioodpadů.....	16
1.2 Výživa mikroorganismů.....	16
1.3 Metabolismus mikroorganismů .....	18
1.4 Ekologie mikroorganismů.....	22
1.5 Charakteristika jednotlivých skupin mikroorganismů .....	27
<b>2. TECHNIKA PRO BIOPLYNOVÉ TRANSFORMACE.....</b>	<b>29</b>
2.1 Bioplynové transformace .....	29
2.2 Proces anaerobní fermentace.....	30
2.3 Bioplynové stanice .....	33
2.4 Vstupní suroviny pro bioplynové stanice .....	39
2.5 Provozní parametry bioplynových stanic .....	39
2.6 Bioplyn .....	43
2.7 Fermentační zbytek .....	56
<b>3. KOMPOSTÁRNY .....</b>	<b>58</b>
3.1 Proces kompostování.....	59
3.2 Vhodné suroviny a odpady pro aerobní kompostování.....	64
3.3 Zásady při kompostování .....	64
3.4 Technologie kompostování .....	67
3.5 Kompostování na volné ploše .....	67
3.6 Technologie pro intenzivní kompostování .....	69
3.7 Vermikompostování .....	75
3.8 Prosévací a separační zařízení.....	75
<b>4. ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD.....</b>	<b>77</b>
4.1 Odvádění odpadních vod.....	79
4.2 Odpadní vody a jejich znečištění.....	81
4.3 Způsoby čištění odpadních vod.....	91
4.4 Standardní technologická linka čištění odpadních vod.....	92
4.5 Mechanické čištění .....	92
4.6 Biologické čištění.....	110
4.7 Procesy probíhající při biologickém čištění odpadních vod .....	111
4.8 Způsoby aerace aktivačních nádrží .....	113
4.9 Aktivační proces.....	115
4.10 Aktivační systémy .....	118
4.11 Základní technologické parametry dosazovacích nádrží.....	121
4.12 Biologické kolony .....	123
4.13 Rotační diskové reaktory.....	125
4.14 Kořenové čistírny odpadních vod.....	126
4.15 Aanerobní čištění odpadních vod .....	128
4.16 Kalové hospodářství .....	129

4.17 Zpracování kalů.....	132
<b>5. TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ Z MLÝNŮ, SLADOVEN, CUKROVARŮ A PIVOVARŮ .....</b>	<b>143</b>
5.1 Zpracování odpadů z mlynářenského průmyslu.....	144
5.2 Odpady ze sladovnického průmyslu.....	144
5.3 Odpady z pivovarnického průmyslu.....	145
5.4 Odpady z cukrovarnického průmyslu.....	145
5.5 Odpady z lihovarnického průmyslu.....	147
5.6 Odpady ze škrobářenského průmyslu.....	147
5.7 Odpady z vinařského průmyslu.....	148
<b>6. SANACE PŮD A VOD KONTAMINOVANÝCH ROPNÝMI PRODUKTY .....</b>	<b>149</b>
6.1 Sanace nenasycené zóny <i>in situ</i> .....	150
6.2 Biologické metody <i>in situ</i> .....	150
6.3 Fyzikální a chemické metody <i>in situ</i> .....	152
6.4 Sanace nenasycené zóny <i>ex situ</i> .....	153
6.5 Biologické metody <i>ex situ</i> .....	154
6.6 Sanace nasycené zóny a vod <i>in situ</i> .....	156
6.7 Biologické metody <i>in situ</i> .....	157
6.8 Fyzikální a chemické metody <i>in situ</i> .....	157
6.9 Sanace nasycené zóny a vod <i>ex situ</i> .....	158
6.10 Biologické metody <i>ex situ</i> .....	158
6.11 Fyzikální a chemické metody <i>ex situ</i> .....	158
<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>160</b>

#### **Autorství a spoluautorství jednotlivých kapitol druhého dílu**

Ing. Petr Junga, Ph.D. (kapitoly 2, 3, 4, 5)

doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D. (kapitoly 1, 2, 3, 4)

doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D. (kapitoly 1, 2, 3, 4)

Mgr. Milan Geršl, Ph.D. (kapitola 6)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Principy mikrobiálních přeměn organických látek.....	19
Obrázek 2: Tvary bakterií, Rosypal (1994), upraveno .....	27
Obrázek 3: Znázornění rozkladu organického materiálu na bioplyn .....	31
Obrázek 4: Obecné schéma bioplynové stanice (zdroj: Hobson et al., 1981, upraveno).....	33
Obrázek 5: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice .....	37
Obrázek 6: Kontinuálně provozované fermentory .....	38
Obrázek 7: Diskontinuálně provozovaný fermentor .....	38
Obrázek 8: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech .....	40
Obrázek 9: Možnosti umístění zásobníku bioplynu .....	45
Obrázek 10: Integrovaný jednomembránový zásobník bioplynu .....	46
Obrázek 11: Integrovaný dvoumembránový zásobník bioplynu .....	46
Obrázek 12: Samostatně stojící kulový zásobník bioplynu .....	47
Obrázek 13: Samostatně stojící zásobník bioplynu, vak.....	48
Obrázek 14: Způsoby využití bioplynu, (zdroj: Reinhart, 1993, upraveno) .....	48
Obrázek 15: Stirlingův motor.....	50
Obrázek 16: Schéma trigenerační jednotky .....	51
Obrázek 17: Schéma funkce mikroturbíny.....	52
Obrázek 18: Schéma funkce palivového článku .....	52
Obrázek 19: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem. ....	57
Obrázek 20: Teplotní průběh kompostování .....	60
Obrázek 21: Mikroorganismy v kompostu.....	61
Obrázek 22: Spotřeba kyslíku a produkce oxidu uhličitého .....	62
Obrázek 23: Hmotnostní bilance kompostování .....	63
Obrázek 24: Schema funkce pásových zakládek s pasivním provzdušňováním .....	68
Obrázek 25: Schema funkce pásových zakládek s aktivním provzdušňováním .....	69
Obrázek 26: Kompostovací systém s vrtnou věží a detail šnekového míchadla.....	70
Obrázek 27: Kompostovací žlaby s překopávacím zařízením .....	71
Obrázek 28: Rotační bioreaktor .....	72
Obrázek 29: Kompostovací boxy .....	73
Obrázek 30: Věžový bioreaktor .....	74
Obrázek 31: Tunelový bioreaktor .....	75
Obrázek 32: Jednotná stoková soustava .....	79
Obrázek 33: Oddílná stoková soustava .....	80
Obrázek 34: Zdroje balastních vod .....	83
Obrázek 35: Blokové schéma standardní technologické linky čistírny městských odpadních vod.....	92

Obrázek 36: Lapák štěrku .....	94
Obrázek 37: Česle, ručně stírané.....	95
Obrázek 38: Česlicový koš.....	96
Obrázek 39: Pásové česle .....	97
Obrázek 40: Step screen česle, průběh vynášení nečistot, 1-3.....	97
Obrázek 41: Rotační česle.....	98
Obrázek 42: Rotační síto .....	99
Obrázek 43: Ultrajemné česle .....	100
Obrázek 44: Pračka a lis na shrabky .....	101
Obrázek 45: Komorový lapák písku.....	102
Obrázek 46: Štěrbínový lapák písku .....	102
Obrázek 47: Vertikální lapák písku.....	103
Obrázek 48: Vírový lapák písku.....	104
Obrázek 49: Provdzušňovaný lapák písku .....	105
Obrázek 50: Pračka písku.....	105
Obrázek 51: Podélná usazovací nádrž.....	107
Obrázek 52: Kruhová usazovací nádrž.....	108
Obrázek 53: Vertikální usazovací nádrž .....	109
Obrázek 54: Základní pochody v anaerobním prostředí .....	112
Obrázek 55: Základní pochody v oxickém prostředí .....	112
Obrázek 56: Schema toku při aktivačním rocesu.....	115
Obrázek 57: Směšovací systém.....	119
Obrázek 58: Směšovací systém.....	119
Obrázek 59: Aktivace s oddělenou regenerací .....	120
Obrázek 60: Šachtová aktivace .....	120
Obrázek 61: Oběhová aktivace .....	121
Obrázek 62: Biologická kolona.....	123
Obrázek 63: Rotační diskový reaktor .....	126
Obrázek 64: Kořenová čistírna odpadních vod .....	126
Obrázek 65: Kalové hospodářství čistíren odpadních vod.....	132
Obrázek 66: Kalové pole.....	140
Obrázek 67: Sítopásový lis.....	140
Obrázek 68: Šnekový lis .....	141
Obrázek 69: Komorový lis .....	142
Obrázek 70: Odstředivka.....	142

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Aktuální postupy a výsledné produkty biotechnologického zpracování odpadů...	15
Tabulka 2: Rozdělení mikroorganismů podle typu látkové výměny .....	17
Tabulka 3: Porovnání katabolizmu a anabolizmu. ....	18
Tabulka 4: Charakteristika katabolických procesů .....	20
Tabulka 5: Přírodní organické látky – jejich složení, výskyt a rozklad .....	20
Tabulka 6: Charakteristika makromolekul vznikajících humifikací (Gobat et al., 2004).....	22
Tabulka 7: Členění mikroorganismů podle nároků na teplotu prostředí .....	23
Tabulka 8: Hodnoty pF kritické pro množení a činnost mikroorganismů .....	24
Tabulka 9: Členění mikroorganismů podle nároků na pH .....	24
Tabulka 10: Dělení anaerobního procesu podle teplot, při kterých probíhá .....	36
Tabulka 11: Složení bioplynu .....	44
Tabulka 12: Základní fyzikální vlastnosti bioplynu a jeho hlavních složek .....	44
Tabulka 13: Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR.....	55
Tabulka 14: Emisní standardy a minimální povolená účinnost čištění .....	78
Tabulka 15: Specifické množství vody fakturované pro domácnost .....	80
Tabulka 16: Převažující znečišťující látky v odpadních vodách z různých průmyslových odvětví.....	82
Tabulka 17: Průměrné denní koncentrace znečišťujících látek v odpadních vodách .....	84
Tabulka 18: Denní produkce znečištění v odpadní vodě vztažená na 1 EO .....	84
Tabulka 19: Fyzikální principy uplatňované při mechanickém čištění.....	93
Tabulka 20: Technologické parametry usazovacích nádrží .....	110
Tabulka 21: Oxygenační kapacita při různých způsobech aerace.....	114
Tabulka 22: Přehled základních modifikací aktivačního procesu.....	117
Tabulka 23: Technologické parametry dosazovacích nádrží .....	122
Tabulka 24: Rozdělení biologických kolon s náplní z plastů.....	125
Tabulka 25: Fyzikální principy uplatňované v kalovém hospodářství.....	129
Tabulka 26: Složení primárního kalu .....	130
Tabulka 27: Složení přebytečného kalu. ....	131
Tabulka 28: Dávky srážedla v závislosti v závislosti na požadované, zbytková koncentraci fosforu .....	132
Tabulka 29: Dosažitelný obsah sušiny podle použité metody a druhu zahušťovaného kalu .	134
Tabulka 30: Kriteria pro zařazení hygienizovaného kalu do třídy I. nebo II., podle vyhlášky MŽP č. 382/2001 Sb.....	138



## 1. ZÁKLADNÍ BIOLOGICKÉ PRINCIPY VYUŽÍVANÉ V RÁMCI ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

V současné době se při zpracování organických odpadů využívá v podstatě sedmi základních biologických principů (tab. 1). Tyto principy jsou založeny na metabolických aktivitách různých skupin mikroorganismů, některé na interakcích mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy. Výsledkem těchto procesů je látková přeměna organických odpadů případně jejich energetické využití. Biologické zpracování má zároveň za následek zmenšování objemu a snižování hmotnosti odpadů, jejich hygienizaci a případně i omezování úniku skleníkových plynů do atmosféry.

Nejvíce využívaným aerobním zhodnocením zdravotně nezávadných organických odpadů je kompostování. V případě cíleného využití žížal hovoříme o vermikompostování. K rychlé hygienizaci zemědělských (většinou tekutých) bioodpadů a kalů z čistíren odpadních vod slouží jejich aerobní termofilní zpracování. Tzv. biologické sušení spočívá v intenzivním provzdušňování a promíchávání odpadu v uzavřených kontejnerech, což vede ke zvyšování teploty, částečnému rozkladu organických látek a postupnému vysušování odpadu. Jde o alternativu mechanicko-biologické úpravy tuhých komunálních odpadů (KO), založené na kombinaci fyzikálních a biologických (aerobních i anaerobních) postupů, kterými by měl projít KO před uložením na skládky. Velký rozvoj zaznamenávají v poslední době anaerobní technologie zaměřené na energetické využití biologicky rozložitelných odpadů, tzn. na výrobu bioplynu nebo etanolu.

Tabulka 1: Aktuální postupy a výsledné produkty biotechnologického zpracování odpadů

Biotechnologický postup	Typ odpadu	Produkt
Kompostování	BRO <sup>1</sup> a BRKO <sup>2</sup> nekontaminované	Kompost
Vermikompostování	Zemědělské odpady, kaly z ČOV <sup>3</sup> (nekontaminované)	Biohumus, vermibílkovina k výrobě některých krmiv a léčiv
Aerobní termofilní zpracování	Zemědělské odpady, kaly z ČOV (nekontaminované)	Organické hnojivo
Biologické sušení	BRO, kaly	Palivo (sypké, tvarované)
Anaerobní zpracování (fermentace)	BRO (kromě dřeva)	Bioplyn, zbytková org. hmota
Lihové kvašení	Odpadní cukry	Bioetanol
Mechanicko-biologické zpracování	Komunální odpady	Stabilizovaný bioodpad, bioplyn

Vysvětlivky:

<sup>1</sup> Biologicky rozložitelné odpady, <sup>2</sup> Biologicky rozložitelné komunální odpady, <sup>3</sup> Čistírny odpadních vod

## 1.1 Mikroorganismy a jejich aktivity při zpracování a využívání bioodpadů

Mikroorganismy jsou morfologicky, fyziologicky i geneticky odlišné skupiny mikroskopických organismů, systematicky řazené do říší *Archaea*, *Bacteria* a *Eucarya*. Prokaryotní (bezjaderné) mikroorganismy, tj. bakterie a sinice nemají pravé buněčné jádro; jejich jaderná hmota je neohraničena v cytoplazmě. Mezi eukaryotní mikroorganismy s pravým jádrem odděleným od cytoplazmy jadernou membránou patří mikroskopické houby (kvasinky, mikromycety) a dále řasy a prvoci. Samostatnou skupinu tvoří viry. Jsou to částice tvořené pouze genetickým materiálem (buď DNA nebo RNA) a obalovými strukturami; rozmnožují se na úkor napadené hostitelské buňky.

Zhruba 70-85 % z celkové hmotnosti mikrobiálních buněk tvoří voda, zbytek sušina. Sušina obsahuje řadu vysokomolekulárních látek, z nichž největší zastoupení mají proteiny (40 %) a dále polysacharidy (16 %), nukleové kyseliny (14 %) a lipidy (11 %). Mikrobiální buňky obsahují rovněž různé produkty svého metabolismu, jako jsou vitamíny, barviva, antibiotika příp. toxiny.

## 1.2 Výživa mikroorganismů

Mikroorganismy potřebují ke svému růstu, látkové výměně a množení zdroje energie a biogenních prvků. Uhlík je výchozím prvkem pro biosyntézu aminokyselin, jednoduchých cukrů, nukleotidů a lipidů. Podle toho, z jakého zdroje mikroorganismy uhlík čerpají, je dělíme na autotrofy, kteří získávají uhlík z  $\text{CO}_2$  a heterotrofy, pro které jsou zdrojem uhlíku organické látky. Většina mikroorganismů zajišťujících biologické přeměny odpadů patří k heterotrofům. Jako zdroj uhlíku a zároveň i energie jim slouží široká škála jednoduchých i komplexních organických látek jako jsou monosacharidy, polysacharidy, aminokyseliny, proteiny, lipidy aj.

Dusík potřebují mikroorganismy pro tvorbu aminových ( $-\text{NH}_2$ ) a iminových skupin ( $-\text{NH}-$ ). Ty jsou součástí aminokyselin, nukleotidů a řady dalších sloučenin, které tvoří buněčnou hmotu. Mikroorganismy využívají dusík z různých zdrojů. Jsou to především amonné ionty či amoniak, které snadno pronikají do cytoplazmy, dusičnany (které však musí být před využitím redukovány na formu amonnou), dále organické látky, jako jsou aminokyseliny, proteiny, močovina aj. Organické sloučeniny jsou v procesu amonizace postupně enzymaticky štěpeny až na dusík amonný. Některé mikroorganismy mají schopnost poutat molekulový dusík z atmosféry. Jde o několik desítek druhů, tzv. fixátorů vzdušného dusíku (diazotrofů), které redukovují  $\text{N}_2$  na  $\text{NH}_3$ . Diazotrofi poutají vzdušný dusík buď v symbióze s

roślinami (např. bakterie rodu *Rhizobium*, aktinomycety rodu *Frankia*), nebo samostatně (např. bakterie rodů *Azotobacter*, *Clostridium*, některé sinice).

Fosfor je stavební složkou nukleových kyselin a některých tuků. Některých organických sloučenin fosforu (adenozindi- a trifosfát; ADP/ATP) využívá buňka k přenosu a akumulaci energie. Nejvýhodnějším zdrojem fosforu pro mikroorganismy jsou soli kyseliny fosforečné. Mikroorganismy rovněž získávají fosfor rozkladem organických látek; proces je katalyzován enzymy fosfatázami.

Síru vyžadují mikroorganismy hlavně pro syntézu některých aminokyselin (cystein, metionin). Přijímají ji v různých formách včetně solí kyseliny sírové – síranů. Pro většinu mikroorganismů jsou zdrojem síry organické sloučeniny, jejichž rozklad je katalyzován enzymy sulfatázami.

Energie je nezbytná především pro biosyntetické procesy, dále pro osmotickou regulaci, difuzi látek přes cytoplazmatickou membránu (=energie osmotická), udržování povrchového náboje mikrobiální buňky, eventuálně pro pohyb buňky a u eukaryot pro proudění cytoplazmy. Podle zdrojů a způsobu získávání energie dělíme mikroorganismy na fototrofní a chemotrofní. Fototrofní mikroorganismy využívají světelné energie a přeměňují ji na chemickou. Chemotrofní mikroorganismy získávají energii oxidací anorganických nebo organických sloučenin.

Fototrofní i chemotrofní mikroorganismy se dále dělí podle toho, z jakých zdrojů získávají uhlík, vodík a elektrony (Tab. 2).

Tabulka 2: Rozdělení mikroorganismů podle typu látkové výměny

Typ látkové výměny	Zdroje energie	Donor elektronů/vodíku	Zdroje uhlíku	Organismy
<b>Chemoorganoheterotrofní</b>	organické sloučeniny	organické sloučeniny, např. $C_6H_{12}O_6$ , $C_2H_5OH$ , $CH_3OH$	organické sloučeniny	živočiškové, houby, většina bakterií
<b>Chemoorganoautotrofní</b>		organické sloučeniny, např. $CH_3COOH$ , $CH_3OH$ , $HCOOH$	$CO_2$	metanogenní archea
<b>Chemolithoheterotrofní</b>	anorganické sloučeniny	anorganické sloučeniny a molekuly, např. $H_2$	organické sloučeniny	$H_2$ oxidující bakterie, metanogenní archea

<b>Chemolitoautotrofní</b>		anorganické sloučeniny a molekuly, např. $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{S}^{2-}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{H}_2$	$\text{CO}_2$	nitrifikační a sulfurikační bakterie, $\text{H}_2$ oxidující bakterie, metanogenní archea
<b>Fotoorganoheterotrofní</b>	světelné záření	organické sloučeniny	organické sloučeniny	zelené a purpurové bakterie
<b>Fotoorganoautotrofní</b>		organické sloučeniny	$\text{CO}_2$	zelené a purpurové bakterie
<b>Fotolithoheterotrofní</b>	světelné záření	anorganické sloučeniny a molekuly, např. $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{S}$	organické sloučeniny	bakterie (purpurové, sírné), některé řasy
<b>Fotolitoautotrofní</b>		anorganické sloučeniny a molekuly, např. $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{H}_2$ , $\text{S}$	$\text{CO}_2$	rostliny, řasy, sinice, některé bakterie

### 1.3 Metabolismus mikroorganismů

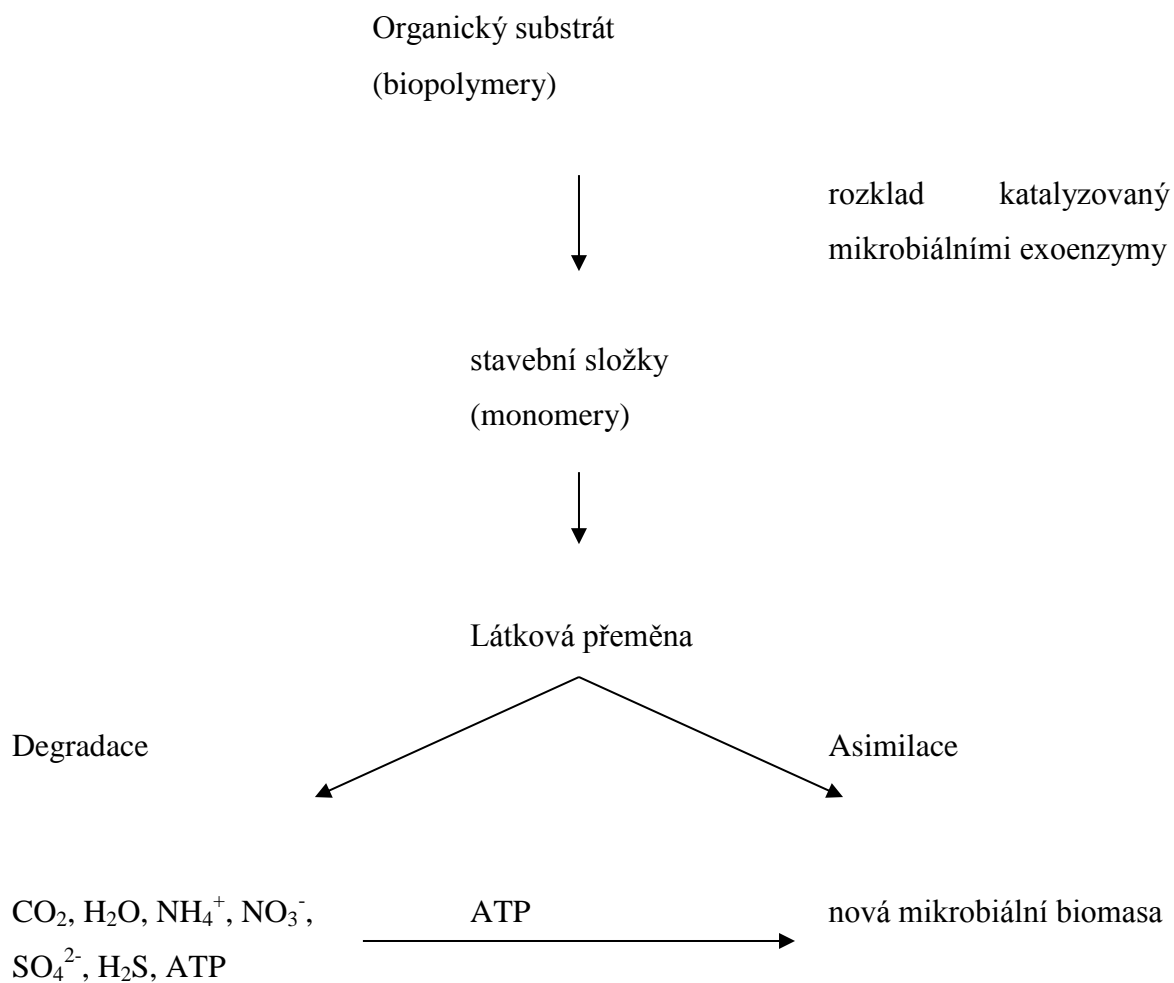
Metabolismus (látková výměna) je soubor procesů, kterými se uskutečňuje příjem látek buňkou, jejich vnitrobuněčné přeměny a vylučování produktů do prostředí. Mikrobiální metabolismus zahrnuje dva typy protichůdných procesů: (a) katabolické a (b) anabolické. V průběhu katabolických procesů jsou složité organické látky oxidovány (rozkládány, disimilovány) na látky jednodušší za současného uvolňování energie.

Procesy anabolické (biosyntetické, asimilační) vyžadují volnou energii využitelnou pro přeměnu látek jednoduchých na látky složitější. Anabolické procesy jsou mnohem rozmanitější než procesy katabolické. Z údajů v Tab. 3 a Obr. 1 vyplývá, že katabolické a anabolické procesy se doplňují, produkty katabolismu jsou využívány v anabolických procesech, naopak produkty anabolických procesů mohou být substrátem pro katabolismus.

Tabulka 3: Porovnání katabolismu a anabolismu.

Charakteristika	Katabolismus	Anabolismus
Látková přeměna	degradace (rozklad)	syntéza (tvorba)
Chemická povaha	oxidace	redukce
Energetický charakter	uvolňování energie	spotřeba energie
Látkové spektrum	široké	úzké (specifické prekurzory)
Výsledné produkty	chemicky jednoduché látky	chemicky složité látky

Vodrážka, 1996 (upraveno)



Obrázek 1: Principy mikrobiálních přeměn organických látek

Jak naznačuje Obr. 1, anabolizmus a katabolizmus jsou propojeny adenzin trifosfátem (ATP). V katabolických procesech se adenzin trifosfát (ATP) vytváří z adenzin difosfátu (ADP), který slouží jako zdroj energie pro procesy anabolické. Katabolickým procesům podléhají různé organické látky, jako jsou polysacharidy, proteiny, tuky a aminokyseliny. Jsou zdrojem energie využívaným buď oxidativně (dýchání, respirace) nebo fermentací (kvašení). Konečnými produkty aerobního využití substrátu jsou CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a energie. Produktem fermentace jsou především organické kyseliny a alkoholy. Fermentací získává mikrobiální buňka méně energie, část zůstává vázána v konečných produktech (Tab. 4).

Tabulka 4: Charakteristika katabolických procesů

Proces	Terminální akceptor elektronů	Účinnost uvolnění energie	Příklady (organizmy, tkáně)
<b>Aerobní respirace (aerobní dýchání)</b>	O <sub>2</sub>	vysoká	živočišné, aerobní mikroorganizmy, nefotosyntetizující rostlinné buňky
<b>Anaerobní respirace</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , CO <sub>2</sub>	nízká	fakultativně anaerobní mikroorganizmy
<b>Fermentace (kvašení)</b>	organické mezi - produkty metabolismu (pyruvát, acetaldehyd, butyrát, sukcinát aj.)	velmi nízká	anaerobní mikroorganizmy, svalové buňky živočichů při velké námaze

Podstatou respiračních procesů je biologická oxidace, která spočívá v přenosu H<sup>+</sup> z jedné sloučeniny na druhou, přenašečem H<sup>+</sup> jsou např. flavoproteiny, cytochromy, nukleotidy. Terminálním akceptorem H<sup>+</sup> jsou při fermentaci organické sloučeniny. Při aerobní respiraci je akceptorem H<sup>+</sup> molekulový vzdušný O<sub>2</sub>, při anaerobní respiraci je to kyslík vázaný v některých anorganických sloučeninách jako jsou NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, uhličitany, CO<sub>2</sub> aj.

Katabolické procesy jsou základem koloběhu látek v přírodě, avšak využívá se jich i při zpracování organických odpadů. Mikrobiálním rozkladem přirozených biopolymerů jsou zpět do koloběhu uváděny makrobiogenní a mikrobiogenní prvky. Tab. 5 shrnuje výskyt nejdůležitějších biopolymerů a charakteristiku jejich mikrobiálního rozkladu.

Tabulka 5: Přírodní organické látky – jejich složení, výskyt a rozklad

Látka	Chemické složení	Výskyt	Rozklad; zúčastněné organizmy
<b>Škrob</b>	řetězce poly – α – - D - glukózy	zásobní látka v semenech, hlízách a kořenech rostlin	velmi rychlý; aerobní i anaerobní mikroorganizmy
<b>Pektin</b>	polysacharid na bázi kyseliny galakturonové	lamely mezi buněčnými stěnami mladých rostlin	snadný; mikromycety a bakterie
<b>Proteiny</b>	makromolekuly na bázi aminokyselin	součást buněčné plazmy	poměrně rychlý; aerobní i anaerobní mikromycety a bakterie
<b>Hemicelulózy</b>	polymery tvořené hexózami, pentózami a uronovými kyselinami	strukturní součástí buněčných stěn	snadný až obtížný; aerobní i anaerobní aktinomycety i mikromycety
<b>Tuky a vosky</b>	Tuky: glycerinestery vyšších mastných kyselin Vosky: mastné kyseliny	součástí rostlinných a živočišných tkání	tuky: bakterie, mikromycety, aktinomycety vosky: anaerobní bakterie

<b>Chitin</b>	polymer z N - acetyl-glukozaminu	podpůrné tkáně (u hmyzu)	pomalý; bakterie, mikromycety
<b>Celulóza</b>	řetězce $\beta$ - 1,4 - D - glukózy	nejvýznamnější polysacharid; buněčné stěny vyšších rostlin	obtížný; (zejména při nízkém pH a inkrustaci ligninem)
<b>Lignin</b>	aromatický polymer koniferylalkoholu a jeho derivátů	spolu s celulózou a hemicelulózami kvantitativně nejvýznamnější strukturní součást rostlin	velmi obtížný

Katabolické a anabolické procesy se uplatňují při postupných biologických přeměnách rostlinných zbytků, jejichž produktem mohou být humusové látky vytvářené jak v přírodním prostředí (půda, voda), tak i v odpadech rostlinného původu.

Tvorba humusových látek zahrnuje rozklad, biochemické modifikace a transformace stavebních složek rostlinné biomasy, především ligninu, vosků, fenolových kyselin. Druhou možností je syntéza humusových látek polykondenzací řady molekul odštěpených z prekurzorů rostlinného původu (např. kys. ferulové, syringové, kávové, protokatechové, z pyrogalolu, konyferyl – alkoholu, katecholu, aj.).

Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma cestami je v tom, že první je založena na postupné oxidaci a degradaci existujících rostlinných polymerů, zatímco druhá zahrnuje tvorbu nových makromolekul. Humusové látky však mohou vznikat i mikrobiální syntézou. Řada mikroskopických hub má schopnost tvorby tmavě zbarvených pigmentů, které se po rozkladu biomasy stávají součástí humusu. V závislosti na podmínkách prostředí mohou různé procesy vzniku humusových látek probíhat souběžně.

Konečným produktem uvedených procesů je několik skupin makromolekul, které se liší molekulovou hmotností a rozpustností (Tab. 6). Hymatomelanové kyseliny jsou produktem polykondenzace s napojenými alifatickými molekulami, jako jsou např. bitumeny. Vyskytují se především v surovém humusu a v rašelině. Žlutě zbarvené fulvokyseliny mají dlouhé alifatické nebo peptidové boční řetězce napojené na aromatické jádro. Na fulvokyseliny se aktivně navazuje řada kationtů. Huminové kyseliny se od fulvokyselin liší především velkým počtem aromatických struktur a kratšími alifatickými řetězci. Nejstabilnější frakcí humusových látek jsou huminy, jejichž organické složky jsou v půdě a kompostech obvykle vázány na jílové minerály.

Tabulka 6: Charakteristika makromolekul vznikajících humifikací (Gobat et al., 2004).

Typ makromolekul	Molekulová hmotnost (Da)	Rozpustnost			
		voda	alkohol	alkálie	kyseliny
Hymatomelanové kyseliny	500-900	ne	ano	ano	ne
Fulvokyseliny	900-2·10 <sup>3</sup>	ano	ano	ano	ano
Huminové kyseliny					
šedé	2·10 <sup>3</sup> - 5·10 <sup>4</sup>	ne	ne	ano	ne
hnědé	5·10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	ne	ne	ano	ne
Huminy	10 <sup>5</sup> - 5·10 <sup>5</sup>	ne	ne	ne	ne

Intenzivní metabolismus mikrobiálních buněk je umožněn jejich specifickými vlastnostmi, mezi něž patří:

- Příjem živin a výdej zplodin metabolismu celým povrchem buňky. Hodnota poměru mezi povrchem mikrobiálních buněk k jejich objemu (tj. specifický povrch), je vysoká. Např. mikrokoky s průměrem buněk 0,5 μm vykazují specifický povrch 120000, zatímco prvoci s průměrnou velikostí 150 μm mají specifický povrch cca 400. Srovnatelné hodnoty čeho?? slepičího vejce činí 1,5 a člověka 0,3 (Stárka, 1959).
- Bohatý enzymatický aparát: udává se, že v jedné bakteriální buňce může být kolem 2000 enzymů (Maier et al., 2000). Jde o enzymy konstitutivní, které jsou stálou součástí buňky (např. enzymy katalyzující využití hexoz) a enzymy inducibilní (adaptivní), které buňka syntetizuje jen tehdy, je-li v prostředí látka, pro jejíž přeměnu je nový enzym nezbytný (např. induktorem enzymů dýchacího řetězce je O<sub>2</sub>). Inducibilní enzymy mohou podléhat represí (např. přítomnost celulózy indukuje syntézu celuláz; je-li ale v prostředí vedle induktoru – celulózy snadněji využitelný substrát např. glukóza, mikrobiální buňka syntézu celuláz zastaví). Díky specifickým vazbám mezi substrátem a enzymy může být rychlost enzymaticky katalyzovaných reakcí 108 až 1020 násobně vyšší než srovnatelných ryze chemických reakcí (Lehninger, 1975).
- Schopnost velmi rychle syntetizovat bílkoviny díky obrovskému počtu ribozomů v mikrobiálních buňkách. Ribozomy spolu s RNA tvoří až 40 % sušiny bakteriálních buněk.

#### 1.4 Ekologie mikroorganismů

Růst, množení a metabolismus mikroorganismů jsou výrazně ovlivňovány faktory vnějšího prostředí, a to jak abiotickými (teplota, dostupnost vody, pH, obsah kyslíku, záření, aj.), tak



biotickými (jiné mikroorganismy, rostliny, živočichové). Mikroorganismy se přizpůsobují změnám vnějšího prostředí mnohem lépe a rychleji než jiné organismy a mnohé zůstávají aktivní nebo alespoň přežívají v podmínkách, za kterých jiné organismy hynou.

### Abiotické faktory

Teplotní rozmezí, ve kterém se mikroorganismy mohou množit a být metabolicky aktivní je velmi široké (Tab. 7). Rozeznáváme tři skupiny mikroorganismů lišících se svými teplotními nároky.

Tabulka 7: Členění mikroorganismů podle nároků na teplotu prostředí

Mikroorganismy	Teplota [°C]		
	minimum	optimum	maximum
psychrofilní	-8 až 0	10 až 20	21 až 30
mezofilní	10 až 15	25 až 35	35 až 45
termofilní	25 až 40	50 až 60	70 až 90

Psychrofilní mikroorganismy se vyznačují pomalým metabolismem i množením, s klesající teplotou se rychlost rozmnožování i intenzita metabolismu postupně snižují. Některé z nich, např. řada mikromycet, rostou i při teplotách nižších než -10 °C, což je umožněno vysokým osmotickým tlakem uvnitř buněk i vyšším obsahem tuků. Mezofilní mikroorganismy, mezi něž patří většina dnes známých mikroorganismů, snášejí dobře i nízké teploty, při nichž je však jejich metabolismus zpomalen. Při překročení maximálních teplot aktivity mezofilů ustávají; teploty vyšší než 65 °C způsobují - pokud netvoří termorezistentní endospóry - lyzi buněk. Mezi mezofilní mikroorganismy patří většina patogenních mikroorganismů, k jejichž inaktivaci lze vyšších teplot účinně využít (viz kapitola Kompostování).

Termofilní mikroorganismy mohou růst a množit se i při teplotách, při nichž většina jiných organismů včetně rostlin a živočichů hyne. Jsou vybaveny extrémně stabilními proteiny. Termofilní mikroorganismy se vyskytují např. v termálních vodách, v některých odpadních vodách, ve zrajících kompostech a rovněž v chlévském hnoji.

Voda, která tvoří 75 - 90 % hmotnosti mikrobiálních buněk, je nezbytná pro růst a metabolismus mikroorganismů. Podle nároků na dostupnou vodu rozlišujeme mikroorganismy hydrofilní, mezofilní a xerofilní (Tab.8). Hydrofilní mikroorganismy mohou využívat pouze vodu volnou, která není fyzikálně či chemicky vázána. Typickými hydrofilními mikroorganismy jsou bakterie a sinice. Mezofilní a zejména xerofilní mikroorganismy jsou schopny zčásti využívat i vodu částečně fyzikálně či chemicky vázanou. K mezofilům patří kvasinky a většina plísní. Typickými xerofily jsou aktinomycety a mnohé

plísň. V prostředí bez vody mohou mnohé mikroorganismy přežít ve formě spor (spóry mikromycet a aktinomycet, endospóry bakterií).

Dostupnost vody pro mikroorganismy se posuzuje podle různých parametrů. Nejčastěji se uvádí obsah vody v hmotnostních či objemových procentech; velmi přesné informace poskytují hodnoty pF. Vyjadřují sílu, kterou je voda v prostředí vázána. Čím vyšší hodnoty pF, tím silnější je fyzikální či chemická vazba vody a tím větší energii musí buňka vynaložit, aby ji získala. Hodnoty pF, při kterých se buněčná činnost mikroorganismů a vyšších organismů zastavuje, jsou odlišné. Pro rostliny je hraniční hodnotou pF = 4,2; při vyšších hodnotách již rostliny nejsou schopny vodu z půdy resorbovat a ztrácí svůj turgor. Proto se tato hodnota označuje jako bod trvalého vadnutí. Mikroorganismy při této hodnotě pF rovněž výrazně omezují svůj metabolismus, avšak k jeho úplnému zastavení dochází až při podstatně vyšších hodnotách pF (Tab. 8).

Tabulka 8: Hodnoty pF kritické pro množení a činnost mikroorganismů

Mikroorganismy	Zastavení činnosti (pF)
Hydrofilní	4,85
Mezofilní	4,90-5,48
Xerofilní	5,68

Hodnoty pH velmi významně ovlivňují růst a aktivitu všech mikroorganismů. Podle citlivosti k pH rozdělujeme mikroorganismy na acidofilní, neutrofilní a alkalofilní (syn. bazofilní) - viz Tab. 9. Většina bakterií nesnáší kyselé prostředí; existují však výjimky, např. sírné bakterie rodu *Thiobacillus*, které oxidují síru na kyselinu sírovou dobře rostou při pH = 2 - 3. Kyselé prostředí vyhovuje také mnohým anaerobním bakteriím, u nichž jsou organické kyseliny (např. kyselina mléčná, propionová či máselná) hlavním produktem metabolismu.

Tabulka 9: Členění mikroorganismů podle nároků na pH

Mikroorganismy	Rozmezí hodnot pH
Acidofilní	1-5
Neutrofilní	5-7,5
Alkalofilní (=bazofilní)	>7,5

Většina mikroorganismů se nejlépe rozvíjí v neutrálním až slabě alkalickém prostředí, tj. při pH 6,5 - 8. Výrazné výchylky do kyselé či zásadité oblasti jejich činnost omezují. Z tohoto pravidla se vymykají plísň, které jsou metabolicky aktivní v širokém rozmezí pH od 2 do 11.

V prostředí silně kyselém či silně zásaditém jsou zbaveny konkurence mnoha jiných mikroorganismů.

Typ mikrobiálního metabolismu je ovlivněn přítomností kyslíku v prostředí. Podle nároků na  $O_2$  lze mikroorganismy rozdělit na několik skupin. Aerobní mikroorganismy vyžadují dostatek volného kyslíku v prostředí. energii získávají aerobní respirací či oxidací anorganických sloučenin. Anaerobní mikroorganismy jsou metabolicky aktivní pouze v prostředí bez vzdušného  $O_2$ ; energii získávají převážně fermentací substrátu. Obě hlavní skupiny zahrnují tzv. striktní (přísné) aeroby či anaeroby. Přechodné skupiny mezi aeroby a anaeroby tvoří fakultativně, tj. příležitostně anaerobní mikroorganismy, které přizpůsobují svůj metabolismus obsahu  $O_2$  v prostředí a mikroaerofilní mikroorganismy, které mají sice anaerobní metabolismus, avšak nízké koncentrace vzdušného  $O_2$  urychlují jejich rozmnožování.

Mikrobiální procesy probíhající v různých prostředích vyžadují odlišné množství dostupného kyslíku. Poměr mezi oxidačními a redukčními procesy, tzv. oxido-redukční potenciál (rH, měrná jednotka mV) má široké rozpětí hodnot. Hodnoty rH vyšší než +100 jsou charakteristické pro aerobní (oxické) prostředí dobře zásobené kyslíkem, který mikroorganismy využívají k oxidaci různých organických či anorganických látek. Hodnoty rH mezi -50 mV až +50 mV ohraničují anoxickou oblast, tj. oblast bez vzdušného kyslíku, avšak s kyslíkem obsaženým v různých anorganických sloučeninách (nitrity, nitráty, uhličitany, sírany, aj.). Kyslíku anorganických sloučenin mikroorganismy využívají k anaerobní respiraci v procesech denitrifikace, desulfurikace apod.

Prostředí s hodnotami rH nižšími než -100 mV (anaerobní) neobsahuje žádný zdroj kyslíku. Za takových podmínek mikroorganismy fermentují organické substráty na organické kyseliny a plyny ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  aj.).

Na mikrobiální buňky působí škodlivě záření, které je absorbováno nukleovými kyselinami. Jeho škodlivost vzrůstá s intenzitou nepřímo úměrnou vlnové délce, tj. čím větší vlnová délka, tím nižší vliv má záření na mikroorganismy. Viditelné záření o vlnové délce 380 - 760 nm i část infračerveného záření (800 - 900 nm) je zdrojem energie pro fototrofní mikroorganismy; činnost chemotrofnů spíše brzdí. Chemotrofní mikroorganismy se intenzivněji množí a jsou metabolicky aktivnější za nepřístupu světla. Existují však výjimky; např. některé mikromycety tvoří spóry pouze za světla. UV-záření o vlnové délce 260 - 270 nm je absorbováno DNA a má mutagenní nebo letální účinky. UV záření lze využít k dekontaminaci vzduchu a povrchu předmětů. Gama-záření (vlnová délka 10nm) vyvolává rychlý rozklad (lyzi) mikrobiálních buněk.

Mnohé chemické sloučeniny a přípravky zastavují rozmnožování mikroorganismů (mikrobistatika), příp. vyvolávají lyzi jejich buněk (mikrobicidní sloučeniny).

Mechanismus jejich účinku na mikroorganismy je v podstatě trojího typu:

- a) Poškozují strukturu buněk mikroorganismů, např. buněčnou stěnu (antibiotika) či buněčné membrány, ribozomy apod. (látky rozpouštějící tuky nebo anionaktivní tenzidy).
- b) Narušují činnost enzymů. Jde o různá oxidační činidla a ionty těžkých kovů, příp. nenasycené sloučeniny (kyselina sorbová).
- c) Poškozují DNA. Jedná se např. o sloučeniny s mutagenním účinkem jako jsou deaminační činidla ( $\text{HNO}_2$ ) nebo silná činidla alkylační.

### **Biotické faktory**

Při biologickém zpracování odpadů se uplatňují jak vztahy mezi různými mikroorganismy, tak i vztahy mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy.

Největší význam má komenzalismus („spolustolovnictví“), kdy mikroorganismy mění svou činností prostředí a umožňují tak rozvoj jiných organismů, jimž změna prostředí vyhovuje. Nejrozšířenějším typem komenzalismu je metabióza, tj. vztah, ve kterém jsou metabolické produkty jedněch mikroorganismů využívány jinými mikroorganismy. Tento vztah zajišťuje koloběh látek a je v přírodě velmi rozšířen. Jeho podstatou je sukcese procesů při transformacích různých typů organických látek. Metabiózy se využívá při kompostování, čištění odpadních vod, či při anaerobním zpracování odpadů.

Poměrně častým vztahem mezi mikroorganismy je synergismus. Je to vzájemně prospěšný vztah mezi dvěma druhy mikroorganismů nebo i skupinami mikroorganismů, který jim umožňuje uskutečňovat procesy, jichž by samostatně nebyly schopny. Např. v půdě či kompostovaném materiálu se může ustavit synergický vztah mezi celulolytickými mikroorganismy a volně žijícími fixátory molekulového dusíku ( $\text{N}_2$ ). Celulolytické mikroorganismy štěpí makromolekuly celulózy a poskytují tak zdroje energie fixátorům  $\text{N}_2$ . Poutaný dusík může být využit pro výživu a činnost celulolytických mikroorganismů. Obě skupiny mikroorganismů však na sebe nejsou striktně vázány – potřebnou energii či dusík mohou získávat i z jiných zdrojů.

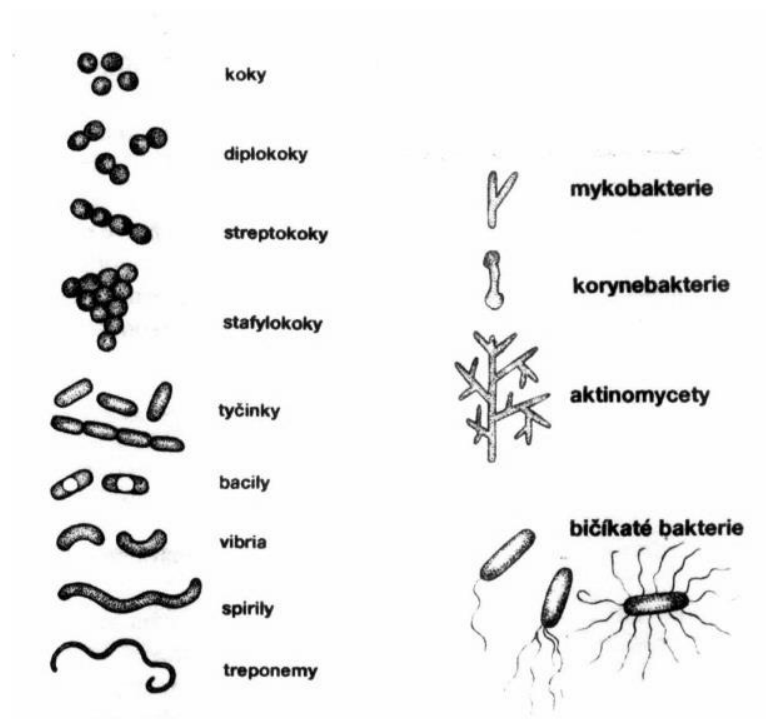
Opakem synergizmu je antagonismus, kdy určitá mikrobiální populace mění svou činností prostředí natolik, že zabraňuje růstu jiných populací (změna pH, oxidačně-redukčního potenciálu, nahromadění produktů metabolismu aj.).

Synergické vztahy mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy se uplatňují mj. při procesu kompostování. Význam bezobratlých spočívá v rozmělnění a fragmentaci

organických zbytků; zvětšují tak jejich povrch, který pak mikroorganismy rychleji osídlují a přeměňují. Mikroorganismy tím velmi často „zchutňují“ organické zbytky pro živočichy, které lákají produkty svého metabolismu. Bezobratlí živočichové (saprofágové) využívají organických zbytků osídlených mikroorganismy ve svém metabolismu. Mikrobiální buňky jsou v trávicím traktu bezobratlých buď rozloženy, nebo jím procházejí a objevují se v exkrementech. Počty a aktivita mikroorganismů se však mohou v trávicím traktu také zvyšovat. Bezobratlí živočichové tak mohou významně ovlivňovat biomasu mikroorganismů a strukturu i aktivitu jejich společenstev, což se následně projeví ve způsobech a rychlosti přeměn organických zbytků (viz kap. Vermikomposty).

### 1.5 Charakteristika jednotlivých skupin mikroorganismů

Bakterie jsou jednobuněčné, morfologicky i fyziologicky velmi rozmanité prokaryotní mikroorganismy. Odlišnou stavbu mají archae (často postrádají buněčnou stěnu), které jsou patrně nejstaršími organismy na naší planetě. Bakterie mají většinou tvar tyčinek nebo kuliček (koků), které se vyskytují buď samostatně, nebo se sdružují do různých seskupení – do dvojic, řetězků či balíčků.



Obrázek 2: Tvary bakterií, Rosypal (1994), upraveno

Průměrná velikost koků se pohybuje mezi 0,5 - 1,5  $\mu\text{m}$ , délka tyčinek 1 – 7  $\mu\text{m}$ , jejich tloušťka 0,5 - 2,0  $\mu\text{m}$ . Aktinomycety se větví do vláken (hyf) o průměru asi 1  $\mu\text{m}$  jejichž délka může dosáhnout několika mm. Většina bakterií se rozmnožuje příčným dělením, kterému

předchází replikace DNA. Rozmnožování probíhá velmi rychle; generační doba, tj. doba za níž dojde k rozdělení buněk, se v optimálních podmínkách pohybuje mezi 15 až 300 minutami. Aktinomycety se nejčastěji rozmnožují pomocí spor nebo členěním vláknitých buněk.

Svou fyziologickou rozmanitostí předčí bakterie ostatní mikroorganismy; najdeme mezi nimi zástupce fototrofů i chemotrofů, heterotrofů i autotrofů, aerobů, anaerobů, fakultativních anaerobů i mikroaerofilů.

Bakterie se velmi dobře přizpůsobují měnícím se podmínkám vnějšího prostředí a mohou přežít v podmínkách, za kterých jiné organismy odumírají (vysoké teploty, extrémní hodnoty pH, sucho aj). Adaptabilitu bakterií podmiňuje bohatý enzymatický aparát, přežívání extrémních podmínek pak u některých z nich endospóry, tj. specifické útvary vznikající uvnitř buněk.

Schopnost tvořit endospóry mají bakterie rodů *Bacillus*, *Clostridium* nebo *Desulfotomaculum*. V průběhu tvorby endospór (sporulace) se syntetizují základní stavební složky nové buňky, které jsou pak v klidovém stavu chráněny několikvrstevným obalem. Jedna buňka tvoří vždy jednu spóru. V příznivých podmínkách spóra vyklíčí a přemění se v obvyklou mikrobiální vegetativní buňku. Ve formě endospór mohou bakterie přetrvat po desetiletí i déle až do doby, kdy nepříznivé podmínky pominou.

Sinice jsou jednobuněčné prokaryotní fotoautotrofní mikroorganismy, které se velmi často sdružují do vláken či kolonií. Jsou větší než bakterie – průměr buněk je zhruba 3 - 5  $\mu\text{m}$ . Sinice se většinou rozmnožují příčným dělením, některé též pomocí spor. Vláknité sinice (např. rod *Anabaena*) obsahují heterocysty s enzymem nitrogenáza (umožňuje poutání vzdušného  $\text{N}_2$ ). Sinice jsou velmi odolné vůči podmínkám vnějšího prostředí.

Mikromycety (mikroskopické houby) jsou eukaryotní mikroorganismy, zahrnující kvasinky a vícebuněčné vláknité houby. Mikromycety patří k chemoheterotrofům; organické látky jim slouží jako zdroj uhlíku a energie. Zatímco kvasinky využívají především jednoduchých cukrů, vláknité houby jsou vybaveny enzymy, které jim umožňují využívat různé polysacharidy, lignin i některá xenobiotika. Většina vláknitých hub patří k aerobům, kvasinky jsou fakultativně anaerobní.

Kvasinky mají nejčastěji elipsovité či kulovité tvar, velikost buněk dosahuje v průměru 4 - 8  $\mu\text{m}$ . Je pro ně typický vysoký obsah proteinů v sušině (až 50 %) a dále přítomnost vitaminů skupiny B ( $\text{B}_1, \text{B}_2, \text{B}_6$ ) a ergosterolu (provitaminu vitamínu D). Většina kvasinek se rozmnožuje nepohlavně a to především pučením, mnohé také pohlavně vzniklými spórami.

Mikromycety jsou tvořeny souborem vláken (hyf), tj. myceliem. Mycelium může vzniknout vyklíčením jedné spóry nebo se rozvíjí z fragmentů hyf. Mycelium vývojově jednodušších mikromycet (Zygomycotina) je většinou jednobuněčné s mnoha jádry a s přepážkami. Většina mikromycet má však mycelium vícebuněčné. Rozmnožování mikromycet zajišťují hlavně nepohlavní spóry, které se tvoří na vzdušném myceliu uvnitř či vně specifických útvarů

Viry, organizmy bez buněčné struktury, jsou submikroskopické částice o velikosti 15 - 390 nm. Jsou tvořeny nukleovou kyselinou (buď DNA nebo RNA), která je chráněna proteinovým pláštěm (kapsidem). Tzv. obalené viry mají na povrchu ještě vrstvu bohatou na lipidy. Viry jsou vnitrobuněční paraziti; nemají vlastní metabolismus a mohou se reprodukovat pouze v hostitelských buňkách (rostlinných, živočišných či mikrobiálních).

## **2. TECHNIKA PRO BIOPLYNOVÉ TRANSFORMACE**

Pro bioenergetické transformace na bioplyn lze v zemědělství a potravinářství použít všechny organické látky. Z naznačených důvodů se tato kapitola orientuje na bioenergetické transformace odpadů organického charakteru, jehož kvantum produkce je v zemědělství značné. Jedná se o tekutý hnůj prasat a chlév-skou mrvu skotu. Jejich produkce neoddelitelně doprovází zemědělskou prvovýrobu a bioenergetické využití se přímo nabízí. Přitom nedochází ke snížení hnojivé hodnoty slámatého hnoje a u tekutého hnoje se řeší jeho využití vůbec. Bioenergetická transformace směřuje k výrobě bioplynu a elektrické energie. Bioplyn může být transformován dále na energii tepelnou i na mechanickou energii např. ve spalovacích motorech, sušárnách píce, vytápění objektů zemědělských i vlastních bioreaktorů apod. Na začátku obou těchto transformací energie z organických odpadů, je sluneční energie s fotosyntetickou látkovou transformací, tj. s tvorbou biomasy, která se stává následně předmětem bioenergetických transformací jak základních (bioplyn), tak vyšších, kterými jsou následné transformace ušlechtilých energií krmiv a potravin. Z naznačeného vyplývá stěžejní úloha sluneční energie v základních i vyšších energetických transformacích, z nichž většina jsou bioenergetické transformace. Proto také je v úvodní kapitole obsáhleji analyzována sluneční energie.

### **2.1 Bioplynové transformace**

Bioplynovými transformacemi rozumíme proces anaerobní fermentace, což je historicky jedna z nejstarších zpracovatelských technologií používaných lidstvem. Do 30. let dvacátého století byla tato technologie běžně využívána zejména na čistírnách odpadních vod ke

zpracování, stabilizaci čistírenských kalů, které obsahovaly velké množství organických látek za vzniku bioplynu, který byl nazýván kalový plyn a byl následně využíván pro ohřev vody, případně vytápění objektů na čistírně odpadních vod. Od 30. let dvacátého století začíná intenzivní výzkum procesu anaerobní fermentace. Díky vědeckotechnickému pokroku v oblasti anaerobních technologií spojených s výrobou a využitím bioplynu se začaly používat k jeho výrobě mimo čistírenských kalů například i odpady ze zemědělství a potravinářství. Od 70. let 20. století se technologie anaerobní fermentace neomezuje pouze na zpracování odpadů, ale jsou již využívány také cíleně pěstované energetické plodiny (Straka *et al.*, 2006). Je nutné si uvědomit, že výroba bioplynu je klíčovou technologií pro udržitelné využívání zemědělské biomasy jako obnovitelného zdroje energie a zpracování biologicky rozložitelných odpadů.

Bioplynové stanice (BPS) jsou dnes rozšířenou biotechnologií využívající procesu anaerobní fermentace pro řízenou konverzi organického uhlíku obsaženého v biologicky rozložitelných materiálech za nepřístupu vzduchu (anaerobní podmínky) na finální produkty, kterými jsou bioplyn a fermentační zbytek.

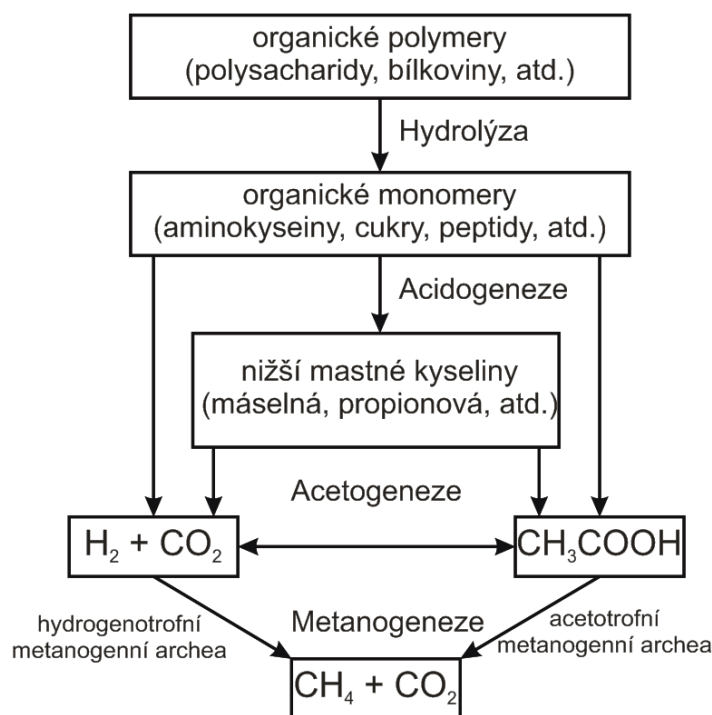
## 2.2 Proces anaerobní fermentace

Proces anaerobní fermentace je složitý biochemický proces, při kterém dochází v několika na sebe navazujících krocích, hydrolýze, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi díky činnosti mikroorganismů k rozkladu organických látek obsažených ve vstupních surovinách (Stams *et al.*, 2003). Meziprodukty jednotlivých skupin mikroorganismů v jednotlivých krocích jsou spotřebovávány v dalších krocích vzniku bioplynu mikroorganismy jinými. Absence jedné skupiny mikroorganismů může mít negativní dopad na průběh procesu jako celku (Lee *et al.*, 2009; Weiland, 2010).

Mikrobiální diverzita v bioplynových fermentorech je stejně rozsáhlá jako mikrobiální diverzita v trávicím traktu přežvýkavců, kde bylo identifikováno sedmnáct základních kmenů anaerobních mikroorganismů. Tyto mikroorganismy hrají zásadní roli při výrobě bioplynu (Stieb a Schink, 1987). Důležitou roli v tom, které z kmenů anaerobních mikroorganismů budou přítomny ve fermentoru, samozřejmě sehrává povaha vstupního materiálu, který má být zpracováván v bioplynové stanici (Hattori *et al.*, 2001). Druh vstupního materiálu určuje, zdali budou ve fermentoru převládat proteolytické mikroorganismy nebo amylolytické mikroorganismy. Mezi nejčastěji se vyskytující se druhy anaerobních mikroorganismů ve fermentorech bioplynových stanic patří *Bacteroides succinogens*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Clostridium cellobioparum*, *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens*, *Eubacterium*



*cellulosolvens*, *Clostridium cellulosolvens*, *Clostridium cellulovorans*, *Clostridium thermocellum*, *Bacteroides cellulosolvens* a *Acetivibrio cellulolyticus* (Stieb a Schink, 1987). Je nutné si uvědomit, že existuje jasný rozdíl v druzích celulolytických mikroorganismů přítomných v trávicím traktu přežvýkavců a v bioplynové stanici. Zatímco v trávicím traktu přežvýkavců představovali zástupci rodu *Ruminococcus* sp. 60 % z celkového počtu kolonií, ve fermentoru bioplynové stanice převládaly rody *Bacteroides* a *Clostridium* (Switzenbaum *et al.*, 1990). Zjednodušené schéma průběhu anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je znázorněno na obrázku 3 (Pohland a Gosh, 1971).

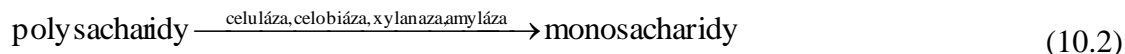


Obrázek 3: Znázornění rozkladu organického materiálu na bioplyn

## Hydrolýza

Hydrolýza je prvním krokem v procesu anaerobní fermentace, během které jsou složité organické látky (polymery) štěpeny na jednodušší organické látky (mono a oligomery). V průběhu hydrolýzy, jsou polymery jako sacharidy, lipidy, nukleové kyseliny a proteinů, štěpeny hydrolytickými enzymy produkovanými hydrolytickými mikroorganismy na glukózu, glycerol, purin a pyridin. Štěpení polymerů na monomery enzymy je možno znázornit pomocí následujících rovnic.





Produkty hydrolýzy jsou rozkládány dalšími mikroorganismy, které je využívají pro své metabolické procesy.

### **Acidogeneze**

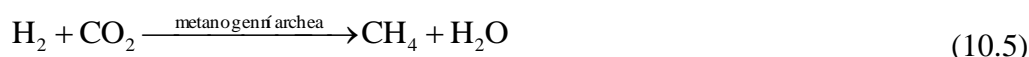
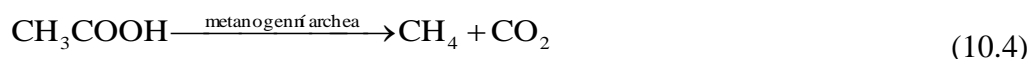
Během acidogeneze jsou produkty hydrolýzy štěpeny acidogenními mikroorganismy na produkty využitelné metanogenními mikroorganismy. Moosacharidy, aminokyseliny a mastné kyseliny jsou štěpeny na acetát, oxid uhličitý a vodík (70 %), jakož i na těkavé mastné kyseliny a alkoholy (30 %).

### **Acetogeneze**

Produkty acidogeneze, které nemohou být přímo transformovány metanogenními archea na metan, jsou štěpeny na tyto produkty v průběhu acetogeneze. Těkavé mastné kyseliny a alkoholy jsou oxidovány do produktů využitelných při metanogenezi. Těmito produkty jsou acetát, vodík a oxid uhličitý. Těkavé mastné kyseliny s uhlíkovými řetězci delšími než dva a alkoholy s uhlíkovými řetězci déle než jeden, jsou oxidovány na acetát a vodík. Produkce vodíku zvyšuje parciální tlak vodíku, což může mít negativní dopad na acetogenezi. Vysoká koncentrací vodíku inhibuje metabolismus acetogenních mikroorganismů, naopak metanogenními archea je vodík transformován na metan. Acetogeneze a metanogeneze musí probíhat paralelně, jako symbióza dvou skupin mikroorganismů.

### **Metanogeneze**

Produkce bioplynu (metanu a oxidu uhličitého) z meziproduktů předcházejících fází anaerobní fermentace probíhá díky činnosti metanogenních archea. Sedmdesát procent vyprodukovaného metanu je produkováno přeměnou kyseliny octové ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), zbývajících třicet procent je vyrobeno z přeměny vodíku ( $\text{H}_2$ ) a oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ). Metanogenezi můžeme popsat následujícími rovnicemi.



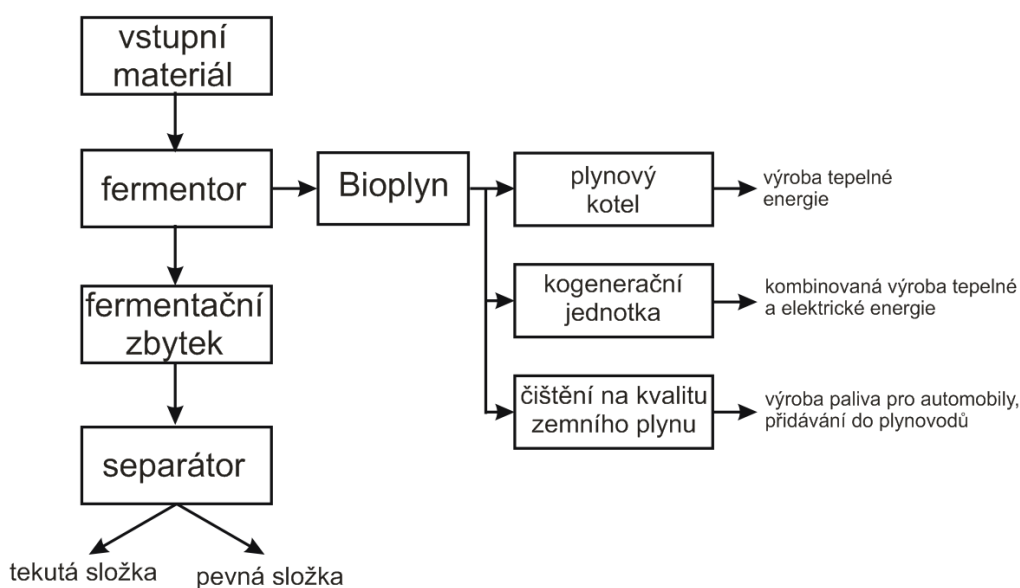
Metanogeneze je nejdůležitým krokem v celém procesu anaerobní fermentace, z biochemického hlediska se jedná o nepomalejší fázi silně ovlivněnou provozními

podmínkami. Významný vliv na proces metanogeneze má složení vstupní suroviny, dávkování vstupní suroviny, teplota a pH.

### 2.3 Bioplynové stanice

Bioplynové stanice můžeme považovat za biotechnologii, ve které je proces výroby bioplynu závislý na interakci mezi různými druhy mikroorganismů. K tomu, aby bylo dosaženo funkčního a stabilního procesu s co nejvyšší produkcí metanu, je důležité vytvořit a udržovat vhodné prostředí pro činnost mikroorganismů (Amon *et al.*, 2006). K tomu právě slouží technologie bioplynových stanic. Díky vhodně nastavené a zvolené technologii bioplynové stanice můžeme maximalizovat výrobu bioplynu jako konečného produktu procesu anaerobní fermentace. V praxi je používáno mnoho technologií pro výrobu bioplynu, v České republice jsou to desítky technologií pro anaerobní zpracování různých druhů materiálů. Tyto systémy se liší zejména v provozních parametrech, přičemž použitá technologie a konstrukce fermentoru závisí primárně na vstupní surovině, která má být zpracována.

Obecně lze říci, že se technologie bioplynových stanic skládá z několika na sebe navazujících technologických celků. Obecné schéma bioplynové stanice je znázorněno na obrázku 10.2.



Obrázek 4: Obecné schéma bioplynové stanice (zdroj: Hobson *et al.*, 1981, upraveno)

#### Rozdělení bioplynových stanic

Kategorizace bioplynových stanic je prováděna podle celé řady faktorů a parametrů. V následujícím přehledu jsou vybrány ty nejzásadnější z nich.

#### Podle druhu zpracovávaného materiálu

Bioplynové stanice dělíme podle druhu zpracovávaného materiálu a v souladu s metodickým pokynem Ministerstva životního prostředí, k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu na:

- zemědělské bioplynové stanice,
- čistírenské bioplynové stanice,
- ostatní bioplynové stanice.

### **Zemědělské bioplynové stanice**

Tyto BPS zpracovávají materiály rostlinného charakteru a statkových hnojiv, resp. podestýlky. Na těchto bioplynových stanicích není možné zpracovávat odpady podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ani jiné materiály, které spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě.

Na zemědělských bioplynových stanicích je možno zpracovávat zejména následující materiály:

#### Suroviny živočišného původu

- kejda prasat
- hnůj prasat se stelivem
- kejda skotu
- hnůj skotu se stelivem
- hnůj a stelivo z chovu koní, koz, králíků
- drůbeží exkrementy, včetně steliva

#### Suroviny rostlinného původu

- sláma všech typů obilovin i olejnin
- plevy a odpad z čištění obilovin
- bramborová nat' i slupky z brambor
- řepná nat' z krmné i cukrové řepy
- kukuřičná sláma i jádro kukuřice
- travní biomasa nebo seno (senáže)
- nezkrmitelné rostlinné materiály (siláže, obiloviny, kukuřice)

#### Cíleně pěstovaná biomasa

- obiloviny v mléčné zralosti (celé rostliny) čerstvé i silážované

- kukuřice ve voskové zralosti (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- kukuřice vyzrálá (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- krmná kapusta (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- dřevní biomasa (štěpky anebo řezanka z listnatých dřevin z rychloobrátkových kultur anebo z průklestů)

### **Čistírenské bioplynové stanice**

Tyto BPS pracovávají pouze kaly z čistíren odpadních vod a jsou nedílnou součástí čistírny odpadních vod (ČOV). Technologie anaerobní fermentace je využívána za účelem anaerobní stabilizace kalu vznikajícího na čistírnách odpadních vod. Tyto technologie nejsou určeny ke zpracování biologicky rozložitelných odpadů a k nakládání s odpady, ale slouží pouze jako součást kalového hospodářství ČOV jako celku. Do tohoto zařízení nevstupují jiné materiály než kaly z ČOV, žump a septiků a odpadní voda. V případě, že jsou do těchto nádrží na anaerobní fermentaci přidávány jiné odpady podle zákona o odpadech, jedná se o ostatní bioplynové stanice. Na tato zařízení se pak vztahují všechny požadavky zákona o odpadech a jeho prováděcích předpisů.

U bioplynových stanic pracujících pouze v režimu ČOV nejsou požadovány zásobní nádrže na anaerobně stabilizovaný kal. Tyto technologie pracují v režimu čistíren odpadních vod, které mají ve svém provozním řádu zpracovány podmínky nakládání s aktivovaným kalem a anaerobně stabilizovaným kalem.

### **Ostatní bioplynové stanice**

Bioplynové stanice, zpracovávající ostatní vstupy, mohou zpracovávat bioodpady podle podínek a požadavků vyhlášky 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady, v platném znění a dále odpady uvedené v tab. 3 v příloze 2., případně substráty uvedené v odstavci 4.1., 4.2. a 4.3. metodického pokynu Ministerstva životního prostředí k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu. Pokud BPS zpracovávají vedlejší živočišné produkty (VŽP), spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 a musí plnit podmínky v něm stanovené, jako je např. hygienizace suroviny/odpadů (pasterace, vysokoteplotní hygienizace, apod.).

### **Podle obsahu sušiny zpracovávaného materiálu**

Bioplynové stanice, kde jsou zpracovávány materiály s obsahem sušiny na vstupu nižším než 15 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající tekuté substráty. Tyto stanice využívají disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Tato

technologie představuje v současnosti 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

Naopak bioplynové stanice, kde je obsah sušiny vstupního materiálu vyšší než 15 %, obvykle 30-45 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající netekuté substráty. Tyto stanice využívají procesní tekutinu (perkolát) jako inokulum pro postřik materiálu, který je naskladněn do fermentoru. Tato technologie představuje pouhé 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

### **Podle provozní teploty ve fermentoru**

Podle provozní teploty ve fermentoru můžeme bioplynové stanice dělit z hlediska mikrobiologického v zásadě do třech skupin, tabulka 10. Bioplynové stanice pracující s provozní teplotou  $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , to znamená v psychrofilním teplotním režimu, bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí  $30\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , to znamená v mezofilním teplotním režimu a na bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí  $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , to znamená v termofilním teplotním režimu (Sánchez *et al.*, 2001).

Dnes používané technologie bioplynových stanic využívají v drtivé většině mezofilní teplotní režim  $30\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A to i přes skutečnost, že termofilní teplotní oblast nabízí vyšší reakční rychlosti, vyšší produkce bioplynu a vyšší účinnost při eliminaci patogenních mikroorganismů obsažených ve zpracovávaném materiálu ve srovnání s mezofilním teplotním režimem. Termofilní proces je však více citlivý na změny životního prostředí ve fermentoru než proces mezofilní (Ahn a Forster, 2002; Hamed *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2002).

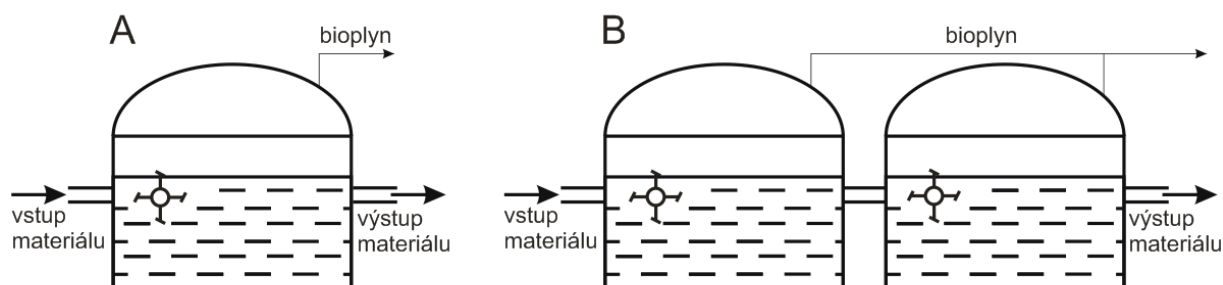
Tabulka 10: Dělení anaerobního procesu podle teplot, při kterých probíhá

	<b>Rozmezí teplot</b>	<b>Minimální doba zdržení</b>
psychrofilní	$< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	70-80 dnů
mezofilní	$30 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	30-40 dnů
termofilní	$45 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	15-20 dnů

### **Podle počtu fermentorů zařazených v sérii**

Technicky nejjednodušší bioplynové stanice používají pro výrobu bioplynu pouze jeden fermentor pro celý proces anaerobní fermentace, jedná se o jednostupňovou fermentaci. U tohoto způsobu konstrukce bioplynové stanice probíhají všechny mikrobiální procesy, hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze, ve stejném čase a na stejném místě. Jedná se o běžný typ fermentoru, ve kterém je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento způsob fermentace je často využíván pro zpracování kalů, potravinářských odpadů, zemědělských odpadů apod.

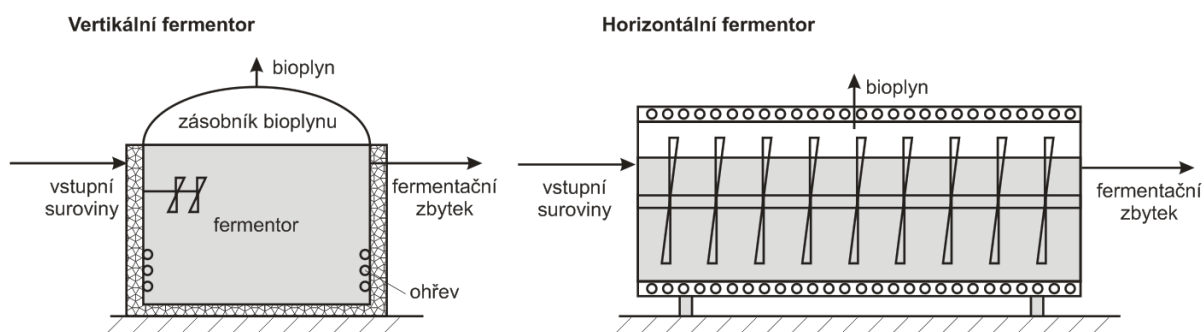
Alternativou k jednostupňovému procesu je proces dvoustupňový, (případně vícestupňový). Při dvoustupňové fermentaci probíhá odděleně v jedné nádrži hydrolyza a acidogeneze a ve druhé nádrži acetogeneze a metanogeneze (Pohland a Gosh, 1971). I u dvoustupňové fermentace jsou použity běžné typy fermentorů, ve kterých je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento typ procesu může být výhodný, pokud vstupní substrát obsahuje snadno rozložitelné látky (energetické plodiny, rostlinné zbytky). Schematicky jsou zobrazeny možnosti provedení na obrázku 5.



Obrázek 5: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice

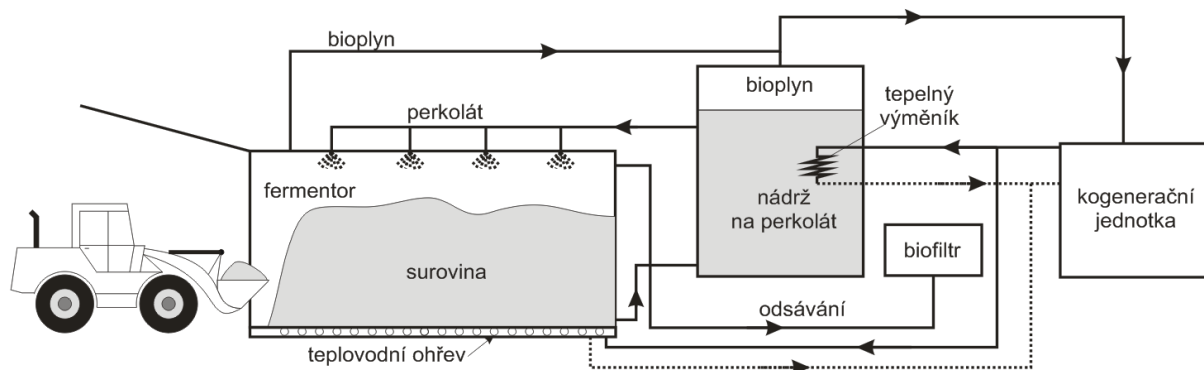
### **Podle způsobu dávkování vstupního materiálu do fermentoru**

Bioplynová stanice, respektive fermentor bioplynové stanice, může být provozován s ohledem na dávkování vstupního materiálu, buď jako kontinuální nebo jako diskontinuální. Způsob provozování závisí na použitém vstupním materiálu (Lettinga, 2005; Sakar *et al.*, 2009). U fermentorů s kontinuálním provozem je vstupní surovina do fermentoru přiváděna a z fermentoru odváděna kontinuálně, resp. v pravidelných intervalech v průběhu dne. Vstupní surovina je do fermentoru nejčastěji dávkována, v závislosti na skupenství, pomocí šnekových dopravníků nebo vřetenových čerpadel. Doba zdržení suroviny ve fermentoru se pohybuje obvykle v rozpětí 30-90 dnů. Materiál je z fermentoru odváděn gravitačně přepady nebo pomocí vřetenových čerpadel. Tyto fermentory jsou vybaveny zařízením pro míchání, obsahu fermentoru, což pozitivně působí na kontakt materiálu s mikroorganismy a na uvolňování bioplynu ze zpracovávaného materiálu. Teplota procesu je řízena prostřednictvím teplovodního ohřevu, který je obvykle řešen jako stěnové vytápění. Z konstrukčního hlediska mohou být fermentory s kontinuálním provozem provedeny jako válcové případně obdelníkové ležaté (horizontální) nebo stojaté (vertikální) nádoby.



Obrázek 6: Kontinuálně provozované fermentory

Diskontinuálně pracující bioplynové stanice jsou tvořeny betonovými fermentory ve tvaru kvádrů umístěnými vedle sebe (obrázek 7). Zhomogenizovaná vstupní surovina je do fermentoru navedena kolovým nakladačem. Doba zdržení suroviny ve fermentoru se pohybuje obvykle v rozpětí 14-21 dnů, po této době je fermentor odvětrán, odsávaný plyn je do ovzduší vypouštěn přes biofiltr. Materiál po fermentaci je kolovým nakladačem vyvezen mimo fermentor na manipulační plochu. Obvykle 30 % materiálu je převezeno k uskladnění pro pozdější využití (hnojivo), zbylých 70 % je smícháno s 30 % čerstvé vstupní suroviny a opět navedeno kolovým nakladačem do fermentoru, proces se opakuje. K inokulaci materiálu mikroorganismy je použit uzavřený koloběh procesní tekutiny (perkolátu), který je v různých intervalech a v různé intenzitě rozstříkovan tryskami umístěnými u stropu fermentoru po povrchu zpracovávané suroviny. Perkolát protéká mezerami v surovině a odtéká potrubím umístěným v komoře fermentoru do vyhřívané nádrže perkolátu odkud je opět čerpán čerpadlem k tryskám umístěným u stropu fermentoru. Tyto fermentory nejsou obvykle vybaveny zařízením pro míchání, převrstvování materiálu, což negativně ovlivňuje rozklad suroviny. Teplota procesu je řízena prostřednictvím podlahového ohřevu fermentoru.



Obrázek 7: Diskontinuálně provozovaný fermentor



V České republice je většina bioplynových stanic provozována v kontinuálním režimu dávkování čerstvého materiálu do fermentoru. Výjimku tvoří některé bioplynové stanice zpracovávající zemědělské odpady s vysokou sušinou a biologicky rozložitelný komunální odpad.

Je-li substrát pro proces anaerobní fermentace homogenní směs dvou nebo více druhů surovin (např. kejdy a organických odpadů z potravinářského průmyslu), nazýváme proces kofermentací. Tento proces je dnes využíván u většiny provozovaných bioplynových stanic.

## **2.4 Vstupní suroviny pro bioplynové stanice**

Jako vstupní surovina může být v procesu anaerobní fermentace použita široká škála typů biomasy. Nejčastěji používané materiály můžeme zahrnout do těchto skupin:

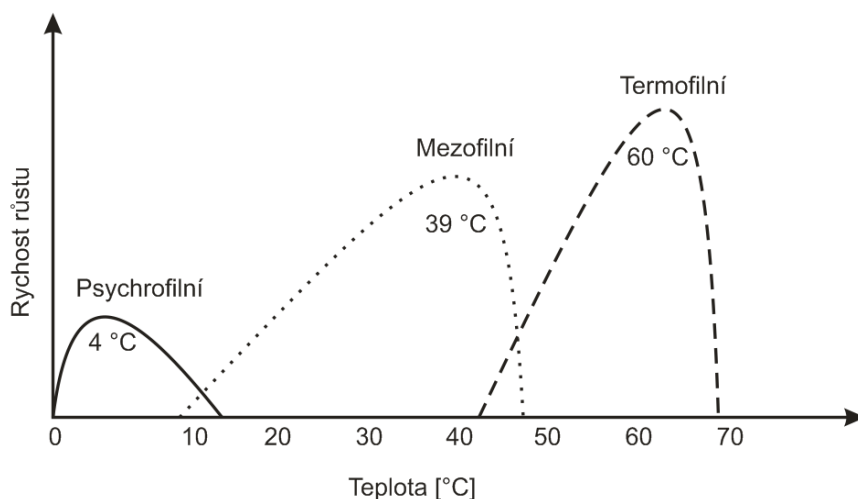
- cíleně pěstované energetické plodiny (např. kukuřice, čirok),
- hnůj a kejda,
- zemědělské odpady a vedlejší produkty,
- biologicky rozložitelné odpady z potravinářských a zemědělských odvětví (rostlinného i živočišného původu),
- biologicky rozložitelné frakce komunálního odpadu a odpadu ze stravování (rostlinného a živočišného původu),
- kaly z čistíren odpadních vod.

V posledních letech je zřejmé převaha zejména bioplynových stanic zpracovávající cíleně pěstované energetické plodiny a odpady ze zemědělství a potravinářství. Vstupní suroviny lze klasifikovat podle mnoha kritérií, původ, obsah sušiny, produkce metanu apod. Volba typu a množství vstupních surovin pro bioplynovou stanici obvykle závisí na obsahu sušiny, jakož i na obsahu cukrů, lipidů a proteinů.

## **2.5 Provozní parametry bioplynových stanic**

### **Teplota**

Optimální teplota, tj. teplota, při které mikroorganismus roste nejrychleji a energeticky nejefektivněji, je různá pro různé druhy mikroorganismů, obrázek 8.



Obrázek 8: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech

Mikroorganismy můžeme dělit do různých skupin, v závislosti na teplotě, která je pro jejich život nejpříznivější. Jedná se v zásadě o tři teplotní režimy.

- psychrofilní, v rozpětí teplot od 5 °C do 25 °C,
- mezofilní, v rozpětí teplot od 30 °C do 45 °C,
- termofilní, v rozpětí teplot od 50 °C do 60 °C.

Dnes provozované bioplynové stanice pracují obvykle při teplotách v rozmezí 30 – 45 °C nebo 50 – 60 °C. Výroba bioplynu je možná i v psychrofilním teplotním režimu, produkce a kinetika tvorby bioplynu bude však mnohem nižší a ekonomicky nezajímavá. V případě vysokých teplot jsou známy příklady metanogenních archea, které jsou schopny pracovat i při teplotách 110 °C. Stabilní bioplynové technologie provozované v praxi však nepřesahují teplotní hranici 60 – 70 °C. Při teplotách nad 60 °C je činnost metanogenních archea snížena natolik, že nejsou schopny zpracovávat produkty předchozích stupňů, což má za následek hromadění mastných kyselin ve fermentoru a kolaps procesu.

Vůbec nejběžněji používaným teplotním režimem v bioplynových stanicích u nás i v zahraničí je mezofilní teplotní režim. Pro bezproblémový provoz bioplynové stanice je nutné udržovat stálou teplotu ve fermentoru. Jakýkoli výrazný výkyv v teplotě ve fermentoru může způsobit kolaps systému. Bioplynové stanice provozované v termofilním režimu jsou na změny teplot náchylnější než bioplynové stanice provozované v mezofilním teplotním režimu.

### **Hodnota pH**

Po produkci bioplynu je hodnota pH zpracovávaného materiálu nejlepším indikátorem stability procesu. Různé fáze procesu výroby bioplynu požadují různé optimální hodnoty pH.

Velmi významně jsou na pH citlivé metanogenní archea. Prostředí s nižší hodnotou pH působí na metanogenní archea inhibičně, čímž dojde k negativnímu ovlivnění produkce bioplynu.

Vznik organických kyselin během acidogeneze může způsobit snížení pH pod hodnotu 5, což je limitní koncentrace pro přežití metanogenních archea a způsobit tak pokles počtu metanogenních archea. Na druhé straně nadměrný nárůst počtu metanogenních archea může vést k vyšší koncentraci amoniaku a tím zvýšení pH nad 8, což je naopak inhibiční pro acidogenezi.

Bylo prokázáno, že optimální rozpětí pH při procesu anaerobní fermentace se pohybuje v rozmezí od 6,5 do 7,5. Tento rozsah je poměrně široký, optimální hodnota pH vždy závisí na zpracovávaném materiálu a použité technologii. Hodnota pH je funkcí koncentrace těkavých mastných kyselin, hydrogenuhličitanů a alkality systému. Aby bylo možné udržet konstantní hodnoty pH, je důležité upravit vztah mezi koncentrací těkavých mastných kyselin a hydrogenuhličitanů.

#### **Zatížení fermentoru organickými látkami**

Zatížení fermentoru organickými látkami popisuje množství organického materiálu (vyjádřeno jako chemická spotřeba kyslíku nebo ztráta žíháním), které je denně přivedeno na jednotku užitečného objemu fermentoru.

Obvyklé zatížení fermentoru, který je provozován v mezofilním teplotním režimu, se pohybuje od 0,5 kg do 3 kg organické sušiny vstupního materiálu na m<sup>3</sup> objemu fermentoru a den. Maximální hranice zatížení fermentoru organickými látkami je uváděna 5 kg organické sušiny vstupního materiálu na m<sup>3</sup> objemu fermentoru a den. Vysoké zatížení fermentoru organickými látkami způsobuje zvyšování koncentrace mastných kyselin, což v dlouhodobém provozu působí inhibičně na metanogenní archea. Aby nedošlo k nadměrnému zatěžování fermentoru, je třeba zajistit rovnoměrný přísun vstupního materiálu během dne.

#### **Doba zdržení**

Doba zdržení nám udává čas, po který je elementární částice zpracovávaného materiálu v kontaktu se substrátem ve fermentoru. Dobu zdržení lze vypočítat podle následující rovnice:

$$\tau = \frac{V}{Q} [s] \quad (10.6)$$

kde:

$\tau$  - doba zdržení [s]

$V$  - objem reaktoru [m<sup>3</sup>]

$Q$  - průtok fermentorem [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

Rovnice je odvozená z průměrné doby potřebné k rozkladu organického materiálu, vyjádřená jako chemická spotřeba kyslíku (CHSK) a biochemická spotřeba kyslíku (BSK) na vstupu a výstupu materiálu do fermentoru. Obecně lze konstatovat, že delší doba zdržení materiálu ve fermentoru znamená jeho účinnější rozklad. Na druhé straně je třeba konstatovat, že množství vznikajícího bioplynu klesá s delší dobou zdržení. Optimální doba zdržení vychází z ekonomicko provozních propočtů. Doba zdržení je závislá na druhu zpracovávaného materiálu a zamýšleném použití zpracovaného materiálu po fermentaci. Dále doba zdržení materiálu v anaerobním fermentoru závisí na provozní teplotě ve fermentoru a sušíně zpracovávaného materiálu. Obecně platí, že fermentory provozované v mezofilním režimu mají delší dobu zdržení, stejně tak jako fermentory zpracovávající materiály s vysokým obsahem sušiny. Ke zkrácení doby zdržení materiálu ve fermentoru je využíváno míchání zpracovávaných materiálů. Doba zdržení také ovlivňuje skladbu mikrobiálních společenstev ve fermentoru.

### **Míchání obsahu fermentoru**

Míchání materiálu ve fermentoru významně ovlivňuje proces anaerobní fermentace a to zejména díky rovnoměrné distribuci živin a mikroorganismů ve zpracovávaném materiálu a teplotní homogenitě v celém objemu fermentoru. Mezi jednoznačné výhody míchání patří eliminace tvorby sedimentu ve fermentoru, eliminace teplotní stratifikace ve fermentoru, udržování chemické a fyzikální jednotnosti ve fermentoru, rychlé rozptýlení metabolických meziproductů vznikajících během rozkladu vstupních materiálů, rychlé rozptýlení všech toxických látek ve fermentoru (minimalizace toxicity).

Metanogenní archea rostou v symbióze s acetogenními a hydrogenními mikroorganismy, což vyžaduje přímý kontakt mezi oběma druhy, který zabezpečuje míchání. Hydrolytické a acidogenní mikroorganismy rozkládají organický materiál efektivněji díky většímu povrchu, který mají k dispozici v suspenzi, která se vytvoří v průběhu míchání materiálu ve fermentoru.

### **Poměr C:N**

Uhlík a dusík jsou základními živinami anaerobních mikroorganismů. Pro efektivní provoz bioplynové stanice by se měl poměr C:N pohybovat v optimálním rozsahu

25 - 30 : 1, neboť významně ovlivňuje růst a činnost mikroorganismů. Každý jednotlivý vstupní materiál tedy může být omezující vzhledem k jeho obsahu živin. Z tohoto pohledu se jeví jako optimální kofermentace různých vstupních materiálů, kdy je možno smíchat vstupní materiály s různými obsahy C a N za účelem dosažení požadovaného poměru C:N.

### **Obsah stopových prvků**

Zemědělské bioplynové stanice pracující s energetickými plodinami mohou za jistých podmínek čelit poklesu produkce bioplynu bez jakéhokoli zjevného důvodu. Základním vodítkem by měla být koncentrace nižších mastných kyselin. Pokud se pohybuje na úrovni 3 – 5 g·m<sup>-3</sup>, může to indikovat nedostatek nebo nedostupnost stopových prvků. Optimální provoz bioplynové stanice, respektive anaerobního procesu ve fermentoru bioplynové stanice, je závislý na dostupnosti a optimálním přísunu organické hmoty. Dalším důležitým faktorem je obsah stopových prvků, který může velmi významně ovlivňovat proces anaerobní fermentace. Potřeba železa (Fe), niklu (Ni), kobaltu (Co), molybdenu (Mo), selenu (Se) a wolframu (W) pro různé metanogenní archea (*Methanosarcina barkeri*, *Methanospirillum hungatii*, *Methanocorpusculum parvum*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *Methanobacterium wolfei*, *Methanococcus voltae*, *Methanococcus vanielli* a *Methanococcoides methylutens*) byla již potvrzena mnoha autory. Dále byly mnoha autory potvrzeny účinky stopových prvků Fe, Ni, Co, Zn, Mo a Cu na průběh anaerobní fermentace různých typů odpadů z průmyslových výroby.

#### **Bioplynové stanice pro zpracování tekutých substrátů**

Bioplynové stanice, kde jsou zpracovávány materiály s obsahem sušiny na vstupu nižším než 15 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající tekuté substráty. Tyto stanice využívají disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Tato technologie představuje v současnosti 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

#### **Bioplynové stanice pro zpracování netekutých substrátů**

Bioplynové stanice, kde je obsah sušiny vstupního materiálu vyšší než 15 %, obvykle 30 – 45 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající netekuté substráty. Tyto stanice využívají procesní tekutinu (perkolát) jako inokulum pro postřik materiálu, který je naskladněn do fermentoru. Tato technologie představuje pouhé 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

## **2.6 Bioplyn**

Primárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je bioplyn. Bioplyn můžeme považovat za celosvětově uznávaný obnovitelný zdroj energie získaný z biologicky rozložitelných materiálů. Bioplyn je považován za jednu z nejlepších alternativ k fosilním palivům. Bioplyn je bezbarvý, hořlavý plyn, který vzniká biochemickými procesy při anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných materiálů (živočišného,

rostlinného nebo průmyslového původu). Jeho majoritní složky tvoří metan 50 – 70 % objemových a oxid uhličitý 30 – 50 % objemových. Kromě majoritních složek obsahuje bioplyn také sirovodík, vodík, vodní páru, siloxany, aromatické a halogenové sloučeniny (tabulka 11). Obsah minoritních složek v bioplynu, z nichž některé můžeme považovat za rizikové, je významně ovlivněn druhem zpracovávaného vstupního materiálu. V plynu vznikajícím na skládkách odpadů byly například diagnostikovány aromatické heterocyklické sloučeniny, ketony alifatických sloučenin, terpeny, alkoholy, halogenované alifatické sloučeniny (Allen et al., 1997; Eklund et al., 1998; Shin et al., 2002). Odpad z domácností a průmyslu, který může obsahovat čisticí prostředky, pesticidy, farmaceutika, plasty, syntetické textilie, nátěrové hmoty apod., velmi negativně ovlivňuje koncentraci rizikových sloučenin v bioplynu. Naopak bioplyn vyráběný ze zemědělsky cíleně produkovaných plodin obsahuje nejmenší množství potenciálně rizikových sloučenin (Reinhart, 1993).

Tabulka 11: Složení bioplynu

Sloučenina	Chemický vzorec	Koncentrace
Metan	CH <sub>4</sub>	55 - 70 [%obj.]
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	30 - 45 [%obj.]
Dusík	N <sub>2</sub>	0 - 5 [%obj.]
Kyslík	O <sub>2</sub>	<1 [%obj.]
Uhlovodíky	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	<1 [%obj.]
Sirovodík	H <sub>2</sub> S	0 - 0,5 [%obj.]
Amoniak	NH <sub>3</sub>	0 - 0,05 [%obj.]
Vodní pára	H <sub>2</sub> O	1 - 5 [%obj.]
Siloxany	C <sub>n</sub> H <sub>2n+1</sub> SiO	0 - 50 mg·m <sup>-3</sup>

(zdroj: Reinhart, 1993, upraveno)

Základní fyzikální vlastnosti bioplynu jsou uvedeny v tabulce 12.

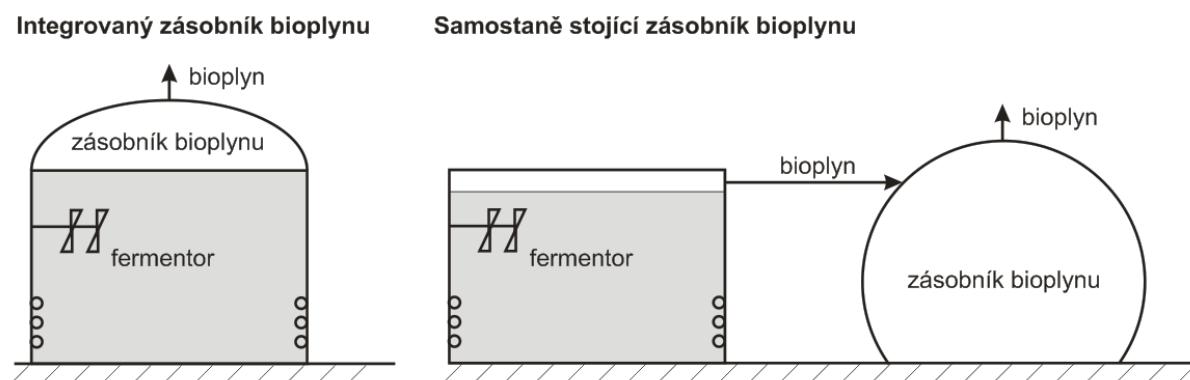
Tabulka 12: Základní fyzikální vlastnosti bioplynu a jeho hlavních složek

Parametr	jednotka	bioplyn	metan	oxid uhličitý	vodík	sirovodík
Výhřevnost	[MJ·m <sup>-3</sup> ]	18 - 25	33 - 35	-	10 - 11	11 - 12
Práh vzplanutí	[%obj.]	6 - 12	5 - 15	-	4 - 80	4 - 45
Zápalná teplota	[°C]	650-750	650-750	-	585	270
Kritický tlak	[MPa]	4,7	4,7	7,4	1,3	8,9
Kritická teplota	[°C]	-82,5	-82,5	31	-239,9	100,4
Měrná hmotnost	[kg·m <sup>-3</sup> ]	1,2	0,714	1,977	0,09	1,536

(zdroj: Hobson et al., 1981, upraveno)

## Skladování bioplynu

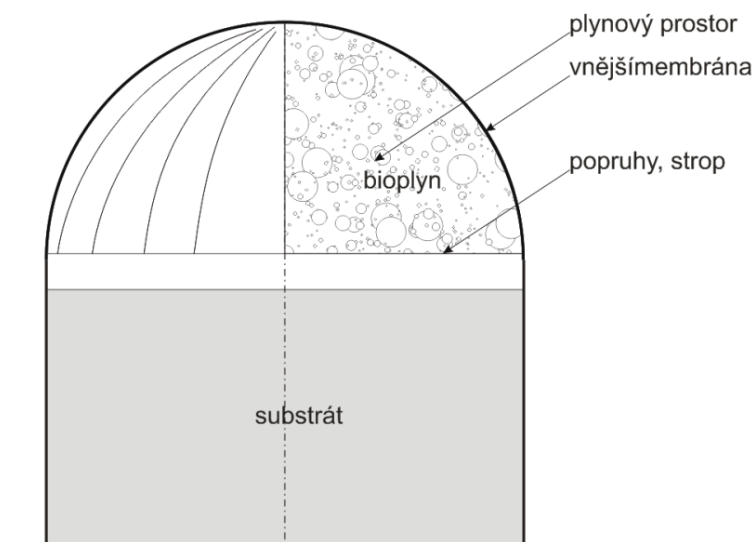
Primárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných surovin je bioplyn. Produkce a spotřeba bioplynu může být v průběhu časového úseku proměnlivá. Ke kompenzaci těchto výkyvů jsou na bioplynových stanicích instalovány zásobníky bioplynu (plynojemy), jejichž úkolem je kompenzovat výkyvy ve výrobě a spotřebě bioplynu stejně jako změny objemu v důsledku změny teploty bioplynu. K dispozici jsou dnes různé typy zásobníků bioplynu, přičemž správný výběr a dimenzování systému zásobníku bioplynu významně přispívá k účinnosti a bezpečnosti zařízení. Mezi rozhodující kritéria pro volbu zásobníku bioplynu patří pracovní tlak, skladovací objem, vnější zatížení, počet a velikost nádrží. Zásobníky bioplynu mohou být provozovány jako nízkotlaké (přetlak do 5 kPa) nebo vysokotlaké (přetlak 5-400 kPa). Zásobníky bioplynu musí být plynotěsné, odolné vůči UV záření, teplotním změnám a vlivu počasí. Zásobník bioplynu, by měl být schopen uchovat jedno až dvoudenní produkci bioplynu. V zásadě jsou dnes využívány dvě konstrukční řešení, integrovaný zásobník bioplynu umístěný na fermentoru nebo samostatně stojící zásobník bioplynu obrázek 9.



Obrázek 9: Možnosti umístění zásobníku bioplynu

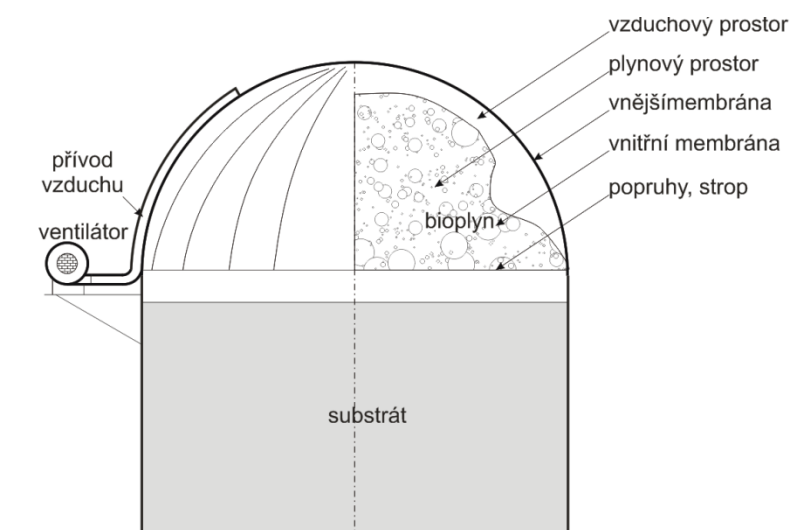
Integrovaný zásobník bioplynu je nejjednodušším a velmi rozšířeným řešením. Zásobník bioplynu je umístěn na vrcholu fermentoru. K akumulaci bioplynu slouží plynotěsná membrána vyrobená z různých druhů materiálu (EPDM kaučuková fólie, polyesterová tkanina potažená PVC), která je umístěna na vrcholu fermentoru. Použitý materiál musí být odolný vůči UV záření a musí vykazovat zvýšenou požární odolnost. Technicky jsou tyto systémy provedeny jako jedno nebo dvoumembránové.

U jednomembránového systému je vznikající bioplyn jímán v prostoru nad hladinou suroviny ve fermentoru pomocí membrány – vaku, které zároveň slouží jako kryt fermentoru, obrázek 10. Membrána je chráněná proti pádu do substrátu pomocí popruhů nebo dřevěného stropu, které jsou umístěny nad hladinou substrátu ve fermentoru. Před nadměrným přetlakem je zásobník bioplynu chráněn kapalinovou pojistkou



Obrázek 10: Integrovaný jednomembránový zásobník bioplynu

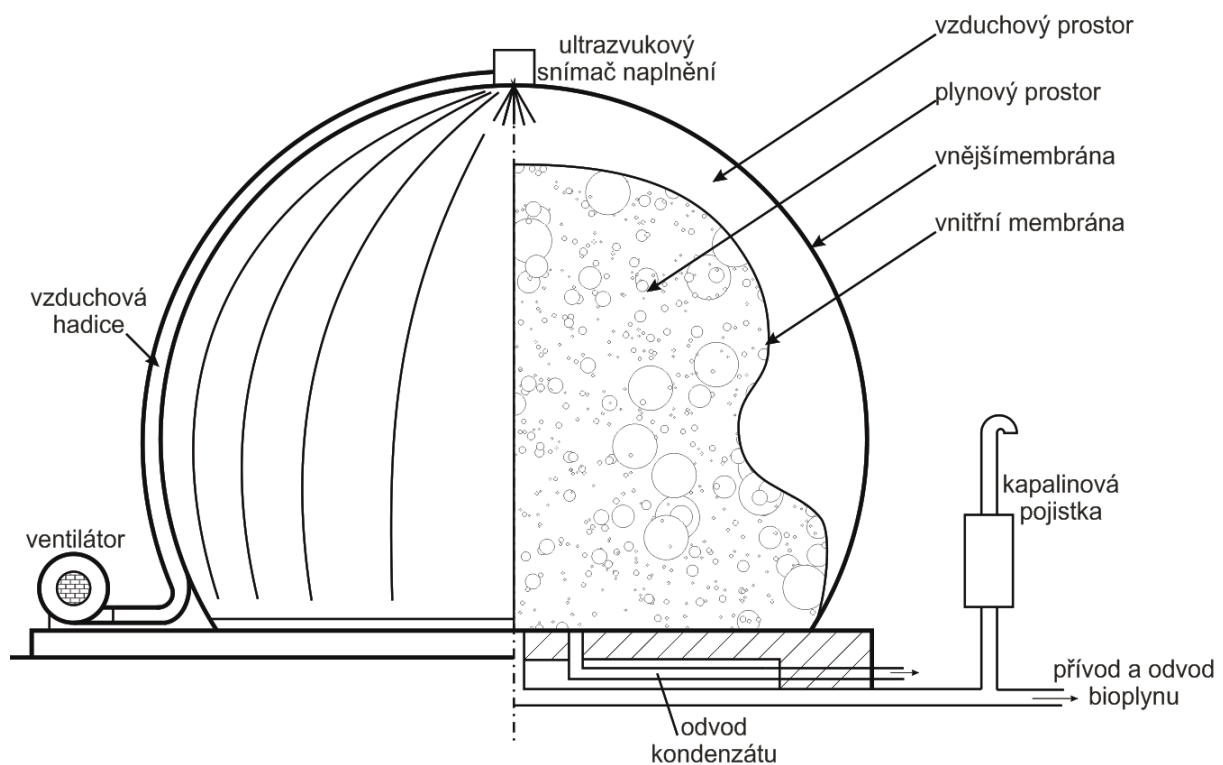
Dvoumembránový zásobník bioplynu je tvořen dvěma membránami, vnější ochranné a vnitřní, která slouží jako kryt fermentoru, obrázek 11. Tlak bioplynu v zásobníku je regulován pomocí vzduchu, který je vhánán mezi membrány vzduchovým ventilátorem. Vzduch vháněný mezi membrány plní dvě funkce, udržuje přetlak bioplynu a zároveň udržuje neměnný tvar vnější membrány. Neměnný tvar membrány významně přispívá ke snížení komplikací v případě nepříznivých povětrnostních podmínek (sníh a vítr). Vnitřní membrána je chráněná proti pádu do substrátu pomocí nosných pásů, které jsou umístěny nad hladinou substrátu ve fermentoru. Měření hladiny naplnění zásobníku bioplynu je zabezpečeno ultrazvukovým snímačem, který je umístěn na vrcholu vzduchového prostoru zásobníku bioplynu. Před nadměrným přetlakem je plynojem chráněn kapalinovou pojistkou.



Obrázek 11: Integrovaný dvoumembránový zásobník bioplynu



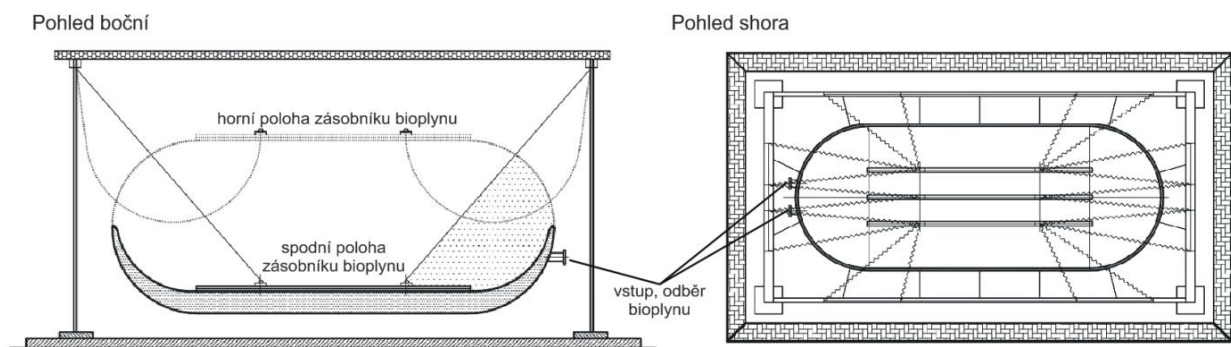
Samostatně stojící kulové zásobníky bioplynu jsou tvořeny vnější, vnitřní a podlahovou membránou. Membrány jsou upevněny k železobetonové základové desce pomocí kotevního prstence. Podlahová membrána utěsňuje plynový prostor vůči železobetonovému základu. Vnější membrána má tvar kulového vrchlíku a je napínána přetlakem vzduchu z podpůrného ventilátoru. Pohyblivá vnitřní membrána vytváří s podlahovou membránou proměnný plynový prostor a společně s napnutou vnější membránou tlakový regulační prostor. Podpůrný ventilátor, připojený vzduchovou hadicí k vnější membráně, vytváří tlakem vzduchu na vnitřní membránu potřebný přetlak bioplynu. Před nadměrným přetlakem je zásobník bioplynu chráněn kapalinovou pojistkou. Je-li produkce plynu vyšší než spotřeba, zvětšuje se objem plynového prostoru na úkor tlakového regulačního prostoru a naopak. Přetlak v plynové soustavě je dán tlakem, který vytváří podpůrný ventilátor. Pro kontrolu naplnění zásobníku bioplynu slouží ultrazvukový snímač polohy vnitřní membrány.



Obrázek 12: Samostatně stojící kulový zásobník bioplynu

Další možností jsou samostatně stojící zásobníky bioplynu tvořeny plynotěsným vakem zhotoveným z membrány o vysoké pevnosti, která je zavěšena na ocelové konstrukci, obrázek 12. V čelní stěně vaku jsou připojena potrubí pro přívod a odvod bioplynu. V nejnižším místě vaku je vývod kondenzátu. Na horní části vaku jsou umístěna vhodná závaží napomáhající jeho vyprazdňování. Pro ochranu plynového prostoru před nepřipustným přetlakem, musí být na

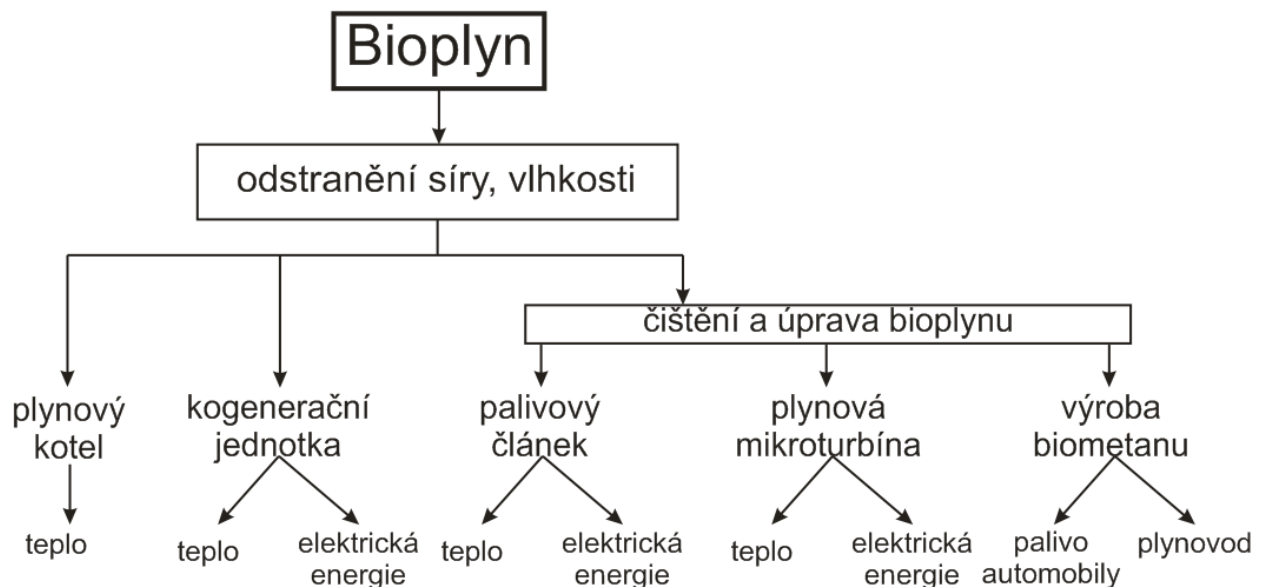
přívodním potrubím umístěna kapalinová pojistka. Vakový plynem se umísťuje do přístřešku, který ho chrání před povětrností a mechanickým poškozením. Membrána zásobníku bioplynu je zhotovena z vysoce kvalitní polyesterové tkaniny povrstvené PVC.



Obrázek 13: Samostatně stojící zásobník bioplynu, vak

### Využití bioplynu

Způsoby využití bioplynu je možno znázornit na následujícím obrázku 12.



Obrázek 14: Způsoby využití bioplynu, (zdroj: Reinhart, 1993, upraveno)

### Přímé využití plynu s využitím tepelné energie

Nejjednodušším způsobem využití bioplynu je přímé spalování bioplynu v kotlích. K produkci tepelné energie lze bioplyn spalovat buď přímo na místě jeho vzniku, nebo může být přepravován potrubím ke koncovým uživatelům. Pro účely výroby tepelné energie není nutné bioplyn nijak upravovat, aby dosáhl emisních limitů srovnatelných s jinými podobnými palivy. Nicméně, z bioplynu musí být odstraněna vodní pára a musí být komprimován.

## **Kombinovaná výroba tepelné a elektrické energie**

Kombinovaná výroba tepelné a elektrické energie, kogenerace, je standardním způsobem využití bioplynu vyprodukovaného na bioplynových stanicích. Tato technologie je považována za velmi efektivní využití energie vázané v bioplynu, s dosahovanou účinností kogeneračních jednotek často přesahují 90 %. Bioplyn je nutno pře konverzí v kogenerační jednotce zbavit tuhých částic a vlhkosti, to zejména z důvodu, že většina kogeneračních jednotek má výrobcem stanoveny maximální limity pro obsah sirovodíku, halogenovaných uhlovodíků a dalších příměsí v použitém bioplynu.

Mezi nejčastější uspořádání kogeneračních jednotek patří spojení čtyřdobého spalovacího motoru s generátorem. Generátory pracují obvykle s konstantními otáčkami 1500 otáček za minutu, kvůli souladu s frekvencí v elektrické přenosové soustavě. Čtyřdobé spalovací motory mohou pracovat s Ottovým cyklem (zážehový motor), Dieslovým cyklem (vznětový motor). Oba, zmíněné motory pracují bez přístřiku pomocného paliva (zapalovacího oleje), zásadní rozdíl mezi těmito motory vychází z jejich principu a je zejména ve velikosti komprese. Dalšími technologickými celky používanými k využití energie získané z bioplynu jsou spalovací motory s přístřikem pomocného paliva, mikro plynové turbíny, Stirlingův motor a palivové články.

Elektrická energie vyrobená transformací energie vázané v bioplynu může být použita jako procesní pro elektrická zařízení instalovaná na bioplynové stanici, jako jsou čerpadla, řídicí systémy a míchací zařízení. V mnoha zemích se zavedenými výkupními cenami pro elektřinu z obnovitelných zdrojů je tato energie prodávána do rozvodné sítě.

Důležitou podmínkou pro energetickou a ekonomickou efektivnost bioplynové stanice je využití vyrobené tepelné energie. Část tepla je spotřebována pro ohřev fermentoru, nicméně přibližně 2/3 vyrobené tepelné energie mohou být využity pro externí potřeby. I proto je dnes kladen obrovský důraz a dochází k úpravám legislativy, která by měla podpořit využití tepelné energie produkované při konverzi bioplynu v kogeneračních jednotkách.

### **Plynové spalovací motory**

Tyto motory pracující na principu Ottova cyklu a byly vyvinuty speciálně pro konverzi bioplynu. Tyto motory jsou vybaveny zapalovacími svíčkami a jsou provozovány s přebytkem vzduchu, aby byly minimalizovány emise oxidu uhelnatého. To vede ke snížení spotřeby bioplynu a snížení výkonu motoru, což bývá kompenzováno pomocí turbodmychadel umístěvaných do spalinových cest. Tyto motory jsou schopny spalovat bioplyn s minimálním obsahem metanu 45 %. Plynové motory lze provozovat na bioplyn nebo zemní plyn, čehož bývá někdy využíváno při náběhu bioplynové stanice, kdy se teplo používá

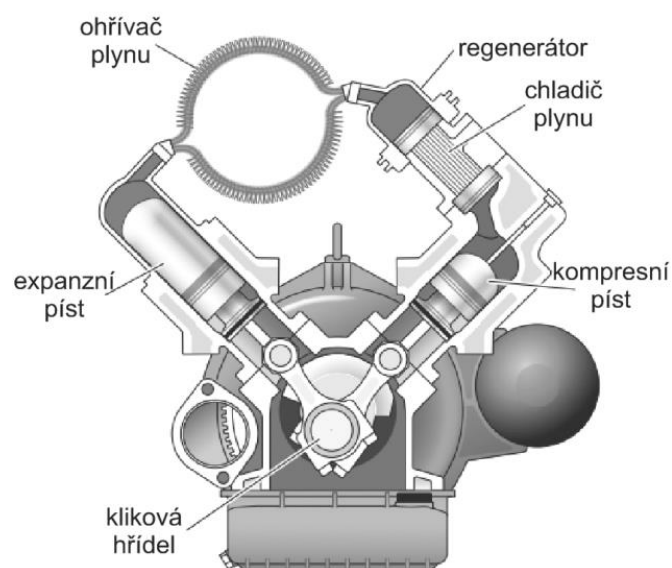
k ohřevu fermentorů. Elektrická účinnost těchto motorů se pohybuje v rozmezí 40-45 % a tepelná účinnost v rozmezí 35-38 %.

### **Plynové spalovací motory s přístřikem pomocného paliva**

Tyto motory pracující s Diesellovým cyklem (vznětové) běžně používané v užitkových vozidlech bývají používány pro konverzi bioplynu. Bioplyn je mísen se vzduchem a tato směs je následně vstřikována do spalovací komory, kde je zapálena pomocným palivem (olejem). Tyto motory jsou provozovány s vysokým přebytkem vzduchu, v případě přerušení dodávky bioplynu mohou tyto motory pracovat bez jakéhokoli problému s topným olejem nebo naftou. Tyto motory dosahují podobné účinnosti jako plynové spalovací motory.

### **Stirlingův motor**

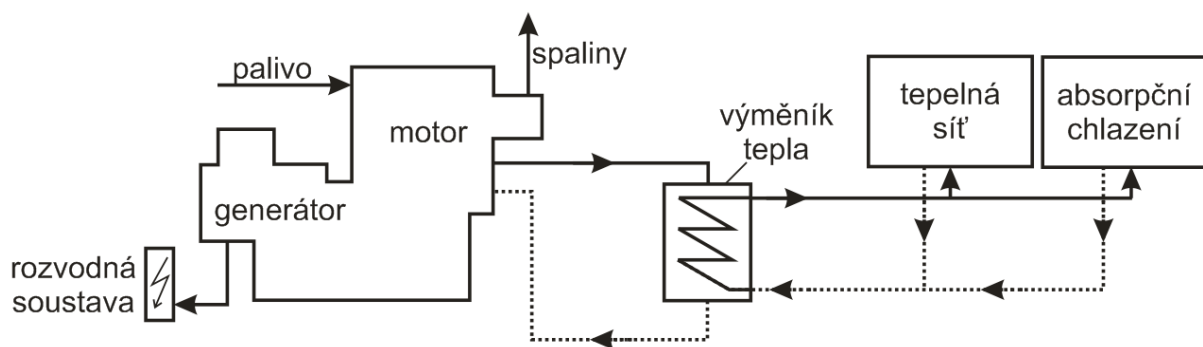
Stirlingův motor, obr. 14, pracuje bez vnitřního spalování, jeho princip je založen na základních principech termomechaniky. Pracovní plyn, uzavřený ve Stirlingově motoru je střídavě ohříván a ochlazován, což má za následek změny jeho teploty a objemu. Po zahřátí ohříváčem plynu se pracovní plyn rozpíná a tlačí na píst v expanzním válci. Rozpínající se horký plyn poté proudí přes regenerátor a chladič, kde regenerátor uchovává tepelnou energii před ochlazením. Kompresní píst tlačí ochlazený pracovní plyn zpět do horké oblasti, kde je plyn znovu ohříván, rozpíná se a začíná nový cyklus. Teplo potřebné pro provoz motoru může být generováno z různých zdrojů, jako je například plynový kotel spalující bioplyn, což umožňuje spalovat bioplyn s nižším obsahem metanu. Elektrická účinnost Stirlingova motoru se pohybuje v rozmezí 24-28 % a tepelná účinnost v rozmezí 38-40 %.



Obrázek 15: Stirlingův motor

## Trigenerace

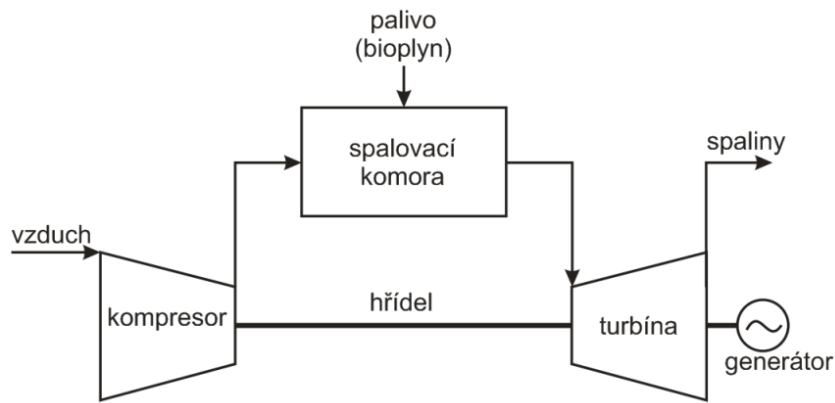
Trigenerace je forma výroby energie (elektrické a tepelné), která se stává běžnou v mnoha zemích situovaných v teplejších klimatických pásmech. V těchto zemích je mimo potřeby elektrické energie poptávka po tepelné energii, v zimním období pro vytápění, naopak v letním období pro chlazení. Trigenerační systém může produkovat současně tepelnou energii (pro vytápění i chlazení) a elektrickou energii v závislosti na aktuálních potřebách. Technologicky jde o spojení kogenerační technologie s absorpční chladicí jednotkou. Toto spojení je pro obě zařízení vysoce nezávislé a fyzické propojení je realizováno pouze v místech tepelných výměníků napojením proudů médií z kogenerační technologie a absorpční jednotky. Z pohledu provozu kogenerační technologie je toto řešení výhodné, neboť absorpční oběh využívá tepelnou energii produkovanou kogeneračním zdrojem v letních měsících, čímž je možno dosáhnout vyššího ročního využití kogenerační jednotky.



Obrázek 16: Schéma trigenerační jednotky

## Mikroturbíny

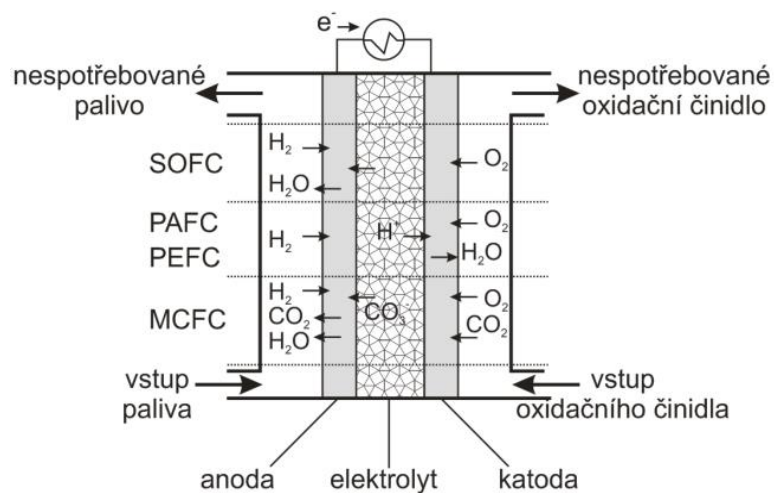
Princip funkce mikroturbíny (obrázek 16) vychází z otevřeného cyklu plynové turbíny (Braytonův cyklus), u kterého jsou modifikovány některé provozní parametry. V tomto cyklu je vzduch stlačený kompresorem, vháněn do spalovací komory, kde získává energii z paliva (bioplynu), tím dochází ke zvýšení jeho teploty. Horké plyny vstupují do turbíny a expanzí plynu (spalin) v turbíně dochází k zisku výkonu na hřídeli. Část výkonu turbíny je použita k pohonu kompresoru, který stlačuje vstupující médium (vzduch), zbylá energie je určena k pohonu elektrického generátoru. Elektrický instalovaný výkon se pohybuje obvykle pod 300 kWe. Otáčky hřídele dosahují rozmezí 90 000 - 120 000 za minutu. Elektrická účinnost mikroturbín se pohybuje v rozmezí 15-30 % a tepelná účinnost v rozmezí 40-55 %. Vyšší účinnosti dosahují mikroturbíny s rekuperací tepelné energie, tedy s předehřevem vstupujícího vzduchu.



Obrázek 17: Schéma funkce mikroturbíny

### Palivové články

Palivové články jsou elektrochemická zařízení, která přeměňují chemickou energii reakce přímo na energii elektrickou. Základní fyzikální struktura palivových článků je tvořena vrstvou elektrolytu, která je v kontaktu s porézní anodou a katodou na obou stranách (obrázek 17). V typickém palivovém článku, jsou plynná paliva (bioplyn) kontinuálně přiváděna k anodě, oxidační činidlo (vzduch, kyslík) je přiváděn kontinuálně ke katodě.



Obrázek 18: Schéma funkce palivového článku

Existují různé druhy palivových vhodné pro zpracování bioplynu, názvy těchto palivových článků jsou odvozeny podle použitého elektrolytu. Volba typu palivového článku závisí na použitém palivu a způsobu využití tepelná energie.

### Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou

Z anglického názvu *Polymer-Electrolyte-Membrane fuel cell* (PEMFC). Tento palivový článek můžeme označit jako nízkoteplotní. Základní článek se skládá z hydratované

protonově vodivé membrány (elektrolytu), jako je například perfluorovaný polymer kyseliny sulfonové, vložený mezi dvě porézní elektrody impregnované platinou. Typ použitého elektrolytu má rozhodujícím vliv na životnost membrány, která je velmi citlivá na nečistoty v palivu, včetně oxidu uhličitého. Z tohoto důvodu, musí být bioplyn před použitím v těchto palivových článcích čištěn. Druhá strana elektrod je vodou nesmáčivá, což je zajištěno vrstvou vhodné látky, např. teflonu. V PEMFC není voda produkována ve formě páry, ale jako kapalina. Důležitým požadavkem těchto typů článků je zajistit vysoký obsah vody v elektrolytu z důvodu iontové vodivosti. Iontová vodivost elektrolytu je vyšší, když je membrána plně nasycena, což znamená nižší elektrický odpor a vyšší účinnost. Provozovat PEMFC při teplotách přesahujících 100°C je možné pouze při vyšších tlacích, což je dáno požadavkem na kapalný stav vody, zároveň tím však dochází ke snížení životnosti článku. Elektrická účinnost PEMFC se pohybuje v rozmezí 45-50 %.

#### **Palivové články s kyselinou fosforečnou**

Z anglického názvu *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC). Tento palivový článek můžeme označit jako středněteplotní. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 160 - 220 °C a jako elektrolyt je použita koncentrovaná kyselina fosforečná ( $H_3PO_4$ ), při nižších teplotách ztrácí kyselina fosforečná iontovou vodivost a tuhne v krystalické podobě. Teplota těchto článků proto nesmí klesnout pod 45 °C. Elektrody jsou tvořeny grafitem s příměsí platiny. Ve srovnání s jinými palivovými články dosahují nižší elektrické účinnosti 40-45 %, výhodou je však menší citlivost na přítomnost oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého v palivu, kterým je vodík vyráběný z uhlíkatých paliv (zemní plyn, bioplyn). U PAFC musí být zajištěn odvod tepla. Chladivo, které může být buď kapalné (voda) nebo plynné (vzduch), je vedeno chladicími kanály umístěnými v článku. Tyto palivové články jsou dosud jediným komerčně využívaným typem palivových článků.

#### **Palivové články s uhličitanovou taveninou**

Z anglického názvu *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC). Tento palivový článek můžeme označit jako vysokoteplotní. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 600 - 700 °C. Jako elektrolyt se používá roztavená směs alkalických uhličitanů. Zpravidla se jedná o směs uhličitanů lithia, draslíku a sodíku, která je umístěna v tuhé porézní keramické matici na bázi  $Li_2OAl_2O_3$ . Při pracovní teplotě článku tvoří směs uhličitanů vysoce vodivou taveninu, ve které je uhličitanovým aniontem  $CO_3^{2-}$  umožněna iontová vodivost. Anoda bývá tvořena slitinami niklu (obvykle s Cr nebo Al) a katoda jeho oxidy (NiO s příměsí lithia). Výhodou tohoto typu palivového článku je rychlá kinetika elektrodových reakcí a vzhledem k vysoké teplotě i možnost přímé konverze palivy (zemní plynu, bioplynu) či jiných druhů uhlíkatých paliv.

Dále není tento typ palivových článků citlivý na obsah oxid uhličitý, je možno použít bioplyn s obsahem CO<sub>2</sub> až 40%. Účinnost PEMFC se pohybuje v rozmezí 50 - 55 %.

### **Palivové články s pevným elektrolytem**

Z anglického názvu *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) je dalším typem vysokoteplotního palivový článek. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 750 - 1000 °C. Jako elektrolyt je použit iontově vodivý keramický materiál. Zpravidla se jedná o oxid zirkoničitý ZrO<sub>2</sub> stabilizovaný oxidy yttria Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ten se v rozsahu pracovních teplot článku stává vodivým pro ionty kyslíku, kterým umožňuje transport od katody k anodě. Iontová vodivost je při teplotě kolem 1000 °C srovnatelná s vodivostí kapalných elektrolytů. Jako materiál pro anody se používají směsné keramicko-kovové sintrované materiály na bázi Ni, které se zpravidla stabilizují přidávkou ZrO<sub>2</sub>. Jako katodové materiály se zpravidla rovněž používají vysoce porézní struktury na bázi LaMnO<sub>3</sub> obohacené stronciem. Jako palivo je možné používat H<sub>2</sub>, CO nebo produkty katalytického reformování uhlíkatých paliv (zemního plynu, bioplynu). Elektrická účinnost SOFC se pohybuje v rozmezí 55-60 %.

### **Hořák zbytkového plynu**

Mohou nastat situace, kdy máme k dispozici bioplyn, který není možno využít pro výrobu energie. To se může stát v důsledku mimořádných situací jako je třeba porucha nebo servis kogenerační jednotky. V takových případech obvykle není možné najít náhradní řešení pro využití bioplynu anebo jsou tato řešení ekonomicky nevýhodná. Vypouštění bioplynu do atmosféry není s ohledem na složení bioplynu vhodným řešením, navíc se provozovatel bioplynové stanice vystavuje riziku sankcí ze strany kontrolních orgánů. Skladování bioplynu v plynojemu bez jeho spotřeby je možné pouze krátkodobě, v řádech hodin. Z tohoto důvodu, bývají bioplynové stanice, které nejsou osazeny více spotřebiči bioplynu (kotle, kogenerační jednotky, mikroturbíny, atd.) vybaveny hořákem zbytkového plynu. Spalování bioplynu je regulováno s ohledem na emisní standardy.

### **Úprava bioplynu**

Bioplyn může být distribuován prostřednictvím stávajících plynovodů pro přepravu zemního plynu a použit pro stejné účely jako zemní plyn nebo může být komprimován a použit jako palivo pro vozidla. Před distribucí do stávajících plynovodů nebo před použitím bioplynu jako paliva v automobilech musí být zbaven příměsí, zejména vodní páry, oxidu uhličitýho, sirovodíku, kyslíku, dusíku, vyšších uhlovodíků, halogenderivátů uhlovodíků a křemíku resp. organokřemičitých sloučenin. Obsah metanu v bioplynu lze zvýšit z obvyklých 50-75 % na více než 95 %. Takovýto plyn bývá nazýván jako biometan. Pro odstranění nečistot z bioplynu mohou být použity různé technologie. Odstranění oxidu uhličitýho se provádí tak,



aby bylo dosaženo požadovaného Wobbého indexu biometanu. Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR uvádí tabulka 13.

Tabulka 13: Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR

Parametr	Hodnota
Obsah metanu	min. 95,0 % mol.
Obsah vody	max. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}^{1)}$
Obsah kyslíku	max. 0,5 % mol.
Obsah oxidu uhličitého	max. 5,0 % mol.
Obsah dusíku	max. 2,0 % mol.
Obsah vodíku	max. 0,2 % mol.
Celkový obsah síry (bez odorantů)	max. $30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah merkaptanové síry (bez odorantů)	max. $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah sulfanu (bez odorantů)	max. $7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah amoniaku	nepřítomen <sup>3)</sup>
Halogenované sloučeniny	max. $1,5\text{ mg (Cl+F) v m}^{3\ 2)}$
Organické sloučeniny křemíku	max. $6\text{ mg (Si) v m}^{3\ 2)}$
Mlha, prach, kondenzáty	nepřítomny <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> vyjádřený jako teplota rosného bodu vody při předávacím tlaku, předávacím tlakem se rozumí minimální požadovaný tlak v místě napojení výrobního plynu na plynárenskou soustavu, který je dohodnutý ve smlouvě o připojení (musí být specifikováno, zda se jedná o přetlak, nebo absolutní tlak).

<sup>2)</sup> Referenční podmínky  $T_v = 288,15\text{ K}$ ,  $p_v = 101,325\text{ kPa}$ .

<sup>3)</sup> Pod pojmem nepřítomen/nepřítomny se rozumí odstranění nečistot do té míry, aby byl zabezpečen bezproblémový transport plynu v distribuční soustavě a bezproblémový provoz plynových spotřebičů a zařízení.

### Metody úpravy bioplynu

Úprava bioplynu představuje proces odstranění nežádoucích příměsí z bioplynu. Za hlavní nežádoucí příměsi jsou považovány oxid uhličitý, sirovodík a voda. Tyto složky jsou z bioplynu odstraňovány za účelem zvýšení podílu energeticky hodnotného metanu, jehož zastoupení se následně pohybuje kolem 96 % obj. V současné technické praxi je známa celá řada technologií umožňující odstranění nežádoucích příměsí z bioplynu. Jednotlivé technologie se liší v principu separace, komplexnosti (některé odstraňují jen některé nežádoucí složky v bioplynu), velikosti zařízení a provozními náklady. Technologie se můžou

kombinovat pro dosažení lepších výsledků čistoty biometanu. Metody čištění bioplynu lze rozdělit do čtyř hlavních skupin podle typu separace.

a) *Adsorpce* - metoda střídání tlaků

b) *Absorpce*

- fyzikální, tlaková vodní vypírka

- chemická vypírka

- nízkotlaká absorpce

c) *Membránová separace*

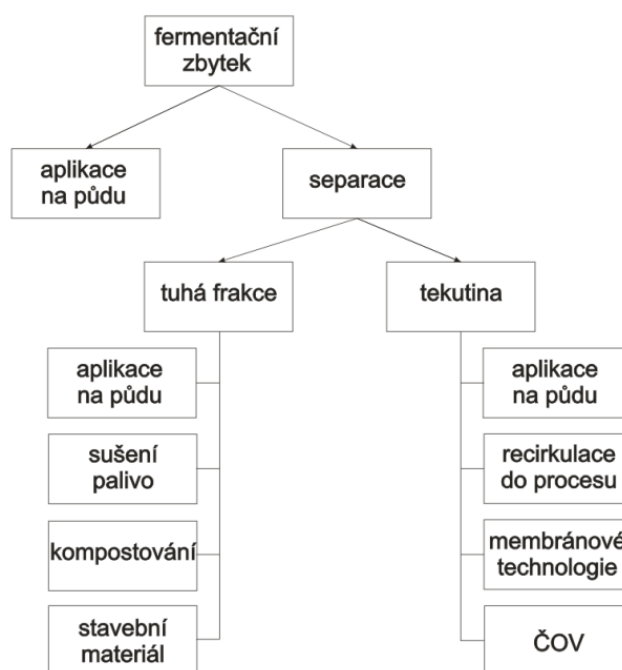
d) *Nízkoteplotní (kryogenní) rektifikace*, vymrazování CO<sub>2</sub>.

Největšího uplatnění v reálném provozu doposud doznaly s jistými modifikacemi v zásadě dvě technologie, proces tlakové adsorpce a membránová separace.

## **2.7 Fermentační zbytek**

Sekundárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je fermentační zbytek. Fermentační zbytek, pokud splňuje podmínky pro aplikaci na zemědělskou půdu, bývá velmi často aplikován na pozemky jako hnojivo. Pokud fermentační zbytek nesplňuje požadavky legislativy, může být používán dále jako vstupní materiál v kompostárnách, rekultivační materiál mimo zemědělskou a lesní půdu nebo po vysušení jako palivo. Kvalita a nutriční obsah fermentačního zbytku jsou ovlivněny několika faktory, kromě druhu zpracovávaných vstupních materiálů se jedná o způsob předúpravy vstupních materiálů, procesní podmínky (provozní teplota ve fermentoru, doba zdržení, obsah sušiny, apod.), způsob a doba skladování. Kapalný fermentační zbytek obsahuje obvykle 5–12 % celkové sušiny, netekutý fermentační zbytek potom 33–40 % celkové sušiny (Marcato et al., 2008). Fermentační zbytek obsahuje vysoké koncentrace celkového dusíku, z čehož 60–80 % představuje dusík amoniakální, dále pak fosfor a draslík, což má bezesporu kladný vliv při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu. Obsah organické hmoty a organického uhlíku ve fermentačním zbytku je snížen o podíl snadno odbouratelných sloučenin uhlíku, které jsou transformovány biochemickými procesy na bioplyn v průběhu anaerobní fermentace. Hodnota pH fermentačního zbytku je obvykle uváděna v rozpětí 7,5–8,3. Obvyklá hodnota rozkladu organické hmoty v průběhu anaerobní fermentace se pohybuje mezi 12–53 %. Obsah snadno rozložitelných organických látek závisí zejména na způsobu provozu bioplynové stanice. Čím delší je doba zdržení substrátu v bioplynové stanici, tím méně snadno rozložitelných organických látek bude obsaženo ve fermentačním zbytku. Přítomnost stopových prvků a těžkých kovů může na druhé straně zamezit používání

fermentačního zbytku jako hnojiva na zemědělské půdy. Jedná se zejména o případy, kdy jsou zpracovávány v bioplynových stanicích materiály s vysokými koncentracemi těchto prvků, případně o bioplynové stanice, které používají speciální směsi stopových prvků. Potom může být obsah stopových prvků a těžkých kovů vyšší ve srovnání s minerálními hnojivy. Způsob nakládání s fermentačním zbytkem je ovlivněn zejména jeho výslednou kvalitou, tedy vstupy do bioplynové stanice a konkrétní situaci každá bioplynová stanice, respektive provozovatele. Možné způsoby nakládání s fermentačním zbytkem jsou uvedeny na obrázku 18.



Obrázek 19: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem.

### *Separace fermentačního zbytku*

Separace fermentačního zbytku je prováděna s cílem oddělit tekutou a pevnou část obsaženou ve zpracovávaném materiálu. Tato zařízení tedy najdou své uplatnění u bioplynových stanic, které pracují s nízkým obsahem sušiny. Dnes je nejčastěji používaný šnekový separátor. Zařízení se skládá z podávacího zásobníku, do kterého je přiváděn fermentační zbytek, který následně vstupuje do tubusu separátoru ve kterém je uložena šnekovice kolem které je válcové síto. Při posunu fermentačního zbytku tubusem dochází k odvádění vody přes perforované válcové síto. Odvodněný fermentační zbytek je dopravován k výstupu ze separátoru, který je uzavírán klapkou. Při stlačení fermentačního zbytku a překonání odporu klapky je odvodněný fermentační zbytek vytlačen z tubusu separátoru. Odseparovaná kapalina je aplikována na pozemky jako hnojivo a částečně vracena do fermentoru. Pevný

podíl je aplikován na pozemky jako hnojivo, případně využit jako stelivo, palivo, stavební materiál.

#### *Skladování fermentačního zbytku*

Fermentační zbytek je čerpán z fermentoru do skladovací nádrže, kde je skladován před tím, než je použit jako hnojivo. Skladovací nádrž pro tekutý fermentační zbytek je nejčastěji provedena jako betonová kruhová otevřená podzemní nebo nadzemní nádrž s mícháním. Objem skladovací nádrže musí být dostatečný k uskladnění fermentačního zbytku po dobu několik měsíců. Právní předpisy vyžadují navrhnout objem skladovací nádrže na tři až devíti měsíční dobu skladování s cílem zajistit optimální a hospodárné využití fermentačního zbytku jako hnojiva a vyhnout se použití v zimním období. Tuhý fermentační zbytek musí být skladován ve stavbách zabezpečených stejným způsobem, jako stavby pro skladování tuhých statkových hnojiv s vyloučením přítoku povrchových nebo srážkových vod. Součástí skladu na tuhý fermentační zbytek je sběrná jímka na srážkové vody.

### **3. KOMPOSTÁRNY**

Technologie kompostování napodobuje a urychluje přeměny organických látek na základě biochemických procesů tím, že upravuje podmínky pro činnost zúčastněných organismů a bezobratlých živočichů. V této kapitole jsou shrnuty základní informace o průběhu a principu biodegradace organické hmoty kompostováním, o metodách kompostování, vhodných odpadech pro kompostování a jejich úpravě.

Kompostování by mohlo v našem životním prostředí řešit řadu důležitých problémů, z nichž některé bychom mohli zařadit až na úroveň pověstných globálních problémů lidstva. Z hlediska ekologie představuje kompostování:

- zpracování odpadů, které nevyžaduje žádnou další přídavnou energii,
- uzavření koloběhu prvků v přírodě,
- možnost doplnění nezastupitelného humusu do půdy.

Můžeme říci, že kompostování je člověkem záměrně vyvolaná a řízená intenzivní biodegradace organických odpadů. Při tomto procesu jsou organické látky postupně rozkládány do forem vhodných pro přímou aplikaci do půdy jako zdroj hmoty a energie pro růst nových rostlin. Jde o stejný proces, který spontánně probíhá se všemi organickými materiály vyskytujícími se v přírodě. Tento proces je možné využít také pro zpracování odpadů. Co se týče koloběhu prvků v přírodě, je snad význam uzavření cyklu evidentní. Člověk systematicky degraduje suroviny na odpady a tím dostává životně důležité prvky do

stále méně využitelných forem. Tím vlastně vyvolává sekundární a dnes již nemalý tok energie a hmoty, konkurující přirozeným primárním tokům. Na rozdíl od přirozených primárních toků jsou tyto sekundární toky vyvolané antropogenním faktorem zpravidla nevratné a použité prvky se obvykle nevrací zpět do životního prostředí.

Jasně to vidíme na příkladu intenzivního zemědělství. Při tomto způsobu hospodaření je půda systematicky připravována o humus, který v půdě zastává nezastupitelnou roli, kterou nemohou nahradit žádná umělá hnojiva. Optimální množství humusu v půdě je 5 %, přičemž dnes už běžně hospodaříme na půdách s 1 % humusu.

### **3.1 Proces kompostování**

Jde o aerobní proces, jehož výsledkem je zpravidla stabilizovaný kvalitní kompost, schopný dodat půdě nezastupitelný humus. Základem kompostování je biodegradace organické hmoty účinkem aerobních mikroorganismů, kombinovaná s některými dalšími reakcemi jako oxidace, hydrolýza. Zastoupení mikroorganismů není konstantní a závisí jak na složení kompostu, tak na stupni humifikace kompostovaného materiálu. Obecně však platí, že se na humifikačním procesu zúčastňují hlavně heterotrofní mikroorganismy, tj. mikroorganismy, které pro svůj růst využívají okolní prostředí jako zdroj uhlíku a kyslíku. Mikroorganismy tohoto typu odbourávají organické látky a část z nich oxiduje až na konečné produkty s nízkým obsahem energie, tj.  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Štěpením vazeb získávají mikroorganismy zdroj energie pro svůj metabolismus a zároveň zdroj biogenních prvků pro svůj růst a vývoj. Biodegradaci podléhají nejprve jednoduché organické látky jako sacharidy, organické kyseliny a bílkoviny. Degradace polysacharidů je pomalejší a začíná nejprve depolymerací. Poměrně stabilní složkou je lignin, který tvoří podstatnou část rostlinných materiálů, a to 15 - 30 %.

Účelem kompostování není úplná biodegradace všech složek. Při kompostování by biodegradace měla proběhnout jen v takovém rozsahu, aby se materiál biologicky stabilizoval. Biologicky stabilizovaným materiálem rozumíme takový materiál, který již nepodléhá prudké biodegradaci a především v něm nemohou začít patogenní procesy jako hniloba a podobně. Dobře biologicky stabilizovaný materiál již neohrožuje žádným způsobem půdu, vodu a ovzduší, nevykazuje známky fytotoxicity a je možno zapravit jej do zemědělsky využívané půdy.

Aby byl proces kompostování efektivní, je třeba zajistit dostatečné provzdušňování kompostovaného materiálu. Přívod vzduchu je základní podmínkou aerobního procesu. Při klasickém kompostování na hromadách se přívod vzduchu zajišťuje občasným převrstvením

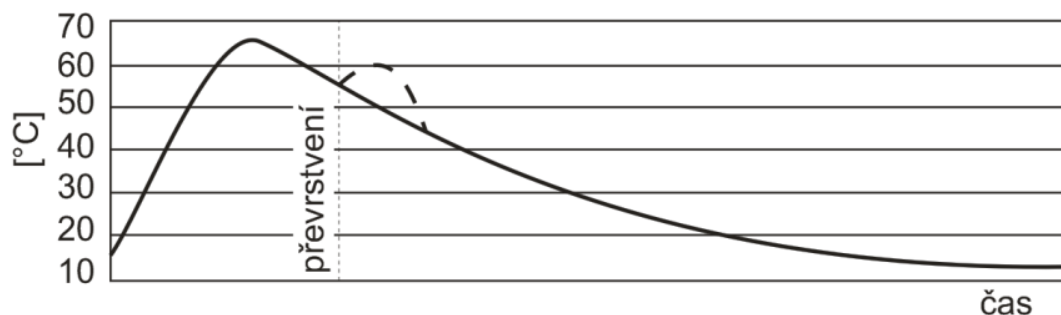
materiálu. Tento způsob se už dnes jeví jako energeticky náročný a málo účinný - proces klasického kompostování je pro zpracování větších množství vstupních surovin pomalý. Z tohoto důvodu se kompostování zefektivňuje výstavbou speciálních zařízení, která slouží především k nepřetržitému a efektivnímu provzdušňování.

### **Průběh aerobního kompostování**

Průběh kompostování je, až na malé odchylky, stejný u všech způsobů aerobního kompostování. Je tedy z hlediska probíhajících dějů lhostejné, zda kompostujeme na hromadách nebo v některých speciálních kompostovacích zařízeních - bioreaktorech (někdy též biofermentorech). Co se liší je pouze rychlost probíhajících dějů. Předpokládejme, že máme připravenou směs optimálního složení a optimální konzistence. O tom, jaké konkrétně má tato směs mít složení a konzistenci, bude rozebráno později, prozatím jen specifikujeme optimální směs jako dobře rozdrčenou, vhodně namíchanou a zhomogenizovanou směs. Přestože je tato směs rozdrčena na částice do několika milimetrů, poznáme jasně u každé částice její původ. Z této směsi založíme kompost buď volně na hromadě, nebo v některém zařízení a sledujeme, jak se směs v průběhu času mění.

Nastartování biodegradace mikroorganismy je zpravidla spontánní. Mikroorganismy jsou běžně přítomny v zakládané směsi a po vytvoření vhodných podmínek se začnou množit. Jen v ojedinělých a speciálních případech se mikroorganismy do kompostu očkují, potom hovoříme o řízeném kompostování. Množení mikroorganismů je za ideálních podmínek exponenciální. V průběhu 24 hodin vznikne  $5,62 \cdot 10^{14}$ .

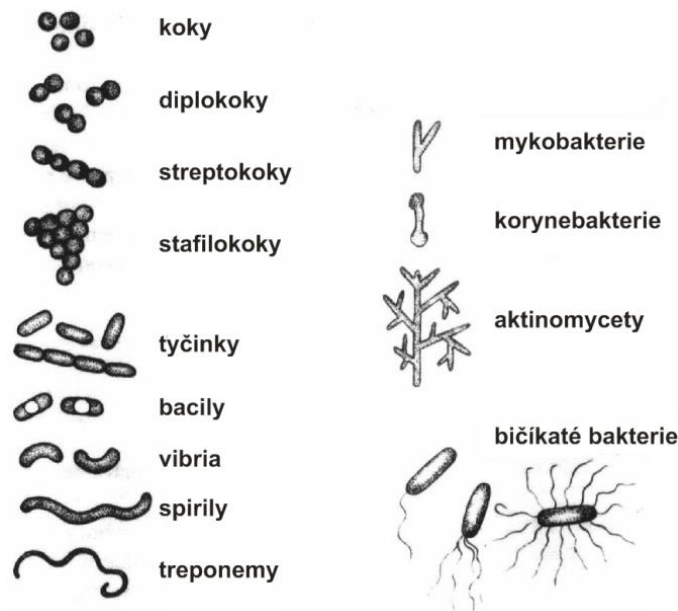
Kompostovací proces má tři základní fáze, které od sebe snadno rozeznáme. Teplota, vzhled, pach a objem substrátu, to jsou základní vlastnosti, odlišující jednotlivé fáze kompostování. Teplotní průběh kompostování je znázorněn na obrázku 19.



Obrázek 20: Teplotní průběh kompostování

*První fáze rozkladná - mineralizace*

Vyznačuje se rychlým nárůstem teploty, následovaném relativně rychlým poklesem. V jádru kompostované hmoty dosáhne teplota nejprve hodnoty přes 60 °C a po krátké prodlevě na tomto maximu začne teplota relativně rychle klesat. Tato fáze patří termofilním mikroorganismům. Na dalším obrázku 20 jsou uvedeny mikroorganismy, které se v této fázi nejčastěji v kompostu vyskytují.

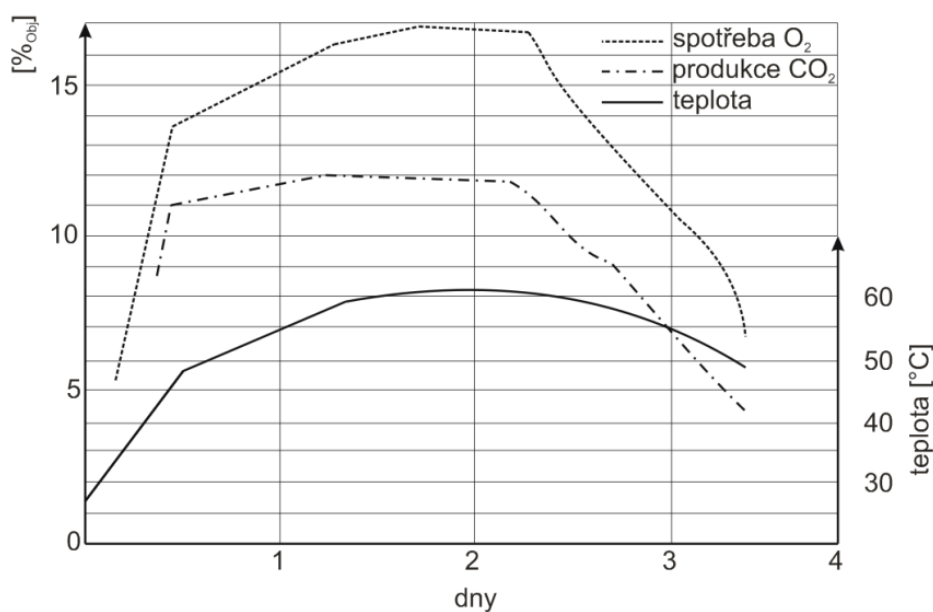


Obrázek 21: Mikroorganismy v kompostu

Tyto mikroorganismy rozkládají složité organické sloučeniny na jednodušší sloučeniny anorganického charakteru. Spolu s touto biodegradací probíhají rovněž chemické degradační reakce. Na počátku se odbourávají cukry, škroby a bílkoviny, v pozdější fázi též celulóza a další součásti dřevní hmoty. Konečné produkty rozkladu jsou voda, kysličník uhličitý a nitrátový iont  $\text{NO}_3^-$ . Při přebytku dusíku ve směsi se může dusík uvolňovat ve formě amoniaku. Proto se tato fáze také nazývá mineralizace.

Mikroorganismy berou kyslík převážně ze vzduchu, energie pak ze štěpení chemických vazeb kompostované hmoty. Na obrázku 21 jsou graficky znázorněny výsledky analýzy vzduchu, který nuceně prochází kompostovanou vrstvou. Vidíme zde značnou spotřebu kyslíku a vývin kysličníku uhličitého. Objem směsi relativně rychle klesá. Nejde přitom pouze o sedání a hutnění materiálu a o odpařování vody, ale přímo bilanční pokles celkové hmotnosti, vyplývající z produkce oxidu uhličitého a dalších plynných produktů metabolismu činnosti mikroorganismů. Celkový pokles hmotnosti je až 30 % původního množství. Mikroorganismy nejsou zavedeny na organické kyseliny. Důsledkem je, že relativní zastoupení těchto kyselin roste a dochází k poklesu pH. Vzhled směsi se prozatím příliš

nemění, pach směsi je stejný jako na počátku procesu, později můžeme cítit i amoniak i když toho by nemělo příliš mnoho unikát. Kompost v této fázi nemá vlastnosti humusu a není schopen aplikace do půdy. V některých případech může dokonce vykazovat známky fytotoxicity. Důležité je, že v této fázi dochází k hygienizaci kompostu. Teplota hubí jednak hnilobné a další patogenní bakterie, jednak likviduje klíčivost semen plevelů.



Obrázek 22: Spotřeba kyslíku a produkce oxidu uhličitého

#### *Druhá fáze - přeměnná*

Vyznačuje se pozvolným poklesem teploty ze 40 °C na 25 °C. Termofilní bakterie nahradí jiná skupina mikroorganismů a plísní. V této fázi se mohou už objevovat i nenáročný hmyz. Na spodní části obrázku 20 vidíme příklady organismů, které se v této fázi mohou v kompostu vyskytnout. Původní vzhled, struktura a pach hmoty se ztrácí. Kompost dostává hnědou barvu, jednotlivé částice se dále rozpadají. V pozdější době už ze směsi cítíme příjemnou zemitou houbovou vůni. Pokračuje další pokles hmoty a objemu, i když již podstatně pomaleji. V této fázi se odbourá dalších 10 % hmoty. Na konci 2. fáze už stěží rozeznáváme původ jednotlivých částic. Mizí fytotoxicita a výluhy kompostu nejsou hygienicky závadné. Ke konci této fáze už lze použít kompost jako hnojivo.

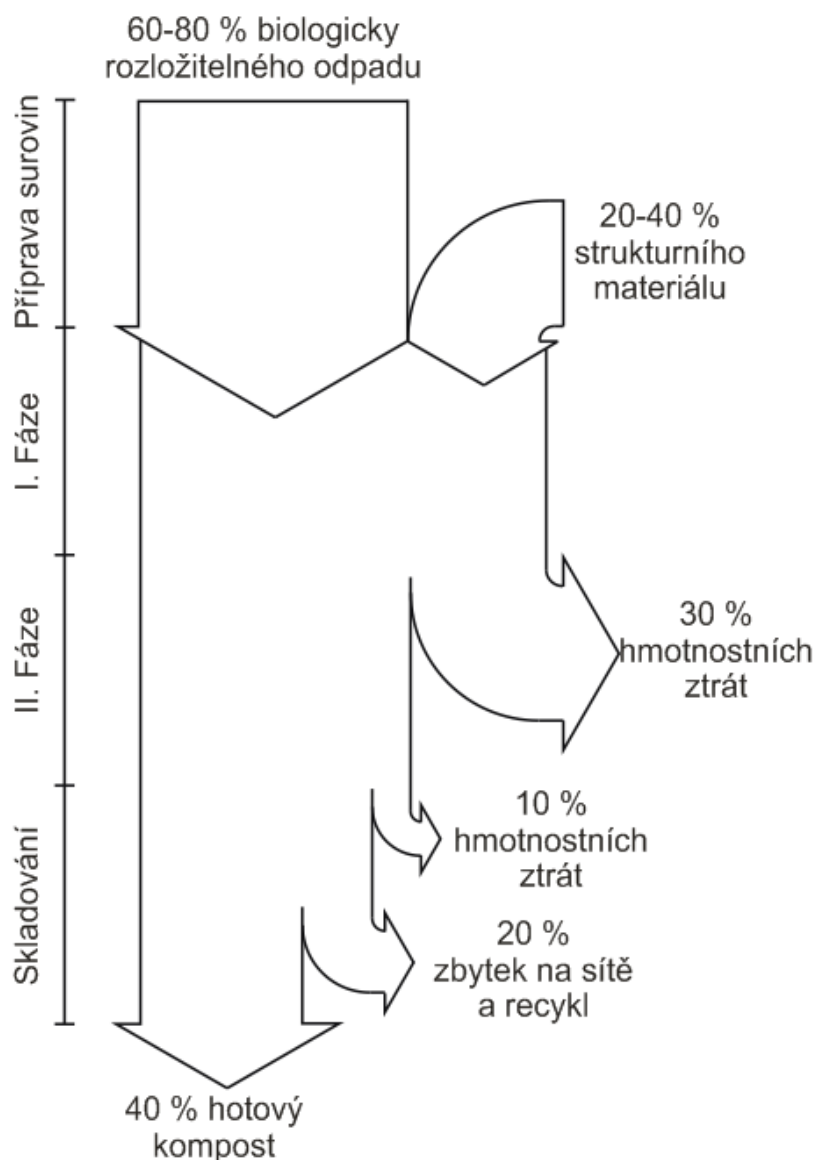
#### *Třetí fáze - dozrávání kompostu*

Teplota klesá na hodnotu teploty okolí. Kompost ovládají malí živočichové a hmyz svinky, stonožky, roztoči, žížaly (obrázek 20). Dochází k vytvoření vazeb mezi anorganickými a organickými látkami v kompostu a ke tvorbě kvalitního a stabilního humusu. V této fázi už dochází jen k nepozorovatelnému poklesu hmotnosti.



Celková bilance hmotnosti je patrná z obrázku 22. Jedná se o tak zvaný Sankeyův diagram a tento typ bilancí a hmotnostních toků je v tomto zobrazení velice názorný.

Celkový pokles hmotnosti od začátku kompostování je 50 % (vztaženo na původní hmotnost zakládané hmoty). Pokles objemu je ještě větší, protože dojde ke zhutnění materiálu. Byla-li původní sypná hmotnost zakládaného materiálu  $400-600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , je sypná hmotnost kompostu podle druhu technologie okolo  $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Obrázek 23: Hmotnostní bilance kompostování

O délce trvání jednotlivých fází kompostování rozhoduje jednak kompostovaný materiál, jednak vlastní podmínky kompostování ale i další faktory, jako třeba roční období.

Důležité je, že proběhnutím 1. fáze kompostování se materiál do určité míry biologicky stabilizuje a směs už nedonutíme k zopakování této fáze.

Konec první fáze a stabilizace kompostu je zpravidla způsobena nedostatkem dusíku a vyčerpáním snadno rozložitelných látek. Tuto fázi bychom iniciovali pouze většími zásahy do kompostu, například dodávkou dalšího dusíku nebo obnovením čerstvého povrchu kompostovaných částic například zopakovaným podrcením. To se také například děje, když kompost v závěru první fáze přeházíme. Po tomto přeházení dojde ke krátkodobému a prudkému nárůstu teploty (čárkovaná čára na obr. 19). Tento nárůst však obvykle nedosáhne původních vysokých teplot a je podstatně kratší.

Zacházení s takto stabilizovaným a hygienizovaným kompostem je mnohem snazší a bezpečnější než s kompostem čerstvě zakládaným. V některých zemích je možno takový kompost skladovat na volné a nedrenážované ploše.

### **3.2 Vhodné suroviny a odpady pro aerobní kompostování**

Kompostováním můžeme zpracovat prakticky všechny materiály, podléhající biologickému rozkladu. Jako možné příklady odpadů zpracovatelných v kompostárně můžeme uvést:

- odpady ze sklizně zeleniny, ovoce, obilí, chmele,
- seno, sláma,
- odpad z údržby zeleně,
- kaly z čistíren odpadních vod,
- potravinářské odpady,
- trus, mrva a kejda,
- kožedělné odpady, vlna, srst,
- třísky, piliny.

Nezanedbatelná je také produkce bioodpadů, které jsou součástí komunálního odpadu nebo jsou odděleně sbírány. Přesnou produkci tohoto druhu odpadu je velmi obtížné stanovit. V České republice je nejčastěji uvažováno s hodnotou, respektive produkcí biologicky rozložitelného odpadu 100 - 150 kg na osobu a rok.

### **3.3 Zásady při kompostování**

Obecně platí, že čím je směs pro kompostování pestřejší, tím je výsledný kompost kvalitnější. Kromě toho je užitečné při zakládání kompostu dodržovat některé další zásady:

#### **Stejná rychlost biodegradace**

Vhodné je mísit přednostně ty látky, jejichž rozklad probíhá stejně rychle. Vyvrálost kompostu je potom homogenní.

### **Vhodné chemické složení**

Vhodné chemické složení je nutnou podmínkou úspěšného kompostovacího procesu. V první řadě se jedná o vhodný poměr mezi organickými a anorganickými látkami. Anorganické látky neposkytují živnou půdu pro mikrofloru a jsou z tohoto hlediska balastní složkou. Při velkém přebytku anorganické složky probíhá humifikace organického podílu pomalu. Důležité je, aby organické látky obsahovaly dostatečný podíl lehkou odbouratelných látek, jako jsou cukry a bílkoviny. Jenom v tom případě se kompostování rychle a účinně rozběhne. Při rychlém rozběhu kompostování se nabourají i obtížněji degradovatelné organické látky a jejich rozpad se v dalších fázích kompostování urychlí.

Pokud substrát obsahuje převahu biologicky stabilních látek a těžko degradovatelných surovin, probíhá humifikace velmi pomalu. Příkladem je třeba kompostování dřevěných pilin. Piliny jsou vhodným přídavkem do kompostů, zvláště pro úpravu vlhkosti. Pokud by však tvořily základ substrátu, bude to s kompostováním špatné.

### **Vhodný poměr C:N**

Mikroflora potřebuje pro svůj život vedle zdroje uhlíku i zdroj dusíku, který je nutný pro syntézu bílkovin. Tyto bílkoviny tvoří jednak přímo součást buněk mikroorganismů, jednak se přímo zúčastňují metabolismu mikroorganismů jako enzymy. Pro optimální proces musí být tedy obsah dusíku v rovnováze s obsahem uhlíku.

Při nedostatku dusíku se průběh humifikace výrazně zpomaluje. Naopak přebytek dusíku vede k nadměrné mineralizaci a k úniku dusíku ve formě amoniaku. Vývin amoniaku vede ke zvyšování pH do oblastí nepříznivých pro život mikroorganismů. V důsledku toho se mohou biochemické reakce úplně zastavit. Optimální poměr mezi obsahem uhlíku a dusíku zvaný poměr C:N se pohybuje v rozmezí 40:1 až 25:1. Vhodný poměr C:N je nutné dosáhnout programovým mísením složek. Látky chudé dusíkem jsou ovoce, jehličí, sláma, kůra, papír, dřevo. Látky bohaté na dusík jsou například všechny živočišné exkrmenty, tedy všechny hnoje a močůvka. Relativně bohatá na dusík je rovněž tráva, zeleninové odpady, listí, zvířecí srst, rohovina. Jako krajní možnost dodávky dusíku je možno použít i dávky močoviny. Optimální poměr C:N finálního produktu kompostu by se měl pohybovat v rozmezí 15:1 až 10:1.

### **Obsah cizorodých látek**

Pro naše podmínky je doporučena česká technická norma ČSN 46 5735 „Průmyslové komposty“. Tato norma praví, že na výrobu kompostů se nesmí použít suroviny, které budou

mít po skončení biologického zrání charakter cizorodých látek. Jako cizorodé látky však norma udává pouze obsah těžkých kovů.

Co se týče ostatních cizorodých látek, norma uvádí pouze přípravky na ochranu rostlin a chemikálie, nemající charakter surovin. Likvidace těchto látek kompostováním je podle normy nepřipustná.

### **Vhodná granulometrie částic a struktura materiálu**

Složky kompostu je potřeba dobře podrtit a důkladně promísit. Jako příklad můžeme uvést dřevo a kůru. Jemné piliny jsou ve vhodné směsi přijatelnou složkou kompostu, která se přímo zúčastní kompostovacího procesu. Naopak hobliny prochází kompostovacím procesem bez jakékoliv výrazné směsi. Podobně je tomu se slámou a trávou.

Na druhé straně velmi jemné složky vytváří kompaktní, těžko provzdušnitelnou strukturu a brání tak spontánnímu růstu mikroorganismů. Vhodným přídavkem upravujícím konzistenci směsi je v těchto případech například drcená sláma.

### **Optimální vlhkost směsi**

Kompostovací vlhkost substrátu se pohybuje kolem 40 %. Za těchto podmínek je 70 % pórů materiálu zaplněno vodou. Nedostatek vlhkosti neumožňuje některé důležité hydrolytické reakce, ani život mikroflory. Mohou však probíhat některé chemické nežádoucí reakce. Uvolněným reakčním teplem se může materiál zahřát na takovou teplotu, že může proběhnout až pyrolýza a suchá destilace materiálu. Tyto procesy mohou způsobit až samovznícení materiálu, jak to známe z podobných případů skladování organických materiálů jako například uhlí, sena, pilin. Toto nebezpečí se ještě stupňuje u těch technologií, u kterých se do nehybné vrstvy přivádí vzduch. Pak se může stát, že při vykládání kompostu se nacházejí hnízda, kde došlo k samovznícení.

Z hlediska kvality vyráběného kompostu jsou tyto procesy nežádoucí, protože vedou k nadměrné mineralizaci kompostu na úkor jeho humifikace.

Nadbytek vlhkosti není rovněž žádoucí, protože odpařování vody odvádí formou výparného tepla značnou část energie a kompost se ochlazuje. Za takových podmínek se nerozvine činnost termofilních mikroorganismů a biologické procesy se mohou zvrhnout na kvašení.

Kromě toho se při vysokém obsahu vody může docházet k jejímu vytlačování ze spodních vrstev. Tato voda extrahuje látky ze zpracovávaných materiálů a může působit nepříjemné komplikace svým zápachem. Nicméně je možno konstatovat, že lepší je vyšší než nižší vlhkost. Vyšší vlhkost se časem volným odparem spontánně upraví a kompostovací proces začne při dosažení optimální vlhkosti, i když s určitým zpožděním. Nízká vlhkost materiálu se upravuje snadno, ale ani s vysokou vlhkostí nemusí být problémy. Vhodným přídavným

kompostovacím materiálem absorbujícím značné množství vody jsou dřevěné piliny, dřevěná kůra, sláma. Při nedostatku vhodného materiálu je možno použít i recyklu vyrobeného kompostu. Ten má vždy nižší vlhkost než připravovaný substrát.

Vhodná vlhkost se odhadne po smáčknutí hrstě kompostu v dlani. Z příliš mokrého kompostu vymáčkne vodu, suchý kompost se po zmáčknutí a rozevření dlaně rozsypá, vhodně vlhký kompost má houbovitou strukturu, vymáčkne z něj pár kapek vody a po rozevření dlaně drží pohromadě.

### **Optimální přívod vzduchu**

Kompostování je aerobní proces a organizmy, které se ho zúčastní, vyžadují pro svůj metabolismus dostatek kyslíku. Proto je dokonalé provzdušnění materiálu pro průběh kompostování velice důležité. O způsobu, jakým se provzdušňování provádí, bude pojednáno u popisu jednotlivých kompostovacích technologií.

## **3.4 Technologie kompostování**

Z technologického hlediska můžeme technologie pro kompostování rozdělit do následujících kategorií:

- a) *Kompostování na volné ploše*
  - kompostování v pásových hromadách,
  - kompostování v plošných hromadách,
- b) *intenzivní kompostování*
  - polouzavřené systémy, kompostování v boxech nebo žlabech,
  - uzavřené systémy, kompostování v bioreaktorech,
- c) *kompostování ve vacích (Ag Bag kompostování),*
- d) *vermikompostování.*

## **3.5 Kompostování na volné ploše**

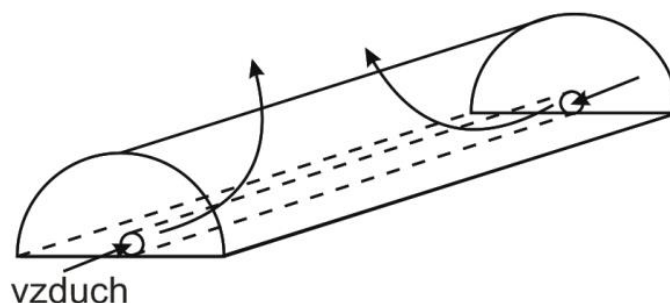
### **Pásové zakládky mechanicky provzdušňované**

Nejjednodušší a stále hojně používané je kompostování v pásových zakládkách. Při tomto způsobu se kompostovaný materiál vrství do lichoběžníkových nebo trojúhelníkových hromad, přičemž šířka zakládky bývá v rozmezí 2-6 m a výška 1,5-3 m. Provzdušňování se zajišťuje tím, že se hromada v pravidelných intervalech překopává. Běžně dostupnou a užívanou mechanizací jsou překopávače kompostu buď nesené, nebo samojízdné. Překopáváním je zajištěna homogenizace materiálu i mechanická destrukce částic, což usnadňuje chemické a biochemické pochody. Provzdušňování při překopávání je málo účinné

a v důsledku toho kompostování trvá dlouho. Tak například první fáze kompostování trvá 1-2 měsíce, druhá fáze kompostování 2-4 měsíce. Kompost je tedy nutno před aplikací do půdy nechat na hromadách alespoň rok. Nedostatečně biologicky degradované sloučeniny představují nebezpečí pro podzemní vody. Z tohoto důvodu se plochy pro kompostování musí budovat s nepropustnou vrstvou a s drenáží a zabránit tak průsaku do spodních vod.

### **Pásové zakládky s pasivním provzdušňováním**

U tohoto způsobu je vzduch do lichoběžníkové nebo trojúhelníkové hromady přiváděn perforovaným potrubím umístěným v každé zakládce (obr. 23). Tímto je eliminována potřeba překopávání kompostu. Vzduch proudí otevřenými konci potrubí materiálem uloženým do zakládky díky komínovému efektu. Komínový efekt vzniká teplotními rozdíly vzduchu v zakládce a okolního vzduchu. Výška zakládky se doporučuje v rozmezí 0,9-1,2 m. Plastové potrubí uložené na dně zakládky je opatřeno řadami otvorů o průměru do 2 cm. Otvory jsou orientovány směrem dolů, aby se minimalizovalo ucpávání a byl umožněn odvod kondenzátu. Před návozem surovin je kolem perforovaného potrubí nebo nad výusti kanálů uložen porézní materiál (štěpka, sláma) a následně kompostovaná surovina. Vzhledem ke skutečnosti, že neprobíhá překopávání kompostovaných surovin, je nutné homogenizovat tyto suroviny při jejich uložení do zakládky.

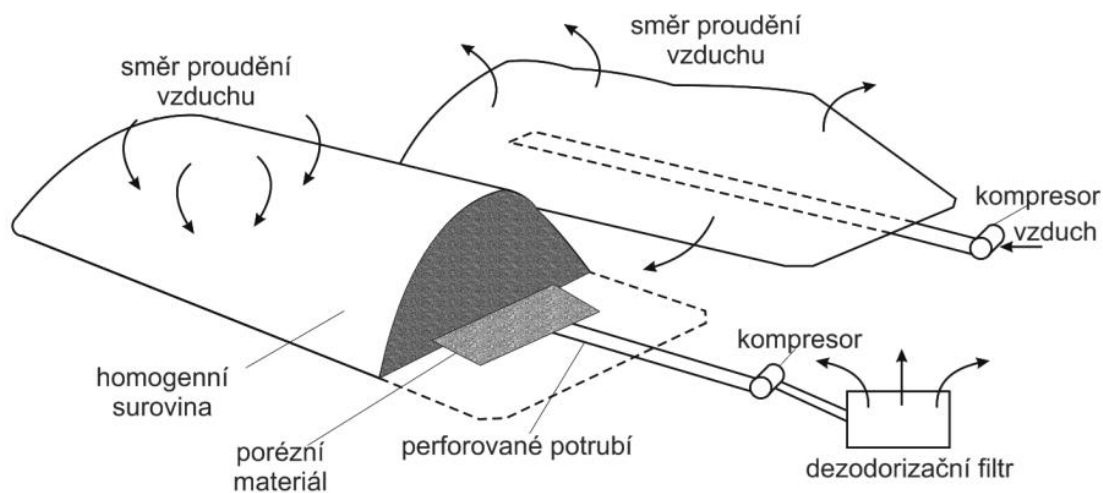


Obrázek 24: Schema funkce pásové zakládky s pasivním provzdušňováním

### **Pásové zakládky s aktivním provzdušňováním**

U tohoto způsobu je vzduch do lichoběžníkové nebo trojúhelníkové hromady nuceně přiváděn perforovaným potrubím umístěným v každé zakládce nebo v kanálech umístěných pod úrovní terénu. Před návozem surovin je kolem perforovaného potrubí nebo nad výstupy kanálů uložen porézní materiál (štěpka, sláma) a následně kompostovaná surovina. Vzhledem ke skutečnosti, že u tohoto systému obvykle nedochází k překopávání kompostovaných surovin, je nutné homogenizovat tyto suroviny při jejich uložení do zakládky. Směr proudění vzduchu závisí na použité technologii, viz obr. 24. Vzduch je do zakládky buď vháněn nebo

nasáván. Výška zakládky se pohybuje v rozmezí 150-245 cm, šířka zakládky se pohybuje v rozmezí 300-490 cm.



Obrázek 25: Schema funkce pásových zakládek s aktivním provzdušňováním

U systémů, kde je vzduch vháněn do pásové zakládky je velmi komplikované kontrolovat průtok vzduchu a tím pádem eliminovat případný zápach. Na kompostárnách, kde je vyžadována kontrola, respektive eliminace zápachu je možno pracovat s většími výškami pásových zakládek nebo změnit systém proudění vzduchu a zařadit dezodorizační filtr.

### 3.6 Technologie pro intenzivní kompostování

Nevýhody kompostování v pásových zakládkách či na hromadách je možné odstranit využíváním kompostovacích zařízení. V těchto zařízeních probíhá biodegradace v polouzavřených nebo uzavřených prostorách, takže podloží je dokonale chráněné před průsaky kontaminované vody do spodních vod. Provzdušňování se v tomto případě realizuje mechanickým přehazováním nebo přívodem stlačeného vzduchu do objemu kompostované hmoty.

Kompostovací zařízení jsou ve výkladu řazena tak, že postupujeme od systémů podobných kompostovacím hromadám k systémům, které se od této technologie stále více liší. Pro všechny je společné, že intenzifikují zejména první rozkladnou fázi-fázi mineralizace. Intenzifikace provzdušněním vede k dosažení vyšších teplot a tím i ke zkrácení celé fáze. Zařízení jsou investičně náročná, a proto jsou obvykle dimenzována jen na dobu zdržení 1. fáze kompostování. Dozrívání pak proběhne volným ložením kompostu na hromadách.

Během 1. fáze kompostování je kompost zbaven zápachu, změní se jeho vzhled a struktura, dojde k celkové hygienizaci, tedy eliminaci patogenních a hnilobných mikroorganismů a k inaktivaci semen plevelu. Výsledkem je biologicky stabilizovaný kompost, který je možno po zaležení aplikovat do půdy.

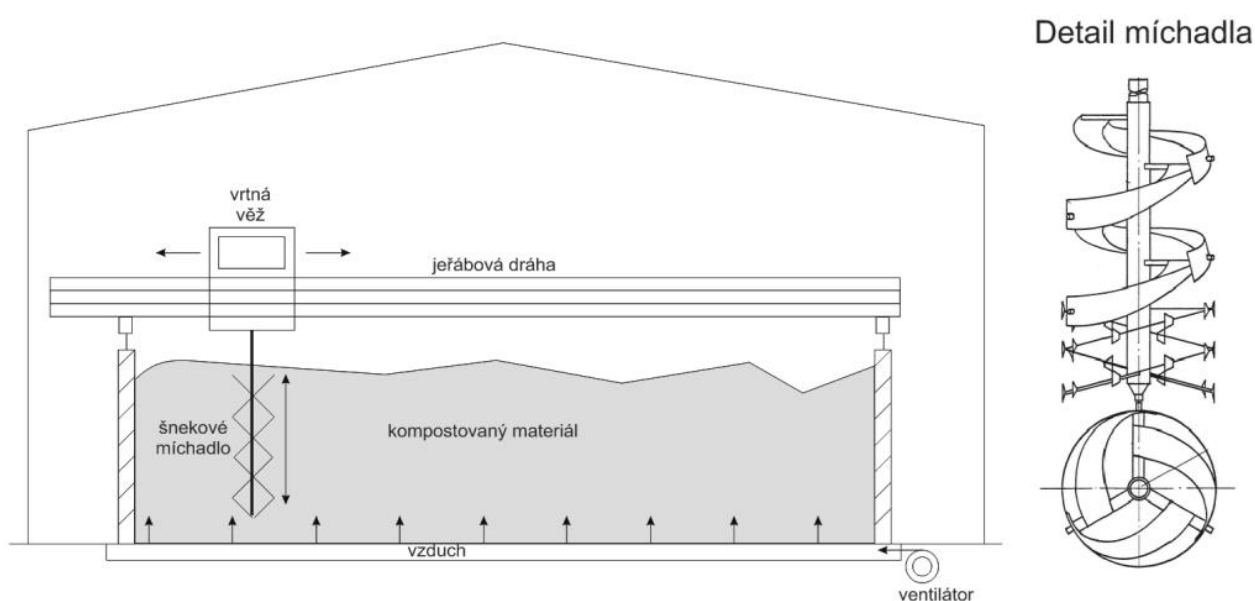
Rozeznáváme dva typy zařízení pro intenzivní kompostování:

- polouzavřená kompostovací zařízení,
- uzavřená kompostovací zařízení, bioreaktory.

### **Polouzavřená kompostovací zařízení,**

#### **Kompostovací systém s vrtnou věží**

Jedná se o polouzavřené diskontinuální zařízení, zastřešené, vybavené pojezdovou jeřábovou dráhou, na které je umístěna tzv. vrtná věž (obr. 25). Substrát je nahrnut nakladačem do elevátoru a odtud do šnekového dopravníku umístěného rovněž na jeřábové dráze. Z výpustních otvorů, ovládaných hydraulicky, padá substrát do kompostovacích komor. Provzdušňování je zabezpečeno mechanicky míchacím zařízením ve tvaru šnekového míchadla a vzduchem, který je do kompostovaného materiálu vháněn drážkami umístěnými v podlaze každé komory. Pohon míchadla je umístěn ve vrtné věži, umístěné na jeřábovém vedení. Podle navoleného programu se věž pohybuje křížovým pohybem. Optimální vlhkost udržuje zavlažovací zařízení. Po dobu kompostování 3-4 měsíců je substrát uložen v komoře. Po této době se z komory odstraní stěna, komora se tak otevře a mechanickým nakladačem se vyprázdní. Pro roční zpracovávané množství 3000 Mg jsou rozměry zásobníku 64x12 m, výška vrstvy je 2,7 m. Výrobce je švýcarská firma COMPAG.

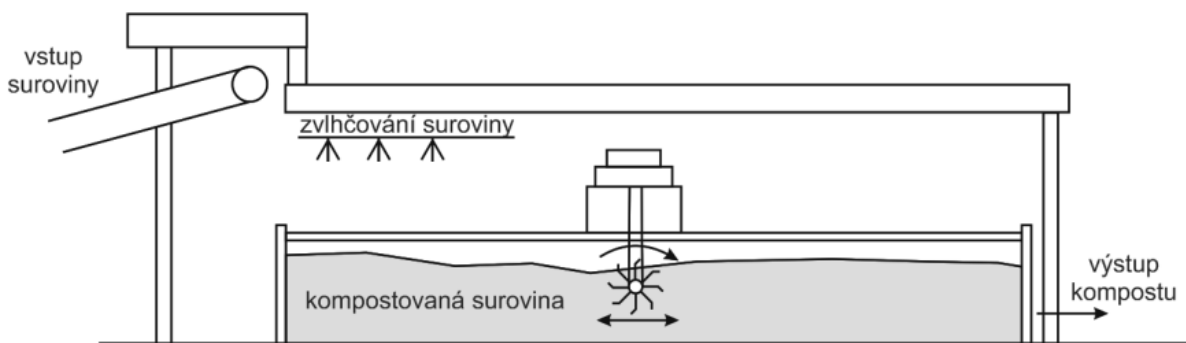


Obrázek 26: Kompostovací systém s vrtnou věží a detail šnekového míchadla



## Kompostovací žlaby

Jedná se o polouzavřené kontinuální zařízení, kompostovací prostory mají tvar podlouhlých žlabů, zaplněných zpracovávanou surovinou. Nad těmito žlaby se pohybuje překopávací mechanismus umístěný na kolejnicích, které jsou osazeny na stěnách žlabu (obr. 26). Zavážecí zařízení není pojízdné a je umístěno na jednom konci žlabu. Zavážení kompostu se provádí 1 až 2 denně. Nad žlabem se pohybuje mobilní provzdušňovací a homogenizační zařízení. Toto zařízení má tvar rotačního válce opatřeného na obvodě hroty. Obě tato zařízení kompost překopávají a tím materiál mechanicky provzdušňují, homogenizují a posunují směrem k opačnému konci žlabů. Nad žlabem může být umístěno zařízení pro zvlhčování kompostu. Doba zdržení biomasy ve žlabu je přibližně 4 týdny. Za tuto dobu dojde k biochemické degradaci, podporované mechanickou destrukcí materiálu. Zařízení zpracovávající 6-10 000 Mg za rok má délku 107 m a šířku 15,8 m.



Obrázek 27: Kompostovací žlaby s překopávacím zařízením

## Bioreaktory

Bioreaktory se od předchozích polouzavřených systémů liší ve dvou základních principech.

- jde o zcela uzavřené systémy kontejnerového typu ve tvaru kvádrů nebo válců, které jsou často tepelně izolované,
- přívod kyslíku se realizuje provzdušňováním kompostované vrstvy od spodu.

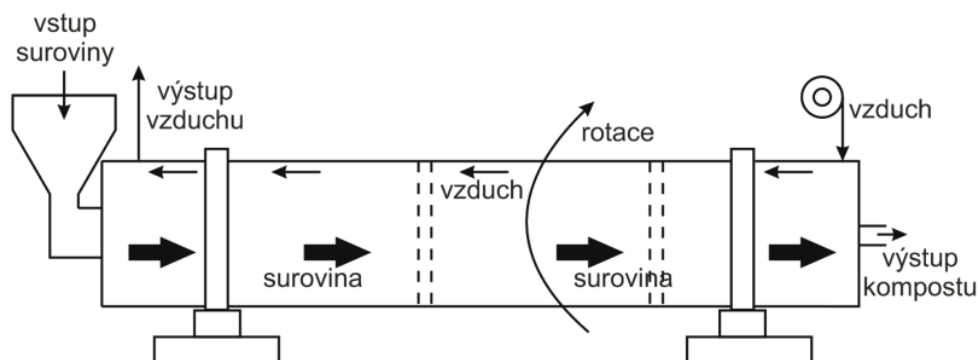
Tyto systémy mohou pracovat buď v režimu diskontinuálním (do bioreaktoru se vhodným mobilním prostředkem naplní kompostovaný materiál, který je provzdušňován) nebo v režimu kontinuálním (kompostovaný materiál se reaktorem posunuje, část materiálu kontinuálně opouští reaktor na výstupním konci a odpovídající část materiálu na vstupním konci se naváží).

Díky intenzivnímu provzdušňování se 1. fáze kompostování zkrátí na několik dnů, podle kompostovaného materiálu.

## Rotační bioreaktory

Tento kontinuálně pracující systém používá horizontálně uložený pomalu se otáčející buben k promíchání, zmenšení velikosti, prosévání a provzdušnění kompostovaného materiálu. Je nutno uvést, že rotační bioreaktory jsou obvykle používány ve spojení s jinou metodou kompostování. Rotační bioreaktor (obr. 27) je uložen na ložiscích a poháněn elektromechanickým pohonem. Rychlost otáčení bioreaktoru a sklon osy rotace určuje dobu zdržení kompostovaného materiálu. Vzduch přiváděný do bioreaktoru se pohybuje opačným směrem než kompostovaný materiál a na výstupu z bioreaktoru je využíván na přehřev vstupujícího materiálu. Vzduch je následně odváděn na biofiltr. Kompostovací proces je nastartován velmi rychle a dobře odbouratelné organické látky jsou rozloženy v řádech dnů. Další rozklad kompostovaného materiálu probíhá v jiných technologiích kompostování. V některých komerčně provozovaných systémech je doba zdržení v bioreaktoru menší než jeden den. V tomto případě, slouží rotační bioreaktor spíše jako směšovací zařízení.

Rotační bioreaktor může být proveden jako otevřený nebo jako dělený. Otevřeným bioreaktorem rozumíme stav, kdy veškerý kompostovaný materiál kontinuálně prochází bioreaktorem od vstupu k výstupu. Děleným bioreaktorem rozumíme stav, kdy je buben rozdělen na komory dvěma nebo více přepážkami. Každou komoru je možno uzavřít a uchovat v ní kompostovaný materiál. Na konci každého dne provozu, jsou postupně otevřeny přepážky, čímž dojde k posuvu kompostovaného materiálu v bioreaktoru.

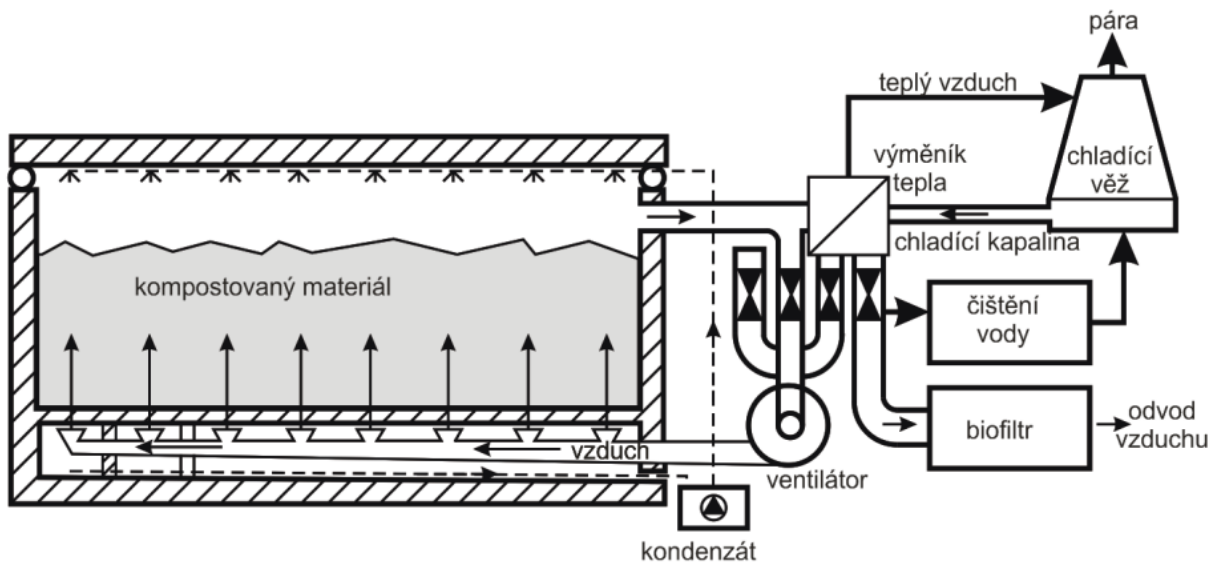


Obrázek 28: Rotační bioreaktor

## Kompostovací boxy

Tento diskontinuálně pracující systém používá obdélníkové kovové nebo plastové kompostovací boxy (obr. 28). Někdy mohou být tyto boxy přizpůsobené pro přemísťování manipulační technikou. Tomu také odpovídá velikost boxů. Menší s manipulací jsou asi do 10 m<sup>3</sup>. Po naplnění se tyto boxy přemístí do obslužného prostoru a zde se napojí na zdroj

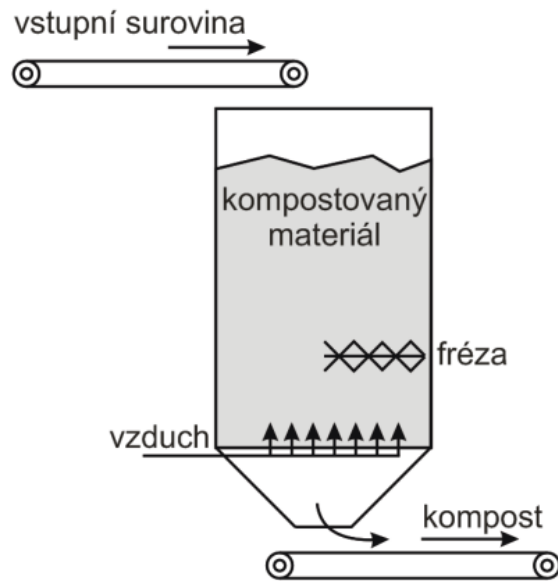
stlačeného vzduchu. Po proběhnutí teplotního maxima se box odpojí a materiál se vyloží na dozrávací plochu. U větších boxů se počítá se stálým uložením a s plněním mechanickou lžicí. Délka stabilně umístěných bioreaktorů může být až 50 m. Tento systém je konstrukčně zdánlivě velmi jednoduchý, ale vyžaduje speciální mechanizaci pro manipulaci. Rovněž prostorové nároky jsou značné, musíme počítat s pohybem boxů nebo mechanizace. Nevýhodou tohoto typu zařízení je, že materiál uvnitř boxu nevykonává žádný pohyb. Vzduch přiváděný dnem boxů může vytvořit zkratové kanály, kterými po celou dobu neefektivně uniká část vzduchu.



Obrázek 29: Kompostovací boxy

### Věžové bioreaktory

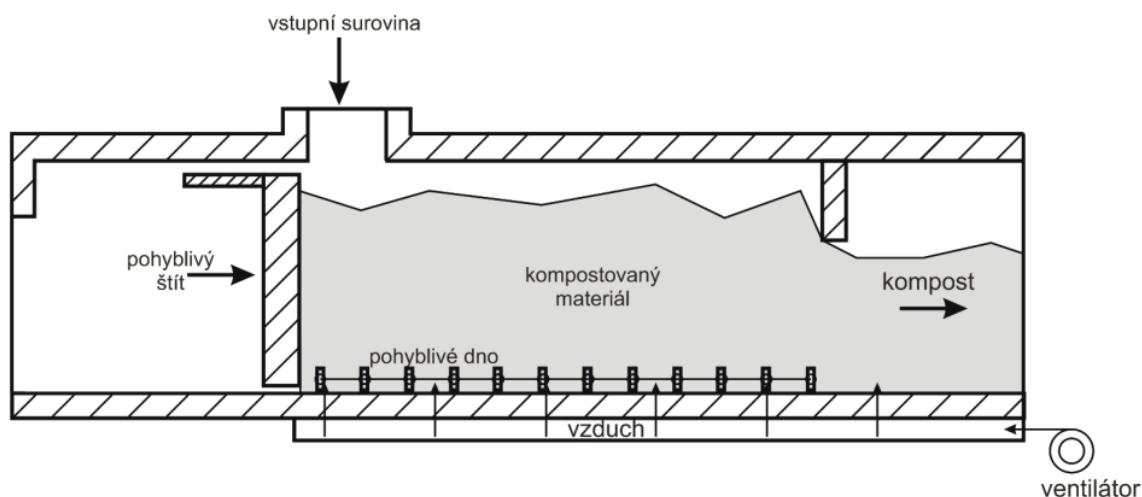
Na obrázku 29 je znázorněn věžový bioreaktor. Tento typ reaktoru sestává z válcové nádoby o průměru 8-10 m a výšky přibližně 7 m. Na dně nádoby je vyprazdňovací a provzdušňovací mechanismus. Vyprazdňovací mechanismus je rotující fréza, otáčející se kolem centrálního otvoru. Tato fréza dopravuje materiál k otvoru, kudy vypadává ven. Bioreaktor je plněn dopravním pásem shora. Zařízení má tedy klasický kontinuální chod a kompostující materiál klesá v průběhu času postupně do nižších vrstev reaktoru. Základní rozdíl oproti kontejnerovým reaktorům spočívá v teplotním průběhu. Zatím co u vsádkového reaktoru celý objem vsádky má v podstatě stejnou teplotu (odhlédneme-li od tepelných ztrát u okrajových vrstev) a stejný stupeň rozkladu, najdeme v horizontálních vrstvách kontinuálního reaktoru jak různou teplotu, tak různý stupeň rozkladu, odpovídající době zdržení příslušné vrstvy. Nevýhodou tohoto zařízení je poměrně komplikovaný mechanismus vyprazdňovacího zařízení. Tento mechanismus je lehký zranitelný a jeho oprava je značně náročná, zpravidla je spojena s ručním vyprázdněním reaktoru.



Obrázek 30: Věžový bioreaktor

### Tunelové bioreaktory

Tento typ reaktoru je rovněž provozován v kontinuálním režimu. Reaktory mají obdobný princip jako věžové reaktory, avšak konstruktéři byli vedeni snahou vyhnout se problémům spojených s údržbou věžových reaktorů. Průřez reaktoru je obdélníkový, dno je opatřeno systémem kanálů pro rozvod vzduchu. Posun materiálu reaktorem obstarává pohyblivé dno nebo čelní pohyblivý štít (obrázek 30), oboje poháněné hydraulikou. Posun dna nebo štítu asi o 1/14 délky reaktoru posune materiál v reaktoru o příslušnou délku dopředu. Tím se vytvoří prostor pro novou zavláčku. Malé kovové reaktory mají objem 10-50 m<sup>3</sup>, větší jsou betonové a mají objem do 500 m<sup>3</sup>. Úvahy o produkci kompostu jsou obdobné jako u věžových reaktorů, tzn. při střední době zdržení kompostu v reaktoru 14 dní je denní výrobní kapacita 1/14 objemu reaktoru. Betonové reaktory je možno spojovat do baterií po dvou, které mají společnou strojovnu. Tyto reaktory mají řadu výhod. Především je provzdušnění podstatně rovnoměrnější než u předchozích zařízení a rovněž se minimalizuje nebezpečí zkratových kanálů, kterými by neefektivně přednostně proudil vzduch. Důvodů je několik. Především je vrstva relativně nízká a denně se pohybuje a tím i stlačuje. Tím jsou kanály narušovány. Navíc se posunem dostane nad kanály každý den jiný povrch spodní vrstvy kompostu. Další výhodou je, že veškeré mechanické části jsou snadno přístupné. To umožňuje snadnou údržbu.



Obrázek 31: Tunelový bioreaktor

### 3.7 Vermikompostování

Vermikompostování lze popsat jako dekompoziční proces, při kterém dochází k oxidaci a stabilizaci organických materiálů spolupůsobením žížal a mikroorganismů. Žížaly požrou kompostovaný materiál a ten projde jejich trávicím traktem, kde jsou přeměněny organické látky v exkrementy. Kompost získaný pomocí žížal dosahuje vyššího stupně přeměny organické hmoty než běžný kompost. Vermikompost taktéž biohumus má po vysušení vzhled jemné lesní půdy. Vermikompost obsahuje vysoký podíl přírodních enzymů, huminových kyselin a růstových regulátorů např. auxinů, giberelinů, cytokininů a dalších.

#### Technologie vermikompostování

Před samotným začátkem s vermikompostováním je nutné vybrat vhodné stanoviště. Zvolenou plochu je vhodné zpevnit a vyspádovat kvůli odvodu průsakové vody, která se používá při zavlažování (kropení) materiálu v období kultivace. Zpevnění terénu pod kultivační hromadou zabraňuje vniknutí predátorů, především krtků a usnadňuje pohyb mechanizace. Pro zpracování 1 Mg suroviny je zapotřebí 1-2 m<sup>2</sup> plochy (při vrstvení do výše 60 cm).

### 3.8 Prosévací a separační zařízení

Prosévací zařízení slouží pro úpravu kompostu s vyšším podílem nerozložitelných částic. Kompostárnu je vhodné vybavit prosévacím zařízením s odpovídajícím výkonem, které umožní tříditi hotový kompost na dvě (i více) frakcí určených k expedici nebo dalšímu zpracování v kompostovacím procesu. Mezi základní znaky, podle kterých lze prosévací zařízení rozdělovat, patří hlavně:

- specifikace surovin, které se budou prosévat (velikost částic, objemová hmotnost, vlhkost),
- prostorové nároky (rozměry prosévacího zařízení a navazujících dopravníků),
- technické parametry prosévacích zařízení (velikost otvorů, povrch prosévací plochy, obvodová rychlost bubnu).

K prosévání kompostu se využívají zařízení, která lze rozdělit do následujících skupin:

#### *Vibrační třídače s rovinným sítím*

Principem činnosti je přerušovaný posun materiálu ve směru spádnice po šikmo uloženém rovinném síti. Výhodou je konstrukční jednoduchost, vysoká životnost a malá energetická náročnost.

#### *Rotační třídače s válcovým sítím*

Principem činnosti je plynulý posun materiálu vnitřním povrchem rotujícího válcového síta. Hlavní výhodou válcových sítí je jejich vysoká výkonnost.

#### *Rotační rošty*

Jsou tvořeny soustavou horizontálně uložených hřidelí, na kterých jsou v pravidelných roztečích umístěny ocelové nebo pryžové elementy. Hlavní výhodou rotačních roštů je jejich vysoká výkonnost, která je dána dobrou průchodností materiálu přes samočisticí elementy.

#### *Třídící a drticí lopaty*

Speciální prosévací zařízení, kterými lze nahradit lopatu u čelních nakladačů. S jejich pomocí je možno současně promíchávat a drtit zpracovávané suroviny, prosévat hotový kompost.

Podle požadavku budoucího uživatele na vlastnosti finálního produktu se používají síta s různými velikostmi ok (6, 12, 20, 40 mm). Pro použití vhodného typu síta (velikosti ok) je rozhodující vedle požadavku zákazníka na jemnost prosátého kompostu i stupeň biodegradace kompostu. Je známo, že se zvyšujícím se stupněm biodegradace stoupá zastoupení jemnějších frakcí v kompostu. Podle stupně biodegradace je možno volit následující typy sítí (velikosti ok).

- čerstvý kompost, 0-40/50 mm
- vyzrálý kompost, 0-15/20 mm
- kompost pro výrobu substrátu, 0-10 mm

Na řadě kompostáren se proto po předběžném zetlení nejprve jednou nahrubo prosévá. Prosetá část materiálu se potom prodává jako čerstvý kompost a druhá část se vrací do kompostovacího procesu. Běžnější je však prosévání vyzrálého kompostu, který je možno ihned expedovat, či uskladnit pro další zpracování ve stabilizované formě.

Při jednoduchém prosévání vzniknou dvě frakce – podsítná (finální produkt) a nadsítná, u níž je nutné rozhodnout o dalším využití. Hlavním kritériem pro rozhodnutí je množství biologicky nerozložitelných příměsí.

Pokud nadsítná frakce obsahuje vysoký podíl biologicky nerozložitelných příměsí, musí neprosetý materiál podstoupit další třídění-separaci. Separální zařízení pracující na různých principech popsaných v kapitole 1 se používají zejména při kompostování bioodpadu z odděleného sběru biologicky rozložitelných složek komunálního odpadu. Na separátorech je oddělován kovový odpad, lehké příměsí (plasty), sklo, kameny od biologicky zpracovatelných surovin. Vzhledem k předpokládanému růstu množství tohoto druhu odpadu se dá očekávat nárůst počtu těchto technologií. Separace je prováděna zejména z důvodu možného výskytu příměsí, které se musí oddělit buď před, nebo po procesu kompostování.

#### **4. ČISTÍRNÝ ODPADNÍCH VOD**

Základním právním nástrojem v Evropské unii řešícím problematiku čištění odpadních vod je směrnice Rady o čištění městských odpadních vod. Směrnice má za cíl zajistit ochranu povrchových vod před znečišťováním způsobeným vypouštěním komunálních odpadních vod a biologicky odbouratelných průmyslových odpadních vod.

Základním právním nástrojem pro ochranu vod v české republice je Zákon o vodách 254/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů. V § 38 tohoto zákona je stanoveno, že ten, kdo vypouští odpadní vody do vod povrchových, nebo podzemních je povinen zajišťovat jejich zneškodňování v souladu s podmínkami stanovenými v povolení k jejich vypouštění. V tomto povolení stanoví vodoprávní orgán povinnosti a podmínky, za nichž je nakládání s vodami povoleno.

Dalšími vybranými právními předpisy jsou:

Nařízení vlády č. 61/2003 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech, ve znění nařízení vlády č. 229/2007 Sb. a nařízení vlády č. 23/2011 Sb. Toto nařízení vlády č. 61/2003 Sb., mimo jiné stanovuje emisní limity a další ukazatele, které je nutno respektovat při návrhu a provozování čistíren odpadních vod. Emisní standardy sledovaných ukazatelů znečištění na odtoku z ČOV po procesu čištění a požadovaná účinnost jejich odstranění jsou uvedeny v tabulce.

Nařízení vlády č. 419/2010 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních.

Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích), ve znění zákona č. 320/2002 Sb., zákona č. 274/2003 Sb., zákona č. 20/2004 Sb., zákona č. 167/2004 Sb., zákona č. 127/2005 Sb., zákona č. 76/2006 Sb., zákona č. 186/2006 Sb., zákona č. 222/2006 Sb. a zákona č. 281/2009 Sb.

Kompletní seznam legislativy vztahující se k problematice vodního hospodářství je možno nalézt na portálu Ministerstva životního prostředí.

Státní správu v oblasti nakládání s odpadními vodami vykonávají podle zákona vodoprávní úřady a Česká inspekce životního prostředí. Vodoprávními úřady jsou, obecní úřady, újezdní úřady na území vojenských újezdů, obecní úřady obcí s rozšířenou působností, krajské úřady, ministerstva jako ústřední vodoprávní úřad.

V průmyslu je ustavena ve vodním hospodářství funkce tzv. vodohospodáře a to na všech úrovních od závodu až po rezort.

Ke kontrole dodržování zákonných ustanovení ve vodním hospodářství slouží vrchní vodoprávní dozor. Tím je Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí, které dozírají v rámci vrchního vodoprávního dozoru, jak vodoprávní úřady a Česká inspekce životního prostředí provádějí ustanovení vodního zákona a předpisů podle něho vydaných.

Tabulka 14: Emisní standardy a minimální povolená účinnost čištění

Kategorie ČOV (EO)	CHSK <sub>Cr</sub>			BSK <sub>5</sub>			NL		
	p	m	účinnost	p	m	účinnost	p	m	účinnost
	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
< 500	150	220	70	40	80	80	50	80	
500 – 2000	125	180	70	30	60	80	40	70	
2001 – 10 000	120	170	75	25	50	85	30	60	
10 001 – 100 000	90	130	75	20	40	85	25	50	
> 100 000	75	125	75	15	30	85	20	40	
Kategorie ČOV (EO)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>			N <sub>celk</sub>			P <sub>celk</sub>		
	průměr	m	účinnost	průměr	m	účinnost	průměr	m	účinnost
	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
< 500	-	-		-	-	-	-	-	-
500 – 2000	20	40	50	-	-	-	-	-	-
2001 – 10 000	15	30	60	-	-	-	3	8	70
10 001 – 100 000	-	-	-	15	30	70	2	6	80
> 100 000	-	-	-	10	20	70	1	3	80

p - uváděné přípustné koncentrace



m - uváděné maximální koncentrace, jsou nepřekročitelné

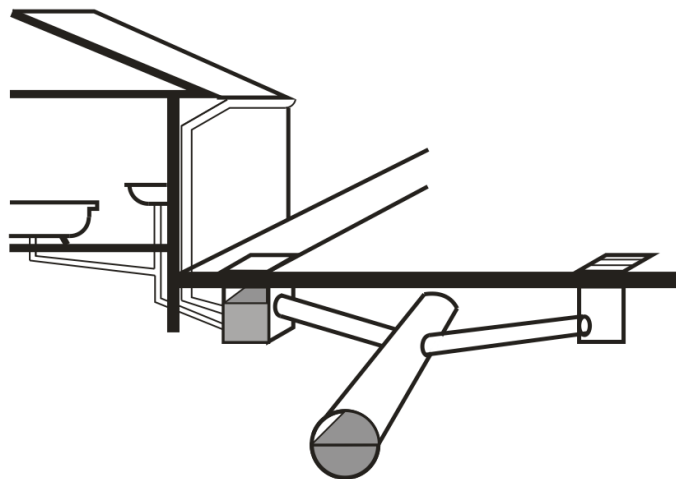
EO - ekvivalentní obyvatel, definovaný produkcí znečištění 60 g BSK<sub>5</sub> za den

#### 4.1 Odvádění odpadních vod

Pro odvádění odpadních vod jsou používány trubní stoky. Účelem stokových sítí a kanalizačních přípojek je spolehlivé, hospodárné a zdravotně neškodné odvádění odpadních vod z určeného území nebo připojené nemovitosti do zařízení na čištění odpadních vod a do recipientu. Stokové sítě dělíme na dvě základní soustavy, jednotnou a oddílnou.

##### Jednotná stoková soustava

Odvádí srážkové vody a splaškové odpadní vody jednou stokovou soustavou společně, obrázek 31.

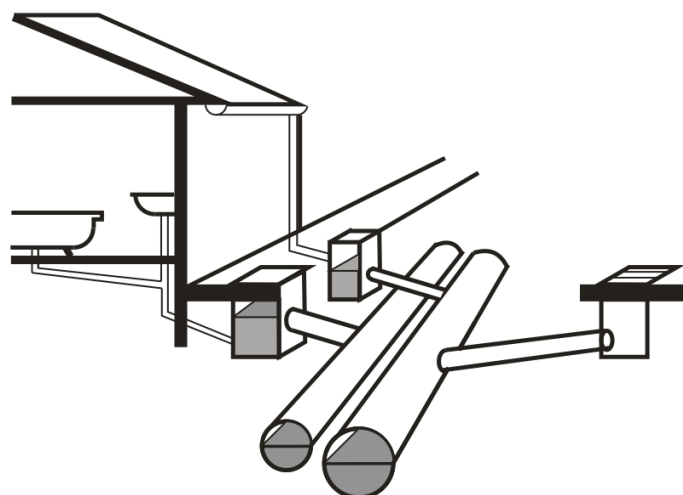


Obrázek 32: Jednotná stoková soustava

Jednotná stoková soustava klade vyšší nároky na dimenzování a skladbu jednotlivých objektů na síti i v technologii čistírny odpadních vod, čímž však zvyšuje bezpečnost ochrany recipientu před znečištěním. Nevýhodou bývá zředování komunálních odpadních vodou při srážkové události, což může mít negativní dopad na kontinuální procesy čištění odpadních vod. V případě srážkových událostí může také docházet k hydraulickému přetížení stokové sítě a ČOV.

##### Oddílná stoková soustava

Odvádí odděleně srážkové vody a splaškové odpadní vody, obrázek 32. Splaškové odpadní vody jsou přiváděny na ČOV k dalšímu zpracování. Srážkové vody, které mohou v první fázi dešťové události obsahovat vysoké koncentrace znečišťujících látek, jsou bez čištění, nebo pouze po mechanickém čištění odváděny do recipientu.



Obrázek 33: Oddílná stoková soustava

Rozhodujícím kritériem pro řešení stokové soustavy by však jednoznačně měla být její schopnost přivádět do ČOV odpadní vody vhodné pro čistící proces. K jakékoli stokové soustavě totiž nelze vybudovat a úspěšně provozovat ČOV. Máme-li k dispozici nekvalitní stokovou soustavu s velkým množstvím balastních vod, nelze úspěšně provozovat vysoce účinné intenzivní způsoby čištění. Stokovým soustavám je nutno věnovat pozornost, protože ve většině případů převyšují investici do čistící technologie.

#### Určení množství splaškových odpadních vod

Při určení množství splaškových odpadních vod u nových ČOV nebo u rekonstrukcí, kde dochází k významné změně na kanalizační síti (např. připojení dalších obyvatel) se vychází z fakturované pitné vody odebírané obyvatelstvem. Většina této vody po použití odtéká do kanalizace.

Výše popsaným způsobem získáme hodnotu specifického množství splaškových odpadních vod  $q_{\text{spec}}$  (tj. množství vody produkované jedním obyvatelem za den). Hodnota  $q_{\text{spec}}$  se pohybuje podle lokality v rozpětí 80 – 200 dm<sup>3</sup> na osobu a den, v praxi se používá mírně nadhodnocená hodnota  $q_{\text{spec}} = 150$  dm<sup>3</sup> na osobu a den. Zde je však nutné upozornit, že se vzrůstající cenou vodného klesá i spotřeba vody, tabulka 15.

Tabulka 15: Specifické množství vody fakturované pro domácnost

Rok	1989	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
dm <sup>3</sup> na osobu a den	171,0	97,5	98,5	94,2	92,5	89,5	88,6	88,1	87,2

#### Určení množství průmyslových odpadních vod

Při určení množství průmyslových odpadních vod se obecně vychází z projektových podkladů, ze kterých by měla být patrná potřeba vody pro technologické účely, v případě stávající technologie je možno využít informace o skutečné spotřebě procesní vody. K tomuto množství se následně připočte produkce odpadní vody z dalších podpůrných provozů a odpadní voda vyprodukovaná zaměstnanci. Velmi často je produkce průmyslové odpadní vody vztahovaná na počet výrobků, případně na hmotnostní jednotku vyrobených výrobků.

### **Určení množství srážkových odpadních vod**

Určení množství srážkových vod patří mezi nejsložitější úkoly při návrhu městského odvodnění. Dnes jsou běžně využívány speciální výpočtové metody, které mohou zpracovávat údaje o srážkové aktivitě v řešené oblasti. S využitím těchto informací a mapových podkladů lze v zájmové oblasti určit druhy ploch (propustné a nepropustné) a pomocí modelů vyšetřit množství srážkové vody, která bude odváděna kanalizační soustavou.

## **4.2 Odpadní vody a jejich znečištění**

### **Definice odpadních vod**

Z pohledu legislativy je odpadní vodou voda použitá v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud má po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu), jakož i jiná voda z těchto staveb, zařízení nebo dopravních prostředků odtékající, pokud může ohrozit jakost povrchových nebo podzemních vod. Odpadní vody jsou i průsakové vody z odkališť, s výjimkou vod, které jsou zpětně využívány pro vlastní potřebu organizace, a vod, které odtékají do vod důlních, a dále jsou odpadními vodami průsakové vody ze skládek odpadu.

### **Rozdělení odpadních vod**

Odpadní vody bývají mnoha autory rozdělovány podle různých parametrů a vlastností do mnoha kategorií. Nařízení vlády však definuje dva základní typy odpadních vod.

- městské odpadní vody,
- průmyslové odpadní vody.

### **Městské odpadní vody**

Jako městské odpadní vody jsou definovány odpadní vody vypouštěné z domácností nebo služeb, vznikající převážně jako produkt lidského metabolismu a činností v domácnostech (splašky), popřípadě jejich směs s průmyslovými odpadními vodami nebo se srážkovými vodami. Do této kategorie spadají i odpadní vody z obecní, resp. městské vybavenosti (školy, úřady, restaurace a hotely apod.), které mají obdobný charakter jako odpadní vody z domácností.

## Odpadní vody průmyslové

Jedná se o odpadní vody, které mohou mít, v závislosti na druhu výroby, různou kvalitu a obsahovat specifickou kombinaci znečišťujících látek, tab. 16.

Tabulka 16: Převažující znečišťující látky v odpadních vodách z různých průmyslových odvětví

Odvětví	Znečišťující látky
Výroba železa a oceli	BSK, CHSK, oleje, těžké kovy, kyseliny, fenoly a kyanidy
Textilní a kožedělný průmysl	BSK, nerozpuštěné látky, sulfáty, chrom
Papírenský průmysl	BSK, CHSK, chlorované organické sloučeniny
Petrochemický průmysl	BSK, CHSK, minerální oleje, fenoly, chrom
Chemický průmysl	CHSK, rozpuštěné látky, organické sloučeniny, těžké kovy, kyanid
Těžební průmysl	rozpuštěné látky, kovy, kyseliny, soli
Potravinářský průmysl	BSK, CHSK, rozpuštěné látky, tuky, nutrienty,

Průmyslové odpadní vody by měly být odděleny a čištěny na samostatných průmyslových ČOV. Bohužel v minulosti byly takové vody, často s obsahem toxických látek (např. těžké kovy, pesticidy apod.), běžně vypouštěny do kanalizace, a to často bez ohledu na možnosti koncové ČOV. V současnosti má většina průmyslových podniků vlastní čistírny odpadních vod. Další možností je čištění průmyslových odpadních vod na komunálních čistírnách odpadních vod jako součást městských odpadních vod. Před vypuštěním průmyslových odpadních vod do veřejné kanalizace musejí být tyto vody upraveny tak, aby vyhovovaly provoznímu řádu kanalizace, respektive byly čistitelné technologií komunální ČOV.

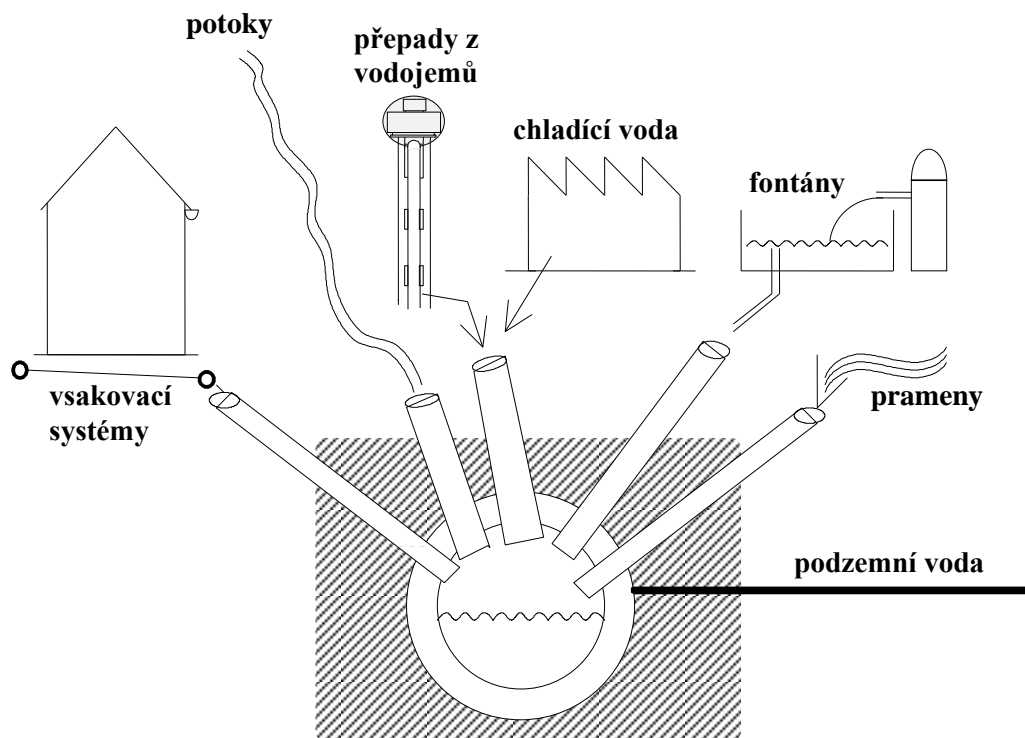
## Srážkové vody

Jedná se o vody často odváděné z intravilánu obce nebo z výrobního závodu, komunikací či jiných ploch veřejnou kanalizací. Z pohledu zákona tyto vody nejsou vodami odpadními, byť jsou často odváděny jednotnou kanalizační soustavou na čistírny odpadních vod. Množství a druh znečišťujících látek obsažených ve srážkových vodách závisí na ročním období (posypové materiály v zimním období), materiálu, na který srážkové vody dopadají, kvalitě atmosféry. Znečištění dešťových vod, zejména nerozpustnými látkami, je pak srovnatelné s komunálními odpadními vodami.

## Balastní vody

Jedná se o vody, které se dostávají do kanalizační soustavy netěsnostmi nebo nekázní, obrázek 12.3. Bohužel často se jedná i o povrchové toky zaústěné do kanalizačního systému (v minulosti se běžně vodoteče zaústěovaly do kanalizace bez ohledu na to, že se jedná,

z pohledu látkového znečištění, o neznečištěnou vodu). Balastní vody představují pro bezproblémovou funkci ČOV riziko a to zejména z důvodu, že ředí splašky a ochlazuje odpadní vodu. Balastní vody bohužel představují značné procento celkových odpadních vod, což platí hlavně u starších systémů stavěných často s nedostatečnou projektovou dokumentací.



Obrázek 34: Zdroje balastních vod

### Znečištění odpadních vod

Znečištění vody je komplexním pojmem, který lze definovat jako změnu fyzikálních, chemických, biologických a estetických vlastností vody v té míře, že ji nelze použít pro daný účel. Znečišťující látky rozdělujeme na:

a) *rozpuštěné*

- organické

- biologicky rozložitelné (cukry, tuky, bílkoviny)

- biologicky nerozložitelné (azobarviva)

- anorganické (těžké kovy, sulfidy)

b) *nerozpuštěné*, které mohou být usaditelné či neusaditelné (koloidní, plovoucí).

- *organické*

- biologicky rozložitelné
- biologicky nerozložitelné
- usaditelné
- neusaditelné
- koloidní
- plovoucí
- *anorganické*
  - usaditelné (štěrk, písek)
  - neusaditelné (brusný prach)

### Definice ekvivalentního obyvatele

Ekvivalentní obyvatel (EO), je zásadním ukazatelem při návrhu čistíren odpadních vod. Ekvivalentní obyvatel je definován produkcí znečišťování 60 g BSK<sub>5</sub> (biochemická spotřeba kyslíku) za den. V případech, kdy je známé množství produkovaného znečištění, je tedy EO počítán vydělením celkové produkce BSK<sub>5</sub> za den hodnotou 60 g BSK<sub>5</sub>. Obdobně lze vyjádřit také další sledované ukazatele. Tabulka 17 uvádí průměrné denní množství znečišťujících látek přiváděných na ČOV vyjádřeno v gramech na 1 EO, hodnoty vycházejí z ČSN 75 6401.

Tabulka 17: Průměrné denní koncentrace znečišťujících látek v odpadních vodách

Ukazatel	g na 1 EO
BSK <sub>5</sub>	60
CHSK <sub>Cr</sub>	120
Nerozpuštěné látky	55
Celkový dusík (N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N <sub>org</sub> )	11
Celkový fosfor	2,5

Typické složení znečišťujících látek v městských odpadních vodách je uvedeno v tab. 18. Hodnoty jsou uvedeny v g na 1 EO.

Tabulka 18: Denní produkce znečištění v odpadní vodě vztažená na 1 EO

Ukazatel	[g]
BSK <sub>5</sub>	60 – 90
z toho nerozpuštěné látky	30 – 40
- usaditelné	20 – 30
- neusaditelné	10 – 20
z toho rozpuštěné látky	30 – 50
CHSK <sub>Cr</sub>	110 – 180
C <sub>org</sub>	35 – 70

N <sub>celk</sub>	10 – 20
P <sub>celk</sub>	0,5 – 5

Přibližně ½ až ¾ přítomných znečišťujících látek v odpadních vodách je organického původu. Koncentrace znečišťujících látek v komunálních odpadních vodách má dlouhodobě stoupající tendenci.

### **Organické látky v odpadních vodách**

Jedním z velmi důležitých ukazatelů kvality odpadní vody je obsah organických látek v ní. Organické látky ve vodách je možno stanovit přímými nebo nepřímými metodami. Z přímých metod lze uvést stanovení sušiny, ztráty žiháním, případně stanovení obsahu uhlíku v organických sloučeninách. Nepřímé metody spočívají ve stanovení kyslíku potřebného k jejich oxidaci. Stanovení obsahu organických látek nepřímými metodami můžeme provádět pomocí analytických metod a vyjádřit jako chemickou spotřebu kyslíku (CHSK, často označován jako COD z anglického názvu „Chemical Oxygen Demand“) nebo jako celkový organický uhlík (C<sub>org</sub>, často označován také jako TOC z anglického názvu „Total Organic Carbon“). Dalším možným ukazatelem obsahu organických látek je biochemická spotřeba kyslíku (BSK, často označována jako BOD z anglického názvu „Biochemical Oxygen Demand“). C<sub>org</sub> je spolu s parametry CHSK a BSK důležitým souhrnným parametrem pro vyhodnocování organické zátěže ve vodě.

### **Přímé metody**

#### **Sušina**

Je množství látek zbylých po vysušení vzorku do konstantní hmotnosti. Diference celkové hmotnosti vzorku a jeho sušiny určuje vodný podíl, protože obsah látek (organických i minerálních) těkajících při teplotě stanovení je zpravidla zanedbatelný. Podle druhu vázané vody (volná, vázaná apod.) na pevnou fázi je třeba k uvolnění molekul vody různé energie, dané teplotou vysušení. Stanovení sušiny (veškerých látek) se provádí gravimetricky. Přesně definované množství zhomogenizovaného vzorku odpadní vody je nadávkováno do předem vysušeného a zváženého porcelánového kelímku. Následně se kelímek se vzorkem suší v sušárně při 105 °C do konstantní hmotnosti. Po ochlazení kelímku na laboratorní teplotu v exikátoru se kelímek zváží na analytických vahách a výpočtem se stanoví obsah sušiny.

$$m_{suš} = \frac{(m_2 - m_1)}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (12-1)$$

kde je:

m<sub>suš</sub> - obsah sušiny ve vzorku[%]

$m_1$  - hmotnost vysušeného porcelánového kelímku [g]

$m_2$  - hmotnost porcelánového kelímku se vzorkem po vysušení [g]

$m_0$  - hmotnost analyzovaného vzorku [g]

### **Nerozpuštěné látky**

Stanovení nerozpuštěných látek (NL) se provádí gravimetricky. Přesně definované množství zhomogenizovaného vzorku odpadní vody je filtrováno přes předem vysušený a zvážený filtr ze skleněných vláken při sníženém tlaku. Následně se filtr vysuší při 105 °C a hmotnost nerozpuštěných látek se stanoví zvážením na analytických vahách.

$$NL = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0} [g \cdot dm^{-3}] \quad (12-2)$$

kde je:

NL - hmotnostní koncentrace nerozpuštěných látek v [g·dm<sup>-3</sup>]

$m_1$  - hmotnost vysušeného filtru [g]

$m_2$  - hmotnost filtru s nerozpuštěnými látkami po vysušení [g]

$V_0$  - objem vzorku použitý pro stanovení [dm<sup>3</sup>]

### **Rozpuštěné látky**

Stanovení rozpuštěných látek (RL) se provádí gravimetricky. Známé množství filtrátu po stanovení nerozpuštěných látek je nadávkováno do předem vysušené a zvážené kádinky. Následně je kádinka s filtrátem sušena při 105 °C do konstantní hmotnosti. Hmotnost rozpuštěných látek se stanoví výpočtem.

$$RL = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0} [g \cdot dm^{-3}] \quad (12-3)$$

kde:

RL - hmotnostní koncentrace rozpuštěných látek v [g·dm<sup>-3</sup>]

$m_1$  - hmotnost vysušené kádinky [g]

$m_2$  - hmotnost kádinky se vzorkem po vysušení [g]

$V_0$  - objem vzorku použitý pro stanovení [dm<sup>3</sup>]

### **Ztráta žiháním.**



Velmi často je třeba znát nejen sušinu analyzovaného vzorku, ale i obsah organického podílu v sušině. Ztráta žíháním je množství látek v sušině, které těkají nebo se spalují obvykle při teplotě 550 °C. Minerální látky jsou do této teploty převážně rezistentní.

$$Z\check{Z} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 [\%] \quad (12-4)$$

kde:

$Z\check{Z}$  - procentuální obsah sušiny ve vzorku [%]

$m_1$  - hmotnost vysušeného porcelánového kelímku [g]

$m_2$  - hmotnost porcelánového kelímku se vzorkem po vysušení [g]

$m_3$  - hmotnost porcelánového kelímku se zbytkem po žíhání [g]

## Nepřímé metody

### Teoretická spotřeba kyslíku

Vyjádřuje teoretickou spotřebu kyslíku (TSK) v gramech potřebnou pro úplnou oxidaci 1 molu (gramu) organických látek na konečné produkty  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Určení teoretické spotřeby kyslíku je možno provést výpočtem pro sloučeniny o známém složení. Výpočet vychází z úplné oxidace organické sloučeniny obecného složení  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$ , kde koeficienty a, b, c odpovídají počtu příslušných atomů v molekule. Oxidaci této sloučeniny o relativní molekulové hmotnosti  $M_r$  lze vyjádřit následujícím postupem.



z předchozí rovnice lze vyjádřit rovnici pro bilanci kyslíku

$$x = 2a + \frac{b}{2} - c \quad (12-6)$$

Pro oxidaci 1 molu ( $M_r$  gramů) organické látky o složení  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$  je tedy potřeba  $x$  molů atomů kyslíku ( $16 \cdot x$  gramů). Teoretická spotřeba kyslíku se tedy vypočte:

$$TSK = \frac{16 \cdot x}{M_r} = \frac{(4a + b - 2c)}{M_r} \cdot 8 [g] \quad (12-7)$$

kde:

TSK - teoretická spotřeba kyslíku [ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ]

a - počet atomů uhlíku

b- počet atomů vodíku

c - počet atomů kyslíku

Mr - relativní molekulová hmotnost látky [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

### **Biochemická spotřeba kyslíku**

Aerobní mikroorganismy využívají organické látky přítomné ve vodách jako zdroj energie. Při rozkladu těchto látek spotřebovávají mikroorganismy kyslík rozpuštěný ve vodě. Biochemická spotřeba kyslíku ( $\text{BSK}_5$ ) vyjadřuje spotřebu kyslíku na biochemickou oxidaci biologicky rozložitelných látek mikroorganismy přítomnými v dané odpadní vodě a to za časovou periodu 5 dní. (U sterilních odpadních vod např. průmyslových je nutno provést zaočkování). Tento parametr je udáván v miligramech na litr odpadní vody.

Stanovení  $\text{BSK}_5$  můžeme provádět:

- jodometrické stanovení, reakcí rozpuštěného kyslíku a síranu manganatého v alkalickém prostředí vznikne rezavě hnědá sraženina hydroxidu manganitého. Po rozpuštění v kyselině a přidavku jodidu draselného vznikne jod, který se stanoví titrací thiosíranem sodným na indikátor škrob. Kyslík se tedy stanovuje nepřímo (jako jod). Rušivý vliv dusitanů je eliminován přidavkem azidu chemicky pomocí manganatých solí kvantitativně reagujících s kyslíkem.
- respirometricky (manometricky), mikroorganismy při rozkladu organických látek ve vodě spotřebovávají rozpuštěný kyslík ve vodě. Tento kyslík je nahrazen vzdušným kyslíkem ze vzduchového prostoru v uzavřené skleněné lahvi. Oxid uhličitý, který je mikroorganismy metabolicky produkován v průběhu tohoto procesu, váže na sebe hydroxidu draselného, obsažený v těsnicím uzávěru lahve. Výsledkem je pokles tlaku v systému, který je přímo úměrný hodnotě  $\text{BSK}_5$  a je měřen.
- kyslíkovými elektrodami, hodnota  $\text{BSK}_5$  se určuje z difference mezi 2 měřeními rozpuštěného kyslíku pomocí kyslíkové elektrody před a po inkubační době 5 dnů.

### **Chemická spotřeba kyslíku**

Vyjadřuje spotřebu kyslíku na oxidaci organických v prostředí oxidačních činidel. Pro stanovení CHSK odpadních vod se používá oxidace organických látek dichromanem draselným  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  v prostředí 50% kyseliny sírové  $\text{H}_2\text{SO}_4$  po dvouhodinovém varu. Výsledná hodnota CHSK se získá následně titrací nebo fotometricky. Je nutno si uvědomit, že tímto stanovením dojde k rozkladu také látek biologicky nerozložitelných, nicméně oxidovatelných v přítomnosti oxidačních činidel. Tento parametr je udáván v miligramech na

litr odpadní vody. Poměr  $BSK_5 : CHSK_{Cr}$  je jistou mírou biologické čistitelnosti a u běžných odpadních vod dosahuje hodnot 0,5–0,8.

Stanovení  $CHSK_{Cr}$  můžeme provádět:

- titračně, množství spotřebovaného dichromanu pro oxidaci vzorku zjistíme titrací síranem amonno-železnatým na Ferroin jako indikátor.
- fotometricky, množství dichromanu spotřebovaného pro oxidaci vzorku se stanoví měřením absorbance vzniklého  $Cr^{3+}$  při vlnové délce  $600 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$ .

### **Obsah celkového organického uhlíku**

Obsah organického uhlíku (TOC) je významný ukazatel kvality vod. Jedná se o analytický skupinový ukazatel vyjadřující sumární koncentraci organických látek ve vodě. Tento parametr je udáván v miligramech uhlíku na jeden litr vody.

Metody stanovení parametru TOC jsou založeny na oxidaci organických látek na oxid uhličitý. Toho lze dosáhnout buď termickou oxidací (při teplotách  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  za přítomnosti katalyzátoru), nebo oxidací na mokré cestě (chemickou nebo fotochemickou). Převažují analyzátory s termickou oxidací,  $CO_2$  vzniklý při oxidaci lze stanovit různými metodami, nejčastěji analýzou v infračervené oblasti spektra.

Stanovení TOC můžeme provádět:

- vytěšňovací metoda, parametr TOC se stanoví přímo pouze jedním měřením po úplném odstranění anorganického uhlíku (TIC) ze vzorku (okyselení + vytěsnění)
- metoda diferenční, je třeba provést dvě měření, tj. stanovit celkový uhlík (TC) a celkový anorganický uhlík (TIC). Parametr TOC se poté vyhodnotí jako rozdíl mezi TC a TIC ( $TOC = TC - TIC$ ).

Při termickém způsobu se oxidují všechny organické látky, což je jednou z výhod stanovení TOC proti stanovení CHSK. Tímto způsobem se stanoví organické látky bez ohledu na to, zda se biologicky rozkládají či nikoli. Jestliže je zapotřebí odlišit podíl biologicky rozložitelných látek stanovuje se tzv. biochemická spotřeba kyslíku (BSK).

### **Další sledované parametry v odpadních vodách**

Obsah anorganických látek v odpadní vodě se obvykle stanoví jako obsah iontů a solí v jejím zdroji. Současné čištění odpadních vod je zaměřeno především na snížení obsahu dusíku, solí fosforu a těžkých kovů v těchto vodách.

## **Sloučeniny fosforu**

Veškerý fosfor se ve vodách vyskytuje ve formě buď anorganických sloučenin, nebo v organických sloučeninách. Zdrojem fosforu v odpadních vodách jsou výkaly a moč. Pouze 10 - 15 % fosforu v odpadních vodách se vyskytuje ve formě vázané v organických látkách (nerozpuštěné látky), zbytek představují látky anorganické. Z anorganických sloučenin jsou nejvýznamnější orthofosforečnany a polyfosforečnany. Stanovení koncentrace fosforu ve vyčištěné odpadní vodě je důležité zejména pro posouzení podmínek eutrofizace povrchových toků. V odpadních vodách a v odtocích z čistíren odpadních vod se sleduje hmotnostní koncentrace celkového fosforu  $P_{\text{celk}}$ .

## **Sloučeniny dusíku**

Dusík je v odpadních vodách přítomen jak ve formě organických sloučenin, tak v anorganických formách, a to amoniakové ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ), dusitanové ( $\text{NO}_2^-$ ) a dusičnanové ( $\text{NO}_3^-$ ). Amonné soli tvoří převážnou většinu anorganicky vázaného dusíku, zatímco dusík vázaný v organických sloučeninách se v amonné formě vyskytuje ze 60 %. Stanovení koncentrace fosforu ve vyčištěné odpadní vodě je důležité zejména pro posouzení podmínek eutrofizace povrchových toků. V odpadních vodách a v odtocích z čistíren odpadních vod se sleduje hmotnostní koncentrace celkového dusíku  $N_{\text{celk}}$  nebo amoniakálního dusíku  $\text{NH}_4^+$ .

## **Nerozpuštěné látky**

Tyto látky v odtoku z ČOV nepocházejí z čištěné odpadní vody, ale jedná se o unikající částičky biomasy. Charakter nerozpuštěných látek (NL) na přítoku do biologické čistírny odpadních vod je zcela jiný než na odtoku (unikající biomasa). Z uvedeného důvodu je postupně upouštěno od vyhodnocování účinnosti tohoto ukazatele na ČOV. Nicméně ukazatel NL je jasným indikátorem fungování dosazovací nádrže na ČOV.

Stanovení NL můžeme provádět:

- filtrací filtrem ze skleněných vláken.

## **pH**

Pod pojmem pH rozumíme zápornou hodnotu dekadického logaritmu aktivity vodíkových iontů, vyjádřené v molech na litr. Hodnota pH významně ovlivňuje chemické a biochemické procesy ve vodách i toxický vliv látek na vodní organismy. Měření pH se provádí prakticky u všech druhů vod a má často klíčový význam pro další posuzování vlastností analyzované vody. Obvyklé hodnoty vodivosti pro městské odpadní vody se pohybují v rozsahu 5 – 8, pro průmyslové odpadní vody potom 3 – 10.

## **Vodivost**

Je obecný ukazatel kvality vody, který je velmi jednoduše měřitelný. Vodivost můžeme považovat za sumární parametr pro koncentraci iontů v měřeném roztoku. Čím více solí, kyselin nebo také zásad měřený roztok obsahuje, tím vyšší je jeho vodivost. Velmi často může být tento parametr použit jako řídicí veličina při čištění odpadních vod.

Obvyklé hodnoty vodivosti pro městské odpadní vody se pohybují v rozsahu 1 – 10 mS/cm, pro průmyslové odpadní vody potom 1 – 100 mS/cm.

U specifických průmyslových odpadních vod jsou sledovány také další ukazatele znečištění v souladu s přílohou č. 1 oddíl B nařízení vlády 61/2003 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Tam je možno nalézt jak limitní koncentrace sledovaných ukazatelů, tak doporučené analytické metody použitelné ke stanovení daných ukazatelů.

### **4.3 Způsoby čištění odpadních vod.**

V současné době je znám a prakticky ověřen dostatek způsobů, kterými lze dosáhnout požadované kvality odpadních vod. Jejich výběr závisí nejen na charakteru znečištění, požadované účinnosti, ale především na ekonomických možnostech. Proto požadujeme, aby čisticí procesy byly nejen účinné, ale též investičně, provozně a energeticky nenáročné.

Při čištění odpadních vod se setkáváme s těmito jednotkovými operacemi:

#### *a) Způsoby mechanické*

- zachycování česlemi, cezení na sítích,
- sedimentace
- flotace (tlaková, elektro, biologická)
- filtrace (pískové filtry, mikrosíta).

#### *b) Způsoby biologické*

##### *aerobní:*

- aktivační proces,
- biologické kolony,
- rotační diskové reaktory,
- čištění a dočišťování v oxidačních rybnících a lagunách,

##### *anaerobní:*

- stabilizace odpadních kalů,
- čištění koncentrovaných odpadních vod.

#### *c) Způsoby chemické a fyzikálně-chemické*

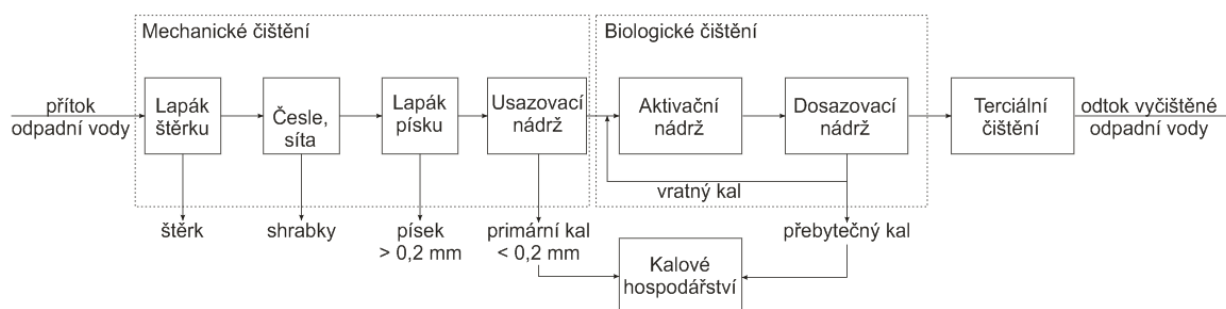
- neutralizace, chemická oxidace a redukce,
- koagulace a metody srážení,

- sorpce (aktivní uhlí),
- výměna iontů (selektivní ionexy),
- odpařování, spalování (silně koncentrované či toxické vody).

#### 4.4 Standardní technologická linka čištění odpadních vod.

Standardní technologická linka čištění odpadních vod, jejíž blokové schéma je znázorněno na obrázku 34 se v této podobě ustálila během vývoje čištění odpadních vod od konce 19. století. Tato linka tvoří i základ čistíren průmyslových odpadních vod, pokud jsou biologicky čistitelné. Setkáváme se s ní proto často právě při čištění potravinářských odpadních vod. Linka může být podle potřeby obměňována. Například při vyšším obsahu tuků je za lapák písku zařazován lapák tuků. Obsahuje-li voda látky toxické či nerozložitelné, zařazuje se před usazovací nádrž koagulace či srážení.

Protože vyčištěná voda ze standardní technologické linky nemusí splňovat současné náročné požadavky na jakost vypouštěné odpadní vod, zařazují se do ní některé operace, souhrnně označované jako terciární čištění.



Obrázek 35: Blokové schéma standardní technologické linky čistírny městských odpadních vod

#### 4.5 Mechanické čištění

Význam mechanického předčištění spočívá v přípravě přiváděné odpadní vody pro biologickou část ČOV, ve spojení s odlučovačem dešťových vod hovoříme někdy o ochranné části ČOV.

Po mechanickém předčištění by měla být odpadní voda zbavena mechanických částic, které nemají význam pro biologické čištění, naopak svou přítomností a svými fyzikálně-mecanickými vlastnostmi působí negativně. Tyto látky mohou způsobit poškození strojních zařízení, případně ucpávání potrubí a při sedimentaci snižování účinného objemu nádrží při biologickém čištění odpadních vod. Současně by však měl být zachován podíl biologicky

rozložitelných látek. Tento nelehký úkol je někdy, většinou u menších ČOV, řešen použitím čerpadel s řezacím ústrojím, které mechanický podíl neodstraňují, nýbrž odpadní vodu před vstupem do aktivace homogenizují. Jako výhoda tohoto postupu je uváděno odstranění problému nakládání s nečistotami odstraněnými z odpadní vody. Základní fyzikální principy využívané v jednotlivých objektech mechanického čištění jsou uvedeny v tabulce 19.

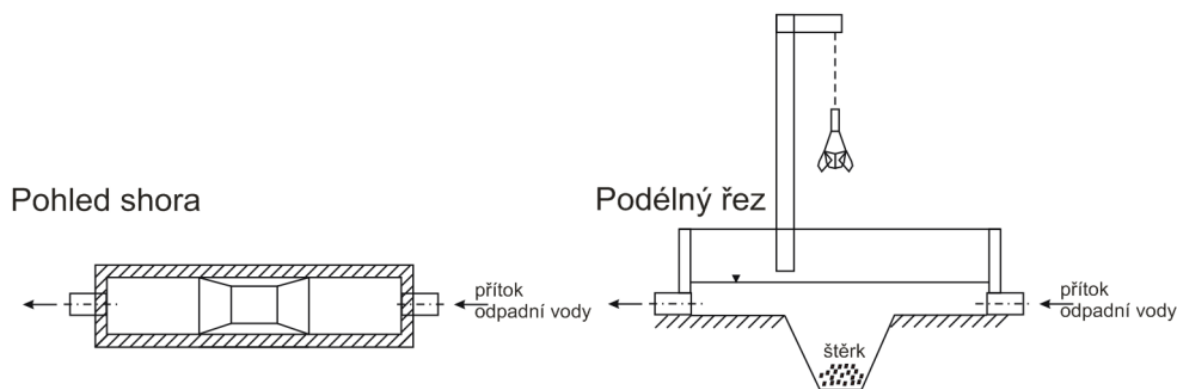
Kromě česlí patří do mechanického předčištění též zachycování sedimentů a plovoucích nečistot - v převážné většině případů je možno hovořit o lapácích šterku, používané u čistíren odpadních vod čistící odpadní vody přiváděné jednotnou kanalizační soustavou. Dále potom o lapácích písku a tuků. Tato zařízení nemusí být na ČOV použita a potom přebírá jejich funkci usazovací nádrž. Při relativně dokonalém odstranění sedimentů je naopak v některých případech možno usazovací nádrž z technologie vypustit.

Tabulka 19: Fyzikální principy uplatňované při mechanickém čištění

Princip	Používaná zařízení
<b>Cezení</b> jsou zachycovány nerozpuštěné příměsi, rozměrově větší než otvory, kterými protéká cezená voda	česle síta
<b>Usazování a zahušťování</b> využívá gravitační sílu a rozdíl hustot oddělovaných složek	lapák šterku lapák písku usazovací nádrž
<b>Vzplývání</b> využívá vztlakovou sílu a rozdíl hustot oddělovaných složek	lapáky tuků odlučovač olejů a ropných látek usazovací nádrž

### Lapáky šterku

Lapák šterku je zařízení pro zachycení velkých kusových nerozpuštěných látek sunutých ve stokové síti. Princip lapáku šterku je založen na sedimentaci nerozpuštěných látek s hustotou vyšší, než je hustota vody. Konstrukčně je lapák šterku obvykle proveden jako otevřený kanál obdélníkového průřezu (obrázek 35), jehož průtočný profil je vyšší než průtočný profil stokové sítě, která do lapáku šterku přivádí odpadní vodu. Ve středu lapáku šterku je obvykle sedimentační prostor, ve kterém jsou zachytávány nerozpuštěné látky. Sediment, šterk (frakce < 5 mm), bývá ze sedimentačního prostoru těžen drapákem s výložníkem. Vytěžený šterk bývá nejčastěji ukládán do oceloplechového kontejneru a následně je odvážen k deponování na skládku ostatních odpadů, případně předán ke zpracování oprávněné osobě.



Obrázek 36: Lapák štěrku

Lapák štěrku bývá osazován obvykle na ČOV, kde je odpadní voda přiváděna jednotnou stokovou soustavou a lze předpokládat obsah větších nerozpuštěných látek v odpadní vodě. Někdy bývají na čistírnách odpadních vod osazována technologická zařízení pro separaci nebo praní štěrku, zejména z důvodu odstranění organických látek z vytěženého štěrku.

### Česle

Zachycují hrubě dispergované látky unášené vodou. Dnes běžně používané česle by měly splňovat následující požadavky:

- jemnost čištění,
- samočištění a automatika provozu,
- propírání a doprava shrabků.

Optimální jemnost čištění od mechanických nečistot se obvykle pro komunální ČOV udává v rozmezí přibližně 3 - 12 mm (pro speciální ČOV může mít význam i čištění s jemností např. méně než 1 mm). Většina dnes používaných moderních technologických zařízení tomuto požadavku vyhovuje. Z pohledu velikosti zachytávaných částic můžeme česle rozdělit do následujících kategorií:

- hrubé (70-100 mm), obvykle ručně stírané,
- jemné (30-50 mm), stírané strojně,
- velmi jemné (0,2-5 mm), stírané strojně.

Samočištění a automatika provozu jsou klíčovým požadavkem pro technologii mechanického čištění. Zachycování mechanických nečistot by vedlo k rychlému ucpání a nutnosti pravidelného ručního čištění. Automatika provozu spočívá v tom, že systém samočištění se uvede v činnost jen v případě nutnosti - při ohrožení ucpání česlí. Výhodou je energetická úspora a menší opotřebení česlí. Princip spočívá většinou ve sledování hladiny (vzdutí při ucpání) a spuštění samočisticího mechanismu při dosažení nastavené hodnoty.



I když většina systémů česlí je samočisticí, zbývá stále manipulace se zachycenými nečistotami, tzv. shrabky, jako jedna z nejméně příjemných oblastí činnosti na ČOV. Je třeba uvést, že s jemností čištění narůstá logicky také množství zachycených nečistot. Nejmodernější zařízení jsou dnes proto vybavena zařízením na propírání, lisování a dopravu shrabků.

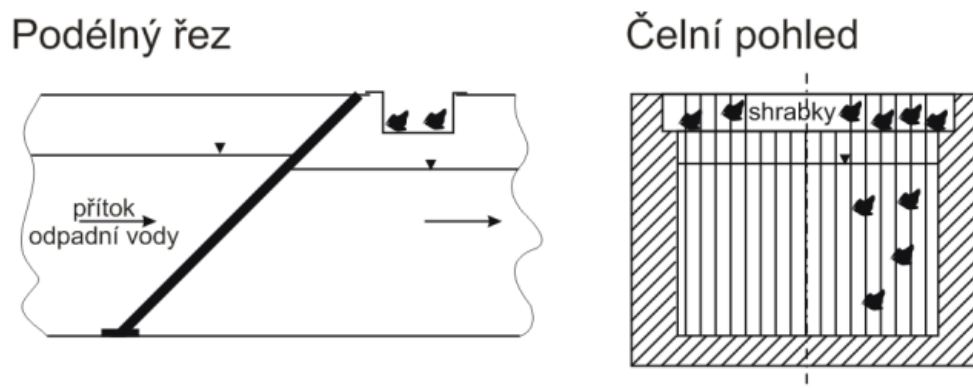
Lisováním shrabků je dosaženo jejich odvodnění, tím i zmenšení jejich objemu. Propíráním shrabků se dosahuje dalšího zmenšení jejich objemu a zlepšení hygienických vlastností, použitá voda z propírání shrabků je vracena za česle a obsahuje velké množství biologicky rozložitelných látek využitelných jako zdroj energie pro mikroorganismy v biologickém čištění.

Doplňkovými zařízeními pro manipulaci se shrabky rozumíme obvykle šnekové dopravníky. Použitím šnekových dopravníků sledujeme základní cíl, a to manipulaci se shrabky bez podílu lidské práce.

Všeobecným trendem je vyrábět česle z trvanlivých nerezavějících materiálů. Mnohdy je výhodou jejich provedení do venkovního prostředí bez nutnosti budovat provozní budovu, při zachování jejich dokonalé a bezproblémové funkce, což vede k úsporám stavebních nákladů při výstavbě nových ČOV.

### **Ručně stírané česle**

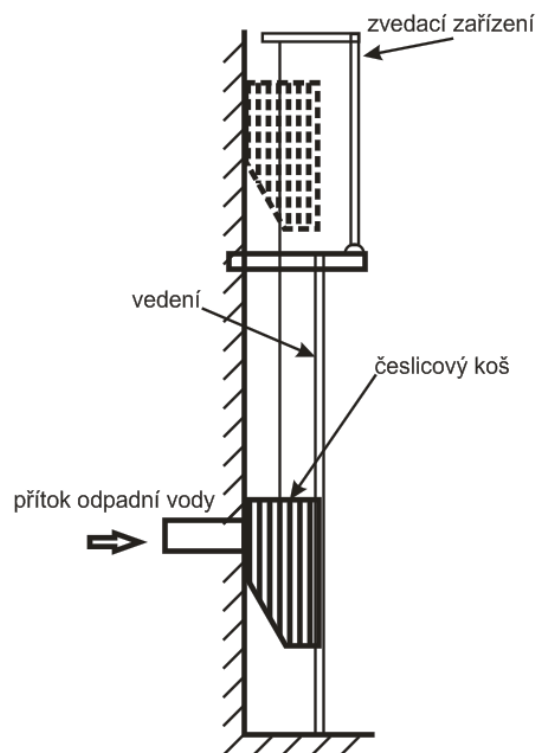
Jsou tvořeny rámy vyplněnými pruty (česlicemi), mezi kterými je různě velká mezera (průlina), ta se pohybuje v rozmezí 15-100 mm. Česle jsou instalovány do žlabů, jimiž proudí odpadní voda, s úhlem sklonu 30-60°. Shrabky jsou zachytávány na česlicích a v pravidelných intervalech ručně stírány speciálním stíracím zařízením podobným hrábím.



Obrázek 37: Česle, ručně stírané

## Česlicový koš

Česlicový koš je tvořen česlicemi s průlinami o velikosti 15-100 mm. Česlice tvoří obvykle kvádr, který je umístěn v místě přítoku odpadní vody do čerpací jímky. Primární funkcí česlicového koše je ochrana kalových čerpadel v čerpací jímce před vnosem nerozpuštěných látek, který by mohly způsobit poškození čerpadel. Vytahování česlicového koše z čerpací jímky je zabezpečeno zvedacím zařízením (elektrickým kladkostrojem nebo ručně ovládaným jeřábkem). Po vytažení česlicového koše je jeho obsah vyprázdněn otevíracím dnem. Schématicky je princip funkce česlicového koše znázorněn na obrázku 37.

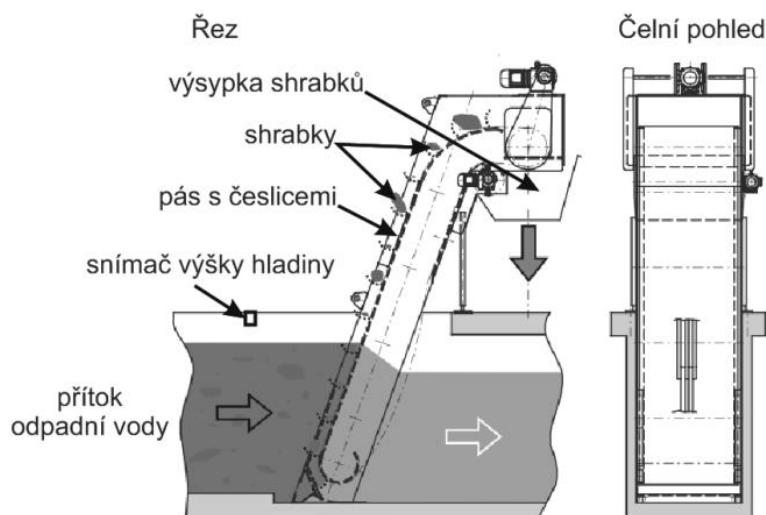


Obrázek 38: Česlicový koš

## Pásové česle

Uplatnění nacházejí na čistírnách odpadních vod, v průmyslu potravinářském, chemickém, kožedělném, na úpravách vod. Česle jsou umístěny přítokového kanálu pod úhlem  $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , odkud vynášejí zachycené látky z hloubky 0,3-10 m. Při průtoku odpadní vody česlemi dochází k zachycení nerozpuštěných látek (shrabků) na česlicovém pásu, který je tvořen paralelními prvky se svislými štěrbinami. V okamžiku zvýšení hladiny před česlemi, je tato změna registrována snímačem výšky hladiny a česlicový pás je automaticky uveden do provozu. Tímto dojde k posuvu česlicového pásu a zachycené shrabky jsou vynášeny do prostoru výsypky. Voda zbavená shrabků prochází česlemi k dalšímu stupni čištění.

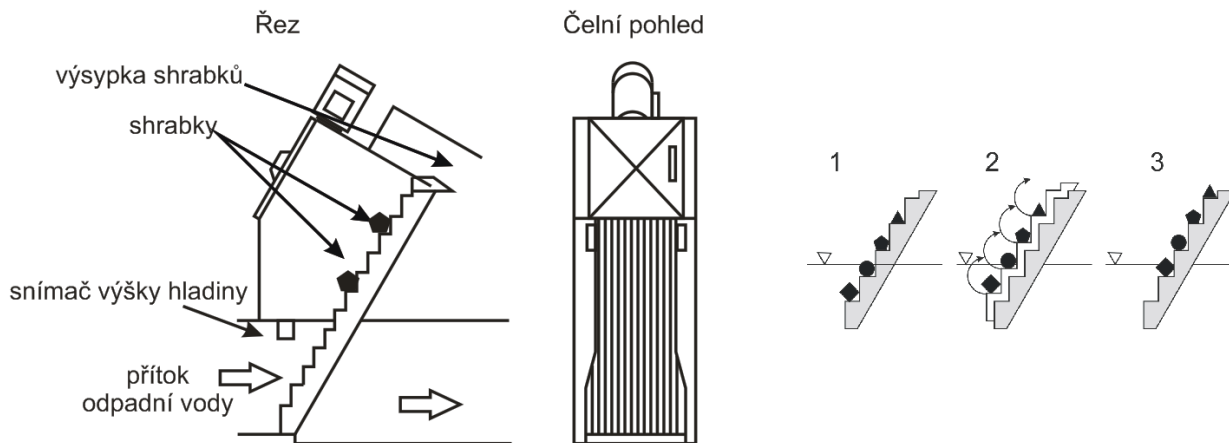
Odloučení hlavního podílu shrabků od pásu se děje samočinně vlivem vhodně tvarovaných a vedených česlic. Pohyb pásu zajišťuje elektropřevodovka přes řetězový převod a hřídel vodících kol pásu. Zachycené shrabky jsou usměrňovány výsypkou do prostoru pod česle. Jejich další doprava, event. lisování a propírání je pak záležitostí přídatných zařízení. Schéma pásových česlí je patrné z obrázku.



Obrázek 39: Pásová česle

### Step Screen česle

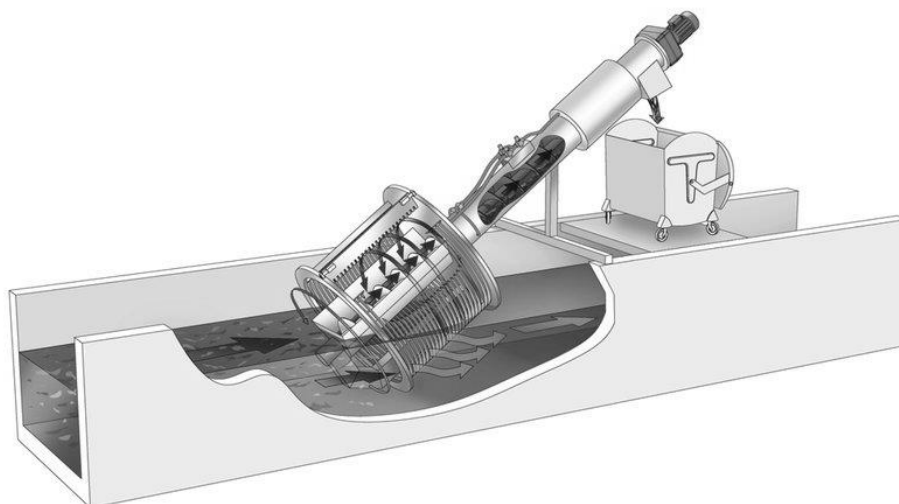
Uplatnění nacházejí zejména na větších čistírnách odpadních vod, s vyšším průtokem odpadní vody. Česle jsou umístěny do betonového žlabu pod úhlem  $70^{\circ}$ – $75^{\circ}$ . Česle jsou tvořeny lamelovými česlicemi, střídavě jedné pevné a jedné pohyblivé, které tvoří schody, na kterých se zachycují shrabky a vytvářejí filtrační koberec, který je při vzájemném pohybu lamel postupnými kroky dopravován do bodu výpadu, průlina se pohybuje obvykle v rozmezí 3-6 mm. Schematicky jsou česle stepscreen znázorněny na obrázku 39.



Obrázek 40: Step screen česle, průběh vynášení nečistot, 1-3

### **Rotační česle**

Rotační česle se skládají z válce, průměr do 3 000 mm, jehož plášť se skládá z česlic, mezi kterými mohou být různé vzdálenosti, tedy různá velikost průlin (6-10 mm). Válec česlí je instalován do žlabu, kterým je přiváděna odpadní voda, obvykle v úhlu 35° na směr proudění odpadní vody. Otevřeným koncem do nakloněného válce s česlicemi vtéká odpadní voda a v ní obsažené nerozpuštěné látky jsou zachycovány na vnitřním povrchu válce. Zanášení průlin s sebou přináší filtrační efekt, díky kterému mohou být zachyceny i částice menší než je velikost jeho průlin. Zanesení povrchu nerozpuštěnými látkami má za následek zvýšení hladiny odpadní vody před rotačními česlemi. Na základě informace ze snímače výšky hladiny dojde k sepnutí motoru, který otáčí čistícím mechanismem, který je tvořen otočným ramenem s výstupy, které zapadají do průlin mezi česlicemi. Otočením o 360° dojde k dokonalému pročištění celého vnitřního povrchu válce. Stírací mechanismus vyčistí z průlin zachycené nečistoty a zastaví se s nimi v poloze 12:00 hodin. Z tohoto místa shrabky spadnou do centrálně umístěného žlabu, ze kterého je šnekový dopravník tlačí vzhůru nakloněným tubusem až k výsypce pro shrabky. Při tomto pohybu jsou současně shrabky šnekovým dopravníkem lisovány, odvodňovány. Schematicky jsou rotační česle znázorněny na obrázku 40.

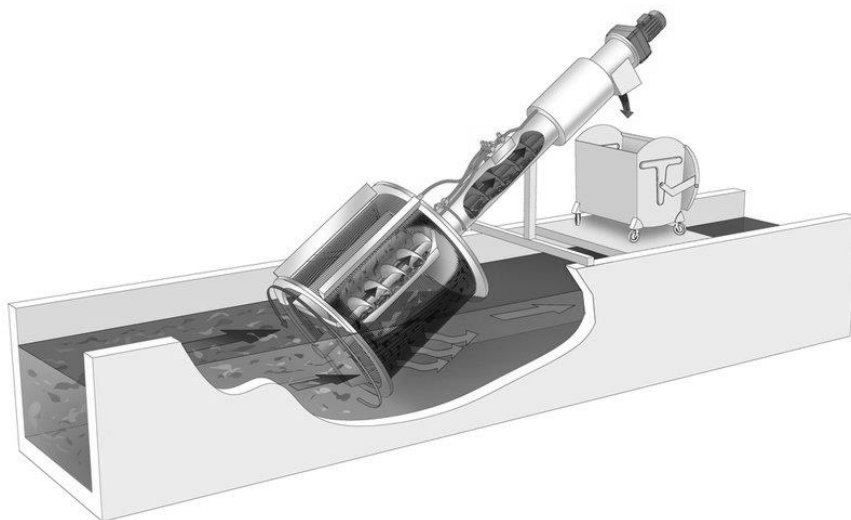


Obrázek 41: Rotační česle

### **Rotační síto**

Rotační síto se skládá z válce, průměr do 3 000 mm, jehož plášť se skládá z česlic s velikostí průlin 0,5 – 6 mm nebo je tvořen sítím s definovanou velikostí ok, 1 – 2 mm. Válec je instalován do žlabu, kterým je přiváděna odpadní voda, obvykle v úhlu 35° na směr proudění odpadní vody. Otevřeným koncem do nakloněného válce vtéká odpadní voda, nerozpuštěné

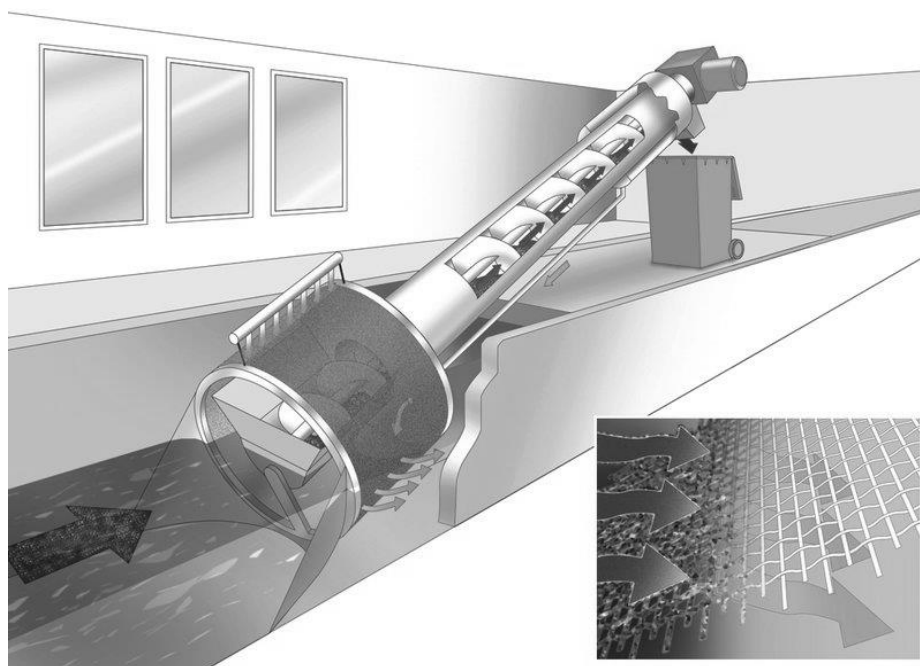
látky obsažené v odpadní vodě jsou zachycovány na vnitřním povrchu válce. Zanášení průlin mezi česlicemi nebo ok síta s sebou přináší další filtrační efekt, díky němuž mohou být zachyceny i částice menší než je velikost jeho ok, či průlin. Zanesení povrchu nerozpuštěnými látkami má za následek zvýšení hladiny odpadní vody před rotačním sítem. Na základě informace ze snímače výšky hladiny dojde k sepnutí motoru, který otáčí sítem. Síto při svém otáčení vyzvedá shrabky, které jsou čistícím lištovým kartáčem a lištou s tryskající tlakovou vodou shazovány do centrálně umístěného žlabu se šnekovým dopravníkem. Šnekový dopravník dopravuje shrabky mimo síto, při této dopravě jsou shrabky zároveň částečně odvodňovány a lisovány. Shrabky z dopravníku následně padají do přistavené sběrné nádoby nebo oceloplechového kontejneru. Schematicky jsou rotační česle znázorněny na obrázku 41.



Obrázek 42: Rotační síto

### **Ultrajemné česle**

Tato zařízení jsou velmi často využívána pro čištění průmyslových odpadních vod, principiálně fungují jako rotační síto. Velmi jemné otvory v sítu (0,5 – 1 mm) zabraňují nerozpuštěným látkám, především vláknům, aby prošly skrz síto. Velmi často je tato technologie používána jako ochrana před vnosem nerozpuštěných látek do recipientu nebo ke snížení organického znečištění. Schematicky jsou ultrajemné česle znázorněny na obrázku 42.



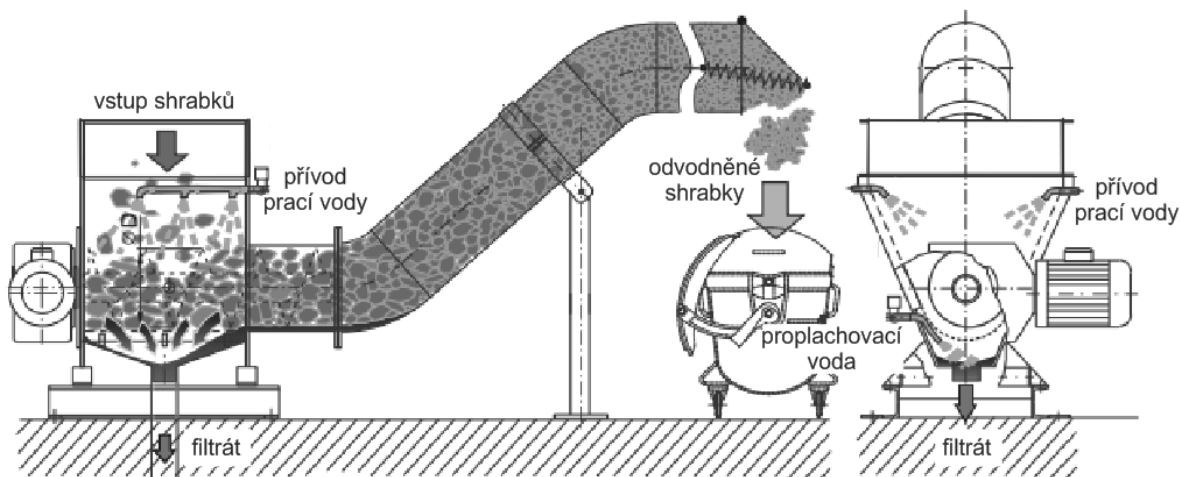
Obrázek 43: Ultrajemné česle

### **Shrabky**

Materiál zachycený na česlích se nazývá shrabky. Množství a složení shrabků kolísá podle ročního období, druhu stokové sítě, velikosti odvodňovaného území, charakteru odpadních vod. Udávané množství shrabků se pohybuje, podle druhu použitých česlí, od 0,2-10,0 m<sup>3</sup> na obyvatele a rok. Shrabky obsahují vysoké procento vody a organických látek. V katalogu odpadů jsou shrabky zařazeny jako ostatní odpad pod katalogovým číslem. Nakládání se shrabky je prováděno v souladu s jejich složením a platnou legislativou. V České republice jsou shrabky nejčastěji deponovány na skládky, využity na kompostárnách, případně spalovány. Při spalování je nutné shrabky nejdříve odvodnit lisováním na vlhkost 60 - 70 % hm, a poté spálit při teplotách vyšších než 1000 °C.

### **Pračka a lis na shrabky**

Existuje celá řada zařízení pro praní a odvodňování shrabků, které jsou provedeny jako jedno zařízení, případně probíhají procesy odděleně. Podstatou této úpravy je snížení množství organických látek ve shrabkách a snížení obsahu vody ve shrabkách. Tyto úpravy mají pozitivní vliv na obsah organických látek v odpadní vodě a dále na manipulaci a následné nakládání se shrabky. Obvykle je zařízení tvořeno komorou, do které jsou přímo od česlí pomocí dopravníků dopravovány shrabky. Pracím a lisovacím elementem je hřídelová šnekovnice, jejíž chod odvozený od elektropřevodovky. Intenzita propírání je závislá na množství přiváděné vody a na práci době. Schematicky je pračka s lisem na shrabky znázorněna na obrázku 43.



Obrázek 44: Pračka a lis na šrabky

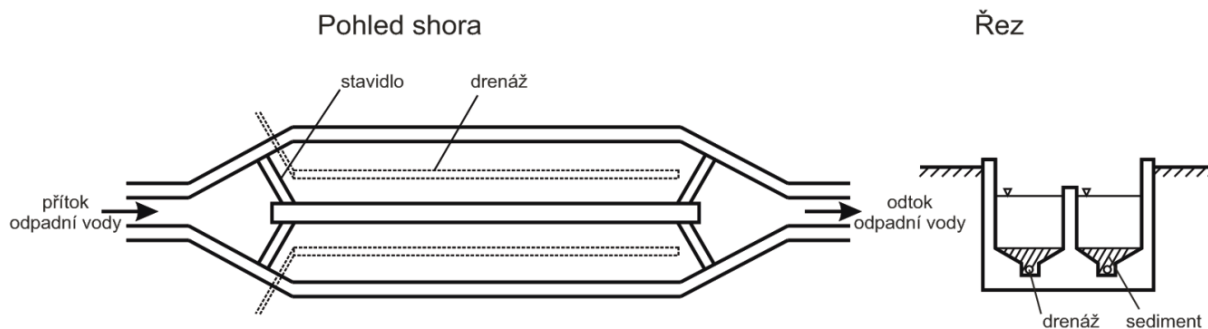
### Lapáky písku.

Lápaky písku jsou zařízení, pomocí kterých jsou z proudu odpadní vody odstraňovány anorganické částice. K oddělení písku (obvykle frakce 0,063 – 5 mm) od ostatních suspendovaných částic organické povahy, které sedimentují až v následujícím stupni mechanického čištění, usazovací nádrži, je zajištění konstantní průtočné rychlosti a přítomnost částic s hustotou vyšší než je hustota vody, tedy  $> 1000 \text{ kg/m}^3$ . Písek odstraňujeme z proudu odpadních vod proto, aby nesedimentoval a nehromadil se v dalších technologických částech čistírny odpadních vod. Dále proto, abychom ochránili strojní zařízení před abrazivními účinky tohoto materiálu. Lapáky písku jsou konstrukčně řešeny jako horizontální nebo vertikální. Vyklizení písku z lapáků je dnes u většiny čistíren odpadních vod strojní. Podle způsobu přivádění odpadní vody rozdělujeme lapáky písky na lapáky s horizontálním a vertikálním průtokem odpadní vody.

### Horizontální lapáky písku

#### *Komorový lapák písku*

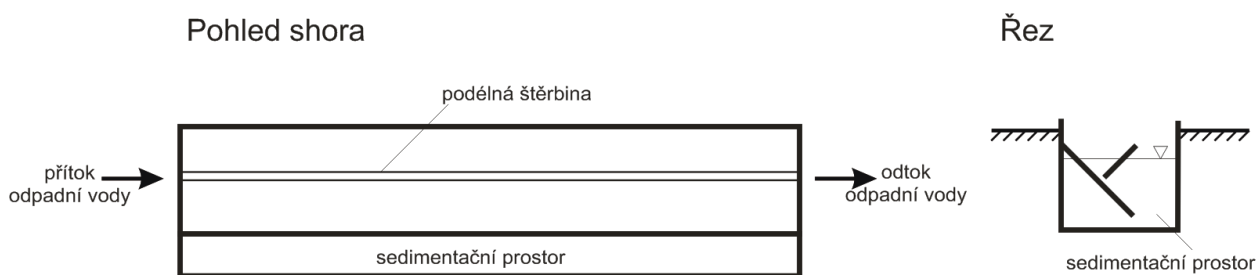
Komorový lapák písku je konstrukčně proveden jako podélná usazovací komora s akumulacním prostorem pro sedimentaci anorganických částic (písku). Vzhledem k nerovnoměrnosti přítoku odpadních vod se navrhuje několik usazovacích komor vedle sebe. Sediment je ze sedimentačního prostoru komory vyklizen ručně nebo strojově, mamutkovým čerpadlem. Při ručním vyklizení je nutno nejprve usazovací komoru uzavřít stavidly a následně odvodnit. K odvodnění je využit drenážní systém, který je umístěn na dně komory, odvedená voda je dopravena do čistícího procesu. Jakmile v komoře není odpadní voda je sediment z komory manuálně vyklizen. Stavidla jsou otevřeně a komora je opět schopna plnit funkci zachytávání sedimentu.



Obrázek 45: Komorový lapák písku

### *Štěrbínový lapák písku*

Štěrbínový lapák písku (obr. 45) je konstrukčně proveden jako žlab obdélníkového nebo trojúhelníkového průřezu, dno má takový sklon, aby i za nejmenších průtoků neklesla rychlost pod 0,15 m/s a za největších průtoků nepřekročila hodnotu 0,4 m/s. Dno žlabu je vyřešeno příčnými nebo podélnými štěrbinami, kterými písek propadá do boční šachty, odkud se těží ručně nebo čerpadlem.



Obrázek 46: Štěrbínový lapák písku

Horizontální lapáky písku jsou dnes budovány zcela ojediněle zejména díky obtížné automatizace vyklízení písku z lapáku písku nejsou na nových čistírnách odpadních vod budovány.

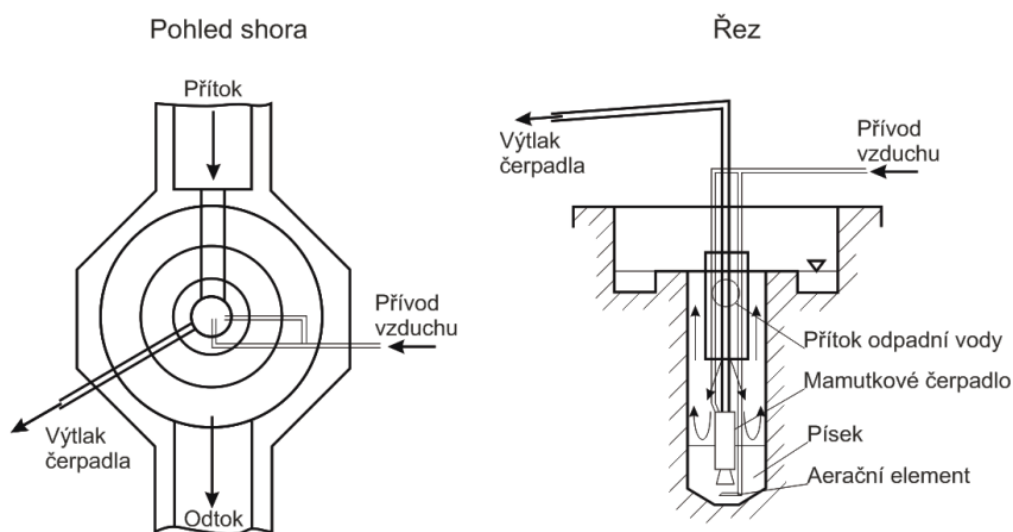
### **Vertikální lapáky písku**

#### *Vertikální lapák písku*

Vertikální lapák písku (obr. 46) je určen k zachytávání písku a hrubých nečistot. Voda natéká do lapáku přívodním potrubím, které je zaústěno do středového uklidňovacího válce, ve kterém dochází ke zpomalování proudění a nasměrování toku proti dnu lapáku. Částice písku sedimentují na dno lapáku do jeho kuželové části. Odpadní voda stoupá vzhůru průřezem lapáku a dochází ke gravitačnímu odlučování jemnějších podílů písku, přičemž musí být splněna podmínka, že vzestupná rychlost vody musí být nižší než sedimentační rychlost písku. Vzestupná rychlost ve vertikálním lapáku písku má být v rozsahu 0,017 - 0,03 m/s a



nemá být větší než 0,05 m/s při maximálním průtoku. Doba zdržení vody v účinném prostoru má být při maximálním průtoku asi 2 minuty a střední doba zdržení nemá být kratší než 30 s. Voda zbavená anorganických příměsí odtéká přes přelivnou hranu do odtokového prstence, ze kterého vede odtokové potrubí. Zachycený písek se z lapáku písku odčerpává mamutkovým čerpadlem, nebo hydrodynamickým čerpadlem do nádoby na písek, kde se odděluje voda od písku a samotná voda odtéká zpět do lapáku písku. U dna lapáku písku je umístěn aerační element, aby se zabránilo usazování písku a ucpání mamutkového čerpadla, nebo hydrodynamického čerpadla. Aerace probíhá cyklicky 10-15 minut za hodinu, nebo při odčerpávání zachycených písků. Tento lapák písku se běžně používá na malých ČOV.

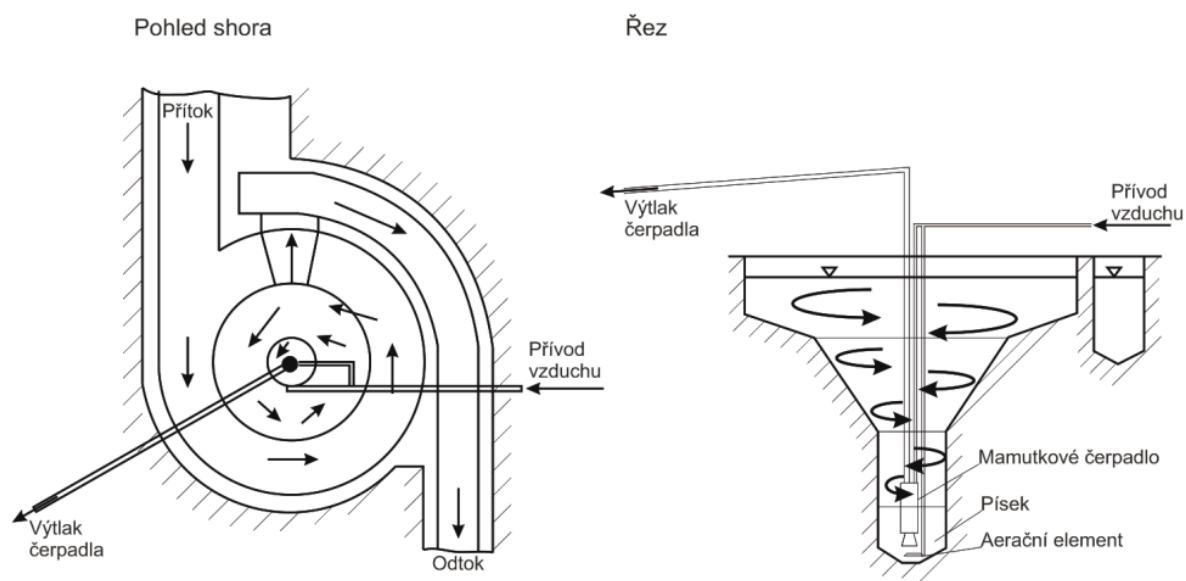


Obrázek 47: Vertikální lapák písku

#### *Vírový lapák písku*

Vírový lapák písku (obr. 47) je betonová nádrž, která má v první třetina kónický tvar a zbylé dvě třetiny mají válcový tvar. Přiváděná odpadní voda vtéká do lapáku písku tangenciálně, což způsobí rotaci odpadní vody. Vlivem odstředivých sil jsou částice s vyšší hustotou než má odpadní voda unášeny ke stěně lapáku písku, po které následně klesají ke dnu lapáku. Písek je ze dna těžen čerpadlem. V závislosti na dodavateli mohou být vírové lapáky písku dodávány pro minimální průtok 10 - 80 l/s a maximální průtok 80 - 650 l/s. Vírový lapák písku se navrhuje na dobu zdržení odpadní vody 25 - 40 s pro maximální bezdeštný průtok. Optimální rychlosti by měly být na přítoku 0,5 - 0,6 m/s a na odtoku 0,4 až 0,6 m/s. U dna lapáku písku je umístěn aerační element, aby se zabránilo usazování písku a ucpání mamutkového čerpadla, nebo hydrodynamického čerpadla. Aerace probíhá cyklicky 10-15 minut za hodinu,

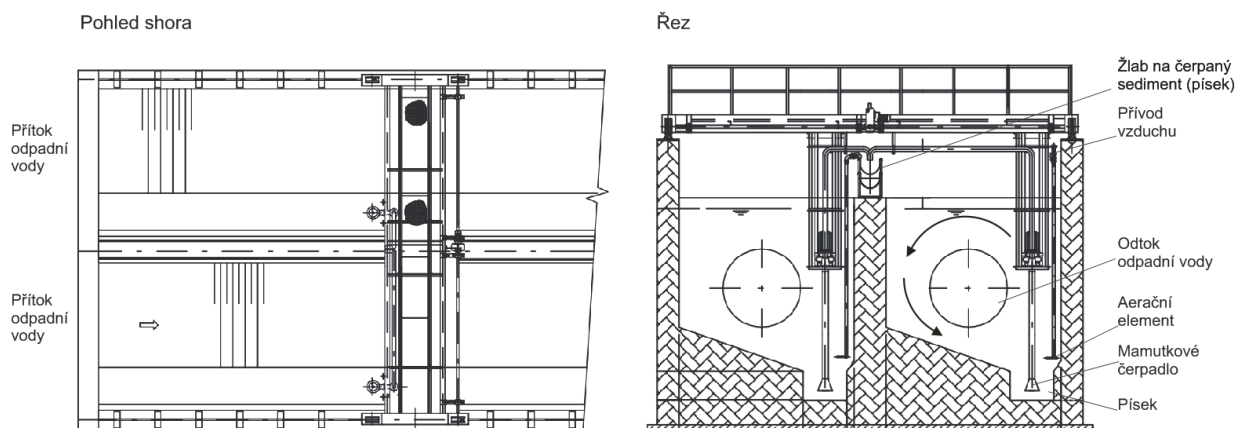
nebo při odčerpávání zachycených písků. Tento lapák písku se běžně používá na středních ČOV.



Obrázek 48: Vírový lapák písku

#### *Provzdušňovaný lapák písku*

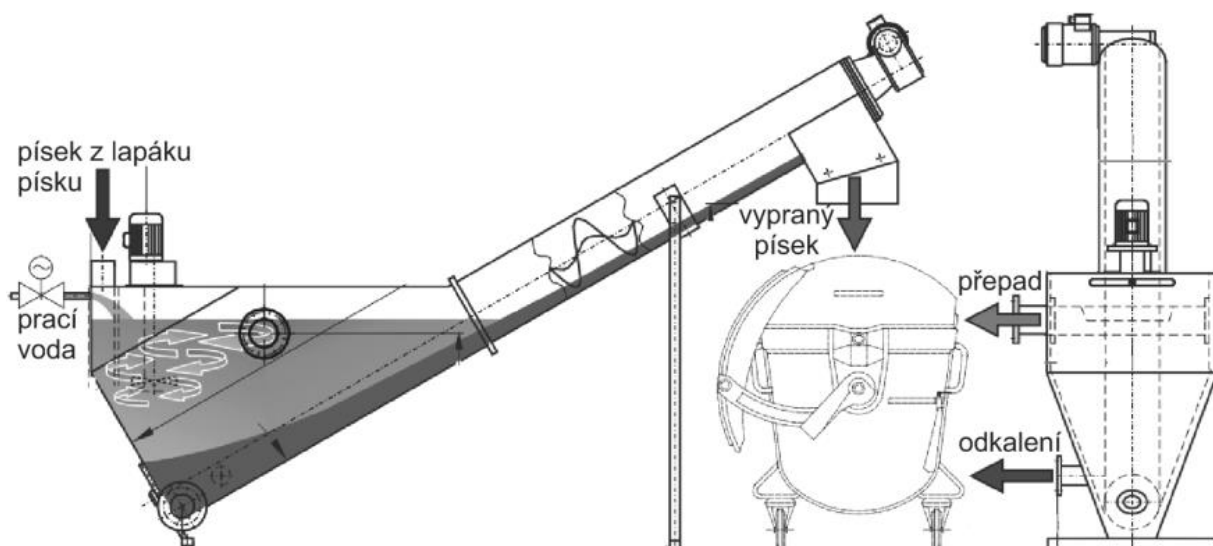
Konstrukčně je provzdušňovaný lapák písku (obr. 48) proveden jako horizontální žlab, v němž je příčné cirkulace odpadní vody dosaženo provzdušněním podél jedné strany žlabu. Rychlost příčné cirkulace ve vzdálenosti 5 - 10 cm nade dnem by se měla pohybovat v rozpětí 0,20 - 0,35 m/s. Provzdušněním se v lapáku písku vytváří v příčném profilu rotace kapaliny, což přispívá k lepšímu oddělení částic organického původu. Proto je kvalita písku z těchto lapáků písku dobrá, s nízkým obsahem organických látek. Obvykle je na čistírnách odpadních vod řazeno více žlabů vedle sebe. Délky žlabů mohou být různé, čímž se lapák písku může přizpůsobit různému hydraulickému zatížení. Podle okamžitého průtoku čistírnou může být v provozu jeden nebo oba žlaby lapáku písku. Typové šířky jednotlivých žlabů mohou být 2,4 m, 3 m a 3,6 m. Délky žlabů mohou být libovolné, obvykle se pohybují od 12 m u menších šířek až po 48 m u nejširších lapáků. Doba zdržení vody by měla být 5-6 minut a podélná rychlost proudění 0,1-0,2 m/s. K těžení písku jsou využívána čerpadla, mamutková nebo hydrodynamická, které jsou umístěny na pojízdných plošinách, pohybujících se podélně po lapáku písku. Tento lapák písku se běžně používá na středních a velkých ČOV. Je vysoce účinný a zároveň umožňuje flotaci plovoucích látek, především tuků na hladinu odkud mohou být odstraněny.



Obrázek 49: Provdzušňovaný lapák písku

### Pračky písku

Pračka písku (obr. 49) je zařízení sloužící k oddělení organických částí, které mohou být obsaženy v písku, který je vytěžen z lapáku písku. Pračka písku je obvykle provedena jako ocelová nádoba různého tvaru s vnitřní vestavbou, míchacím a vyhrnovacím mechanismem, přívodem a odvodem prací vody. Znečištěný písek je mícháním udržován ve vířivé vrstvě, kde dochází k oddělování částic písku od organických podílů. Při tomto procesu je využíváno gravitačních a vířivých sil, přičemž se hmotnostně rozdílné částice odlučují a soustřeďují do vzájemně opačně umístěných prostorů. Organické podíly s prací vodou jsou odváděny dále do čistícího procesu, částice propraného písku jsou po usazení vynášeny vyhrnovacím šnekem k výstupnímu otvoru.



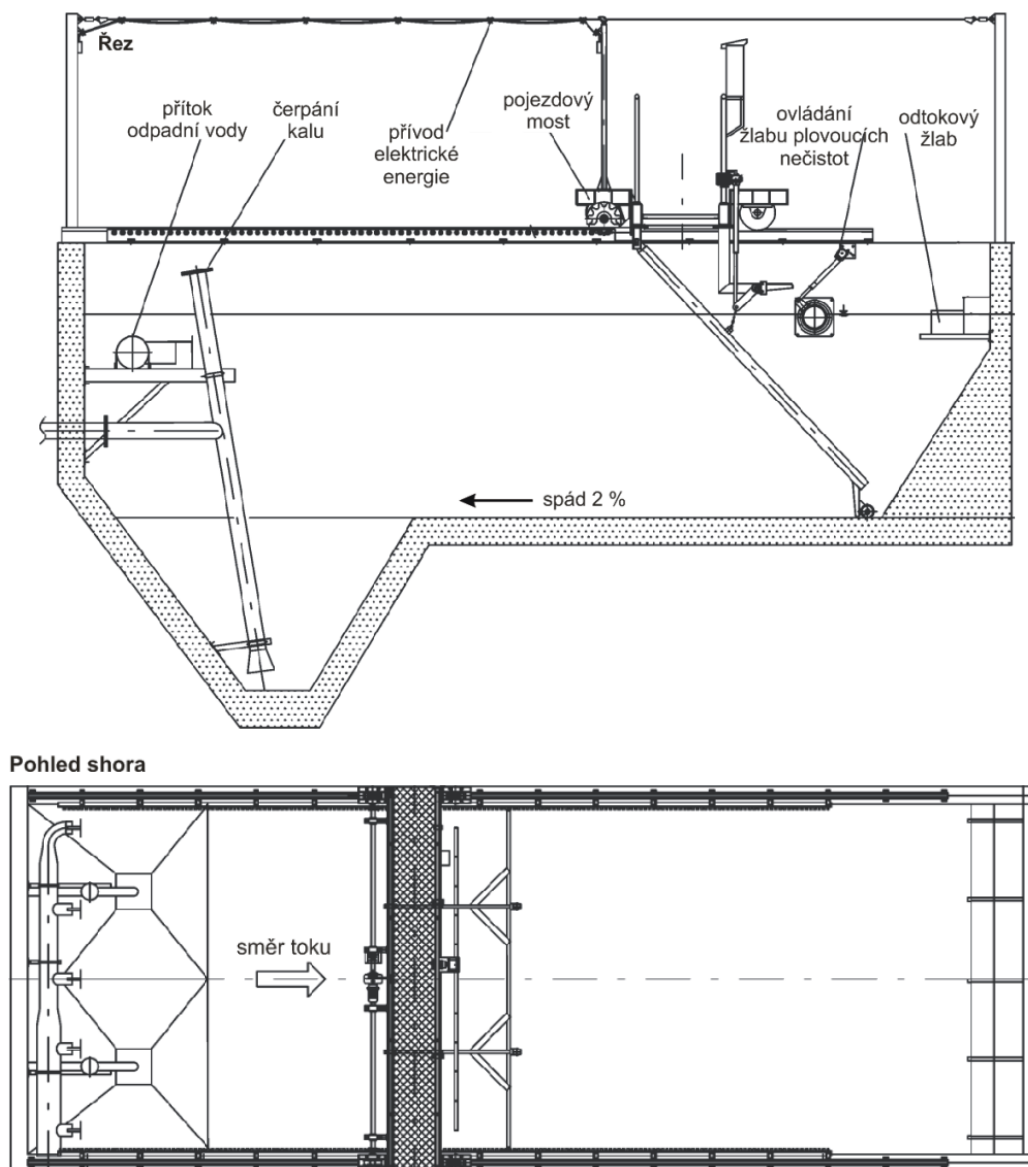
Obrázek 50: Pračka písku

## **Usazovací nádrže.**

Usazovací nádrže slouží k odstraňování suspendovaných částic menších než 0,2 mm prostou sedimentací, sediment nazýváme primární kal. Jelikož suspendované látky v městských odpadních vodách podléhají koagulaci, navrhují se usazovací nádrže nejen podle povrchového hydraulického zatížení, ale i podle doby zdržení odpadní vody v usazovací nádrži. Protože při uklidnění proudu vody v nádrži dochází i k oddělení plovoucích nečistot, což jsou nejčastěji tuky a oleje, jsou usazovací nádrže vybaveny i zařízením pro stírání hladiny. Podle průtoku odpadní vody dělíme usazovací nádrže na nádrže s horizontálním a vertikálním průtokem. Podle tvaru potom na čtvercové, obdélníkové a kruhové, dále se budeme zabývat dnes nejčastěji používanými druhy usazovacích nádrží.

### *Podélná usazovací nádrž*

Podélné usazovací nádrže s horizontálním průtokem (obr. 50) jsou obvykle betonové nádrže obdélníkového tvaru. Dno nádrže může být vodorovné nebo vyspádované směrem k sedimentačnímu prostoru u jednoho okraje nádrže, obvykle na přítoku odpadní vody. Odpadní voda protéká usazovacím prostorem po délce nádrže směrem k odtokovému žlabu. Na dně nádrže, obvykle v místě přítoku odpadních vod je umístěn sedimentační prostor. V sedimentačním prostoru jsou akumulovány suspendované látky, které jsou do tohoto prostoru přiváděny stíracím zařízením dna. V sedimentačním prostoru může docházet vlivem hydrostatického tlaku k zahušťování sedimentu (primárního kalu), zároveň je z tohoto prostoru kal odčerpáván kalovými hydrodynamickými čerpadly. Usazovací nádrž bývá vybavena pojízdným mostem, který pojíždí nad usazovací nádrží. Kola mostu pojíždí po kolejnicích na okraji nádrže. Vlastní pohon může být přímo jedním pojezdovým kolem na každé straně mostu nebo nepřímo pastorkem a ozubenými hřebeny umístěnými vedle kolejnic podél nádrže. Na mostu je umístěno zařízení pro stírání hladiny, prostřednictvím kterého jsou z hladiny odstraňovány látky plovoucí na hladině k dalšímu zpracování. Na stírání hladiny navazuje zařízení pro odběr plovoucích nečistot, které může být řešeno jako naklápěcí válec nebo jako řetězový shrabovák, který shrabuje nečistoty z hladiny do pevného žlabu šířky do 1 m. Odtokové žlaby mohou být umístěny na konci nádrže nebo protaženy podél boční stěny nádrže, a to s ohledem na hydraulické zatížení nádrže. Obvyklé parametry těchto nádrží mohou být následující, šířka 4-12 m délka 12-60 m, volbě rozměrů nádrže musí předcházet technologický výpočet.

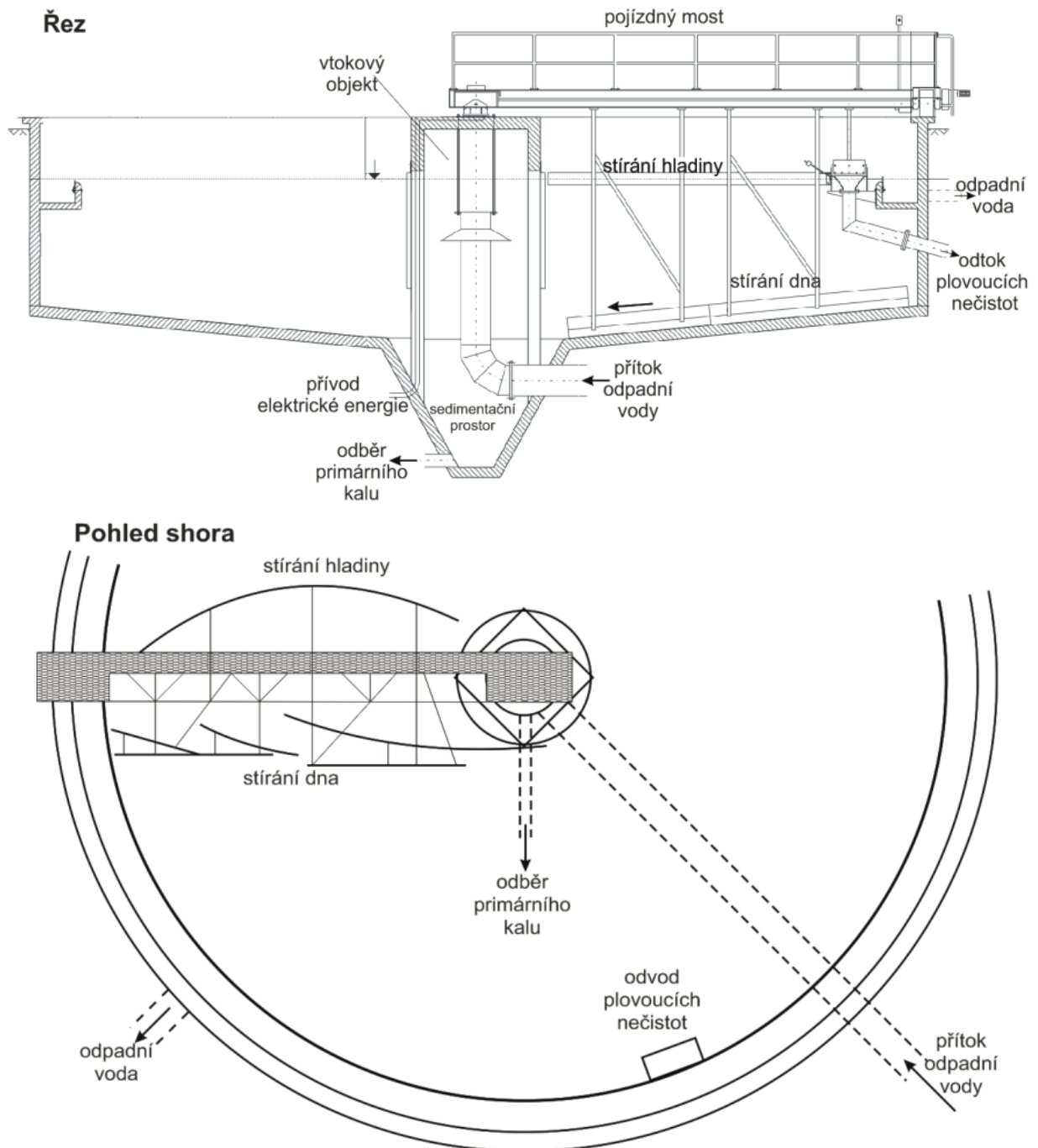


Obrázek 51: Podélná usazovací nádrž

### *Kruhová usazovací nádrž*

Kruhové usazovací nádrže s horizontálním průtokem (obr. 51) jsou betonové nádrže kruhového tvaru. Dno nádrže je vyspádováno směrem ke středu nádrže. Odpadní voda je do nádrže přiváděna potrubím do vtokového objektu, který je umístěn ve středu nádrže. Vtokový objekt je osazen česlicemi, které zabraňují narušení sedimentace, která probíhá v sedimentačním prostoru nádrže. Odpadní voda protéká nádrží směrem od středu k obvodu, kde přepadá přes pilový přepad do kruhového sběrného žlabu. K zabezpečení stírání dna i hladiny jsou kruhové usazovací nádrže osazeny pojízdným mostem s pohonem ve střední části pevného mostu, s pohonem pojezdovými koly nebo nepřímo pastorkem a ozubenými hřebeny umístěnými vedle kolejnic na obvodu nádrže. Plovoucí látky jsou během otáčení

stíracího zařízení postupně dopravovány k obvodu stíracího ramena, které končí kyvným plechem opatřeným gumovým stěračem. Při přechodu přes jímku jsou nečistoty shrnuty do šachty pro plovoucí nečistoty. Sediment, primární kal, je dopravován od obvodu nádrže k jejímu středu, odkud je gravitačně nebo čerpadly dopravován k dalšímu zpracování. Obvyklé parametry těchto nádrží mohou být následující, hloubka 2-3 m průměr 10-60 m i více, volbě rozměrů nádrže musí předcházet technologický výpočet.

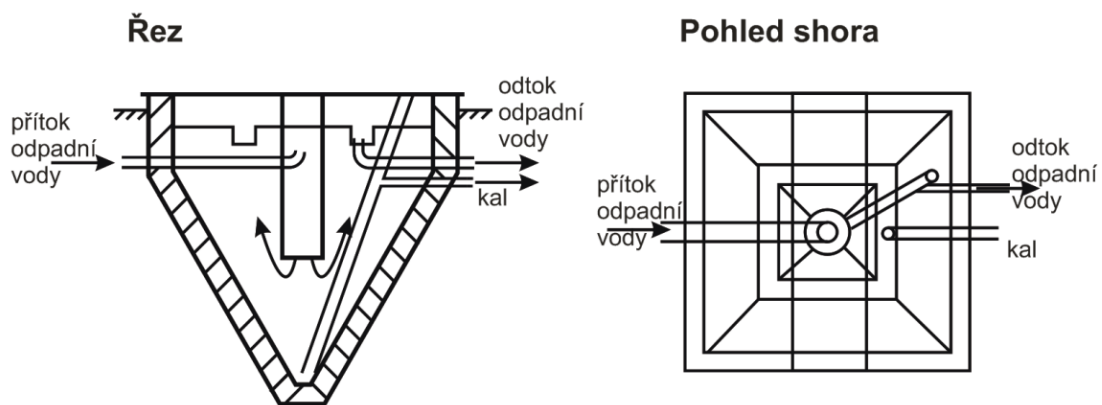


Obrázek 52: Kruhová usazovací nádrž

### Vertikální usazovací nádrž

Vertikální usazovací nádrže mohou mít kruhový nebo obdélníkový půdorys. Odpadní voda natéká do středového válce a protéká jím směrem ke dnu. Nad dnem dojde ke změně směru proudění odpadní vody o 180°. odpadní voda protéká usazovacím prostorem směrem vzhůru ke sběrným žlabům s pilovým přepadem. Sediment (primární kal) je shromažďován v kalovém prostoru, odkud je odváděn gravitačně nebo čerpadlem.

Obvyklé parametry těchto nádrží mohou být následující, hloubka 4-6 m a čtvercový půdorys o straně 3-6 m, volbě rozměrů nádrže musí předcházet technologický výpočet. S výhodou se používaly na malých čistírnách odpadních vod pro jednoduchou údržbu a malou zastavěnou plochu.



Obrázek 53: Vertikální usazovací nádrž

### Technologické parametry usazovacích nádrží

Povrchové hydraulické zatížení nádrže, ( $v$ )

$$v = \frac{Q}{A_u} \text{ [m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (12-8)$$

kde:

$Q$  - průtok odpadní vody usazovací nádrží, [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$A_u$  - plocha usazovací nádrže (plocha hladiny), [ $\text{m}^2$ ]

V nádrži se pak zachytí ty částice, pro jejichž usazovací rychlost  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] platí:

$$v = v \quad (12-9)$$

Doba zdržení v usazovací nádrži, ( $\Theta$ )

$$\Theta = \frac{V}{Q} \cdot \eta \text{ [s]} \quad (12-10)$$

kde:

V - je objem nádrže, [m<sup>3</sup>]

Q - je průtok odpadní vody usazovací nádrží, [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

η - hydraulická účinnost [-], 0,4-0,5 pro kruhové nádrže, 0,4-0,6 pro podélné nádrže, 0,7-0,8 pro čtvercové vertikální nádrže

Tabulka 20: Technologické parametry usazovacích nádrží

Úmístění usazovacích nádrží	Střední doba zdržení v hodinách při průtoku		Hydraulické zatížení plochy (v) v [m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ] při průtoku	
	Q <sub>d</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>d</sub>	Q <sub>max</sub>
Před biofiltry	2,0-4,0	1,0	0,7-1,4	2,5
Před aktivací	1,0-3,0	0,5	1,0-2,8	5,0

### Lapáky tuků a olejů.

Pokud je koncentrace tuků a olejů v odpadní vodě taková, že k jejich zachycení nepostačuje usazovací nádrž, nebo tam, kde není usazovací nádrž instalována je nutno zařadit lapáky tuků a olejů. Tyto látky snižují účinnost biologického čištění i dočištění v tocích, zejména zhoršením přestupu kyslíku do vody a do funkční směsné kultury. Princip odlučovačů tuků a olejů je opačný k sedimentačním nádržím. Odpadní voda se přivádí ke dnu separační nádrže, po zmenšení průtočné rychlosti dojde k oddělení tuků a olejů z vody. Hromadí se u hladiny, kde jsou stírány. Proces lze urychlit zavedením tlakového vzduchu. Tukové částice se nabalují na vzduchové bubliny a jsou vynášeny na povrch v podobě pěny. Pokud jsou tuky a oleje v emulgované formě, je nutno nejprve emulze chemicky deemulgovat. Poté je vhodnou separační operací tlaková flotace.

### 4.6 Biologické čištění.

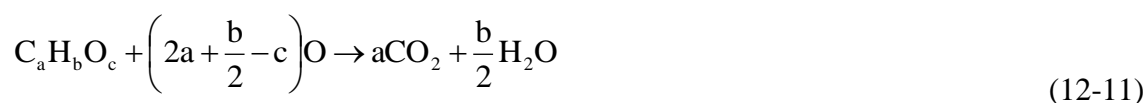
Při biologickém čištění je užívána činnost tzv. funkční polykultury, která je tvořena směsí heterotrofních aerobních i fakultativně anaerobních bakterií, autotrofních bakterií, přítomny jsou i plísně, houby kvasinky, prvoci, vířníci a červi. Kvalitativní i kvantitativní složení polykultury je dáno složením odpadní vody i parametry procesu (doba zdržení a zatížení biomasy).



Znečišťující látky v odpadní vodě jsou mikroorganismy využívané jako substrát, který je z části oxidován na jednoduché sloučeniny  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  a částečně využit pro tvorbu nové biomasy, tuto rovnici můžeme zapsat následovně, organické sloučeniny +  $\text{O}_2$  + nutriety  $\rightarrow$   $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  + biomasa. Produkce nové biomasy se běžně pohybuje v rozmezí  $0,3-0,8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (sušina biomasy na odstraněnou  $\text{BSK}_5$ ). Na syntézu biomasy je též spotřebován dusík a fosfor obvykle v poměru  $\text{BSK}_5 : \text{N} : \text{P} = 100 : 5 : 1$ .

#### 4.7 Procesy probíhající při biologickém čištění odpadních vod

Oxidace organických látek



##### *Nitrifikace*

Nitrifikace probíhá ve dvou stupních. V prvním stupni je amoniakální dusík oxidován činností mikroorganismů na dusitany. Ve druhém stupni jsou vzniklé dusitany oxidovány mikroorganismy na dusičnany. Obě skupiny mikroorganismů jsou litotrofní a jako zdroj uhlíku potřebují oxid uhličitý. Nitrifikace probíhá podle následujících rovnic.



sumárně



Podle rovnice 12-11 se na oxidaci  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  spotřebuje 3,45 g kyslíku, podle rovnice 12-12 1,14 g kyslíku.

##### *Denitrifikace*

Jedná se o odbourání organické hmoty za současné redukce dusičnanů a dusitanů na oxid dusný nebo plynný dusík. Oxidované formy dusíku jsou organotrofními mikroorganismy využívány asimilačně i disimilačně. Proces nitrátové asimilace je redukce na amoniak za účelem syntézy hmoty. Podstatou procesu nitrátové disimilace (respirace) je využití dusičnanového dusíku jako konečného akceptoru elektronů místo kyslíku.

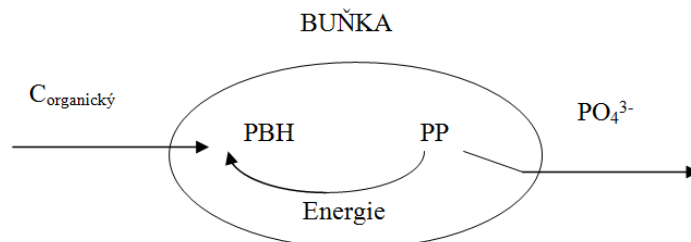


Dusičnanový nebo dusitanový dusík je akceptorem elektronů při anoxické respiraci, má tedy stejnou úlohu jako molekulární kyslík při omické respiraci. U dusičnanů ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) přijímá

dusík pět elektronů, u dusitanů ( $\text{NO}_2^-$ -N) tři elektrony při redukci na plynný dusík. Dusičnanový dusík je tedy ekvivalentní 2,5 atomům kyslíku a dusitanový dusík 1,5 atomu kyslíku.

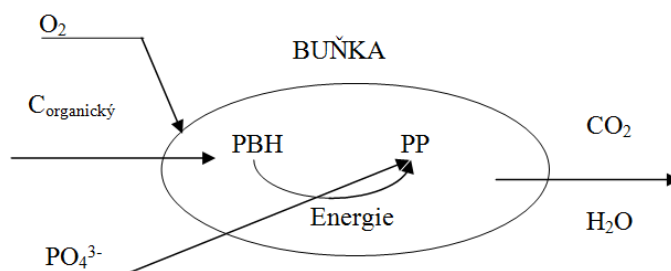
### *Odstraňování fosforu*

Biologické odstraňování fosforu je založeno na schopnosti některých mikroorganismů aktivovaného kalu akumulovat fosfor ve formě polyfosfátů. Obecně se tento typ bakterií označuje jako PP bakterie. Pro tento pochod je nutno, aby buňky mikroorganismů měly k dispozici specifické uhlíkaté sloučeniny, hlavně kyselinu octovou (AA), případně jako rezervní látku kyselinu poly-beta-hydroxymáseľnou (PBH). Princip spočívá v tom, že aktivovaný kal je smíchán s odpadní vodou v anaerobním reaktoru. V anaerobních podmínkách vznikají činností fermentativních bakterií z organických látek mastné kyseliny, hlavně pak kyselina octová. Vzniklé nižší mastné kyseliny jsou pak využívány PP bakteriemi, přitom potřebná energie pro transport do buněk se získává hydrolýzou akumulovaných polyfosfátů. Uvnitř buněk je z nižších mastných kyselin syntetizována PHB, která je pak využívána jako endogenní substrát. Tento proces může při vysokých koncentracích AA probíhat i v anoxických případně oxických podmínkách.



Obrázek 54: Základní pochody v anaerobním prostředí

Po anaerobní fázi musí být aktivovaný kal v oxických nebo anoxických podmínkách. V těchto podmínkách slouží akumulovaná PBH jako zdroj organického uhlíku pro syntézu buněčné hmoty PP bakterií a současně jako zdroj energie pro syntézu polyfosfátů.

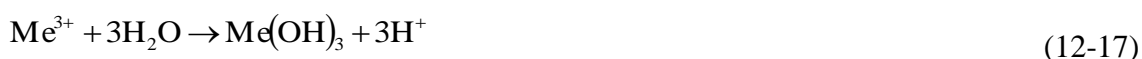


Obrázek 55: Základní pochody v oxickém prostředí

Díky velmi složitým požadavkům mikroorganismů na prostředí bývá fosfor velmi často odbouráván fyzikálně-chemickými metodami. Tyto metody jsou založeny na srážení fosforu v odpadní vodě sloučeninami kovů, jako jsou vápník, hliník a železo při vzniku nerozpustných fosforečnanů kovů, které jsou potom součástí přebytečného kalu. Srážení lze popsat obecnými rovnicemi.



Současně s touto reakcí probíhá tvorba hydroxidů.



kde:

Me - je obecný kov

#### 4.8 Způsoby aerace aktivačních nádrží

Aby aerobní biologické procesy mohly probíhat, je nutné zajistit přísun kyslíku do aktivační směsi. Pro optimální poměry je nutno zajistit aby rychlost přísunu kyslíku byla větší nebo rovna rychlosti jeho spotřeby.

##### *a) pneumatická aerace (stlačeným vzduchem)*

Vzduch je vháněn kompresorem ke dnu nádrže, kde je distribuován do vody děrovanými trubkami, rošty, nebo různě tvarovanými porézními elementy z keramiky či plastů. Tyto aerátory se dělí na hrubo, středně a jemnobublinné. Velikost bublin se pohybuje od 2 do 10 mm. Většina čistíren dnes procuje s jemnobublinnými aeračními elementy a to zejména z důvodu lepšího využití kyslíku mikroorganismy.

##### *b) mechanická aerace*

Voda je sycena prostupem kyslíku hladinou, která je mechanicky čeřena. Aerátory jsou buď s osou vertikální (aerační turbíny) nebo s osou horizontální (aerační válce, kartáče). Tyto systémy jsou dnes na ústupu, zejména díky rozmachu jemnobublinné aerace, které nemohou mechanické aerátory svými provozními parametry konkurovat.

##### *c) kombinovaná aerace*

Pro tuto aeraci jsou využívána zařízení pracující na principu ejektoru, či kombinace tlakového vzduchu vháněného pod turbínu. Tyto systémy nejsou v České republice významně zastoupeny.

##### *d) použití čistého kyslíku*

Je určeno především pro čištění některých průmyslových odpadních vod (celulóžky apod.).

Okysličovací schopnost daného aeračního zařízení lze kvantitativně vyjádřit oxygenační kapacitou, která se stanovuje experimentálně. Oxygenační kapacita je definována jako množství kyslíku, které zařízení dodá do jednotkového objemu nádrže za jednotku času při počáteční nulové koncentraci rozpuštěného kyslíku, je udávána v  $\text{kg} \cdot \text{m}^3$  za den.

Tabulka 21: Oxygenační kapacita při různých způsobech aerace

Způsob aerace	Oxygenační kapacita
pneumatická hrubobublinná	1,2-2,4
pneumatická středněbublinná	0,2-3,0
pneumatická jemněbublinná	2,6-6,9
mechanická	2,0-7,0
Kombinovaná	1,0-2,5

### Míchání aktivačních nádrží

Míchání v procesu aktivovaného kalu je jeden z nejdůležitějších faktorů při návrhu a jeho význam je často podceňován. Pro dobrou funkci anoxických a anaerobních nádrží je základní podmínkou. Míchání je nutno považovat za jeden z návrhových parametrů procesu v aktivačních čistírnách odpadních vod. Příčinou problémů s nedokonalým mícháním může být celá řada. Nejčastějším důvodem je podcenění potřebné rychlosti pro udržení kalu ve vznosu, nebo podcenění ztráty rychlosti v systému. Jakákoli překážka v aktivační nádrži působí nepříznivě na proces míchání.

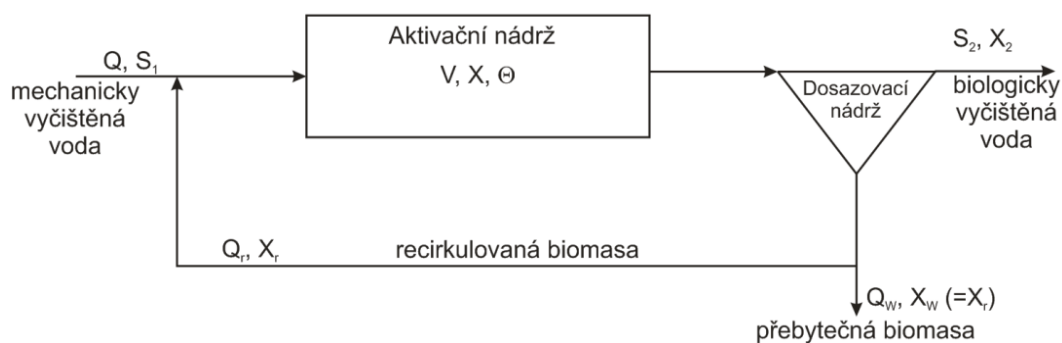
Návrh aktivační nádrže ovlivňuje požadované rychlosti vlivem tvaru a distribucí v objemu nádrže a povolené množství kalu k usazení. Všechny nádrže mají slabá místa, kde jsou rychlosti a turbulence pod hranicí podmínek pro udržení ve vznosu (ohyby, rohy, za rozdělovacími zdmi). Důležitým faktorem je umístění odtoku. Odtok u hladiny způsobí, že těžké částice, které se jen stěží udržují ve vznosu, se budou akumulovat v systému. Koncentrace těchto částic bude vzrůstat a tím bude vzrůstat množství neaktivního kalu v systému a sedimenty na dně nádrže.

Míchání je navrhováno za účelem maximalizace aktivního objemu, aktivního kontaktu a aktivního času zdržení. U zabezpečení aktivního objemu je minimální požadavek, že se kal nebude usazovat. Míchací systém však musí být navržen pro uvedení kalu do vznosu po případném výpadku míchání. Jako návrhový parametr je užívána minimální rychlost. Obvyklá hodnota je  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Je nutno také uvažovat z konfigurací, která ovlivňuje turbulenci. Turbulence, která je vytvářena míchadly, ohyby a dalšími překážkami, způsobuje udržení kalu ve vznosu i za menších rychlostí. Míchací systém je praktické navrhovat na průměrnou

rychlost. Distribuce rychlostí je řízena geometrií nádrže a míchadla mohou být charakterizována jako bodové zdroje. To znamená, že vždy budou v nádrži oblasti, kde rychlost bude nižší nebo dokonce záporná. Volba návrhových kritérií míchacího systému je velmi komplikovaná. Zejména efekt aerátorů, míchadel, jejich umístění vzhledem k překážkám a ohybům může způsobit neočekávané ztráty v systému. Při stanovení minimální rychlosti je nutno vzít v úvahu charakteristiky odpadní vody a aktivovaného kalu. Přesný návrh může ušetřit až 50 % investičních a provozních nákladů nebo na druhé straně investice nutné pro napravení špatné funkce ČOV.

#### 4.9 Aktivační proces

V aktivačním procesu jsou nutriety (C,N,P) biologickými procesy transformovány funkční polykulturou, která je kultivována v suspenzi a nazývá se aktivovaný kal, na konečné produkty čištění. V principu je to kontinuální kultivace s recyklem, která je schematicky znázorněna na obrázku 55.



Obrázek 56: Schema toku při aktivačním procesu

#### Základní technologické parametry aktivačního procesu

Hydraulická doba zdržení ( $\Theta$ )

$$\Theta = \frac{V}{Q} \text{ [s]} \quad (12-18)$$

kde:

V - je objem nádrže [ $\text{m}^3$ ]

Q - je množství přitékající odpadní vody [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Doba zdržení směsi ( $\Theta_s$ )

$$\Theta_s = \frac{V}{Q + Q_r} = \frac{\Theta}{1 + R} \text{ [s]} \quad (12-19)$$

kde:

V - je objem nádrže [m<sup>3</sup>]

R - je recirkulační poměr  $R = \frac{Q_r}{Q}$  [-]

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

Q<sub>r</sub> - je množství přitékajícího vratného kalu (recirkulace) [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

Θ - hydraulická doba zdržení [s]

Objemové látkové zatížení (B<sub>v</sub>)

$$B_v = \frac{Q \cdot S_1}{V} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-20)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

S<sub>1</sub> - je hmotnostní koncentrace složky 1 na přítoku (BSK<sub>5</sub>) [kg·m<sup>-3</sup>]

V - je objem nádrže [m<sup>3</sup>]

Látkové zatížení biomasy-kalu (B<sub>x</sub>)

$$B_x = \frac{Q \cdot S_1}{V \cdot X} = \frac{B_v}{X} [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-21)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

S<sub>1</sub> - je hmotnostní koncentrace složky 1 na přítoku (BSK<sub>5</sub>) [kg·m<sup>-3</sup>]

V - je objem nádrže [m<sup>3</sup>]

X - je sušina aktivovaného kalu [kg·m<sup>-3</sup>]

Doba zdržení biomasy (Θ<sub>x</sub>)

$$\Theta_x = \frac{V \cdot X}{Q_w \cdot X_w + (Q - Q_w) \cdot X_2} [\text{s}] \quad (12-22)$$

kde:

V - je objem nádrže [m<sup>3</sup>]

X - je sušina aktivovaného kalu [kg·m<sup>-3</sup>]

X<sub>w</sub> - je sušina přebytečného kalu [kg·m<sup>-3</sup>]

X<sub>2</sub> - je koncentrace nerozpuštěných látek v odtoku z dosazovací nádrže [kg·m<sup>-3</sup>]

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

$Q_w$  - je množství přebytečného kalu [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

Kalový index (KI)

Základním ukazatelem jakosti kalu, charakterizuje schopnost kalu sedimentovat a zahušťovat se. Hodnoty kalového indexu a sedimentační rychlosti jsou udávány pro tři základní druhy kalu.

Normální kal	$KI < 100 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$	$v_s > 0,6 \text{ m/h}$
Lehký kal	$KI 100-200 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$	$v_s 0,3 - 0,6 \text{ m/h}$
Zbytnělý kal	$KI > 200 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$	$v_s > 0,3 \text{ m/h}$

$$KI = \frac{V_{30}}{X} [\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}] \quad (12-23)$$

kde:

$V_{30}$  - je objem kalu po půlhodinové sedimentaci [ $m^3$ ]

$X$  - je sušina aktivovaného kalu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Účinnost čištění (E)

$$E = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \cdot 100 [\%] \quad (12-24)$$

kde:

$S_1$  - je hmotnostní koncentrace složky 1 na vstupu do systému [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]

$S_2$  - je hmotnostní koncentrace složky 2 na výstupu ze systému [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]

### Dělení aktivačních procesu podle zatížení

Podle technologických parametrů rozlišujeme tři základní modifikace aktivačního procesu, tabulka 22.

Tabulka 22: Přehled základních modifikací aktivačního procesu

Proces	Doba zdržení biomasy $\Theta_x$	Hydraulická doba zdržení $\Theta$	Objemové látkové zatížení $B_v$	Látkové zatížení biomasy $B_x$	Účinnost čištění E
	dnů	hodin	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[%]
nízkozatížený	20-100	24-72	do 0,3	0,05-0,1	75-90
střednězatížený	3-20	4-10	0,5-1,5	0,2-0,6	90-95
vysokozatížený	pod 3	1-3	nad 1,5	nad 0,5	50-80

Nízkozatížené systémy jsou dnes nejčastěji používané systémy, neboť v důsledku malého zatížení biomasy dochází k její aerobní stabilizaci, čímž se významně redukuje objem přebytečného kalu, který je nutno zpracovat. U vysokozařížených systémů dochází k výraznému zmenšení potřebných objemů nádrží, vzhledem k účinnosti jsou vhodné např. pro předčištění průmyslových vod před vypouštěním do veřejné kanalizace. Střednězatížené systémy tvoří dnes minimum instalací na komunálních čistírnách odpadních vod, tyto systémy jsou postupně, až na výjimky, nahrazovány nízkozaříženými systémy.

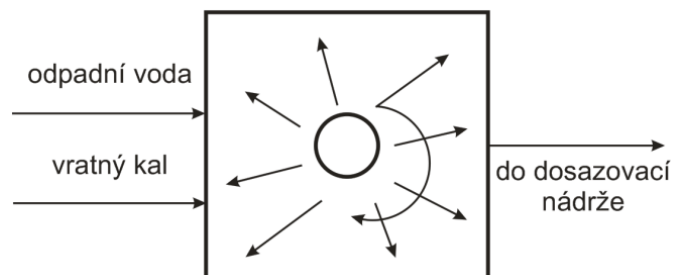
#### **4.10 Aktivační systémy**

Od svého vzniku v roce 1930 zaznamenala aktivace řadu proměn a úprav. V následující části budou zmíněny dnes používané uspořádání aktivace. Aktivační nádrže jsou většinou betonové, pravoúhlé, koridorové či kruhové. Hydraulicky pracují jako reaktory směšovací či s postupným tokem. Výška sloupce aktivovaného kalu bývá 3-6 m. Kyslík je do nádrže dodáván aeračním zařízením, které společně s ponornými míchadly udržuje aktivovaný kal ve vznosu. Aktivační systémy můžeme dělit na diskontinuální (SBR reaktory) a kontinuální. Kontinuální aktivační systémy se vyznačují trvalým přítokem substrátu, postupným promícháváním s aktivovaným kalem a také s postupným odtokem vyčištěné vody.

##### **Kontinuální směšovací systém**

Odpadní voda je přiváděna do aktivační nádrže, kde je za intenzivního provzdušňování míchána s aktivovaným kalem, obr. 56. Při dostatečné homogenizaci má celá aktivační nádrž prakticky stejné složení a koncentrace substrátu je v celé nádrži stejná. Pro směšovací nádrž je charakteristická konstantní rychlost odstraňování substrátu. Proto je také stejná rychlost spotřeby kyslíku v celé nádrži. Hydraulické poměry vyplývají z uspořádání na základě směšovacího principu. Tento systém aktivace má velký význam zejména pro průmyslové odpadní vody s velkým organickým znečištěním a s obsahem sloučenin, které jsou sice biochemicky snadno rozložitelné, ale ve větších koncentracích jsou toxické pro mikroorganismy aktivovaného kalu. Jednou z nevýhod směšovací aktivace je skutečnost, že podporuje růst nežádoucích vláknitých mikroorganismů.



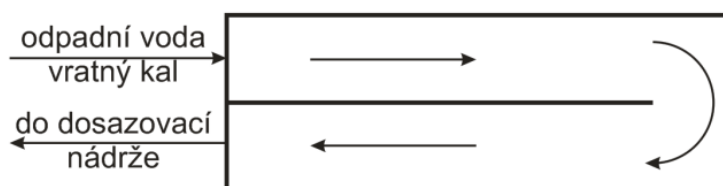


Obrázek 57: Směšovací systém

### Kontinuální systém s postupným tokem

V tomto případě má aktivační nádrž tvar dlouhého koryta s relativně malým průtočným profilem, obr. 57. Odpadní voda se smísí s vráceným kalem a směs se vede do aktivační nádrže, kde je provzdušňována. Během průtoku nádrží dochází k postupnému poklesu substrátu.

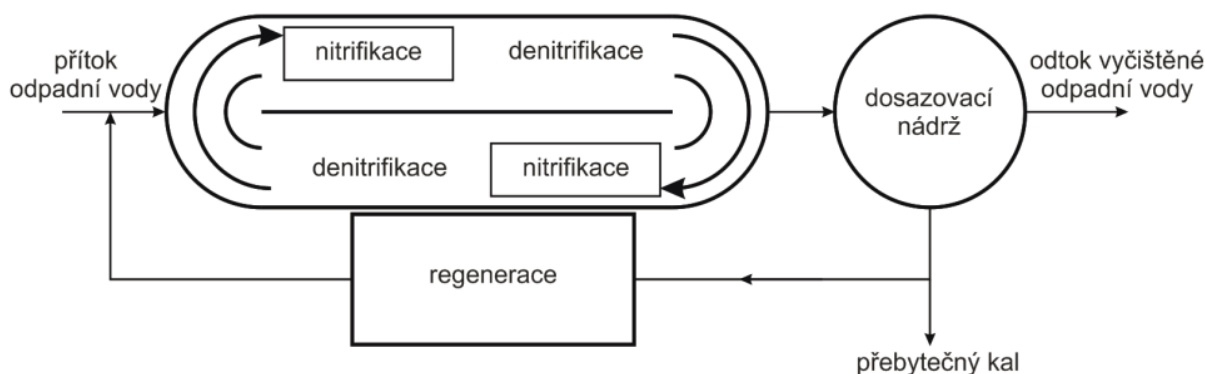
Pro tento systém je opět charakteristické, že směsná kultura je ve styku se substrátem, jehož koncentrace se mění. Jeden průtok nádrží odpovídá jednomu aeračnímu cyklu v jednorázovém systému.



Obrázek 58: Směšovací systém

### Kontinuální systém s oddělenou regenerací kalu.

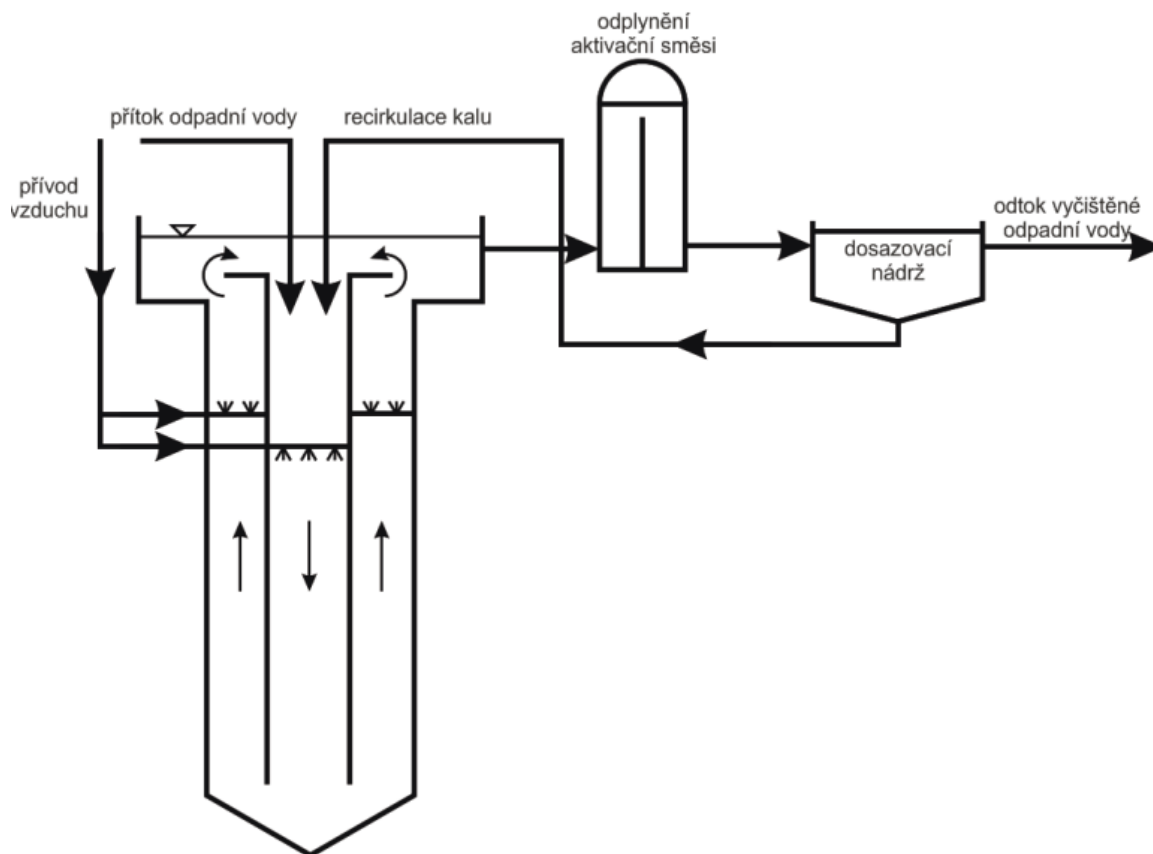
Jedná se o jednu z nejstarších modifikací aktivačního systému. Tento systém se vyznačuje krátkou dobou zdržení odpadní vody v aktivační nádrži, obvykle do jedné hodiny. Z dosazovací nádrže je potom vratný kal odváděn do regenerační nádrže, do které nejsou zavedeny odpadní vody, tedy zdroj živin. Zregenerovaný („vyhladovělý“) kal, který je vrácen zpět do aktivační nádrže je shcopen následně odstranit znečištění v kratším časovém intervalu, obr. 58.



Obrázek 59: Aktivace s oddělenou regenerací

### Kontinuální šachtová aktivace

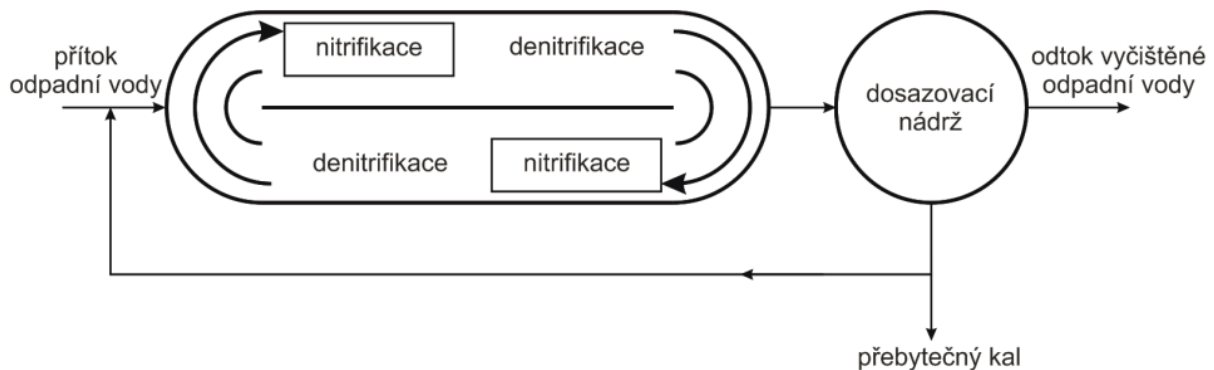
Aktivační nádrž je tvořena vnějším válcovým pláštěm z oceli, betonu, případně sklolaminátu o průměru 2-10 m a hloubce 50-200 m. Do tohoto vnějšího pláště je vložena roura o průměru 1-2 m. Aktivační směs cirkuluje v aktivaci tak jak je znázorněno na obrázku 59. Rychlost cirkulace se pohybuje v rozmezí  $1-2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a cirkulace nastává díky rozdílné měrné hmotnosti ve vnitřní a vnější sekci nad přívodem stlačeného vzduchu pro aeraci, který je umístěn v hloubkách 20-40 m. rozdělenou přepážkou na dvě části. V jedné části proudí kal směrem vzhůru druhou dolů. Hnací silou v tomto případě je rozdíl hustot kalu v obou částech.



Obrázek 60: Šachtová aktivace

## Kontinuální oběhová aktivace

V posledních letech velmi rozšířený způsob aktivace na čistírnách odpadních vod. Substrát je do aktivace přiváděn postupně stejně tak je i postupně odváděna aktivační směs do dosazovacích nádrží. K aktivaci dochází za plynulého přísunu kalu a odvodu vyčištěné vody. Velkou výhodou je vysoká účinnost odstranění dusíku nitrifikací a denitrifikací kalu a zároveň možnost použití aerobní stabilizace kalu.



Obrázek 61: Oběhová aktivace

## Diskontinuální systém

Diskontinuální kultivace je v podstatě opakující se jednorázový proces. Pro tento systém je charakteristické, že mikroorganismy jsou v prostředí s měnící se koncentrací substrátu. Po určité době se odebere část kultivačního média a část biomasy a obsah nádrže se doplní substrátem. V podstatě se jedná o časový průběh kontinuálního systému s postupným tokem. Semikontinuální systém je v současné době prakticky provozován jako tzv. systém SBR - Sequential Batch Reactor.

## Dosazovací nádrže

Slouží k odseparování aktivovaného kalu od vyčištěné odpadní vody k čemuž je využit princip sedimentace. Úloha dosazovacích nádrží je velmi důležitá, protože při správné separaci aktivovaného kalu od vody eliminujeme riziko úniku nerozpuštěných látek do odtoku z čistírny odpadních vod. To má za následek snížení koncentrace nerozpuštěných látek a tedy i parametru BSK<sub>5</sub> na odtoku z čistírny.

### 4.11 Základní technologické parametry dosazovacích nádrží

Doba zdržení ( $\Theta$ )

$$\Theta = \frac{V}{Q} [\text{s}] \quad (12-25)$$

kde:

V - je objem nádrže [m<sup>3</sup>]

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

Skutečná doba zdržení ( $\Theta_{sk}$ )

$$\Theta_{sk} = \Theta \cdot \eta_h \text{ [s]} \quad (12-26)$$

kde:

$\Theta$  - je doba zdržení [s]

$\eta_h$  - je hydraulická účinnost usazovacího prostoru, 0,4-0,5 pro kruhové nádrže, 0,4-0,6 pro podélné nádrže, 0,7-0,8 pro čtvercové vertikální nádrže

Povrchové hydraulické zatížení (v)

$$v = \frac{Q}{A_D} \text{ [m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-27)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

A<sub>D</sub> - je plocha dosazovací nádrže [m<sup>2</sup>]

Zatížení nerozpuštěnými látkami (N<sub>A</sub>)

$$N_A = \frac{Q_s \cdot X}{A_D} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-28)$$

kde:

Q - je průtok aktivační směsi [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

A<sub>D</sub> - je plocha dosazovací nádrže [m<sup>2</sup>]

X - je sušina aktivovaného kalu [kg·m<sup>-3</sup>]

Tabulka 23: Technologické parametry dosazovacích nádrží

Úmístění dosazovacích nádrží	Střední doba zdržení v hodinách při průtoku		Hydraulické zatížení plochy (v) v [m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ] při průtoku	
	Q <sub>d</sub>	Q <sub>max</sub>	Q <sub>d</sub>	Q <sub>max</sub>
za biofiltry	1,5-2,0	1,0	1,0-1,4	2,4
za aktivací	2,0-3,0	1,0	0,5-1,2	1,8-2,2

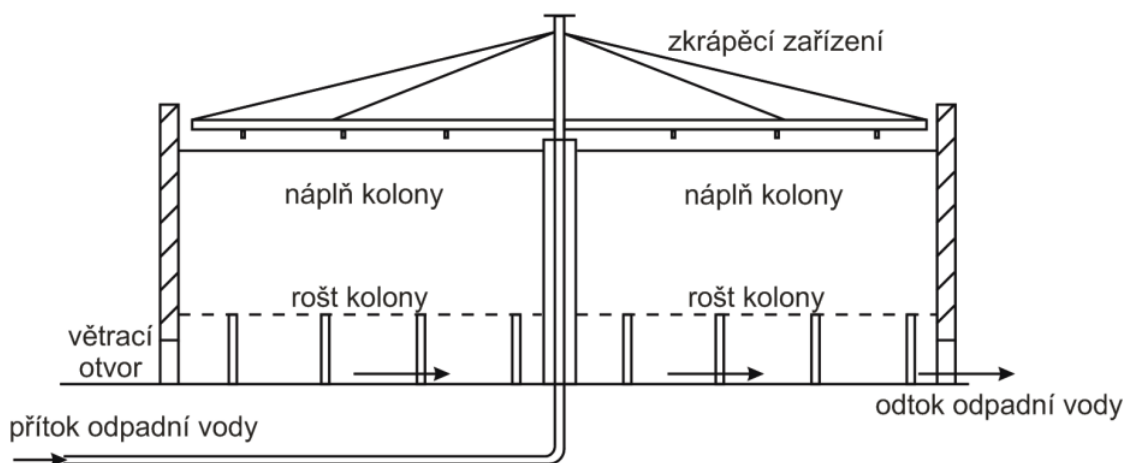
Podle průtoku aktivační směsi dělíme dosazovací nádrže na nádrže s horizontálním a vertikálním průtokem. Podle tvaru potom na čtvercové, obdélníkové a kruhové. Čtvercové nádrže jsou výhodné z hlediska úspory místa, kruhové jsou vhodnější z hlediska hydraulického. Lze v nich dosáhnout teoreticky rovnoměrného zatížení přepadové hrany po celém obvodu. Konstrukční řešení dosazovacích nádrží je podobné jako u nádrží usazovacích, popsáno v odstavci 12.6.5.

#### 4.12 Biologické kolony

Biologické kolony jsou nádrže obvykle kruhového půdorysu, jejichž plást je betonový či z plechu a sklolaminátů. Náplň kolony je buď kamenná, nebo z plastů. Náplně z plastů jsou tvořeny sypanými výlisky nebo bloky z profilovaných desek. Specifický povrch plastických náplní činí  $80-300 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ , mezerovitost 90-97 %, výška náplně 4-8 m. Důležitá je distribuce odpadní vody do průřezu kolony. Nejčastěji se používá zkrápědlo s hydraulickým pohonem na principu Segnerova kola.

Funkční polykultura je kultivována ve formě biofilmu na náplni, po které stéká odpadní voda. Aerace je zajištěna přirozeným prouděním vzduchu v důsledku teplotních gradientů uvnitř a vně kolony.

Přebytečná biomasa je strhávána proudem vody a po separaci v dosazovací nádrži není nutno jí již do kolony vracet. Případně se však recirkuluje odsazená voda po naředění koncentrovaných vod či k zvýšení proplachu lože kolony, obrázek 61.



Obrázek 62: Biologická kolona

Základní technologické parametry biologické kolony jsou následující.

Specifický povrch náplně (a)

$$a = \frac{A}{V} \quad [m^2 \cdot m^{-3}] \quad (12-29)$$

kde:

A - je plocha průřezu kolony [m<sup>2</sup>]

V - je objem náplně [m<sup>3</sup>]

Mezerovitost náplně (ε)

$$\varepsilon = \frac{V - V_N}{V} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12-30)$$

kde:

V - je objem náplně [m<sup>3</sup>]

V<sub>N</sub> - je objem materiálu náplně [m<sup>3</sup>]

Povrchové hydraulické zatížení (v)

$$v = \frac{Q}{A} \quad [m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (12-31)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

A - plocha průřezu kolony [m<sup>2</sup>]

Objemové látkové zatížení (B<sub>v</sub>)

$$B_v = \frac{Q \cdot S_1}{V} = \frac{Q \cdot S_1}{A \cdot H} = \frac{v}{H} \cdot S_1 \quad [kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}] \quad (12-32)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

S<sub>1</sub> - vstupní koncentrace složky, na níž zatížení vztahujeme (BSK<sub>5</sub>, CHSK) [kg·m<sup>-3</sup>]

V - je objem náplně [m<sup>3</sup>]

A - plocha průřezu kolony [m<sup>2</sup>]

H - výška lože [m]

v - povrchové hydraulické zatížení [m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>]

Povrchové látkové zatížení (B<sub>A</sub>)

$$B_A = \frac{Q \cdot S_1}{A} = \frac{Q \cdot S_1}{a \cdot H} = \frac{B_v}{a} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-33)$$

kde:

Q - je množství přitékající odpadní vody [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$S_1$  – vstupní koncentrace složky, na níž zatížení vztahujeme (BSK<sub>5</sub>, CHSK) [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

A - plocha průřezu kolony [ $\text{m}^2$ ]

a - specifický povrch náplně [ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ]

H - výška lože [m]

$B_v$  - je objemové látkové zatížení [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Rozdělení biologických kolon je uvedeno v následující tabulce 24.

Tabulka 24: Rozdělení biologických kolon s náplní z plastů.

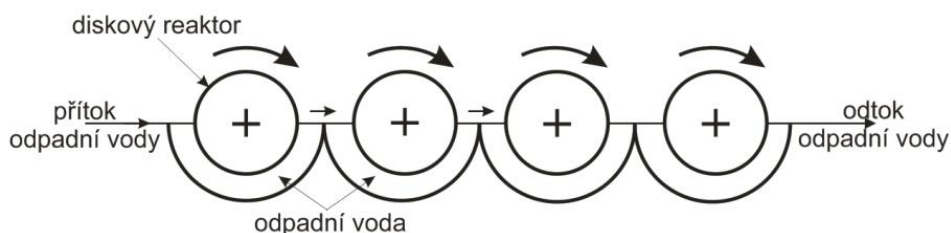
Kolona	Povrchové hydraulické zatížení v	Objemové látkové zatížení $B_v$	Účinnost čištění účinnost E
	[ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[%]
nízkozatěžovaná	do 5	do 0,5	85 - 95
vysokozatěžovaná	20 - 80	1-8	50 - 80

Nízkozatěžovatelné biologické kolony se sypanou náplní jsou určeny pro menší čistírny odpadních vod vzhledem k nízkým nárokům na obsluhu a údržbu. Vysokozatěžované kolony jsou vhodné pro předčištění koncentrovaných vod. Výhoda biologických kolon oproti aktivačnímu procesu spočívá v nižší spotřebě energie, kterou dodáváme pouze na čerpání vody na hlavu kolony, nikoliv na přísun kyslíku do systému. Biofilmové reaktory jsou i odolnější proti tzv. vláknitému bytění, kdy se separační schopnosti suspenzní kultury zhoršují v důsledku rozvoje vláknitých mikroorganismů. Tento problém nastává např. při čištění sacharidických odpadních vod.

#### 4.13 Rotační diskové reaktory

V těchto reaktorech (obr. 62) je biofilm kultivován na pomalu rotujících discích, které jsou částečně ponořeny do čištěné odpadní vody. Rotace disků zajišťuje střídavý kontakt biofilmu s odpadní vodou i se vzduchem. Konstrukčně je bioreaktor řešen jako horizontálně protékavý žlab, ve které na společném hřídeli rotuje potřebné množství kotoučů z plastu. Jejich průměr

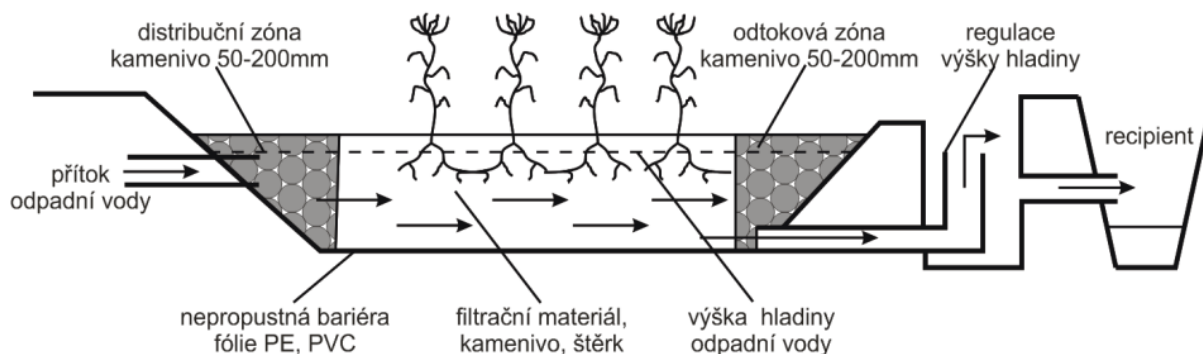
bývá 0,5-3,5 m. Kromě těchto kotoučů, které jsou někdy označovány jako biodisky, se však používají i další konstrukční prvky jako jsou segmentová, eventuálně válcová kola.



Obrázek 63: Rotační diskový reaktor

#### 4.14 Kořenové čistírny odpadních vod

Kořenová čistírna je přírodě blízkým systémem, který lze použít k dočištění odpadních vod rekreačních objektů nebo obcí do 1 500 obyvatel. Princip čištění je založen na velmi pomalé filtraci odpadních vod propustným štěrkovým ložem, osázeným vegetací. Princip činnosti této čistírny je patrný z obrázku 63.



Obrázek 64: Kořenová čistírna odpadních vod

*Návrhové parametry vegetační kořenové čistírny*

Plocha kořenového pole (A)

$$A = \frac{Q_d \cdot (\ln S_1 - \ln S)}{K_{BSK}} \quad [\text{m}^2] \quad (12-34)$$

kde:

- $Q_d$  - je denní množství přitékající odpadní vody  $[\text{m}^3]$
- $S_1$  - je koncentrace  $BSK_5$  na přítoku  $[\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}]$
- $S$  - je koncentrace  $BSK_5$  na odtoku  $[\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}]$

$K_{BSK}$  - je reakční konstanta odbourání  $BSK_5$ , obvyklá hodnota – 0,18



Objem filtračního lože (V)

$$V = A \cdot h \quad [\text{m}^3] \quad (12-35)$$

kde:

A - je plocha kořenového pole [ $\text{m}^2$ ]

h - je zvolená hloubka filtračního lože, (0,6-1,0) [m]

Hydraulická doba zdržení odpadní vody ve filtračním loži ( $\Theta$ )

$$\Theta = \frac{V \cdot n}{Q_d} \quad [\text{s}] \quad (12-36)$$

kde:

V - je objem filtračního lože [ $\text{m}^3$ ]

Q - je denní množství přitékající odpadní vody [ $\text{m}^3$ ]

n - je pórovitost náplně filtračního lože, (0,3-0,5) [m]

Hydraulické zatížení (v)

$$v = \frac{Q_d}{A} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12-37)$$

kde:

Q - je denní množství přitékající odpadní vody [ $\text{m}^3$ ]

A - je plocha kořenového pole [ $\text{m}^2$ ]

Hydraulického zatížení plochy filtračního lože se pohybuje v rozmezí 30 až 50 mm za den.

Základem této čistírny je mělká zemní nádrž utěsněná hydroizolační folií nebo jílem, vyplněná zrnitým, dobře propustným materiálem. Vhodný je písek až štěrkopísek stejné frakce, mezerovitosti náplně 0,3-0,5, tloušťky vrstvy přibližně 0,6-0,8 m. Povrch lože je osázen vodními hlubokokořenícími rostlinami, jako je např. rákos obecný, skřípina, ostřice, kosatec apod. Pro dno nádrže je vhodný sklon 0,5-1 %, naopak povrch nádrže musí být rovný za účelem možnosti potlačení nežádoucí vegetace zaplavením povrchu. Proto je nutné, aby se povrch štěrkového lože nacházel přibližně 0,3 m pod povrchem okolního terénu. Přitékající odpadní voda se po primárním předčištění, tj. v česlích, lapáku písku a sedimentační nádrži přivádí do silně propustné přítokové zóny, která musí zajistit její rovnoměrné rozdělení do celého průtočného profilu. Na konci lože je sběrný drén, který odvádí vyčištěnou odpadní vodu. Životnost celého systému je přibližně 25 - 30 roků. Výhody kořenových čistíren jsou

nenáročnost na obsluhu, možno nerovnoměrně zatěžovat čistírnu, nižší provozní a investiční náklady, oproti mechanicko-biologickým čistírnám. Naopak mezi nevýhody můžeme zařadit vyšší požadavky na plochu. Na jednoho obyvatele je nutno počítat s plochou 4-5 m<sup>2</sup>.

#### **4.15 Anaerobní čištění odpadních vod**

Anaerobní proces je mikrobiální rozklad organické hmoty, který probíhá samovolně v přírodě (dna rybníků, močály). Stejně procesy lze využít i při čištění odpadních vod, a to zejména vysoce znečištěných průmyslových vod.

Anaerobní rozklad je soubor několika dílčích na sebe navazujících procesů, na kterých se podílí několik základních skupin anaerobních mikroorganismů. Rozklad vyžaduje jejich koordinovanou metabolickou součinnost, produkt jedné skupiny mikroorganismů je substrátem skupiny druhé. K rozkladu organické hmoty dochází ve čtyřech na sebe vzájemně navazujících krocích. Prvním krokem je hydrolýza, což je rozklad makromolekulárních organických látek (lipidy, polysacharidy, proteiny) na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě (ty jsou schopny transportu dovnitř buňky). Druhým krokem je acidogeneze, při které jsou nízkomolekulární látky rozkládány na jednodušší organické látky (kyseliny, alkoholy, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>). Třetím krokem je acetogeneze, při které dochází k oxidaci těchto látek na H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>COOH. Čtvrtým, posledním krokem je metanogeneze, kdy pomocí metanogenních mikroorganismů dochází k rozkladu substrátů (jednoduché látky a CH<sub>3</sub>COOH) na konečné produkty kterými jsou CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>.

Podrobněji je proces popsán v kapitole pojednávající o bioplynových stanicích.

#### **Porovnání aerobních a anaerobních procesů**

Při aerobních procesech je přibližně 60 % energie spotřebováno na syntézu nové biomasy a 40 % se ztrácí ve formě reakčního tepla. Při anaerobních procesech je téměř 90 % energie obsažené v substrátu zachováno ve vzniklém bioplynu, 5 až 7 % je spotřebováno na růst nové biomasy a 3 až 5 % se ztrácí ve formě reakčního tepla.

Z bilance uhlíků je možno vyvodit následující závěry

Při aerobních procesech je asi 50 % uhlíku ze substrátu proměněno v biomasu a 50 % na CO<sub>2</sub>. Při anaerobních procesech přechází asi 95 % uhlíku ze substrátu do bioplynu a 5 % do biomasy. Z technologického hlediska představují anaerobní procesy energeticky málo náročné metody anaerobní stabilizace kalů a anaerobního čištění odpadních vod. Odstranění jednotkového množství znečištění anaerobním způsobem je vždy ekonomicky výhodnější než aerobním způsobem.

Energeticky je anaerobní proces tento způsob výhodný ze dvou důvodů:

- nedodává se kyslík potřebný při aerobním rozkladu,
- produkuje se bioplyn, který lze energeticky využít.

Dalšími klady anaerobního procesu je nízká produkce biomasy, nízké nároky na živiny a nízká reakční rychlost. Na druhou stranu je potřeba také zmínit zápory anaerobního procesu, kterými jsou vysoká koncentrace látek na odtoku, citlivost metanogenní archea na změny prostředí a dlouhá doba zpracování procesu.

Pro anaerobní čištění odpadních vod se ukazují jako nejvýhodnější tyto reaktory.

- ponořená biologická kolona s plastickou náplní,
- kolona s kalovým mrakem, tj. fluidní reaktor bez inertního nosiče biomasy,
- náplňová kolona s expandovaným či fluidizovaným ložem.

Anaerobní čištění představuje obvykle první stupeň biologického čištění, za kterým musí následovat aerobní dočištění, např. aktivačním procesem. Jeho úkolem je odstranit zbytkové znečištění, meziprodukty anaerobního rozkladu a převést vodu do kyslíkatého stavu, aby mohla být vypouštěna do toků.

#### 4.16 Kalové hospodářství

Jako vedlejší produkt při procesu čištění odpadních vod na biologických ČOV vzniká čistírenský kal. Jeho produkce může u velkých ČOV dosáhnout až několik desítek i stovek metrů krychlových denně. Nutno vzít v úvahu, že z tohoto množství je přibližně 94-96 % vody.

Základní fyzikální principy využívané v jednotlivých objektech mechanického čištění jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25: Fyzikální principy uplatňované v kalovém hospodářství

Princip	Používaná zařízení
<b>Zahušťování</b> využívá gravitační sílu a rozdíl hustot oddělovaných složek	zahušťovací nádrž
<b>Filtrace</b> jsou zachycovány nerozpuštěné příměsi, rozměrově větší než otvory, kterými protéká cezená voda	jemná síta bubnové filtry sítopásové lisy kalolisy
<b>Flotace</b> je uměle snižována hustota příměsí a vzniklý rozdíl hustot je využíván k oddělení složek (vztlakem)	flotační vany s tlakovým vzduchem elektroflotační vany
<b>Odstředování</b> využívá odstředivou sílu a rozdíl hustot oddělovaných složek	kontinuální odstředivky

## Druhy kalů

V závislosti na druhu čistírny odpadních vod, respektive charakteru čištěných odpadních vod se setkáváme s následujícími druhy čířirenských kalů.

### Primární kal

Suspendované látky, zachycené v usazovací nádrži – mechanický stupeň čistírny odpadních vod, předřazené biologickému čištění, označujeme jako primární kal. Složení primárního kalu je do značné míry ovlivněno vlastnostmi napojené stokové sítě, účinností předřazeného hrubého předčištění a také, jak bude uvedeno dále technologickým řešením celé čistírny odpadních vod.

### Produkce a složení primárního kalu

Množství primárního kalu produkované na jednoho EO za den značně kolísá, v závislosti na výše uvedených podmínkách a složení. Podle různých publikovaných zdrojů se produkce primárního kalu pohybuje v rozmezí 35 – 54 g za den, při účinnosti sedimentace v usazovací nádrži přibližně 70%. Toto číslo je důležité pro dimenzování případně použitých zahušťovacích nádrží a fermentorů. Složení primárního kalu je značně závislé na použité technologii čištění odpadních vod a účinnosti jednotlivých technologických celků. Obsah organických látek stanovený jako ztráta žiháním se pohybuje v rozmezí 70 – 75 %. Orientační složení primárního kalu podle zastoupení jednotlivých typů organických látek je uvedeno v následující tabulce 26.

Tabulka 26: Složení primárního kalu

Parametr	Obsah v hmot. %
Tuky (extrahovatelné látky – EL)	5,7 – 44,0
Bílkoviny	19,0 – 28,0
Celulosa, hemicelulosa, lignin	12,8 – 25,4
Huminové kyseliny	do 4,0
N <sub>celk.</sub>	2,0 – 4,5
P <sub>celk.</sub>	0,5 – 2,1
Fe	2,1 – 3,5
Al	1,3 – 2,5
Anorganická složka celkem	25,0 – 30,0

### Sekundární (přebytečný) kal

Během procesu biologického čištění odpadních vod dochází k produkci biomasy, která je v přímé souvislosti s množstvím odstraněného organického znečištění. Produkovaná,

přebytečná biomasa bývá odstraňována většinou v dosazovacích nádržích – při sekundární sedimentaci a proto bývá označována, jako sekundární nebo přebytečný kal.

### **Produkce a složení přebytečného kalu**

Produkce přebytečného kalu je zásadním způsobem závislá na technologické konfiguraci čistírny, jejím stavebním provedení, zvolené technologické koncepci, způsobu provozování a řadě biochemických a fyzikálních faktorů. Obecně a velmi zjednodušeně lze říci, že v případě předřazené primární sedimentace je z hlediska produkované sušiny produkce přebytečného kalu k primárnímu kalu v poměru asi 1 : 1 až 1 : 2, podle toho zda je aplikováno chemické předsrážení nebo ne, tedy přibližně 25-39 g sušiny za den na EO.

Na rozdíl od primárního kalu, kdy je, jak bylo uvedeno výše složení značně ovlivněno kvalitou přiváděné odpadní vody, u složení sekundárního – přebytečného kalu takové rozdíly nepozorujeme. Je to dáno tím, že podíl přiváděných suspendovaných látek je v poměru k vyprodukované biomase biologickým procesem čištění, méně významný. Přibližné složení přebytečného kalu uvádí následující tabulka 27.

Tabulka 27: Složení přebytečného kalu.

Parametr	Obsah ve hmot. %
Organické látky, jako ztráta žiháním	60 – 70
Obsah uhlíku v organické složce biomasy	47 – 52
Obsah kyslíku v organické složce biomasy	31 – 38
Obsah vodíku v organické složce biomasy	7 – 8
Obsah dusíku v organické složce biomasy	7 – 11
Obsah fosforu v organické složce biomasy	1,1 – 2,6
Obsah anorganických látek	30 – 40

### **Chemický kal**

Chemický kal je produktem srážecích reakcí, využívaných většinou ke snížení obsahu fosforu ve vyčištěné vodě nebo v odděleně upravované kalové vodě nebo ke zlepšení sedimentačních vlastností aktivovaného nebo primárního kalu. Vzhledem k tomu, že k naznačeným procesům může být použito několik chemických látek, liší se i chemické složení a množství chemického kalu. Většinou je chemický kal nedílnou součástí primárního nebo přebytečného kalu, podle toho kde se srážení aplikuje. V případě odděleného srážení – třetí stupeň čistíren odpadních vod vzniká samostatný chemický kal.

### **Produkce a složení chemického kalu**

Množství vznikajícího chemického kalu je dáno především způsobem aplikace srážedel a jejich chemickým složením. Fosfor je nutno srážet vždy nadbytkem solí  $Fe^{+3}$  nebo  $Al^{+3}$  a

tento nadbytek je určen na základě technologické koncepce čistírny odpadních vod, účinnosti biologického odstraňování fosforu vázáním v biomase a hlavně chemickým složením čištěné odpadní vody. Pro určení dávky srážedla je klíčová cílová – požadovaná, zbytková koncentrace fosforu. V následující tabulce 12.XV je pro tento účel použita garantovatelná hodnota  $P_{\text{celk.}}$  na odtoku  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ .

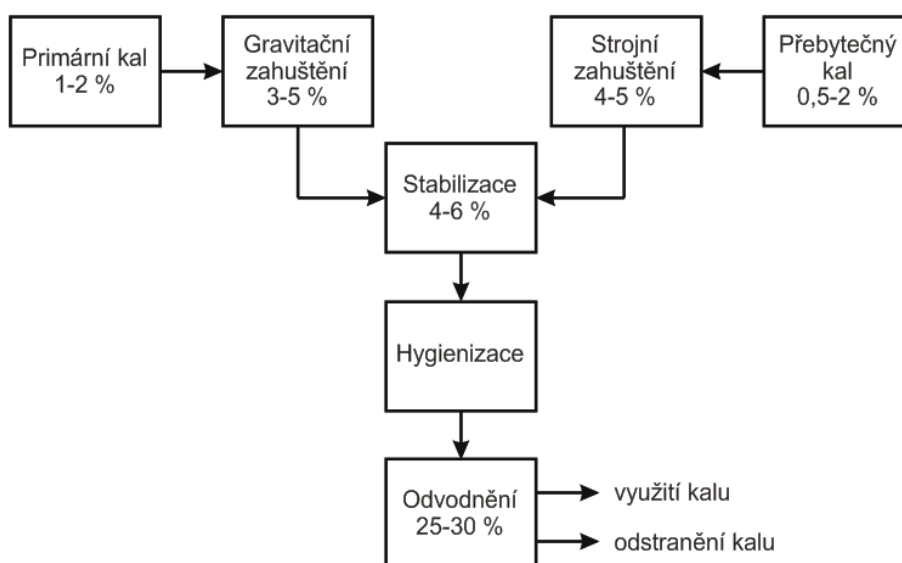
Tabulka 28: Dávky srážedla v závislosti v závislosti na požadované, zbytkové koncentraci fosforu

Produkce chemického kalu v g za den na EO		
Použitá chemická látka	Simultánní srážení	Oddělené srážení
Soli $\text{Fe}^{+3}$	12,1 – 17,1	9,6 – 14,6
Soli $\text{Al}^{+3}$	9,4 – 16,8	9,4 – 13,1

Složení chemického kalu je závislé na použitých sloučeninách. Převážně se jedná o směs ortofosforečnanů železa nebo hliníku a hydroxidů příslušných kovů o nestechiometrickém složení. Složení chemického kalu je značně závislé na fyzikálně-chemických podmínkách srážení a není jednoduché a z technologického hlediska ani příliš důležité.

#### 4.17 Zpracování kalů

Zpracováním kalů rozumíme většinou zpracování aerobně nebo anaerobně zpracovaných kalů, u kterých byl snížen podíl organických látek na takovou hodnotu, aby takový kal již nepodléhal dalším biochemickým rozkladům a při skladování či aplikaci jako hnojiva nezpůsobil hygienické či senzorické závady. Kalové hospodářství je tvořeno operacemi, jak je patrné z obrázku 64.



Obrázek 65: Kalové hospodářství čistíren odpadních vod

Optimálním řešením kalové problematiky je zlepšení odvoditelnosti kalů přidavkem organických flokulantů a odvodnění na pásových lisech s následnou aplikací odvodněného kalu jako hnojiva.

### **Zahušťování kalů**

Zahušťování kalu je proces, kterým se snažíme snížit obsah vody v kalu před jeho dalším zpracováním. Zahušťování kalu může mít zásadní technologický a ekonomický význam. V současné době je zahušťování kalu nezbytnou operací i na malých čistírnách odpadních vod. K zahušťování kalu používáme řadu metod založených buďto na prosté sedimentaci nebo na využití strojního zařízení. Na použité technologii je závislý konečný výsledek zahuštění kalu. Z technologického hlediska je za optimální stupeň zahuštění považována konečná koncentrace sušiny v rozmezí 4,5 – 6,0 hmotnostních %. Vyšší koncentrace zahuštěného kalu jsou dosažitelné, ale mohou působit potíže s jeho čerpáním, obzvláště při použití odstředivých čerpadel.

### **Prostá sedimentace**

Tato technologie se využívá ke zpracování přebytečného kalu, především na malých čistírnách a často bývá konečným řešením kalové koncovky nebo jako mezistupeň po anaerobní stabilizaci kalu před jeho odvodněním. Postup spočívá v občasném stahování kalové vody. Proces většinou probíhá v jedné nebo dvou válcových uskladňovacích nádržích, které mohou být vybaveny míchadly pro homogenizaci kalu. Aby splnil tento způsob nakládání s kalem svůj účel, musí být objemy uskladňovacích nádrží dimenzovány na střední hydraulickou dobu zdržení nejméně 150 dní. Produktem je potom stabilizovaný kal. Tento způsob zpracování je extenzivní a v poslední době ztrácí na významu.

### **Gravitační zahušťování kalu**

Tato technologie se nejčastěji využívá k oddělenému zahušťování primárního kalu v míchaných gravitačních zahušťovačích nebo v zahušťovačích s usměrněným prouděním – hydrocyklónech. Na menších a starších čistírnách se gravitační zahušťování využívá k zahušťování smíšeného nebo i sekundárního – přebytečného kalu. Řešením může být i dvou až třístupňové sériové propojení uskladňovacích nádrží s řízeným režimem. Tento systém je využíván u nových malých čistíren odpadních vod.

odstředování. Do gravitačních technologií zahušťování kalu patří i odstředování. Tato technologie se využívá především u velkých čistíren odpadních vod. Stupeň zahuštění je závislý na vlastnostech zahušťovaného kalu, u přebytečného kalu na kalovém indexu. Účinnost zahuštění na odstředivce lze zvýšit aplikací pomocných prostředků – flokulantů, ale při běžném zahušťování se tento postup z ekonomických důvodů nevyužívá.

## Tlaková flotace

Flotace je fyzikálně-chemický způsob odstraňování lehkých pevných částic a oleje z kapaliny, nejčastěji z vody. Principem flotace je, že suspendované látky (vločky, částice, organismy) se vznášejí tím, že mají menší měrnou hmotnost než kapalina, v které jsou rozptýlené nebo se v kontaktní zóně spojují s mikrobublínkami vzduchu a jsou pak v separační zóně vynášeny k hladině, kde vytvoří plovoucí vrstvu kalové pěny, která je odstraňována hydraulicky nebo mechanicky. Vzestupné rychlosti takto vzniklých agregátů jsou o jeden až dva řády vyšší než byly původní sedimentační rychlosti těchto vloček, což umožňuje pracovat při vysokém povrchovém zatížení flotace ve srovnání se sedimentací.

Tlaková flotace je moderní a výkonnou metodou zahušťování kalu. Je vhodná pro zahušťování přebytečného, smíšeného i chemického kalu. Její účinnost není příliš ovlivněna vlastnostmi zahušťovaného kalu a lze ji ještě zvýšit způsobem řízení procesu a dávkováním flokulantu. Pro optimální provoz je však důležité správné dimenzování flotační jednotky. Pro zahuštění přebytečného kalu se doporučuje dimenzovat flotační jednotku na základě látkového zatížení pracovního objemu flotační jednotky za jednotku času. Podle technického řešení flotační jednotky se doporučuje látkové zatížení pracovního objemu kalem v rozmezí 0,5 – 2,5 kg sušiny na m<sup>3</sup> za hodinu.

## Sítové zahušťovače

Zahušťování kalu je možné provádět s pomocí organického flokulantu filtrací flokulovaného kalu na sítích různého provedení. Jedná se o ekonomicky nejvýhodnější a výkonnou technologii zahušťování, kterou lze využít ve většině případů. K zahušťování se používají většinou nerezová síta různého provedení. Nejčastěji se jedná o stolové pásové zahušťovače, zahušťovače s rotačním šikmým, bubnovým nebo šnekovým sítem. Volba technického provedení je závislá na požadovaném výkonu z hlediska kapacity a na požadované sušině.

V následující tabulce jsou pro srovnání uvedeny v běžné praxi dosažitelné koncentrace zahuštění podle použité metody a druhu zahušťovaného kalu.

Tabulka 29: Dosažitelný obsah sušiny podle použité metody a druhu zahušťovaného kalu

Metoda zahuštění	Druh kalu	Dosažitelná sušina [%]
Prostá sedimentace+uskladnění	Přebytečný a stabilizovaný kal	3,5 – 6,5
Řízené gravitační zahuštění	Primární kal	4,0 – 8,0
Řízené gravitační zahuštění	Sekundární – přebytečný kal	2,5 – 3,8
Odstředování	Sekundární – přebytečný kal	3,0 – 6,0
Odstředování s flokulantem	Sekundární – přebytečný kal	4,0 – 6,5
Tlaková flotace	Sekundární – přebytečný kal	3,5 – 7,0



Tlaková flotace s flokulantem	Sekundární – přebytečný kal	4,5 – 10,0
Sítové zahušťovače s flokulantem	Sekundární – přebytečný kal	4,0 – 18,0

## **Stabilizace kalů**

Stabilizací kalu nazýváme proces, kterým upravujeme konečné vlastnosti kalu tak, aby dále nepodléhal spontánnímu samovolnému rozkladu. Ve většině případů se jedná o biochemický postup snižování obsahu zbytku snadno rozložitelných organických látek a tím i celkové koncentrace organické složky v kalu. Doba potřebná ke stabilizaci kalu je závislá na použité metodě a je určena na základě empirických zkušeností. Současně se stabilizací kalu klesá i obsah patogenních mikroorganismů a metoda stabilizace kalu může být zároveň metodou hygienizace kalu.

### **Aerobní stabilizace kalu**

Aerobní stabilizace kalu je biochemický postup, kdy je v odděleném prostředí udržován přebytečný kal v oxických podmínkách. Tato metoda stabilizace je jednoduchá, ale je nutno počítat s ekonomickými náklady na aeraci. Kal musí být odděleně zpracován v aerovaných nadzemních betonových nádržích po dobu nejméně 35 dní za podmínek, kdy se koncentrace kyslíku pohybuje v rozmezí 0,5-1,5 mg·l<sup>-1</sup>. Střední hydraulická doba zdržení větší než 45 dní neúnosně zvyšuje investiční i provozní náklady. Pro udržení výše popsaných provozních podmínek obvykle stačí přerušovaná středobublinná aerace s výkonem dmýchadel navrženým tak, aby se nádrž zároveň umíchala. Potom nemusí být řešeno mechanické míchání. Většího efektu se dosáhne při rozdělení potřebného objemu na dvě nádrže. Jejich sériovým propojením potom můžeme při vhodně řízeném procesu dosáhnout i vyššího stupně zahuštění. Metoda aerobní stabilizace kalu je vhodná i pro nejmenší čistírny odpadních vod. V současné době se tato metoda doporučuje pro čistírny odpadních vod s kapacitou 50 – 25000 EO, kde slouží uskladňovací nádrže zároveň k přechovávání kalu před dalším konečným zpracováním, například na jiné větší čistírně s komplexním vystrojením kalového hospodářství.

### **Autotermní aerobní termofilní stabilizace kalu**

Aerobní autotermní termofilní stabilizace kalu je proces, při kterém dochází k žádoucímu snížení organického podílu v biologickém kalu, produkovaném na čistírně odpadních vod biochemickými pochody probíhajícími v termofilních podmínkách za přítomnosti kyslíku. Metoda autotermní aerobní termofilní stabilizace kalu, je založena na využití tepla vzniklého exotermním aerobním biologickým procesem za použití vzduchu, čistého kyslíku nebo směsi čistého kyslíku a vzduchu. Teplo uvolněné biologicky zprostředkovanou oxidací organické hmoty v reaktoru, zahřívá jeho obsah až na pracovní teplotu 55 – 60 °C, na které je potom

proces řízeně udržován potřebnou dobu stabilizace a případné hygienizace. Proces je kontinuální a je energeticky nezávislý, tedy nepotřebuje externí zdroj tepelné energie. Proces probíhá v tepelně izolované nádrži – reaktoru, který může být dle zvolené technologie a procesní potřeby dotován i čistým kyslíkem. Z důvodů možnosti současného zajištění i hygienizace kalu, bývá často tento proces veden semikontinuálně, tedy s dávkováním čerstvého kalu přetržitě v určených intervalech. Tímto způsobem, při zajištění předepsaných podmínek tj. minimální střední hydraulická doba zdržení v reaktoru 20 dní, minimální teplota v reaktoru 55 °C a prodleva mezi denními dávkami čerstvého zahuštěného kalu minimálně 20 hodin, lze trvale zajišťovat i hygienické parametry kalu kategorie I., z hlediska požadavků na jeho hygienizaci. Tato metoda vede zároveň ke snížení celkové konečné produkce sušiny kalu. Z ekonomického a ekologického hlediska se jedná o perspektivní metodu stabilizace kalu, která může najít uplatnění na čistírnách odpadních vod s projektovanou kapacitou 5000 – 60000 EO. Maximální, uvedená velikost čistírny odpadních vod není limitní možností technologického řešení, ale je dána ekonomikou konkurenčních metod zpracování čistírenských kalů. Technologické zařízení pro autotermní aerobní termofilní stabilizaci čistírenských kalů může být využita i ke konečné úpravě dovážených zahuštěných a stabilizovaných kalů z malých čistíren odpadních vod.

### **Anaerobní stabilizace kalu**

Anaerobní stabilizace kalu je metoda stabilizace kalu za nepřístupu vzduchu. Čistírenské kaly (primární, aktivovaný) se ve větších čistírnách zpracovávají technologií anaerobní stabilizace. Anaerobní stabilizace je soubor procesů, při nichž směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Konečnými produkty jsou vzniklá biomasa, plyny ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) a nerozložený zbytek organické hmoty, který je již z hlediska hygienického a sensorického nezávadný pro prostředí, je již stabilizován. Anaerobní stabilizace probíhá ve fermentoru, který je tvořen tepelně izolovanou nadzemní betonovou nádrží. Čistírenský kal je do fermentoru přiváděn kontinuálně nebo v pravidelných intervalech. Současně je z fermentoru odváděna kalová voda, která je vracena do procesu čištění a stabilizovaný kal, který je odváděn do uskladňovací nádrže, před jeho dalším zpracováním. Podle teploty ve fermentoru rozdělujeme anaerobní stabilizaci do tří skupin.

Psychrofilní, s teplotou ve fermentoru rovnou teplotě okolí, provozním zatížením v rozmezí 0,3 – 1,0 kg organických látek na  $\text{m}^3$  objemu fermentoru a den a dobou zdržení 60-90 dnů. Mezofilní, s teplotou ve fermentoru v rozmezí 35-50 °C, provozním zatížením v rozmezí 0,5 – 1,5 kg organických látek na  $\text{m}^3$  objemu fermentoru a den a s dobou zdržení v reaktoru 20-30

dnů. Termofilní s teplotou ve fermentoru v rozmezí 50-60 °C, provozním zatížením v rozmezí 1,5 – 5,0 kg organických látek na m<sup>3</sup> objemu fermentoru a den a dobou zdržení 15-20 dnů. V současné době je v České republice provozována převážně anaerobní mezofilní stabilizace. Z hlediska technologického řešení se u větších čistíren využívá provedení dvoustupňové, u menších čistíren provedení jednostupňové v kombinaci s otevřenou uskladňovací nádrží. Vzniklý bioplyn (kalový plyn) obsahuje 65 - 75 %<sub>obj</sub> CH<sub>4</sub>, 25 - 35 %<sub>obj</sub> CO<sub>2</sub> a nepatrné podíly H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, v současné době je významným zdrojem energie s výhřevností 20-30 MJ·kg<sup>-1</sup>.

### **Další metody stabilizace kalů**

Chemická stabilizace kalu je jednou z možností, jak zabránit spontánnímu rozkladu kalu v krátkém čase. Nejznámější je chemická stabilizace kalu páleným vápnem (CaO). Tato metoda má však omezený účinek, protože s poklesem hodnoty pH vlivem působení vzdušného oxidu uhličitého dojde opět k obnovení rozkladných procesů. Jinou metodou stabilizace čistírenských kalů za jejich současného rozkladu až na minerální složky je stabilizace působením kyseliny sírové za zvýšeného tlaku a teploty kolem 160 °C. Tato metoda byla vyvinuta pro velké městské čistírny odpadních vod a nemá zatím širší uplatnění. Poslední z realizovaných způsobů stabilizace čistírenských kalů je totální rozklad kalu čistým kyslíkem při teplotách kolem 150 °C a tlaku až 1,5 MPa. Produktem tohoto postupu jsou uhličitany, volný oxid uhličitý a voda. Za metodu stabilizace kalu lze také považovat jeho sušení bez předběžného rozkladu. Výše popsané metody stabilizace kalu jsou v současné době předmětem zájmu, protože ve svém výsledku vedou k minimalizaci produkce kalu, s jehož dalším využitím jsou stále větší legislativní potíže.

### **Hygienizace kalu.**

Hygienizace čistírenských kalů je nezbytnou technologickou operací, která umožňuje jejich využití k zemědělským účelům, jako součást hnojiv nebo přímou aplikací, zapravením do zemědělské půdy. Zemědělské využití čistírenských kalů je totiž přirozeným zakončením koloběhu živin. Pokud nejsou čistírenské kaly zatíženy nepřiměřeným obsahem těžkých kovů z lidské činnosti, jsou pak pouze hygienická kritéria limitujícím faktorem jejich využitelnosti v zemědělství.

Kaly z čistíren odpadních vod představují suspenzi pevných látek a agregovaných koloidních látek, které jsou z části původem z čištění odpadní vody a z části vznikají při procesu čištění odpadních vod, v závislosti na použité technologii. Z mikrobiologického hlediska jsou v surovém a částečně i ve stabilizovaném kalu přítomny, kromě jiných následující skupiny mikroorganismů:

- bakterie (psychofilní, mezofilní a termofilní),

- viry (enteroviry),
- Nižší houby a jejich spory a toxiny,
- kvasinky,
- červi, roztoči a jejich vajíčka.

Je řada možností určování hygienických kritérií hygienizovaného kalu a názory na tuto problematiku se stále vyvíjí. V současné době se jako potenciální patogenní mikroorganismy sledují především následující skupiny mikroorganismů:

- termotolerantní koliformní bakterie
- enterokoky
- *Salmonella* spp.

Většina legislativních norem zemí EU, včetně legislativy ČR, umožňuje klasifikaci hygienizovaných kalů z čistíren odpadních vod, pro účely případného využití v zemědělství, do dvou tříd, a to například v ČR od 1.1.2002, podle platné vyhlášky MŽP č. 382/2001, Sb. je to kal třídy I. a II., Kriteria pro zařazení hygienizovaného kalu do třídy I. nebo II., podle této citované vyhlášky, jsou v následující tabulce 30.

Tabulka 30: Kriteria pro zařazení hygienizovaného kalu do třídy I. nebo II., podle vyhlášky MŽP č. 382/2001 Sb.

Kritérium	Třída I. (KTJ/g)	Třída II. (KTJ/g)
Termotolerantní koliformní bakterie	$< 10^3$	$10^3 - 10^6$
Enterokoky	$< 10^3$	$10^3 - 10^6$
<i>Salmonella</i> spp.	negativní	nestanovuje se

Zařazení do uvedených tříd potom určuje i možnosti zemědělského využití kalů. K dosažení kvality kalů podle výše uvedených požadavků je nutno dodržet některé dohodnuté technologické podmínky postupu při hygienizaci kalů.

#### **Technologické procesy hygienizace kalů**

Dosažení hygienické kvality kalu, umožňující jejich zařazení do třídy I. není technologicky jednoduché. Vzhledem k tomu, že se vždy jedná o technicky i ekonomicky náročnější provoz kalového hospodářství, měla by tomuto požadavku předcházet koncepčně dobře propracovaná rozvaha již ve fázi přípravy technologické koncepce celého kalového hospodářství. Vzhledem k tomu, že se v čase mohou hygienické požadavky na vlastnosti kalů ještě zvyšovat, je volba technologie hygienizace kalu komplikovaným krokem. V současné době je možné volit z následujících technologických postupů.

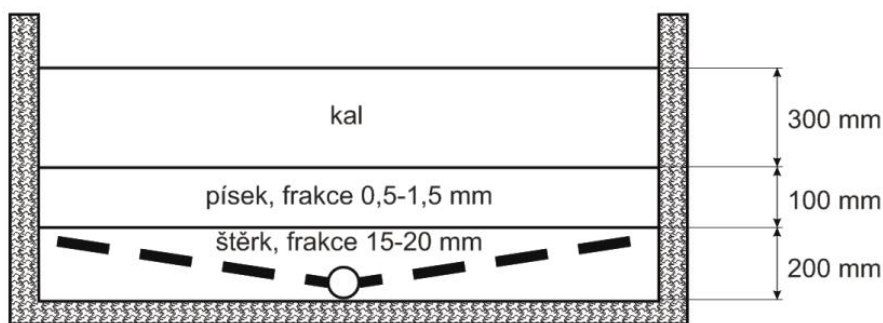
- sušení kalu při teplotě vyšší než 80 °C a na sušinu vyšší než 90%,
- kombinovaný systém s předřazenou autotermní aerobní termofilní stabilizací při 55 °C a následnou mezofilní stabilizací,
- autotermní aerobní termofilní stabilizace při teplotě nad 55 °C a s přerušovaným dávkováním surového kalu a odběru s odstupem nejméně 20 hodin,
- termofilní anaerobní stabilizace při teplotě nad 55 °C, s přerušovaným dávkováním surového kalu a odběru s odstupem nejméně 20 hodin,
- termická předúprava surového kalu při teplotě nad 70 °C a s dobou zdržení minimálně 30 minut (pasterace),
- alkalizace kalu vápnem při dosažení pH nad 12 a teploty nad 55 °C a udržení těchto dosažených hodnot po dobu nejméně 2 hodin,
- alkalizace kalu vápnem při dosažení pH nad 12 a udržení této hodnoty po dobu nejméně 3 měsíců.

### **Odvodňování kalů**

U velkých ČOV se odvodňování kalů buduje jako součást technologie ČOV, u menších ČOV nabývají na významu mobilní zařízení na odvodňování kalů, která mohou střídavě odvodňovat kal z uskladňovacích nádrží těchto ČOV. Úkolem odvodnění kalu je požadavek na snížení dopravních nákladů, kterého lze dosáhnout jedině odvodněním kalu. Uvědomme si, že zvýšením obsahu sušiny z původních 4 % na 28 % v odvodněném kalu snížíme jeho objem i hmotnost přibližně sedmkrát.

### **Kalová pole**

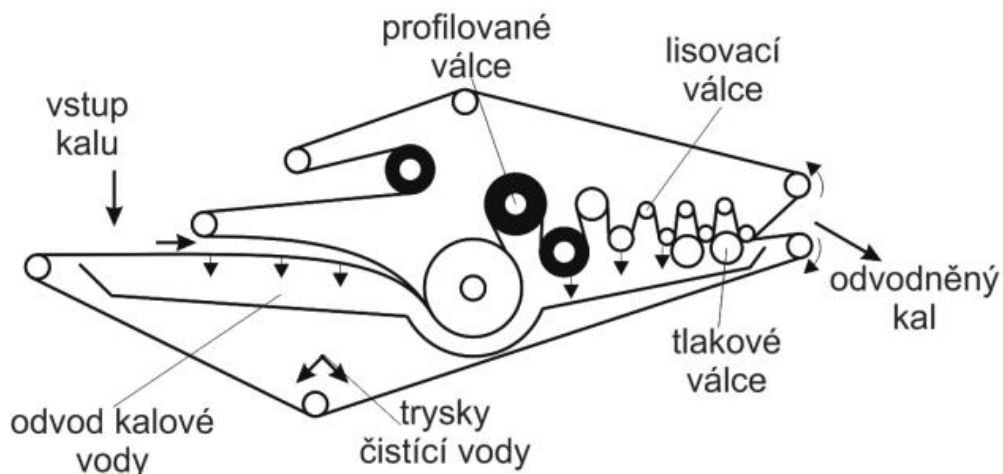
Jedná se o nejstarší a nejjednodušší způsob odvodňování kalů. Kalové pole (obr. 65) je speciálně upravená obdelníková betonová nádrž o maximálních rozměrech 8×20 m, jejíž dno tvoří drenážní systém - drenážní trubky, zasypané vrstvou šterku a vrstvou písku. Na tuto vrstvu je napuštěna vrstva kalu. Principem odvodňování na kalovém poli je kombinace procesů filtrace a odpařování. Účinnost odvodňování na kalovém poli závisí na klimatických a povětrnostních podmínkách. Za příznivých klimatických podmínek je možno dosáhnout sušiny až 65 %. Zatížení kalového pole pro anaerobně stabilizovaný kal 0,4-0,6 kg sušina na m<sup>2</sup> za měsíc, pro aerobně stabilizovaný kal 0,3-0,5 kg sušina na m<sup>2</sup> za měsíc. Vyklízení ruční, u větších mechanické.



Obrázek 66: Kalové pole

### Sítopásový lis

Sítopásové lisy, obr. 66 patří k nejstarším zařízením pro odvodňování kalů. Směs vloček a filtrátu se odděluje lisováním mezi nekonečnými perforovanými tkaninovými pásy. V současné době jde o jednu z rozšířených metod odvodňování kalů. Kal je po kondicionaci polykoagulanty filtrován, zpočátku volně (předodvodňovací fáze), později při tlaku (0,1 MPa) mezi dvěma nekonečnými perforovanými filtračními pásy, které meandrovitě procházejí systémem válců, kde dochází k postupnému stlačování a deformaci (stříhové síly) koláče, což usnadňuje uvolňování vody. Výkonnost sítopásového lisu se udává v kg sušiny koláče z 1 m<sup>2</sup> plochy plachetky za 1 hodinu (maximální šíře pásu bývá 3 m) a pro stabilizovaný kal se pohybuje v rozmezí 250-500 kg·m<sup>2</sup> za hodinu. Za těchto podmínek lze dosáhnout obsah sušiny odvodněného kalu v rozmezí 27-36 %.

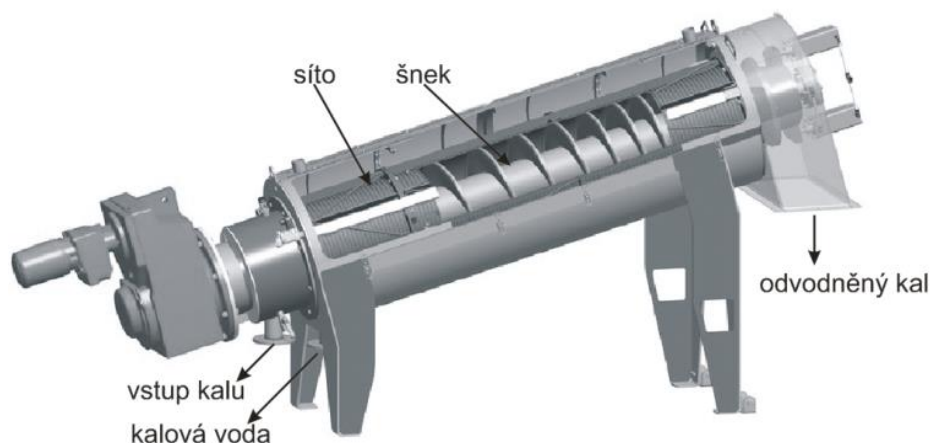


Obrázek 67: Sítopásový lis

### Šnekový lis

Odlučování probíhá v nakloněném bubnu s drátěným sítím, které tvoří stěnu válce, uvnitř kterého je umístěn vyhrnovací šnek. Po přivedení vyvločkové kalové suspenze (po přidání polymerového roztoku) do plnicí komory se první část bubnu použije k odvedení vody, která

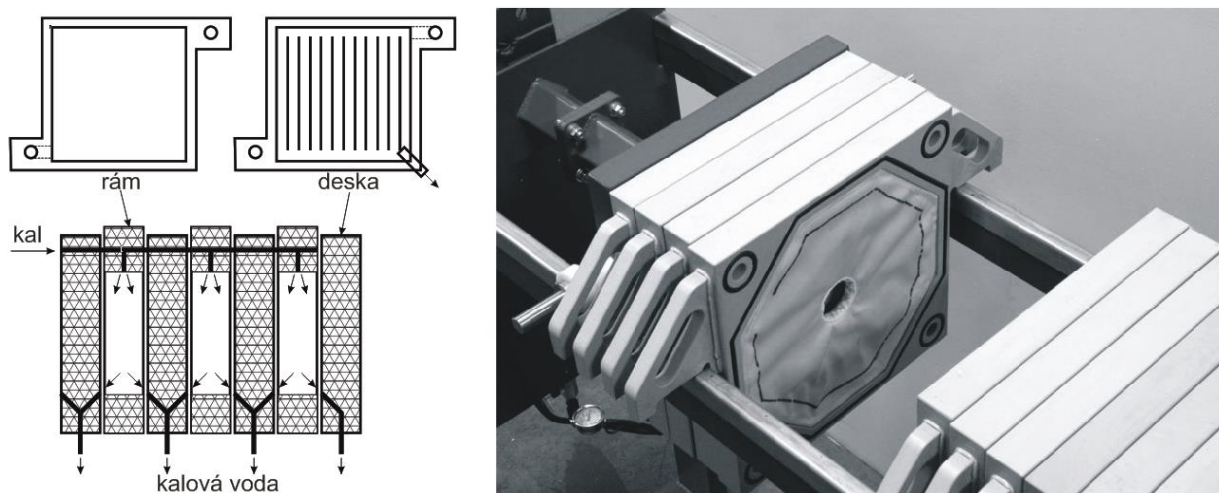
se ze suspenze uvolnila. V kalové suspenzi se postupně zvyšuje obsah sušiny s tím, jak suspenze postupuje do tlakové zóny bubnu. Vlivem protitlaku, který vytváří výstup se zúženým otvorem, se z kalového koláče, který postupuje k výstupu, uvolní další voda. Uvolněná voda se vypustí vývodem na odpadní vodu pod buben. Klínové drátěné síto se udržuje v čistotě průběžným proplachováním z jeho vnější strany a šetrným kontaktem se speciálním materiálem na vrcholu hřebel vyhrnovacího šneku. Dosažitelná sušina odvodněného kalu se pohybuje v rozmezí 18-25 %.



Obrázek 68: Šnekový lis

### **Komorové lisy**

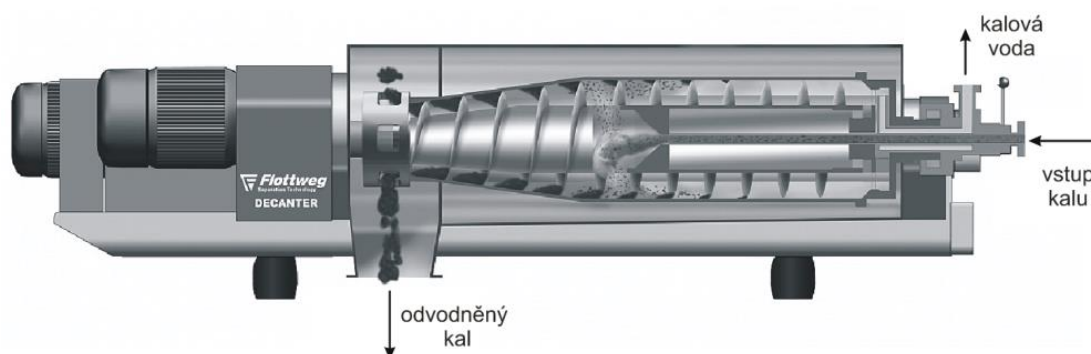
Nosnou konstrukci celého zařízení tvoří rám, na který jsou zavěšeny filtrační desky a který zabezpečuje dostatečnou tuhost komorového lisu (obr. 68) při působení vysokých tlakových sil během pracovního cyklu, které se pohybují v rozmezí 1,5 až 2,5 MPa. Filtrační desky, maximální velikost 2×2 m, vytvářejí pracovní prostor kalolisu – soustavu uzavřených filtračních komor. Okraj desky je silnější než její prohloubená vnitřní část a tvoří tak styčnou plochu se sousední deskou. Filtrační komora je vytvořena vždy dvěma sousedními deskami, tloušťka komory je určena součtem jejich prohloubení a pohybuje se obvykle v rozmezí 5-50 mm. Filtrační desky jsou povlečeny filtračními plachetkami. Odvodňovaná suspenze je přiváděna nátokovým otvorem probíhajícím průběžně celým svazkem desek i plachetek. Kapalina je tlakem rovnoměrně plněna do všech komor, filtrát prochází skrz plachetky a je odváděn kanálky vrtanými v deskách. Svazek desek, maximální počet 120 ks, je v průběhu celé filtrace pevně sevřen pomocí hydraulického agregátu. Tím je zajištěno, že i při vysokém filtračním tlaku nedojde k úniku suspenze z filtračních komor. Komorovým lisem je možno kal odvodnit na sušinu v rozmezí 35-50 %.



Obrázek 69: Komorový lis

### Odstředivky

Pro odvodňování kalů se používají celoplašťové šnekové odstředivky. Kal je přiváděn potrubím v ose bubnu. Odseparovaný kal se usazuje na vnitřní straně kuželovité části rotačního bubnu, kalová voda (filtrát) odtéká přes hranu bubnu ve válcovité části, odvodněný kal je dopravován šnekem (otáčejícím se uvnitř bubnu o něco menšími otáčkami než buben) k zúženému konci komolého kužele, kde vypadává z odstředivky. Kondicionace kalu je potřebná. Koncentrace sušiny odvodněného kalu dosahuje 30-35 %. Centrifuga se vyznačuje vysokou výkonností a malými požadavky na plochu a prostor oproti ostatním odvodňovacím zařízením.



Obrázek 70: Odstředivka

### Terciární čištění

Pod pojmem terciární čištění rozumíme ty operace či jejich kombinace, které zvýší jakost biologicky vyčištěné odpadní vody na takovou úroveň, že ji lze použít jako užitkovou vodu, technologickou, či v krajních případech pro úpravu na vodu pitnou. Setkáváme se zde s uzavřenými cykly použití vody, neboť mnohdy je snazší připravit vodu požadované jakosti z



odpadní vody biologicky vyčištěné než z vody říční, přičemž se šetří poplatky za odběr vody z toků. Při terciárním čištění používáme tyto hlavní procesy a operace.

*a) Separace jemně dispergovaných částic*

Jedná se většinou o zbytky biomasy, které pronikly dosazovací nádrží. K separaci se používají pískové filtry či bubnová mikrosíta.

*b) Odstranění zbytkových rozpuštěných organických látek*

Organicky znečištěné odpadní vody po biologickém čištění jsou tvořeny metabolickými produkty organismů funkční polykultury. K jejich odstranění lze použít sorbci na aktivní uhlí.

*c) Snížením obsahu solí*

Zvláště při určitém cyklu vody je nebezpečné postupně zvyšovat koncentraci solí. K eliminaci lze použít běžné metody - ionexy, reverzní osmózu apod.

*d) Hygienické zabezpečení*

Podobně jako u pitné vody chlorace, UV záření a ozonizace.

## **5. TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ Z MLÝNŮ, SLADOVEN, CUKROVARŮ A PIVOVARŮ**

Při zpracování plodin v potravinářských průmyslových provozech vzniká řada odpadů, které je nutno vhodným způsobem zpracovat pro jejich využití či odstranění. Množství, druh a složení produkovaných odpadů je závislé na typu zpracovatelského podniku, druhu a skladbě zpracovávané suroviny, druhu konečného výrobku apod. Potravinářský průmysl je charakteristický produkcí významného podílu kapalných odpadů, s vysokým obsahem organických látek, které jsou zpravidla netoxické a dobře biologicky rozložitelné. Odpady produkované z potravinářství přednostně využíváme, čímž je dosahováno snížení znečištění povrchových vod a zvýšení efektivity celého výrobního procesu. V potravinářství je typické, že určitý podíl surovin se stává odpadem již před zpracováním v zařízení (zejména pro nevyhovující hygienické požadavky na surovinu). Nevyhovujícími parametry může být např. obsah těžkých kovů, reziduí pesticidů, PCB, mykotoxinů, kontaminace mikroorganismy nebo parazity apod. Odpady z potravinářského průmyslu jsou nejčastěji využívány především ke krmení hospodářských zvířat, či ke hnojení půdy. Vzhledem k nákladům a výsledné efektivitě je využití k energetickým účelům méně časté.

## 5.1 Zpracování odpadů z mlynářského průmyslu

V rámci provozů mlynářského průmyslu je produkována řada specifických druhů odpadů, mezi které řadíme:

- *krmné mouky*, které vznikají při mletí obilného zrna (především pšeničného a žitného) a jedná se o tzv. zadní mouky (mají nejhorší kvalitu a tmavou barvu). Jsou typické obsahem značného množství organických i minerálních látek. Jejich použití je možné při krmení hospodářských zvířat,
- *otruby*, což jsou zbytky po mlýnském zpracování pšenice a žita, obsahující převážně obalové části zrna. Otruby jsou hodnotným krmivem, nesmějí však být nakyslé, hořké nebo zatuchlé či napadené škůdci a plísněmi,
- *čistírenské klíčky*, které se získávají při loupání a kartáčování zrna (především žita). Cílem procesu čištění je odstranění oplodí, obalových vrstev zrna, klíčků a vousků, s cílem zvýšení trvanlivosti mouky. Čistírenské klíčky obsahují vitamíny B, E, tuky, enzymy a popeloviny. Jsou přímo využitelné jako součást krmných směsí pro drůbež,
- *mlýnské klíčky mačkané*, se získávají při luštění pšeničných krupic na mlecích válcích. Tvarem se podobají vločkám a obsahují až 40 % otrub. V sušině obsahují až 25 % hrubého proteinu a využívají se při výrobě krmných směsí,
- *zemní prach z filtrů*, který se zpracovává kompostováním, jako složka kompostovací zakládky,
- *obtížně využitelný odpad*, kam řadíme např. smetky z mlynářských provozů, zbytky pytlů, sáčků apod. Nakládá se s nimi jako s ostatním odpadem, využitelné složky se vytrídí, ostatní nevyužitelné složky se odstraňují na skládkách či ve spalovnách komunálních odpadů.

## 5.2 Odpady ze sladovnického průmyslu

Mezi odpady produkové tímto odvětvím patří:

- *výčist (zadina)*, což jsou odpady (tzv. zadní ječmen) vznikající při třídění ječmene, které propadávají sítím s velikostí otvorů 2,2 mm. Výčist představuje cca 4 % hmotnosti zpracovávaného ječmene a používá se jako krmivo,
- *splávky*, což jsou lehká ječmenná zrna a příměsi, které vyplouvají na povrch při máčení ječmene. Splávky představují cca 0,2 až 0,5 % zpracovávaného ječmene. Splávky mají hlediska složení a krmivářských vlastností podobné parametry jako výčist,

- *sladový květ*, což jsou ulámané zárodečné kořínky, získané při odkličování vysušeného sladu. Kořínky jsou velmi křehké a odlamují se. Sladový květ představuje v průměru 4 % z hmotnosti vyrobeného sladu. Jedná se o nejhodnotnější druhotnou surovinu produkovanou sladovnickým průmyslem, s vysokým obsahem živin, vitamínů a enzymů. Pokud má být využit ke krmení hospodářských zvířat, pak je nutné, aby měl dobrou jakost, nebyl připálený, přeschlý a může obsahovat maximálně 4 % sladového prachu, slupek a úlomků,
- *odpadní máčecí vody*, vznikají jako odpadní vody z máčení ječmene, které probíhá z důvodu iniciace klíčení zrna. Nejčastěji jsou zpracovány na podnikové čistírně odpadních vod nebo mohou být využity jako závlaha.

### 5.3 Odpady z pivovarnického průmyslu

Mezi odpady produkované tímto odvětvím patří:

- *pivovarské mláto*, které je tvořeno nerozpustnými složkami sladu a dále látkami, které při procesu rmutování (což je proces přeměny sloučenin sladu do roztoku, hlavně škrobu a části bílkovin) koagulovaly a zachytily se ve vrstvě mláta. Podíl suchého mláta představuje asi 27 % použitého sladu. Používá se buď ke krmení hospodářských zvířat, a to buď v čerstvém stavu nebo po vysušení. Mláto v čerstvém stavu snadno podléhá zkáze,
- *pivovarské kvasnice*, což jsou odpadní kvasnice, které již není možno použít jako zákvas. Při výrobě je produkováno asi 0,5 % hustých a 0,25 % lisovaných kvasnic z celkového objemu vyrobeného piva. Vzhledem k tomu, že kvasnice obsahují cenné minerální látky, aminokyseliny a vitamíny, tak je nejvhodnějším využitím krmení hospodářských zvířat,
- *hořké kaly*, které vznikají při sedimentaci a filtraci mladiny, které lze využít jako krmivo pro hospodářská zvířata,
- *odpadní vody*, které jsou produkovány v různých fázích technologického procesu výroby piva. Nejčastěji jsou čištěny na podnikových ČOV, případně je lze využít k závlaze.

### 5.4 Odpady z cukrovarnického průmyslu

V rámci tohoto odvětví jsou produkovány zejména tyto odpady:

- *vyslazené řízky*, které vznikají po vyluhování cukru ze sladkých řízku v difuzérech. Řízky představují podíl 70 až 90 % hmotnosti řepných bulev. Průměrně složení řízku

je 8 % sušiny, 0,4 % sacharidů a další látky. Řízky je možno upravit lisováním na sušinu 14 až 18 % případně sušit na sušinu 88 % (extrémně nákladné, využívané minimálně). Využití řízků je jako hodnotné sacharidové krmivo pro hospodářská zvířata. Řízky se zkrmují buďto v čerstvém stavu (denní krmná dávka 25 až 35 kg řízků na 1 kus u skotu, 4 až 8 kg na kus u prasat) případně jako sušené (součást krmných směsí). Častý způsobem zpracování řízků je jejich konzervace silážováním. Řízky jsou společně s řepným chrástem ukládány po vrstvách do silážních jam. Vrstvy jsou důkladně hutněny pro vytvoření anaerobních podmínek příznivých pro mléčné kvašení, jehož produkty (zejména kyselinou mléčnou) a příznivou hodnotou pH je silážovaná hmota konzervována,

- *melasa*, což je hustý sirup, který vzniká při oddělování (odstředování) poslední (zadinové) cukroviny (směs cukerných krystalů a sirupu), ze které již nelze krystalizací v provozních podmínkách získat cukr. Součástí melasy jsou všechny necukry obsažené v řepě a dále rozpustné látky, které byly použity při výrobním procesu jako přísada nebo vznikly rozkladem. Melasa je produkováno asi 5 % hmotnosti bulev. Složení melasy kolísá v závislosti na jakosti cukrové řepy a technologickém postupu výroby. Melasa obsahuje průměrně 23 % sušiny, 50 % cukrů, 9,5 % nerozpuštěných látek, 5 % stravitelných dusíkatých látek a 8,8 % popelovin. Hodnota pH se u melasy pohybuje v rozmezí 7 až 7,5. Z minerálních látek melasa obsahuje nejvíce draslíku (5 %), nezanedbatelný je i obsah stopových prvků. Melasa se využívá jako surovina pro další průmyslové zpracování při výrobě lihu, droždí, toruly, organických kyselin a rozpouštědel nebo pro krmení hospodářských zvířat,
- *řepné kořínky a úlomky*, které se získávají při praní bulev před jejich hlavním zpracováním. Těchto odpadů je produkováno asi 1 až 3 % hmotnosti bulev cukrové řepy. Řepné kořínky a úlomky obsahují 8 až 13 % cukrů a po odstranění nežádoucích příměsí se používají buďto ke krmení hospodářských zvířat (denní krmná dávka 15 kg na 1 kus u skotu a 5 kg na 1 kus u prasat). Dalším možným zpracováním je silážování,
- *saturační kaly*, které vznikají při filtraci nasycených cukrovarnických šťáv v množství 6 až 8 % z hmotnosti zpracované cukrové řepy. Z hlediska složení obsahují 50 až 52 % sušiny, 6 až 10 % organických látek, 1 % cukrů, 26 % CaCO<sub>3</sub>, 0,2 % N, 0,4 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,2 % K<sub>2</sub>O a 2 % MgO. Pro vysoký obsah vápníku jsou tyto kaly velmi hodnotným vápenatým hnojivem. Z hlediska úpravy je prováděno jejich odvodnění na kalolisech, kde je sušina zvýšena na hodnotu 65 %, tak aby byly dobře aplikovatelné na půdu a lépe využitelné,

- *zemité kaly*, které jsou tvořeny zbytky ornice a balastními minerálními látkami, transportovanými do cukrovarů společně s cukrovou řepou. Z bulev cukrové řepy jsou tyto látky odstraňovány na separátorech strojní mechanizace pro vykládání nebo se získávají po sedimentaci plavící vody v plavicích kanálech. V podstatě se jedná o zbytky orné půdy, což charakterizuje její další využití. Tyto kaly jsou po odvodnění navraceny zpět na zemědělské pozemky nebo jsou využívány ke kompostování jako součást kompostovací zakládky,
- *odpadní vody*, které vznikají v různých fázích procesu zpracování cukrové řepy. Řadíme sem odpadní vody plavící, prací, difúzní, kondenzační a z lisování řízků. Nejvíce zatížené jsou odpadní vody difúzní a z lisování řízků, které je nutné bezpodmínečně čistit na podnikové ČOV. Ostatní druhy produkovaných odpadních vod je možné buďto rovněž čistit na podnikové ČOV nebo je možné je využít k závlaze.

### **5.5 Odpady z lihovarnického průmyslu**

V rámci tohoto odvětví jsou produkovány zejména tyto odpady:

- *výpalky*, což je zbytek tzv. zápary (tvořené ztekuceným a zcukernatělým škrobem, následně prokvašeným), zbavené lihu procesem destilace. Výpalky vytékají kontinuálně ze záparové kolony a jsou odčerpávány do výpalkové jímky, odkud jsou následně přečerpány do nákladní cisterny a používány k hnojení zemědělské půdy, do kompostovací zakládky nebo ke krmení hospodářských zvířat,
- *lihovarská šáma*, což jsou vápenato-hořečnaté kaly, které vznikají společně s produkcí výpalků. Šáma je produkována ve dvou formách, jako černá a bílá. Vápník je v šámě obsažen v uhličitanové a hydroxidové formě. Po vysušení je možno šámu používat na zemědělské půdě k vápnění,
- *odpadní vody*, které vznikají při plavení a praní brambor, praní a máčení obilnin, čištění strojního vybavení technologické linky apod. Tyto odpadní vody neobsahují koncentrované znečištění a buďto se čistí na podnikové ČOV nebo je možno je využívat k závlaze.

### **5.6 Odpady ze škrobárenského průmyslu**

V rámci tohoto odvětví jsou produkovány zejména tyto odpady:

- *bramborové zdrtky*, což je zbytek, který se tvoří ve vypírací stanici po vyprání bramborové třenky (rozstrouhaná bramborová hmota). Těchto odpadů je produkováno

asi 3 až 4 % suchých zdrtek z hmotnosti zpracovávaných brambor. Z hlediska využití je možné zdrtky použít ke krmení hospodářských zvířat. Zdrtky obsahují malý podíl bílkovin a vyšší podíl škrobu (30 až 60 %), z tohoto důvodu je při krmení nutno krmnou dávku doplnit bílkovinnými krmivými. Zdrtky se nejčastěji lisují, čímž je dosahováno sušiny v rozmezí 15 až 25 % a následně se přímo zkrmují (s řezankou) nebo se silážují,

- *odpadní vody, které vznikají při plavení a praní plodin.* Tyto odpadní vody obsahují množství nečistot ve formě organických látek (klíčky, zbytky natě apod.) a anorganických látek (zemina, písek). Tyto odpadní vody jsou čištěny pomocí sedimentačních procesů, kdy se odsazená odpadní voda recirkuluje zpět jako plavící voda a sediment se např. kompostuje,
- *technologické odpadní vody z výrobního procesu,* které mají vyšší úroveň obsahu znečišťujících látek a čistí se na podnikové ČOV nebo je lze využívat k závlaze. Pokud je k výrobě škrobu používána kukuřice, pak jsou při zpracování produkovány druhotné odpadní látky jako kukuřičné mláto, klíčky, glutén a pokrutiny.

## 5.7 Odpady z vinařského průmyslu

V rámci tohoto odvětví jsou produkovány zejména tyto odpady:

- *střapiny,* což jsou zbytky hroznů po odstranění bobulí. Střapiny jsou typické vyšším obsahem celulózy a po vhodné úpravě (sušení, drcení) je lze přidávat do krmných směsí nebo kompostovat,
- *semena,* která obsahují asi 20 % oleje. Olej má příznivý obsah mastných kyselin a lze je získávat extrakcí organickými rozpouštědly a je dobře využitelný v potravinářském průmyslu,
- *výlisky (matoliny),* které vznikají jako zbytek po vylisování moštu ze rmutu (hroznové drti). Výlisky obsahují slupky bobulí, střapiny i semena. Těchto odpadů je produkováno asi 15 až 30 % z hmotnosti zpracovávaných hroznů. Čerstvé výlisky lze využít v malém množství pro krmení hospodářských zvířat (skotu a ovcí), a to buď přímo, nebo až po předchozí extrakci barviv a cukrů horkou okyselenou vodou. V krmné dávce je přípustné pouze omezené množství výlisků, protože obsahují látky jako třísloviny, hořké látky a kyselinu vinnou, které mohou působit zažívací potíže. Vhodnějším způsobem zpracování je zpracování výlisků v rámci výroby destilátů, kdy z nich lze získat 2 až 5 % hmotnostních destilátu. Dalším možným způsobem zpracování je kompostování,

- *kvasničné kaly*, které vznikají po vylisování sedimentovaných kalů a mrtvých kvasinek z prokvašeného moštu na kalolisech. Při tomto zpracování je možno získat asi 50 % nekvalitního vína. Z celkového množství vyrobeného vína je asi 5 % tvořeno čerstvými kvasničnými kaly. Tyto odpady lze zpracovat na destilát, případně z nich vyrábět vinan vápenatý a kyselinu vinnou. Ke krmným účelům jsou kaly nevhodné,
- *vinný kámen*, který se tvoří jako kyselý vinan draselný jako důsledek přidavku stabilizačních látek proti zákalům (např. sorbanu draselného). Vinný kámen je vhodný pro výrobu kyseliny vinné.

## 6. SANACE PŮD A VOD KONTAMINOVANÝCH ROPNÝMI PRODUKTY

Fungování moderní společnosti je do velké míry založeno na využívání ropy a produktů z ní vyrobených, tzv. ropných látek. Ropné látky jsou v nějaké podobě využívány v každém z oborů lidské činnosti. Přes vysoký stupeň vyspělosti technického vybavení i nepřeborné množství preventivních opatření a bezpečnostních předpisů stále existuje potenciální možnost úniků nebo havárie.

K tomu je potřeba připočítat staré ekologické zátěže. Jedná se všeobecně o pozůstatky provozních úniků nebo havárií v bývalých průmyslových areálech, skladech pohonných hmot chemikálií, doprovodné činnosti důlní i povrchové těžby nerostných surovin, úpravárenství nerostných surovin, armádní aktivity a mnoho náhodných havárií. Všechny uvedené problémy může řešit jediné moderní společnost, která pochopila, že komplexní péče o životní prostředí a nejen řešení akutních problémů spojených s efektivitou výroby a ekonomickým růstem je jedním z nejjasnějších znaků její vyspělosti. Pro účely sanací půd a vod kontaminovaných ropnými produkty bylo vyvinuto široké spektrum sanačních metod. Spektrum dostupných sanačních metod odpovídá širokému spektru chemického složení ropných produktů, rozsáhlému využití v mnoha oborech a činnostech lidské společnosti, různorodostí matric, které mohou být zasaženy i stupni vědeckého poznání aktuálním technickým možnostem, které mohou být uplatněny. Stále probíhající výzkum přináší cestou laboratorních, zkušebních a poloprovozních testů do praxe stále nové možnosti. Cílem této kapitoly je představit ucelený přehled technologií v praxi používaných pro sanace zemín a vod ve spojení s ropnými látkami. Kompletní informace o jejich možnostech a využití však lze získat jen studiem aktuální literatury a sledováním výstupů jednotlivých výzkumných institucí a nabídky firem, které se problematikou sanací zabývají.

Pojem sanace lze definovat jako přijetí opatření k nápravě škod způsobených lidskou (v širším chápání i přírodní) činností na krajině nebo majetku. Sanace zahrnuje samotné odstranění příčin a následků způsobených škod. Nápravná opatření učiněná v krajině se nazývají revitalizace a rekultivace.

### **Sanace nesaturované zóny**

Saturovanou zónou je v hydrogeologii označována zóna nad hladinou podzemní vody, v níž vlhkost  $w$  je menší než celková pórovitost  $n$ , přičemž tlaková výška  $z < 0$ . V pórech horninového prostředí je zde přítomna kapalná fáze (voda) ve formě vlhkosti a plynná fáze (půdní vzduch). Pohyb kapalin se děje převážně ve vertikálním směru a pro jeho rychlost je důležitým parametrem právě obsah vlhkosti. V principu podobně se chovají další pevné materiály, především stavební konstrukce, stavební sutě nebo skládky, proto je jejich sanace metodicky řešena společně se sanacemi horninového prostředí.

#### **6.1 Sanace nesaturované zóny *in situ***

*In situ* je odborný termín pocházející z latiny, který v češtině znamená „v přirozené poloze“, volně použito „na místě“. Je tím myšleno, že se něco vyskytuje na „původním místě“ a tam je to zpracováváno, zkoumáno, v tomto případě sanováno. Opakem *in situ* je *ex situ*, tedy „mimo původní místo“ výskytu. V českých i cizojazyčných odborných textech je tradice psát „*in situ*“ kurzívou tak, aby došlo k odlišení a zvýraznění textu. Možnosti sanace *in situ* zahrnují celou řadu fyzikálních, chemických a biologických postupů používaných buď samostatně, kombinovaně nebo ve spojení s jinými metodami.

Sanace *in situ* zpravidla přináší mnoho problémů. Mezi hlavní problémy patří velmi obtížné až nemožné vytýčení prostorového rozsahu kontaminace a následně zajištění a ověření (prokázání investorům) účinnosti použité metody. Z těchto důvodů je metody *in situ* vhodné navrhnout druhořadě po metodách *ex situ*, a to v místech, kde řešení *ex situ* není možné. Jedná se především o zastavěné průmyslové nebo obytné zóny nebo o případy, kdy nelze dražší sanaci *ex situ* volit z ekonomických důvodů. Ve srovnání se sanacemi *ex situ* vykazují sanace *in situ* menší účinnost.

#### **6.2 Biologické metody *in situ***

Biologické metody používají k degradaci kontaminantů aktivitu mikroorganismů, a to původních (autochtonních) nebo přinesených (alochtonních). Nespornou výhodou všech biologických metod je rozklad nebo transformace kontaminantů přirozenými procesy, bez



vzniku dalších nebezpečných produktů nebo oddělených frakcí. Další výhodou jsou nízké finanční náklady na přirozeně probíhající procesy.

Základním požadavkem pro aplikaci biologických metod je biologická rozložitelnost uvažovaného kontaminantu. Činnost mikroorganismů „pro člověka“ musí být pro tyto mikroorganismy nějakým způsobem výhodná, prakticky se jedná o množení a přežití, které musí být na zájmové lokalitě efektivnější než v okolní hornině. Pro přítomné mikroorganismy musí být zajištěny vhodné životní podmínky, tzn. makrobiotické (N, P) a mikrobiotické (K, Mg, Mn, Fe, aj.) prvky, pH, Eh, vhodná teplota a vlhkost a terminální akceptory elektronů (kyslík, železo, dusík, síra). Mikrobiální procesy mohou probíhat aerobně nebo anaerobně, z toho vychází potřeba nebo škodlivost vzdušného kyslíku. Pro sanaci ropných kontaminací jsou využívány procesy aerobní. Jejich konečnými produkty jsou CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, biomasa a teplo. Naopak anaerobní procesy vedou často ke vzniku nejasných produktů, jsou pomalejší a velmi citlivé na okolní podmínky.

Obvyklými organismy využitelnými pro biologickou sanaci jsou bakterie, kvasinky, plísně, houby působící bílou hnilobu dřeva a vyšší rostliny (fytoremediace). V prakticky probíhajících procesech lze však využít bakterie pro celý objem horniny nebo vyšší rostliny pro sanaci povrchových vrstev v dostupnosti kořenového systému.

#### *Fytoremediace*

Fytoremediace využívá činnosti vyšších rostlin pro degradaci, extrakci nebo imobilizaci polutantů. Dostatečná fytoremediace může probíhat jen v součinnosti s mikroorganismy symbioticky přítomnými v kořenovém systému – rhizoremediace. Fytoremediace je používána pro eliminaci organických i anorganických polutantů. S výhodou lze použít jen rostliny, které rostou rychle, přičemž akumulují dostatečné množství polutantu a následně je lze sklídit a dále zpracovat. Fytoremediace je ze všech dostupných metod in situ nejméně finančně nákladná a současně nejméně náročná na provoz a údržbu a je možné tímto způsobem obsáhnout plošně rozsáhlá území. Nezanedbatelnou výhodou je i estetický přínos pro krajinu jinak zdevastovanou např. povrchovou těžbou nebo pozůstatky rozsáhlých průmyslových areálů. Fytoremediace je obvykle využívána in situ, lze ji však aplikovat na speciálních plochách na převezené zemině nebo sedimentech.

#### *Bioventing*

Principem bioventingu je vhánění vzdušného kyslíku do nesaturované zóny. Transport vzdušného kyslíku probíhá kompresory přes ventingové vrty, a to vháněním čerstvých plynů nebo naopak odsáváním půdních plynů. V určitých geometrických uspořádáních lokality lze vzdušiny přivádět jen rozdíly atmosférického tlaku, bez spotřeby elektrické energie. Kyslíku

se přivádí jen tolik, kolik je potřeba pro oxidaci polutantů. Tím je snížena spotřeba energie i těkání polutantů na povrch. Bioventing je použitelný pro degradaci všech aerobně rozložitelných polutantů s rozdělovacím koeficientem oktanol-voda pod  $5 \cdot 10^3$ , tj. pro ropné uhlovodíky, PAU, aceton, benzen, toluen, ethylbenzen, xyleny a naftalen. Bioventing lze provádět také jako tzv. kometabolický bioventing, při kterém se společně se vzduchem do vrtu vhání látky podporující aktivitu přítomných mikroorganismů. Tato metoda je velmi účinná, protože v neřízeném průběhu je půdní vzduch spotřebován na oxidaci polutantů a prostředí přechází do anaerobního režimu, čímž se přirozená degradace zastaví.

#### *Podporovaná bioremediace*

Tato metoda využívá přítomných autochtonních mikroorganismů, které jsou ve své aktivitě podporovány zapouštěním živných roztoků a dalších podpůrných sloučenin (terminální akceptory elektronů, donory elektronů, povrchově aktivní látky). Horninové prostředí lze také inokulovat vhodnými bakteriálními kmeny. Výsledkem je zvýšená účinnost biologické degradace.

### **6.3 Fyzikální a chemické metody *in situ***

Kombinace fyzikálních a chemických procesů umožňuje vznik mnoha různorodých sanačních metod založených na různých principech a disponujících různými přednostmi i nedostatky a pohybujících se v různých cenových hladinách. Pravděpodobně nejrozšířenější je metoda ventingu.

#### *Venting*

Venting (Soil Vapor Extraction) je jednou z neznámějších, nejpoužívanějších a nejefektivnějších metod sanace nenasycené zóny. Jedná se o odsávání znečištěných půdních plynů v prostoru tzv. podtlakového pole. Podtlakové pole je vytvářeno nad kontaminovaným prostředím soustavou potrubních rozvodů. Odsávaný půdní plyn obsahující těkavé polutanty je přiváděn k dekontaminační stanici, kde je vyčištěn. Tato metoda je využívána *in situ* i *ex situ*. Metoda je vhodná pro odstranění těkavých organických látek, benzenu, toluenu, ethylbenzenu, xylenů i ropných látek, částečně také PAU.

#### *Chemická oxidace*

Chemická oxidace *in situ* je relativně novou sanační metodou založenou na infiltraci oxidačního činidla do nenasycené zóny. Ideálními konečnými produkty jsou oxid uhličitý, voda a sloučeniny železa nebo manganu. V podstatě tak nevznikají další nechtěné odpady nebo sloučeniny. Metoda je obecně použitelná pro všechny polutanty, které lze degradovat oxidací. Předností je vysoká rychlost rozkladu, zřetelným nedostatkem však je procesní i

legislativní náročnost při práci s oxidačními činidly. Mezi nejpoužívanější činidla patří manganistan draselný  $\text{KMnO}_4$ , manganistan sodný  $\text{NaMnO}_4$ , ozon nebo směs peroxidu vodíku  $\text{H}_2\text{O}_2$  a železnatých iontů označována jako Fentonovo činidlo. S úspěchem je využitelná pro degradaci ropných uhlovodíků, PAU, ale i organických rozpouštědel, chlorovaných ethylenů a alkanů, fenolů, pesticidů, herbicidů, výbušnin.

#### *Praní půdy*

Praní (vymývání) půdy je založeno na infiltraci vodných roztoků povrchově aktivních látek vhodných k rozpuštění nebo pozměnění povrchových vlastností polutantů, jedná se tedy o extrakci polutantů. Vzniklý roztok je z horninového prostředí odčerpáván.

Použití metody podmiňuje výborná znalost hydrogeologických podmínek na lokalitě a dostatečné posouzení možných směrů a rychlostí proudění podzemních vod, a tím také rozpuštěných polutantů. Nedostatečná propustnost horninového prostředí vylučuje použití této metody. Metoda je použitelná pro eliminaci ropných uhlovodíků, PAU, benzen, toluen, ethylbenzen, xyleny, kresoly, fenoly, ale i radionuklidů a toxických kovů. Směsné kontaminace však nelze odstranit jedním rozpouštědlem. Příprava směsných rozpouštědel je však náročná. Metoda je využitelná pro nesaturovanou i saturovanou zónu.

#### *Stabilizace a solidifikace*

Stabilizace je převedení polutantů do stabilní chemické vazby, která je málo rozpustná a vytváří pro okolí jen minimální riziko. Solidifikace je převedení materiálu do mechanicky odolné a téměř nepropustné, monolitické struktury. Chemické vazby nemusí být tímto procesem ovlivněny, jsou uzavřeny v okolním materiálu. Obě metody jsou velmi podobné a často do sebe přecházející. V provedení in situ se používají v případech, kdy není těžba materiálů ekonomicky únosná, nebo kdy se nepočítá s dalším intenzivním využívání území. Metod se používá především pro stabilizaci kalů v kalových lagunách a je vhodná pro ošetření nesaturované i saturované zóny. Na kontaminovaných lokalitách je zapracovááno stabilizační nebo solidifikační činidlo. Obvykle se používají hydraulická pojiva (cement), popílky, strusky, vápenný hydrát, někdy asfalty. Metoda je vhodná pro široké spektrum polutantů. Aplikaci musí předcházet dobrá znalost přítomných škodlivin a počítačové modelování a laboratorní testování, pomocí kterého je určeno vhodné činidlo a následně je odvozena jeho odolnost a trvanlivost.

### **6.4 Sanace nesaturované zóny *ex situ***

*Ex situ* je odborný termín pocházející z latiny, který v češtině znamená „mimo přirozenou polohu“, volně použito „mimo místo“. Je tím myšleno, že se něco vyskytuje na „mimo

původní místo výskytu“ a je to tedy mimo původní místo výskytu zpracováváno, zkoumáno, v tomto případě sanováno. Opakem *ex situ* je *in situ*, tedy „mimo původní místo“ výskytu. V českých i cizojazyčných odborných textech je tradice psát „*ex situ*“ kurzívou tak, aby došlo k odlišení a zvýraznění textu. Jedná se tedy o technologie čištění vytěžených materiálů, přepravených do vhodného areálu. Obecně jsou metody *ex situ* účinnější, než obdobné metody použité *in situ*. V některých případech je těžba a transport další zátěží (sedimenty, zeminy), v jiných je částí logického postupu, neboť materiál na místě zůstat nemůže (technologické odpady, kaly z výroby, demolice, havárie dopravních prostředků nebo průmyslové havárie).

### **6.5 Biologické metody *ex situ***

Při sanaci pevných materiálů *ex situ* biologickými materiály se v naprosté většině technologií využívá aerobní degradace. Terminálním akceptorem elektronů je tedy kyslík. Hlavní výhodou těchto procesů zřetelně vyšší rychlost ve srovnání s procesy anaerobními a vznik přirozených produktů: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, biomasy a tepla. Kyslík se používá obvykle ve formě vzdušného kyslíku. Čistý kyslík nebo oxidující sloučeniny jsou v těchto případech zbytečně nákladné.

#### *Kompostování*

Vytěžený substrát se smíchá s organickým materiálem (odpadní biomasa z údržby zeleně, dřevní štěpka, piliny, sláma, hnůj, kejda aj.) a takto připravená zakládka se umístí do kompostovacího zařízení. Preferován je termofilní biologický rozklad, pro který jsou optimální poměry C:N = 30:1. Do zakládky se intenzivně vhání vzdušný kyslík za stálé kontroly vlhkosti a teploty substrátu. Kompostování lze použít pro degradaci biologicky rozložitelných polutantů. Při navrhování procesu musí být dostatečně známý obsah polutantů, neboť nevhodné složení či vysoké koncentrace mohou vést k zastavení biodegradčních procesů.

#### *Biologické suspenzní systémy*

Principem metody je biologické čištění zemin a kalů v suspenzních bioreaktorech. Jemnozrnný materiál je smísen s vodou za výsledného podílu pevného materiálu 10-30 %. Vzniklá suspenze je čištěna v reaktoru nebo v lagunách. Řízení je regulován přínos kyslíku a živin potřebných pro mikroorganismy, pH, teplota, příp. další fyzikální a chemické parametry. Metoda je vysoce účinná pro čištění materiálů silně kontaminovaných ropnými látkami, organickými rozpouštědly, pesticidy, herbicidy atd. Postup čištění a výsledky lze velmi dobře kontrolovat. Reaktory lze provozovat i v anaerobních podmínkách nebo lze

použit i postupné čištění nejprve v anaerobních, poté v aerobních podmínkách. Metoda je však prodražena těžbou, transportem, přípravou materiálů a provozováním reaktorů.

#### *Fyzikální a chemické metody ex situ*

Chemické metody pracují na principu extrakce polutantů z čištěných materiálů. Fyzikální metody jsou používány pro přípravu těchto materiálů např. drcením, mletím a gravitačním síťováním, kdy je vydělena nejjemnější frakce obsahující nejvyšší koncentrace polutantů.

#### *Extrakce*

Extrakce je oddělení polutantů ze zemin, kalů, sedimentů nebo demoličních sutí. Pro extrahování jsou používány organická rozpouštědla, do kterých ochotně přechází celá řada polutantů v nich rozpustných. Nutností je požití vhodného činidla pro uvažované polutanty. V následném procesu jsou rozpouštědla oddělena od pevné fáze. Hlavní nevýhodou metody je nutnost dalších operací, při kterých jsou z pevných materiálů odstraněny zbytky extrakčního činidla, a čištění samotného činidla, které je výhodné recyklovat. Investiční náklady do technologického vybavení jsou příliš vysoké.

#### *Praní zemin a demoličních sutí*

Při praní jsou polutanty vymývány vodou nebo vodou s povrchově aktivními látkami (na rozdíl od extrakce, kdy jsou polutanty rozpouštěny do rozpouštědla). Anorganické i organické polutanty díky své schopnosti vázat se na nejjemnější části horniny (jíly, organickou hmotu) mohou být z materiálu vyprány ve formě suspenze společně s těmito částicemi. Praní zemin lze využít pro čištění od ropných látek, a těžkých kovů, příp. některých dalších organických látek a pesticidů. Nevýhodou je nutnost dalšího čištění technologických vod. V případě směsných kontaminací není jednoduché připravit správný vypírací roztok. Proces je soustředěn na nejjemnější části materiálu a celková efektivita tedy není vysoká.

#### *Stabilizace a solidifikace*

Podstata metody je shodná s metodou prováděnou *in situ*, tedy jde o převedení polutantů do stabilní chemické vazby, která je málo rozpustná a vytváří pro okolí jen minimální riziko. Solidifikace je převedení materiálu do mechanicky odolné a téměř nepropustné, monolitické struktury. Chemické vazby nemusí být tímto procesem ovlivněny, jsou uzavřeny v okolním materiálu. Obě metody jsou velmi podobné a často do sebe přecházející. Činidla jsou zapracovávána na lokalitách při těžbě materiálu nebo až po přepravení do zpracujícího provozu. Obvykle se používají hydraulická pojiva (cement), popílky, strusky, vápenný hydrát, někdy asfalty. Metoda je vhodná pro široké spektrum polutantů. Aplikaci musí předcházet

dobrá znalost přítomných škodlivin a počítačové modelování a laboratorní testování, pomocí kterého je určeno vhodné činidlo a následně je odvozena jeho odolnost a trvanlivost.

### *Spalování*

Spalování za přítomnosti kyslíku při teplotách 870 -1200 °C se používá pro likvidaci těžce rozložitelných organických látek. Chemickým principem je oxidace za vzniku CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Spalovací metody jsou vysoce účinné, ještě vyšší účinnosti je dosahováno čištěním spalin, které je navíc nutné z pohledu ochrany ovzduší. Metody se primárně používají pro likvidaci zvláště odolných polutantů (chlorované uhlovodíky, polychlorované bifenyly, dioxiny aj.), v případě ropných látek a organických rozpouštědel je využívána také možnost přínosu energie z hoření těchto látek např. při spalování v cementářských pecích. V jiných případech je však nutné podpurná paliva dodávat.

Nejrozšířenější spalovací technologií jsou rotační pece. Jedná se o mírně nakloněné ocelové válce se žáruvzdornou vyzdívkou umožňující provoz do cca 1200 °C. Dalšími možnostmi jsou cirkulační spalovací komory, cirkulační fluidní vrstvy nebo infračervené spalování. Do jisté míry může být spalování součástí jiného výrobního procesu, např. při výrobě cementu v cementářských pecích, při výrobě železa ve vysokých pecích nebo při výrobě elektrické energie v elektrárenských kotlích. Tyto postupy se pak mohou prosadit díky nízké finanční náročnosti, příp. i ziskovosti.

### *Termická desorpce*

Termická desorpce je obdobou spalování, kdy je kontaminovaný materiál tepelně upraven. Pro nízkoteplotní desorpce jsou používány teploty 90-320 °C, pro vysokoteplotní do 600 °C po dobu 15-20 minut. Při tomto procesu se mechanické vlastnosti materiálu mění jen minimálně, takže materiál může být znovu vyžit pro remediaci postižené lokality. Nutností této technologie je čištění uvolněných plynů.

### **Sanace saturované zóny a podzemních vod**

Saturovaná zóna se nachází v horninovém prostředí, kde tlaková výška  $z > 0$  a obsah vlhkosti  $w$  je roven celkové pórovitosti  $n$ . Veškerý pórový prostor je tedy vyplněn podzemní vodou. Voda se zde pohybuje vlivem hydraulického gradientu. Pro saturovanou zónu se také používá pojem zvodněný kolektor, kolektor nebo zvoďeň.

### **6.6 Sanace saturované zóny a vod *in situ***

Vzhledem k povaze saturované zóny a výskytů značných objemů podzemních vod jsou metody *in situ* pro čištění podzemních vod nejrozšířenější. Opět se jedná o fyzikální,

chemické, biologické a kombinované metody čištění. Řada metod je v principu shodných s metodami sanace nenasycované zóny.

### **6.7 Biologické metody *in situ***

Biologické metody přímo souvisí s tzv. přirozenou atenuací, při které jsou polutanty přirozeně odbourávány. Při tímto způsobu čištění jsou využívány přirozené biologické procesy, při kterých vznikají přirozené produkty, které již není nutné dále zpracovávat nebo čistit. Biologické metody jsou při vyšších koncentracích polutantů pomalejší ve srovnání s metodami fyzikálními a chemickými.

Hlavní metodou je *podporovaná bioremediace*, která je založena na mikrobiální aktivitě podpořené optimalizací fyzikálně-chemických podmínek. Optimalizace spočívá v úpravě pH, Eh, dodávání výživy v podobě makrobiotických i mikrobiotických prvků, dodávání terminálních akceptorů elektronů. Metody lze použít pro rozklad – atenuaci celé řady organických sloučenin a anorganických dusičnanů a síranů.

Podobnou metodou je *biosparing*, při kterém je do podzemní vody vháněn vzdušný kyslík. Kyslík se stává terminálním akceptorem elektronů nutným pro oxidaci polutantů. V některých případech lze vhánět také propan, butan nebo metan, které slouží jako kometabolický substrát pro výživu mikroorganismů. Metody lze použít pro rozklad – atenuaci celé především těkavých organických sloučenin a ropných látek.

### **6.8 Fyzikální a chemické metody *in situ***

Kombinace fyzikálních a chemických procesů umožňuje vznik mnoha různorodých sanačních metod založených na různých principech a disponujících různými přednostmi i nedostatky a pohybujících se v různých cenových hladinách. Pravděpodobně nejrozšířenější je metoda *air sparing*.

*Air sparing* je založen na principu vhánění vzduchu pod hladinu podzemních vod. Po reakci v nasycované zóně vzduch opouští podzemní vodu a přechází do nenasycované zóny, kde ve své aktivitě pokračuje a de facto plynule přechází do principu metody ventingu. Vhánění vzduchu podporuje přirozené biodegradační procesy. Metoda je účinná pro degradaci ropných látek, těkavých organických látek, příp. chlorovaných uhlovodíků.

*Chemická oxidace* je založena na vhánění oxidačních činidel ve formě vodného roztoku do podzemních vod. Mezi nejpoužívanější činidla patří manganistan draselný  $\text{KMnO}_4$ , manganistan sodný  $\text{NaMnO}_4$ , peroxidovosíransodný, ozon nebo směs peroxidu vodíku  $\text{H}_2\text{O}_2$  a železnatých iontů označována jako Fentonovo činidlo. Přirozenými konečnými produkty jsou

oxid uhličitý, voda a sloučeniny železa nebo manganu. Metoda je obecně použitelná pro všechny polutanty, které lze degradovat oxidací.

### **6.9 Sanace saturované zóny a vod *ex situ***

Vzhledem k nutnosti přepravit vodu do vhodného sanačního areálu jsou metody *ex situ* omezeny jen na čištění vod od dobře rozpustných nebo s vodou nemísitelných, ale kapalných polutantů. Polutanty uchycené na horninová zrna zůstávají v tomto případě na původním místě výskytu. I přesto mohou být metody *ex situ* zajímavé, neboť umožňují mnohem detailnější řízení procesu i provádění jeho kontroly. Mimo podzemní vody čerpané na povrch jsou takto čištěny průsaky ze skládek a odpadů, technologické vody, nebo vody vznikající při jiných sanačních postupech.

### **6.10 Biologické metody *ex situ***

Biologické metody mohou být soustředěny do *biologických reaktorů* nejrůznějších technických variant. Časté jsou reaktory s mikroorganismy suspendovanými v kontaminované vodě nebo s mikroorganismy narostnými na biofilmu. Reaktory mohou pracovat v aerobních i v anaerobních podmínkách nebo lze použít i postupné čištění nejprve v anaerobních a poté v aerobních podmínkách. Podstatnou a moderní výbavou všech reaktorů je rozsáhlý systém řízení a on-line monitorování provozních stavů napomáhající vysoké efektivitě čištění. Díky různým sestavám a kombinacím technických řešení i biologických náplní mohou reaktory eliminovat velmi široké spektrum organických polutantů.

Druhou významnou skupinou využívajících biologické metody jsou *kořenové čistírny*, tzv. *umělé mokřady*. Tyto areály využívají pro čištění povrchových i podzemních vod uměle připravené mokřady, kde se uplatňují přirozené geochemické a biologické reakce. Podstatnou složkou mokřadů jsou cévnaté rostliny, ale také mikroorganismy. Umělé mokřady jsou vhodnější pro odstranění anorganické kontaminace vod, eliminace organických polutantů je omezena.

### **6.11 Fyzikální a chemické metody *ex situ***

Kombinace fyzikálních a chemických procesů umožňuje vznik mnoha různorodých sanačních metod založených na různých principech zahrnujících gravitační dělení, stripping, oxidaci, srážení, flotaci, flokulaci, koagulaci, adsorpci a desorpci.



Vzhledem k neobyčejně širokému spektru všech možných metod a jejich kombinací a současně k dobré dostupnosti vyčerpaných vod lze těmito metodami odstranit jakékoliv anorganické i organické polutanty, a to buď současně, nebo postupně.

Mezi nejpoužívanější metody patří *air stripping*, při kterém jsou těkavé látky ve speciálních věžích uvolňovány z vody do plynné fáze. Adsorpce a desorpce probíhají řízeně za pužití vhodných činidel na rozhraních různých fází. *Chemická oxidace* umožňuje oxidovat všechny oxidovatelné polutanty. *Koagulace a flokulace* napomáhá odstranit část polutantů ve formě vloček vznikajících po přidání koagulačních a floukulačních činidel. Vzniklé vločky jsou poté odděleny od vody. *Flotace* je zaměřena na využití rozdílné smáčivosti materiálů, kdy jsou odděleny hydrofobní a hydrofilní částice.

## SEZNAM LITERATURY

- FILIP, J. *Odpadové hospodářství*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. 118 s. ISBN 80-7157-608-5.
- FILIP, J., ORAL, J. *Odpadové hospodářství II*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2003. 78 s. ISBN 80-7157-682-4.
- FILIP, J., BOŽEK, F., KOTOVICOVÁ, J. *Komunální odpad a skládkování*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2003. 128 s. ISBN 80-7157-712-X.
- KÁRA, J., PASTOREK, Z., PŘIBYL, E. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., 2007. 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8.
- KURAŠ, M., DIRNER, V., SLIVKA, V., BŘEZINA, M. *Odpadové hospodářství*. Chrudim: vodní zdroje Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-34-0.
- MALAŤÁK, J., VACULÍK, P. *Technologická zařízení staveb odpadového hospodářství – zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. 178 s. ISBN 978-80-213-1747-5.
- MALAŤÁK, J., VACULÍK, P. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6.
- OCHRANA, L. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Nakladatelství VUT CERM, 2004. 86 s. ISBN 80-214-2847-3.
- PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC PUBLIC, 2004. 288 s. ISBN 80-86534-06-5.
- VÁŇA, J., HANČ, A., HABART, J. *Pevné odpady*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2009. 190 s. ISBN 978-80-213-1992-9.
- VÍTĚZ, T., GRODA, B. *Čištění a čistírny odpadních vod*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 126 s. ISBN 978-8073751807.
- VOŠTOVÁ, J. *Zpracování pevných odpadů II*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 95 s. ISBN 80-01-03488-7.
- ZEMÁNEK, P., BURG, P., KOLLÁROVÁ, M., PLÍVA, P. *Biologicky rozložitelný odpad a kompostování*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., 2010. 113 s. ISBN 978-80-86884-52-3.



<b>Autor</b>	Ing. Petr Junga, Ph.D. doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D. doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D. Mgr. Milan Geršl, Ph.D.
<b>Název titulu</b>	TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II
<b>Vydavatel</b>	Mendelova univerzita v Brně Zemědělská 1, 613 00 Brno
<b>Vydání</b>	První, 2015
<b>Náklad</b>	200 ks
<b>Počet stran</b>	156
<b>Tisk</b>	ASTRON studio CZ, a.s.; Veselská 699, 199 00 Praha 9 Neprošlo jazykovou úpravou.
<b>ISBN</b>	
<b>ISBN</b>	
<b>ISBN</b>	(I. díl)

Tato publikace je spolufinancována z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Byla vydána za podpory projektu OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0302 Inovace studijních programů AF a ZF MENDELU směřující k vytvoření mezioborové integrace.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ