



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

OPTIMALIZACE PROVOZU STÁVAJÍCÍ ČOV

OPTIMIZATION OF WWTP OPERATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Ondráček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. PETR HLAVÍNEK, CSc., MBA

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Ondráček
Název	Optimalizace provozu stávající ČOV
Vedoucí práce	prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment and reuse (4th International Edition). McGraw-Hill, New York. 2003. ISBN 0-07-041690-7.
- [2] SHI, Cao Ye. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Sewage Treatment Plant. London: Intl Water Assn, 2011. ISBN 978-184-3393-825.
- [3] GRADY, C.P.Leslie ; DAIGGER, Glen T. ; LOVE, Nancy G. ; FILIPE, Carlos D.M. Biological Wastewater Treatment, Third Edition, IWA Publishing, 2011. 991 s. ISBN 9780849396793.
- [4] Water Environment Federation Technical Practice Committee. Nutrient Removal, WEF MOP 34 (Water Resources and Environmental Engineering Series). McGraw-Hill Professional. 1 edition. ISBN 9780071737098.
- [5] HLAVÍNEK, P.; MIČÍN, J.; PRAX, P. Příručka stokování a čištění, Brno: NOEL 2000, 2001, ISBN 80-86020-30-4.
- [6] KREJČÍ a kol. Odvodnění urbanizovaných území - koncepční přístup, Brno: NOEL 2000, 2002, ISBN 80-86020-39-8.
- [7] Sborníky Water Science and Technology, IWA Publishing

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce bude zaměřena na optimalizaci provozu stávající ČOV s ohledem na zlepšení sledovaných parametrů na odtoku. Práce je řešena na základě požadavku z praxe ve spolupráci se společností Vodovody a kanalizace Břeclav, a.s.. V první části práce bude zpracována rešerše problematiky. V druhé části práce bude zpracován návrh optimalizace ČOV s využitím softwarového nástroje WEST zakoupeného centrem AdMaS. Podklady si diplomant zajistí po dohodě s vedoucím práce v rámci diplomového semináře. Při zpracování textů, výpočtů a výkresové části dokumentace bude v maximální míře využita výpočetní technika.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na optimalizaci provozu na čistírnách odpadních vod s ohledem na zlepšení sledovaných parametrů na odtoku z ČOV. Je zpracován přehled možností optimalizace objektů na čistírnách odpadních vod. V druhé části práce je řešena optimalizace provozu na stávající ČOV s využitím softwarového nástroje WEST.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace, čistírna odpadních vod, softwarový nástroj WEST

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the optimalization of an operation on SWTP and improvement of figures of drainage from sewage water treatment plants. Possible options of the optimalization are also included. The second part of the thesis deals with the optimalization of operation of the concrete sewage water treatment plant using the WEST programme.

KEYWORDS

Optimization, wastewater treatment plant, a software WEST

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Martin Ondráček *Optimalizace provozu stávající ČOV*. Brno, 2016. 88 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

Bc. Martin Ondráček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Petru Hlavínkovi, CSc., MBA za odbornou pomoc při řešení problému spojených s prací na dané téma, za cenné rady, připomínky a materiály, díky kterým jsem byl schopen práci vypracovat. Poděkování patří i kolektivu ze společnosti Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., jmenovitě panu Ing. Frčkovi a Ing. Plechatému za jejich ochotu se mi věnovat. V neposlední řadě patří velké díky doktorandům z VUT v Brně, fakulty stavební, oboru vodního hospodářství obcí Ing. Lžičařovi a Ing. Macsekovi za jejich odborné vedení při práci se softwarovým nástrojem WEST.

Obsah

1. ÚVOD.....	- 7 -
2. Matematický popis problému optimalizace.....	- 8 -
2.1 Terminologie	- 8 -
2.2 Postup při aplikaci optimalizace.....	- 9 -
2.3 Metody řešení úloh optimalizace.....	- 10 -
2.3.1 Grafická metoda lineárního programování.....	- 10 -
2.3.2 Numerické metody.....	- 10 -
2.3.3 Simplexova metoda.....	- 10 -
2.3.4 Duální úloha	- 11 -
2.4 Multikriteriální optimalizační úlohy	- 12 -
2.4.1 Charakteristika	- 12 -
2.4.2 Základní pojmy	- 12 -
3. Aplikace optimalizačních postupů na ČOV.....	- 14 -
3.1 Analýza ČOV	- 15 -
3.1.1 Kapacita ČOV	- 17 -
3.2 Faktory limitující účinnost ČOV	- 19 -
3.2.1 Stanovení priorit faktorů limitující účinnost ČOV	- 21 -
3.3 Určení způsobu optimalizace	- 23 -
3.4 Volba vhodné varianty optimalizace.....	- 27 -
4. Možná intenzifikace jednotlivých technologií.....	- 29 -
4.1 Biologické čištění – biomasa ve vznosu.....	- 29 -
4.1.1 Aerace.....	- 31 -
4.1.2 Mechanická aerace.....	- 31 -
4.1.3 Pneumatická aerace	- 32 -
4.1.4 Hydropneumatická aerace	- 33 -
4.1.5 Kombinovaná aerace.....	- 33 -
4.2 Biologické čištění – přisedlá biomasa.....	- 35 -
4.2.1 Skrápěný filtr	- 35 -
4.2.2 Kombinovaný systém – skrápěný filtr s aktivací.....	- 36 -
4.2.3 Zdvojený systém – přisedlá biomasa a biomasa ve vznosu	- 37 -
4.2.4 Biologické filtry.....	- 38 -
4.2.5 Rotační biologické kontaktory.....	- 38 -

4.3	Dosazování	41 -
4.3.1	Rozdělení přítoku	41 -
4.3.2	Usměrňovače proudění.....	42 -
4.3.3	Lamelové usazovací nádrže.....	43 -
4.4	Chemické čištění.....	45 -
4.4.1	Soli kovů	45 -
4.4.2	Polymery.....	46 -
4.5	Terciální stupeň čištění.....	48 -
4.5.1	Filtrace odtoku	48 -
4.5.2	Filtrace přes aktivní uhlí	49 -
5.	Optimalizace provozu na ČOV Nová Role	51 -
5.1	Popis lokality ČOV Nová Role	51 -
5.1.1	Základní údaje o provozu ČOV	52 -
5.1.2	Hodnoty přítoku a odtoku z ČOV	53 -
5.1.3	Údaje o vodním recipientu v místě vypouštění OV.....	55 -
5.2	Spotřeba elektrické energie na ČOV	55 -
5.3	Návrh variant pro optimalizaci ČOV s využitím programu WEST	57 -
5.3.1	Software WEST od společnosti MIKE Powered by DHI	58 -
5.3.2	Modelování stávajícího stavu.....	60 -
5.3.3	Varianta I – Předsazená sedimentace	65 -
5.3.4	Varianta II – Terciální stupeň čištění – membránový reaktor	72 -
5.4	Posouzení a vyhodnocení variant.....	76 -
6.	Závěr.....	77 -
	Příloha č.1 - Fotodokumentace	78 -
	Použitá literatura.....	84 -
	Seznam tabulek	86 -
	Seznam obrázků	88 -
	Seznam fotografií	89 -
	Seznam použitých zkratk a symbolů	90 -
	Summary	92 -

1. ÚVOD

Vzhledem ke stále zvyšujícím se požadavkům společnosti na ekologické standardy veškerých provozů jsou stále přísnější limity na vypouštěné znečištění po čištění na čistírnách odpadních vod. Toto vede buď k navýšení kapacity technologické linky na ČOV, nebo k modernizaci stávajících objektů. Tyto činnosti souhrnně označujeme jako optimalizaci provozu. Je nutné provádět tyto kroky, protože právě ČOV jsou považovány za jeden z prostředků, jakými je možné dosáhnout ekologicky přijatelné úrovně.

Základem je teoretický výzkum a následná aplikace poznatků do praxe. Optimalizace pak vede ke zvýšení účinnosti při minimalizaci nákladů. Nyní vývoj cílí na zvýšení účinnosti a dosažení stabilních výkonů intenzifikací čistírenských procesů. Na automatizaci provozu čistíren odpadních vod a na systémový přístup k celkovému řešení a k upřesňování matematických modelů jednotlivých procesů čištění odpadních vod.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. Tvoří ji část rešeršní a část praktická. V první části práce se zaměřuji především na popis optimalizačních postupů na čistírnách a na popis způsobu optimalizace jednotlivých objektů na ČOV. V druhé části práce řeším návrh optimalizace ČOV s využitím programu WEST. Jedná se o softwarový nástroj, který slouží k modelování čistírenského procesu na čistírnách. Cílem práce je tedy optimalizace provozu na ČOV v Nové Roli na Karlovarsku s ohledem na zlepšení sledovaných parametrů na odtoku.

V čisté vodě může člověk spatřit odraz své podoby, ve víně srdce jiného člověka a v odtoku z čistírny odpadních vod svědomí společnosti.

„autor neznámý“

2. Matematický popis problému optimalizace

Optimalizace je matematickou disciplínou, která hledá za určitých podmínek maximum, nebo minimum pro konkrétní úlohu. Tyto určité podmínky označujeme jako omezující případně okrajové. Jsou to podmínky, které vymezují konkrétní oblast, pro kterou je možné najít optimální nebo suboptimální řešení. Jsou zapsány jako soustava rovnic, nebo častěji, nerovnic. V případě zapsání okrajové podmínky ve formě rovnice, je nutné najít řešení, které nabývá hodnoty právě této omezující podmínky.

V případě, že okrajová podmínka je zapsána jako nerovnice, znamená to, že přípustné řešení je na oblasti určené touto rovnicí. Jedním z nejdůležitějších kroků při řešení úlohy optimalizace je správná volba matematické funkce, která popisuje chování problému, jež chceme optimalizovat. Tuto funkci nazýváme funkcí účelovou nebo kritériální.

V případě, že máme správně zapsanou účelovou funkci a okrajové podmínky, můžeme pomocí několika způsobů provést optimalizaci, ať už se nám jedná o zjištění minima nebo maxima.

2.1 Terminologie

Charakteristika optimalizace: Jedná se o cíleně řízený proces směřující k nalezení vhodného řešení. Společnou charakteristikou všech optimalizačních problémů je existence minimálně jednoho nebo několika přípustných řešení. Výběr nejlepšího možného řešení spočívá na jednoznačné definici, vzájemném ovlivnění všech přítomných proměnných veličin popisujících problém, explicitním stanovení návrhu, nalezení efektivní procedury pro lokalizaci optimálního řešení v souladu s návrhem.

Oblast řešení: Oblast možných řešení je dána typem posuzovaného problému a definuje i přípustný podprostor možných řešení. Aby měla optimalizace smysl, musí existovat alespoň jedno minimum na tomto přípustném podprostoru. Na přípustném podprostoru je úloha určena svými souřadnicemi a popsáním geometrických a materiálových návrhových parametrů.

Základní pojmy optimalizace - *Nezávisle proměnné parametry*: jedná se o souhrn základních návrhových veličin, které jsou postačující k popisu úlohy. Všechny ostatní parametry lze vyjádřit jejich kombinací. Při optimalizačním procesu mohou být měněny všechny, nebo podle typu úlohy jen některé z nich. *Funkcionál*: funkce, jejímiž parametry jsou jiné funkce. Je speciálním případem operátoru, který zobrazuje z prostoru funkcí do množiny obecně komplexních čísel. Lineárním funkcionálem se rozumí zobrazení z množiny vektorů daného vektorového prostoru do množiny jeho skalárů. *Dualita*: vzájemný vztah mezi dvěma úlohami, kdy kterákoliv úloha z dvojice duálních úloh může

být vzata jako primární. *Vázaný extrém*: extrém funkce n -proměnných, který splňuje další tzv. vedlejší podmínky

Způsoby řešení optimalizace: Ke každému problému je třeba přistupovat zvlášť a při jejich řešení je nutno uvažovat všechny vlastnosti účelové funkce a množiny přípustných řešení. Problémy v technické praxi jsou charakteristické velkým množstvím proměnných veličin a soustavou omezujících podmínek. Pro řešení takových situací, tj. nelineárních numerických optimalizačních úloh s vázanými extrémy, je doporučován postup:

1) Sestavit primární úlohu a hledat optimum v dovoleném rozsahu proměnných.

2) Sestavit sdruženou duální úlohu definovanou na stejném rozsahu proměnných.

3) Řešením primární úlohy se optimum ohraničuje shora a řešením duální úlohy se optimum ohraničuje zdola. Důležité je, aby jedna úloha byla maximalizační a druhá minimalizační. [10]

2.2 Postup při aplikaci optimalizace

- Správný popis úlohy – Jde o jednu z nejdůležitějších etap. Jedná se o detailní popis úlohy, který nás informuje o tom, co chceme řešit. Zde si vymezíme problém a stanovíme požadavky na výsledek. Případně stanovíme nějakou alternativu optimálnímu řešení.
- Matematický model – Následuje matematický zápis problému. Konkrétně zápis omezujících podmínek v podobě rovnic a nerovnic a zápis kritériální funkce.
- Řešení matematického modelu:
 - Analytické metody – Funkce, jež je postupně vyšetřovaná.
 - Numerické metody – přesný postup řešení daný algoritmem.
 - Iterační metody – Řešení problému s použitím předešlých výsledků.
 - Stochastické metody – Vychází z velkého množství vstupních dat, které jsou generovány do výpočtu.
- Verifikace řešení – Posuzujeme adekvátnost modelu vůči realitě a vymezujeme kritéria shod modelu a reality. Posuzujeme dopady zjednodušení modelu na kvalitu výsledku.
- Modifikace řešení – Upravíme matematický model tak, abychom našli nějaké výhodnější řešení. Zejména můžeme měnit okrajové podmínky a hodnotící funkce.
- Realizace řešení – Výsledky z matematického modelu jsou aplikovány při řešení konkrétního problému. [1]

2.3 Metody řešení úloh optimalizace

Všeobecně můžeme říct, že úlohy optimalizace lze řešit graficky a numericky. Však mezi praktičtější způsoby, patří numerické metody, především pro přesnost jejich řešení.

2.3.1 Grafická metoda lineárního programování

Zásadou lineárního programování je mimo jiné to, že omezující podmínky a účelová funkce musí být zapsány v lineárním tvaru. To znamená, že rovnice jsou zapsány jedinečně polynomem prvního stupně. Grafická metoda řešení optimalizačních úloh je pak schopna řešit problémy jak ve dvou dimenzích, tak i ve třech. Můžeme řešit úlohy pro n - neznámých pro které máme m - omezujících podmínek. Při grafické metodě celý problém řešíme v prvním kvadrantu. To znamená, že vše řešíme na oblasti kladných hodnot os. Tomuto říkáme podmínka nezápornosti. V principu máme vymezenou oblast, která je popsána nerovnicemi omezujících podmínek, a známe směrnici účelové funkce. Pro vyřešení úlohy vedeme rovnoběžku se směrnici účelové funkce tak, aby procházela bodem s největší hodnotou na ose x a y . Směrnice účelové funkce však nesmí procházet oblastí přípustných řešení danou nerovnicemi omezujících podmínek. Po dosažení souřadnic tohoto bodu do směrnice účelové funkce získáváme výslednou hodnotu maxima pro zadanou úlohu. [24]

2.3.2 Numerické metody

Jako numerická metoda optimalizace se používá metoda Simplexova, metoda duální, případně úlohy řešené metodou nazvané dopravní problém či řešení pomocí Lagrangeových součinitelů. Výše zmíněné způsoby lze použít pro optimalizaci různých typů úloh. Můžeme jimi najít maximum případně minimum účelových funkcí.

2.3.3 Simplexova metoda

Simplexovou metodou lze řešit lineární úlohy, pro které hledáme maximum účelové funkce. Vycházíme z toho, že máme problém popsáný soustavou nerovnic (omezujících podmínek) a směrnici účelové funkce. Nejdříve musíme upravit všechny omezující podmínky tak aby levá strana nerovnice byla menší nebo rovna pravé straně. Tímto převedeme úlohu na standardní úlohu lineárního programování. V následujícím kroku je nutné ke každé levé straně nerovnosti přidat takzvanou přidatnou proměnnou, tímto krokem dostaneme soustavu rovnic.

U takto upraveného zápisu máme tedy n neznámých a m přidatných neznámých. Přičemž přidatných neznámých je právě tolik, kolik je omezujících podmínek. Nyní musíme vybrat z neznámých takzvané bázové proměnné. Počet bázových proměnných je

shodný s počtem neznámých v řešené úloze. Výhodné je volit jako nebázové proměnné právě přidatné. U takto zapsané soustavy pak povolenými úpravami položíme všechny nebázové proměnné rovny nule a soustavu řešíme.

Pro správnost výpočtu je také nutné ověřit správnost volby nebázových proměnných. To provedeme tak, že řešíme soustavu rovnic bez nebázových proměnných. Pokud nám vyjde, že všechny bázové proměnné jsou nezáporné, jde o přípustné bázové řešení. V případě, že by bázové proměnné vyšly rovny nule, případně menší než nula, museli bychom volit jiné nebázové proměnné. V následujícím kroku je nutné vyjádřit v každé rovnici jednu bázovou proměnnou jako funkci nebázových proměnných. Takto připravenou soustavu zapíšeme do Simplexovy tabulky.

Zde se dostáváme k finální části celého výpočtu. Zde volíme takzvaný klíčový sloupec, klíčový řádek a klíčový prvek, a to podle následujících pravidel. Klíčový sloupec je ten, ve kterém je největší kladná hodnota účelové funkce. Minimální kladný podíl pravé strany a klíčového sloupce je právě v klíčovém řádku. Klíčový prvek je na pomyslném průsečíku klíčového sloupce a řádku.

Po nalezení klíčového prvku nahradíme symbol bázové proměnné klíčového řádku symbolem nebázové proměnné klíčového sloupce. Do takto upravené soustavy zapíšeme hodnotu klíčového prvku rovnu jedné. V následujících krocích pomocí povolených úprav klíčového sloupce přepíšeme soustavu tak, aby prvky v něm (mimo hodnotu klíčového prvku = 1) byly rovny nule.

V takto upravené soustavě již můžeme najít výsledek úlohy a to v případě, že v řádku účelové funkce není žádný kladný koeficient. Tedy pokud jsou všechny hodnoty účelové funkce záporné nebo nulové neexistuje žádné výhodnější řešení. Pokud však je nějaký člen kladný, existuje výhodnější řešení a je nutné v této soustavě opět hledat klíčový řádek, sloupec a prvek a úpravu opakovat.

Výsledky jsou čitelné ze Simplexovy tabulky. Hodnoty původních proměnných jsou zapsány ve sloupci pravé strany. Hodnota účelové funkce je ve sloupci pravé strany zapsána v absolutní hodnotě. [25]

2.3.4 Duální úloha

Pro řešení úlohy, kde chceme účelovou funkci minimalizovat, lze využít větu o dualitě úloh lineárního programování. Tato věta říká, že ke každé úloze lineárního programování lze sestavit úlohu duální. Při aplikaci věty o dualitě je nutné respektovat tato pravidla:

- Má-li původní úloha n skutečných proměnných a m omezujících podmínek, pak duální úloha má m skutečných proměnných a n omezujících podmínek.

- Právě strany omezujících podmínek duální úlohy jsou koeficienty proměnných v účelové funkci původní úlohy.
- Matice koeficientů proměnných duální úlohy je transponovaná matice koeficientů proměnných původní úlohy (levá strana omezujících podmínek).
- V duální úloze se proti původní úloze mění smysl nerovnosti.
- Koeficienty proměnných v účelové funkci duální úlohy jsou první strany omezujících podmínek původní úlohy.
- Účelová funkce duální úlohy má požadavek opačného extrému než původní úloha.

Při dodržení těchto podmínek můžeme tedy pro zadanou úlohu minimalizovat hodnotu účelové funkce a to následovně. Úloha je zadaná soustavou nerovnic, které je zapotřebí v první řadě převést na standardní úlohu lineárního programování tak, že levé strany nerovnice upravíme tak aby byly menší nebo rovno pravé straně.

Soustavu nerovnic máme zapsanou v maticovém tvaru. Pro správné řešení duální úlohy musíme v tomto kroku matici transponovat. U vzniklé transponované matice jsou hodnoty původních pravých stran zapsány v řádku účelové funkce a naopak, hodnoty původní účelové funkce jsou nyní zapsány jako hodnoty pravých stran. Takto vzniklou úlohu již lze řešit Simplexovou metodou. Řešení původní úlohy je v absolutních hodnotách v řádku účelové funkce, a to z toho důvodu, že tabulka je transponovaná. [26]

2.4 Multikriteriální optimalizační úlohy

2.4.1 Charakteristika

Disciplína zabývající se rozhodovacími situacemi s vektorovým ohodnocením výsledků. Studuje rozhodovací situace charakterizované existencí většího počtu vyhodnocovaných ukazatelů. O rozhodovacích situacích se hovoří v teorii vícekriteriálního rozhodování jako o rozhodovacích úlohách, a o ukazatelích jako o hodnotících kritériích. Možnosti, z nichž se při rozhodování vybírá, se označují jako varianty. Důležitým faktorem je si stanovit cíl rozhodování, tj. čeho chce hodnotitel rozhodnutím dosáhnout, uvědomit si podmínky, za kterých se rozhoduje, a všechny okolnosti (faktory), které na jedné straně určují podmínky, za kterých se rozhoduje, a na druhé straně předurčují důsledky rozhodnutí. Některé tyto faktory je možno aktivně ovlivnit, pak hovoříme o říditelných faktorech, jiné nikoliv a pak hovoříme o neřiditelných faktorech.

2.4.2 Základní pojmy

Účelem rozhodnutí je buď nalezení nejlepší varianty podle všech uvažovaných hledisek, nebo vyloučení neefektivních variant.

Cílem vícekriteriálního rozhodování je najít extrém všech účelových funkcí za podmínek, že vektor proměnných je z množiny přípustných řešení. Množina přípustných řešení má nekonečně mnoho řešení a vybrané řešení z hlediska více kritérií je označováno jako optimální nebo suboptimální řešení, tj. takové, které je z hlediska všech kritérií to nejvýhodnější.

Soustava kritérií hodnocení – soubor charakterizující podstatné vlastnosti hodnoceného objektu a významně ovlivňují svojí skladbou celkové hodnocení. Podle povahy se dělí na maximalizační nebo minimalizační. Dělí se na kvantitativní (objektivně měřitelné) a kvalitativní (objektivně neměřitelné).

Optimální varianta - za optimální variantu lze označit takovou, která je relativně jednoznačně doporučena ke konečnému výběru.

Suboptimální varianta - v případech, kdy jednoznačnost doporučení není výrazná a existuje větší množství vhodných variant, je možné vybrat z této množiny doporučených variant. Takové řešení se pak nazývá suboptimální.

Váha kritéria - slouží k rozlišení relativní významnosti jednotlivých ukazatelů (kritérií) v rámci dané hodnotové stupnice. Vyjadřuje hodnotu kvantitativního multiplikátoru. Někdy bývá používáno alternativní označení koeficient významnosti. [10]

3. Aplikace optimalizačních postupů na ČOV

Při vytváření postupů pro optimalizaci čistírny je důležité si uvědomit, že v čistírenském procesu souvisí vše se vším. Proto změnou jednoho procesu můžeme ovlivnit velkou část celého technologického procesu a tím i kapacitu a účinnost ČOV. Je možné postup návrhu optimalizace rozdělit do čtyř hlavních bodů, a to:

- analýza ČOV,
- limitující faktory,
- výběr možností intenzifikace,
- doporučená varianta.

Optimalizací provozu na ČOV se snažíme dosáhnout především zlepšení účinnosti bez větších investičních nákladů. Tohoto lze dosáhnout analýzou faktorů limitujících účinnost. Zvýšení účinnosti je tedy možné, pokud stanovíme faktory, které limitují účinnost. [2]

Mezi požadavky na optimalizaci ČOV patří:

- snížení hodnot znečištění na odtoku, zejména BSK₅, CHSK, NL, P,
- zvýšení objemové kapacity čistírenských zařízení,
- stabilita čistírenského účinku při různém zatížení,
- snížení produkce kalu, zlepšení jeho zpracovatelnosti,
- snížení nároků na energii a pracnost obsluhy.

K dosažení těchto postupů je doporučeno těchto postupů:

- modifikace aktivačního procesu, potlačující vláknité bytnění kalu,
- procesy, umožňující nitrifikaci s následnou denitrifikací,
- procesy, umožňující biologické odstraňování fosforu,
- zvýšení provozní koncentrace biomasy kombinací vznášené a přisedlé polykultury,
- kombinace dvoustupňového čištění v biologické části čistírny sériovým zapojením vysoko a nízkozatěžovaného stupně s případným vynecháním primární sedimentace,
- zvyšování průměrné doby zdržení biomasy v aktivačním systému,
- používání aeračních zařízení s vyšším využitím kyslíku,
- enzymatické preparáty (Lapol, AN, ANR) [9]

Faktory, které vedou na nutnost optimalizace čistírny [4]:

Tab. 1 Faktory vedoucí k optimalizaci

FAKTOR	ZPŮSOB
Zvýšení množství nebo znečištění v stávající oblasti	Zvýšení kapacity ČOV
Rozšíření oblasti obsluhované ČOV	Zvýšení kapacity ČOV
Přísnější kritéria na odtoku z ČOV	Zvýšení schopnosti k odstranění specifických znečišťovatelů nebo odstranění dalších znečišťovatelů
Zastaralé zařízení nebo technologie	Zvýšení spolehlivosti ČOV

3.1 Analýza ČOV

Komplexní analýza je výchozím materiálem pro optimalizaci a to z toho důvodu, že obsahuje vyhodnocení a analýzu projektových možností čistírenského procesu a s ním související administrativní a provozní postupy. Je zapotřebí zhodnotit výkonnost jednotlivých čistírenských jednotek. Jestliže se ukáže, že čistírenské procesy jsou adekvátní nebo potenciálně adekvátní, pak nemusí být optimalizace nutná a je třeba se zaměřit na zlepšení řízení provozu ČOV. Jestliže jsou však tyto procesy neadekvátní, je nutné pro dosažení požadované účinnosti ČOV optimalizovat. Toto se dá ověřit procesními nebo hydraulickými výpočty, analýzou historických dat, nebo ohodnocením stavu technologického zařízení ČOV.

K nejdůležitějším faktorům optimalizace ČOV náleží:

- charakteristika odpadní vody v důležitých profilech ČOV,
- kapacita mechanického čištění,
- velikost aeračních nádrží,
- kapacita dosazovacích nádrží,
- typ aeračního systému,
- způsob hospodaření s kalem, velikost a konfigurace zpracování kalu,
- zkušenosti provozovatele,
- územní omezení. [3]

Z předchozího vyplývá, že pro úspěšný návrh optimalizace je nezbytné stanovit faktory, které mohou ovlivňovat kapacitu stávající ČOV. Tyto faktory jsou nejčastěji tyto:

- Skladba čistírny, tj. počet, velikost a typ biologických jednotek a dosazovacích nádrží.
- Velikost, počet a typy strojního zařízení. Zejména důležité jsou údaje o čerpadlech, dmychadlech a aerátorech.

- Stav stávajícího zařízení. Kapacita ČOV je redukována, pokud jsou tato zařízení zastaralá nebo ve špatném stavu vlivem špatné údržby.
- Charakteristika odpadní vody. Je velmi důležitá pro návrh technologie a pro způsob intenzifikace. Sleduje se BSK₅, NL, N, P a další látky, jako těžké kovy a toxické látky.
- Požadavky na odtok z ČOV. Vychází z nařízení vlády 171/1992 SB., které stanovuje ukazatele BSK₅, NL, N, P. Sledovány jsou hodnoty průměrné a maximální.
- Strategie řízení. Sestává z přístupů používaných k porovnání ČOV a k optimalizaci jednotlivých jednotkových procesů. Tyto přístupy předurčují, zda jsou stávající jednotky plně využívány k dosažení efektivního čištění odpadních vod.
- Údržba a provoz. Údržba musí být prováděna efektivně, aby byla zařízení udržována ve správné funkci. Provozní procedury předurčují, zda je strategie řízení efektivně využívána v provozu ČOV.
- Zdroje na údržbu a provoz. Jsou to finance na údržbu a provoz, počet obsluhy, laboratorní vybavení a prostory pro údržbu. [2]



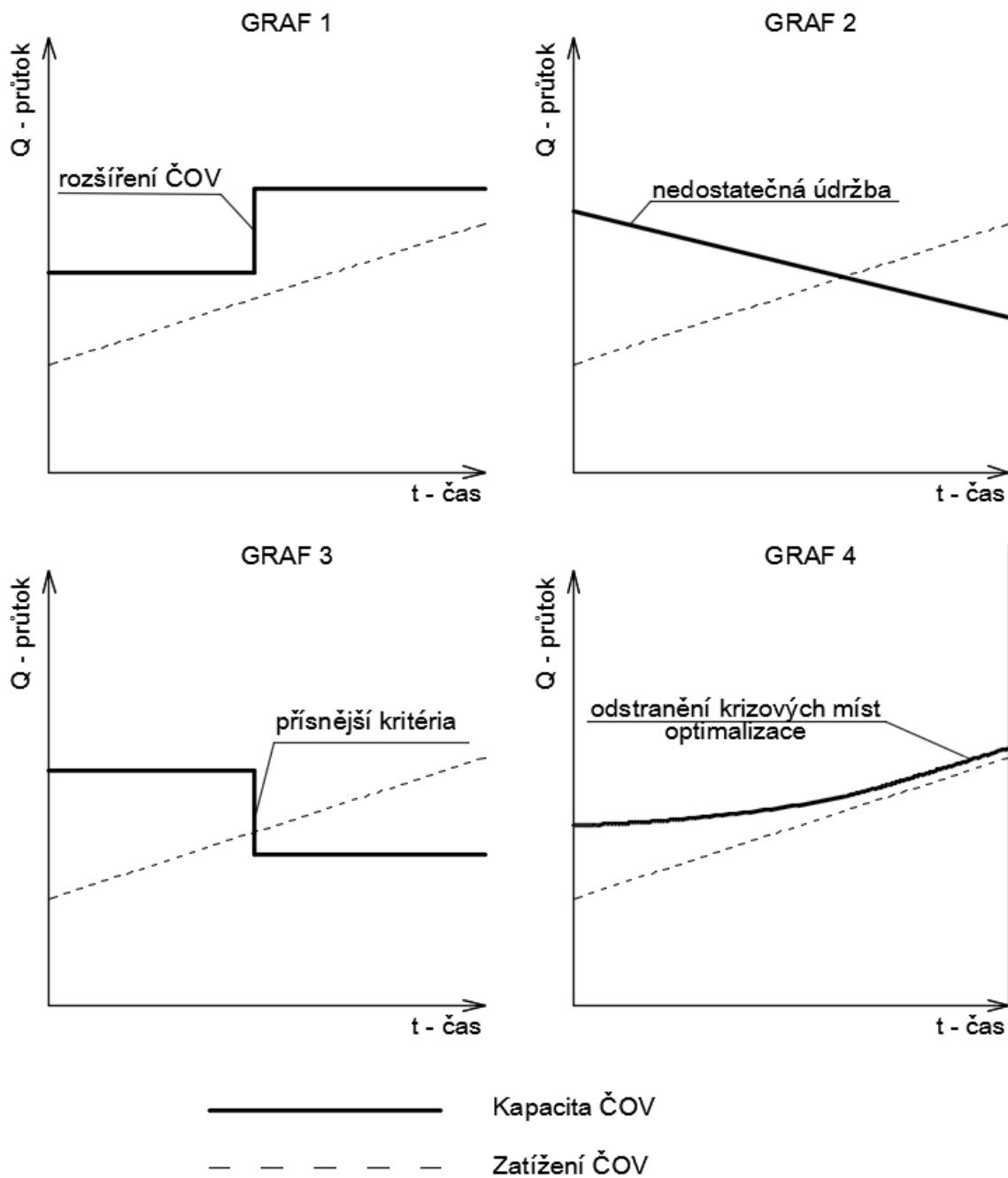
Obr. 1 Kapacita zařízení

3.1.1 Kapacita ČOV

Faktory, jež ovlivňují kapacitu ČOV, se mění v čase. Například se mění charakteristika a množství odpadních vod od průmyslu vzhledem k změně průmyslové produkce, dále pak vlivem stáří stokového systému (množství balastních vod) a v neposlední řadě i vlivem změny potřeby vody pro obyvatelstvo. S přísnějšími limity na požadovanou kvalitu vypouštěných odpadních vod přichází i požadavek na lepší kvalitu těchto vod. K vyhodnocení těchto změn se zpracovávají scénáře růstu ČOV.

Na obrázku *Obr. 2 Scénáře růstu ČOV* jsou graficky naznačeny čtyři typické scénáře růstu ČOV. Na prvním grafu je znázorněn konvenční pohled. Kapacita ČOV je dostatečná až do chvíle, než se vlivem zvyšující se produkce odpadní vody stává téměř nedostačující. Tento stav vyžaduje zvýšení kapacity ČOV. Druhý graf zobrazuje případ, kdy kapacity ČOV klesá kontinuálně. To může být následkem špatné údržby nebo obsluhy. Na třetím grafu je zaznamenán pokles kapacity ČOV vlivem zpřísnění kritérií odtoku. Graf č. 4 zobrazuje optimalizaci stávajících procesů bez budování dalších objektů.

Při posouzení dostatečnosti současného stavu ČOV je možné srovnání s hodnotami uvedených v tabulce *Tab. 2 Přepokládané hodnoty na odtoku pro jednotlivé technologie čištění [mg/l]*. Zde jsou uvedeny hodnoty na odtoku pro různé technologie čištění. Tyto hodnoty byly zjištěny Holandskou firmou DHV. Hodnoty byly získány sledováním desítek čistíren odpadních vod v západní Evropě. Jsou to průměrné hodnoty pro dané technologie.



Obr. 2 Scénáře růstu ČOV

Tab. 2 Přepokládané hodnoty na odtoku pro jednotlivé technologie čištění [mg/l] [5]

	BSK ₅	CHSK	P	N	N-NH ₄	NL
Základní čištění	20	90	10	35	30	20
Základní s nitrifikací	15	80	10	30	10	20
Dvoustupňové s nitrifikací	12	75	10	25	5	15
Aktivace s predenitrifikací a R=200%	15	80	9	20	10	20
Základní + rybník	12	75	8	30	25	12
Základní + nitrif. + rybník	10	70	8	25	10	10
Základní + nitrif. + mikrosíta	10	70	10	30	10	10
Základní + rychlofiltrace	10	70	10	35	30	10
Základní + nitrif. + rychlofiltrace	7	60	10	30	10	7
Aktivace + simult. flokulace	15	75	1	35	30	25
Aktivace + nitrif. + flokulace	12	65	1	28	12	20
Aktivace + flokulace + filtrace	5	5	0,2	32	28	5
Aktivace + nitrif. + srážení + filtrace	5	5	0,2	25	10	5

3.2 Faktory limitující účinnost ČOV

Faktory, které mohou limitovat účinnost provozu ČOV, jsou řazeny do kategorií administrativa, údržba, návrh intenzifikace a provoz. Snažíme se však mapovat celý provoz a zjišťujeme faktory, jež nesplňují standard. Toto však nutně nemusí znamenat, že tyto faktory limitují účinnost ČOV. Je nezbytné hledat spojení mezi celkovou účinností čištění a identifikovaným faktorem.

Faktory limitující účinnost ČOV [2]

1. Administrativa

1.1. Vedení ČOV

- Politika vedení
- Znalost problémů ČOV
- Adekvátní dohled
- Plánování

1.2. Pracovníci ČOV

- Pracovní síly
 - ◆ Počet
 - ◆ Pokrytí ČOV
 - ◆ Rozložení pracovního zatížení
- Morálka
 - ◆ Motivace
 - ◆ Plat
 - ◆ Pracovní prostředí
- Kvalifikace
 - ◆ Úroveň vzdělání

- ◆ Přístup k novým poznatkům
 - Produktivita
- 1.3. Financování
 - Zdroje
 - Výdaje
- 2. Udržba
 - 2.1. Preventivní
 - Program údržby
 - Inventář náhradních dílů
 - 2.2. Opravy
 - Plán oprav
 - Kritické náhradní díly
 - Technická dokumentace
 - 2.3. Běžná údržba
 - Denní údržba a čištění
 - Reference technologického vybavení
 - Kvalifikace k opravám
 - Dokumentace ke strojním zařízením
 - Stáří technologie
- 3. Projekt
 - 3.1. Zatížení ČOV
 - Organické látky
 - Hydraulické zatížení
 - Průmysl
 - Toxické látky
 - Sezónní výkyvy průtoků
 - Balastní vody
 - Vracený kal
 - 3.2. Adekvátnost jednotek
 - Hrubé předčištění
 - Primární čištění
 - Sekundární čištění
 - ◆ Flexibilita procesu
 - ◆ Kontrolovatelnost procesu
 - ◆ Aerace
 - ◆ Dosazování
 - Třetí stupeň čištění
 - Přebytečný kal
 - Kalové hospodářství
 - Finální likvidace kalu

3.3. Různé

- Umístění ČOV
- Situativní řešení ČOV
- Obtok ČOV
- Rozdělování průtoků
- Kontrolní systém
- Náhradní zdroje energie
- Automatizace provozu
- Chybějící záložní jednotky
- Vybavení laboratoře
- Možnost odběru vzorků
- Přístupnost zařízení pro údržbu
- Vliv počasí

4. Provoz

4.1. Testování

- Monitorování účinnosti
- Testování řízení provozu

4.2. Kontrola procesu

- Porozumění procesu
- Interpretace výsledků řízení
- Technické informace
- Kurzy a školení
- Znalost ČOV

4.3. Údržba

5. Různé

3.2.1 Stanovení priorit faktorů limitujících účinnost ČOV

Účelem stanovení priorit je sestavit pořadí aktivit, nezbytných k zlepšení provozu ČOV. Mezi nejdůležitější faktory patří nedostatečná kapacita hlavních jednotek.

Omezující faktory dělíme na:

- A) Faktory, které mají dlouhodobý závažný efekt.
- B) Faktory, které mají dlouhodobý nezávažný efekt nebo krátkodobý závažný efekt.
- C) Faktory, které mají minimální efekt.

Faktory označené jako A) jsou hlavní problémy, které způsobují špatnou účinnost ČOV. Je nutné se na ně zaměřit při návrhu optimalizace ČOV.

Faktory označené jako B) spadají do jedné ze dvou kategorií. Jsou to buď faktory, které přispívají trvale ke snížení účinnosti, ale nejsou hlavními problémy. Anebo jsou to faktory, které přispívají ke snížení účinnosti periodicky.

Faktory označené jako C) přispívají ke snížení účinnosti, ale jejich efekt je zanedbatelný.

Výsledky komplexní analýzy hlavních čistírenských jednotek ČOV je možno sumarizovat kategorizací typu ČOV, jak je ilustrováno na obr 3. *Kategorizace typů ČOV*.

Následující schéma uvádí tři základní typy situací, jež mohou na ČOV z hlediska nedostatečné účinnosti nastat. Jsou to tyto typy:

- Typ I reprezentuje ČOV, kde problémy v současnosti nejsou způsobeny velikostí jednotek nebo jejich potenciálních schopností. V těchto případech jsou hlavní problémy způsobeny provozem, údržbou nebo administrativou, případně problémy, které mohou být řešeny drobnými úpravami zařízení.
- Typ II reprezentuje situaci, kde dosažitelná kapacita hlavních jednotek může ovlivnit schopnost zajistit dostatečnou účinnost. Zlepšení údržby a provozu pravděpodobně zlepší účinnost, ale nemusí vést k požadované úrovni bez modifikace hlavních čistírenských jednotek.
- Typ III reprezentuje situaci, kde velikost hlavních jednotek je neadekvátní. I když mohou existovat další limitující faktory, nelze očekávat, že se výrazně zvýší účinnost, pokud nebudou eliminovány limity hlavních procesů.



Obr. 3 Kategorizace typů ČOV

3.3 Určení způsobu optimalizace

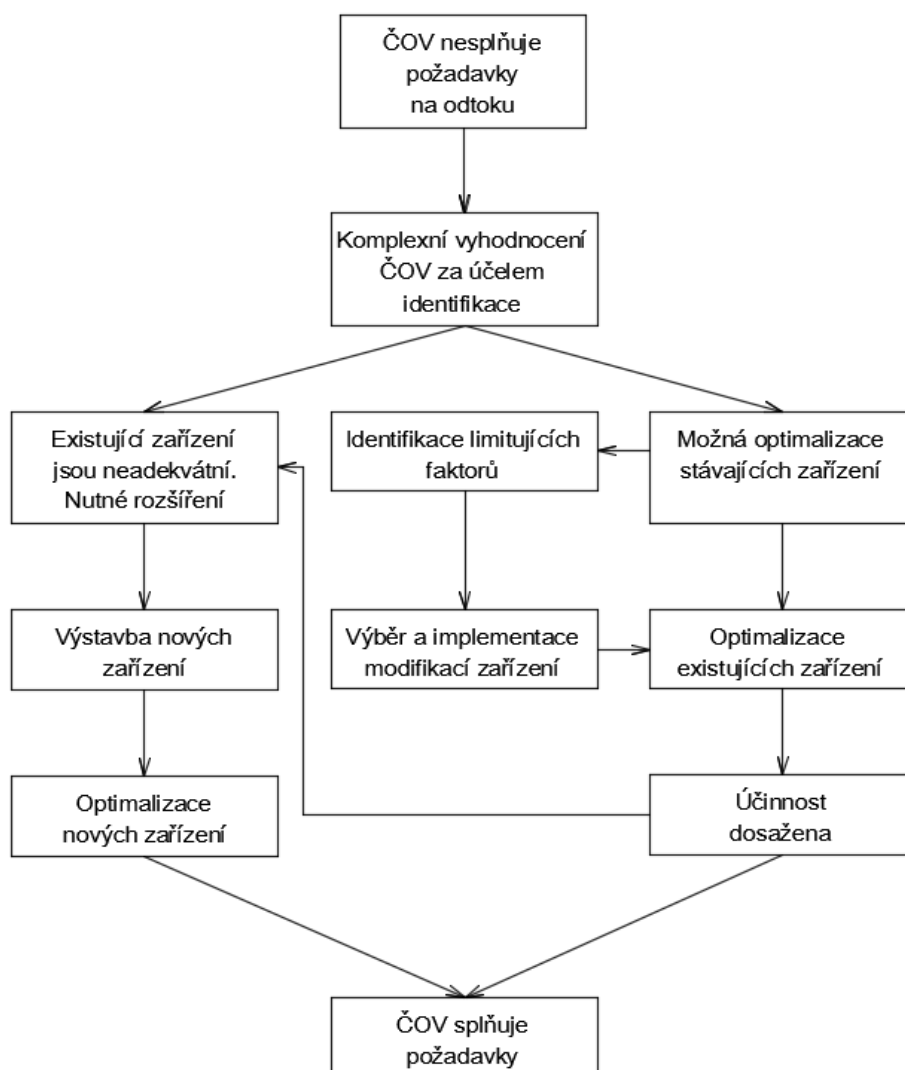
Dobrý výběr způsobu optimalizace vede ke zlepšení celkové účinnosti ČOV. Zda-li provoz ČOV odpovídá typu I jedná se o ČOV kde jsou její hlavní jednotky dostačující. Intenzifikace se zaměří na odstranění faktorů, limitujících účinnost bez nutnosti modifikace zařízení.

Pro typ II jsou hlavní jednotky na hranici potenciálních možností a ČOV může, ale nemusí, dosáhnout požadované kvality odtoku bez modifikace zařízení. Je důležité definovat optimální kapacity stávajících zařízení. Pokud ČOV nedosáhne požadovaných parametrů, je nutné definovat jednotky, které je nutné rozšířit.

Pro typ III je nutné zařadit další jednotky do technologické linky. Volba nových zařízení záleží na charakteru odpadní vody a na plnění následujících požadavků:

- Proces musí být účinný.
- Proces by měl být ekonomicky přijatelný.
- Proces by neměl být příliš náročný na spotřebu energie.
- Při procesu by se neměly vnášet do čištění odpadní vody další znečišťující látky.

Obr 4. *Metody pro dosažení požadované kvality odtoku* znázorňuje metody pro dosažení požadovaných hodnot na odtoku. Jako první musí být provedeno vyhodnocení stávající ČOV za účelem zjištění dosažitelné kapacity zařízení. Pokud je technicky možné dosáhnout požadované účinnosti na odtoku optimalizací existujícího zařízení, pak je nutno tuto variantu preferovat. Pokud není technicky možné dosáhnout požadovaných účinností, pak je nutno maximálně optimalizovat stávající zařízení, je-li to ovšem technicky proveditelné a ekonomicky výhodné, a dostavět další potřebná zařízení. Tato druhá varianta zahrnuje i možnost úplného opuštění stávajících zařízení. [2]



Obr. 4 *Metody pro dosažení požadované kvality odtoku*

Modifikace ČOV spadají obecně do čtyř kategorií: [6]

- modifikace charakteristik odpadní vody (dávkování chemikálií, intenzifikace předčištění),
- modifikace strojního zařízení (čerpadla, ventily),
- úpravy stávajících nádrží (lamely, aerační zařízení),
- přidání jednotek do série nebo paralelně.

Po ukončení identifikace faktorů limitujících výkon čistírny začíná proces výběru alternativ technologií.

Tab. 3 Sumarizace limitujících procesů [4]

JEDNOTKA	LIMITUJÍCÍ FAKTOR	PROBLÉMY V ÚČINNOSTI
Primární čištění		
Kontrola přítoku	Velké variace v průtoku	Vyplavování NL z usazovacích nádrží během špiček, hydraulické a látkové šoky pro biologii.
Rozdělování průtoků	Neadekvátní dělení průtoků	Nestabilní účinnost daná změnami zatížení
česle	Špatné zachycování plovoucích a sunutých nečistot	Poškozování a ucpávání zařízení ČOV
Lapák písku	Poddimenzované zachycování písku	Poškozování zařízení, zmenšování účinného objemu nádrží
	Špatná kontrola rychlosti	Poškozování zařízení, zmenšování účinného objemu nádrží
Primární usazování	Poddimenzovaná nádrž	Snížená účinnost a následné zvýšení zatížení na druhý stupeň
	Nedostatečný odtah kalu a plovoucích nečistot	Snížení účinnosti a následné zvýšení zatížení na druhý stupeň
Zacházení se septickými vodami	Poddimenzované nebo chybějící vyrovnání pro septické vody	Šoky pro biologii
Procesy s přisedlou biomasou		
Skrápěný filtr	Poddimenzovaná jednotka	Organické přetížení, špatná účinnost, zápach
	Neadekvátní zásobení kyslíkem	Špatná účinnost, zápach

JEDNOTKA	LIMITUJÍCÍ FAKTOR	PROBLÉMY V ÚČINNOSTI
	Neadekvátní hydraulické zatížení	Ucpávání náplně filtru, špatná účinnost
	Špatná ochrana proti mrazu	Zamrzání, špatná účinnost
Rotační biologické reaktory	Poddimenzovaná jednotka	Organické přetížení, špatná účinnost, mechanické problémy
	Poddimenzovaná I. stupeň	Organické přetížení, špatná účinnost
	Neadekvátní zásobení kyslíkem	
Dosazování nádrží	Poddimenzovaná nádrž	Špatná účinnost, vysoké koncentrace NL na odtoku
	Výrazné proudění v nádrži	Vyplavování NL, periodicky vysoké koncentrace NL na odtoku
Procesy s biomasou ve vzhledu		
	Poddimenzovaná dosazovací nádrž	Vysoké koncentrace NL a BSK ₅ na odtoku
	Poddimenzovaná aerační nádrž	Vysoké koncentrace NL na odtoku
	Neadekvátní zásobení kyslíkem	Organické nebo hydraulické přetížení
	Špatné míchání nádrže	Nemožnost kontrolovat charakteristiky kalu
	Vláknité mikroorganismy	Vysoké koncentrace NL a BSK ₅ na odtoku, špatná účinnost, zápach
		Nemožnost kontrolovat distribuci kalu mezi aerační a dosazovací nádrží, snížení účinného objemu nádrže vlivem depozice kalu
		Špatné sedimentační vlastnosti kalu, vysoké KI
Kalové hospodářství		
zahušťování	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatné koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému
stabilizace	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatné koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému

JEDNOTKA	LIMITUJÍCÍ FAKTOR	PROBLÉMY V ÚČINNOSTI
odvodňování	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatná koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému
Skladování	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatná koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému
Doprava	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatná koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému
Finální likvidace kalu	Nedostatečná kapacita nebo flexibilita	Špatná koncentrace na odtoku vlivem retence kalu v systému
Různé		
Měření a kontrola	Nedostatečné měření veličin	Nevěrohodná koncentrace na odtoku, špatné řízení ČOV
	Nedostatečné měření průtoků	Nevěrohodné průtoky
	Nevhodné rozdělování průtoků	Zhoršení koncentrace na odtoku
bezpečnost	Chybějící signalizace	Porušení rovnováhy procesu
	Chybějící obtok ČOV	Porušení rovnováhy procesu
	Chybějící rezervní jednotky	Porušení rovnováhy procesu

3.4 Volba vhodné varianty optimalizace

Pro vyhodnocení je vhodné použít inženýrské ohodnocení variant a pracovní porady specialistů. Doporučuje se také testování v terénu, pilotní testy, měření a inženýrské výpočty. Součástí je také analýza efektivnosti nákladů a kvalitativní hodnocení. Význam má také spolehlivost zařízení, snadnost provozu a jednoduchost implementace. Po vlastním provedení stavby a instalace nových zařízení je nutno provést zkušební provoz a zpracovat manipulační řád. Je také nutné řešit údržbu a provoz čistírny. Je nutné realizovat plán počtu pracovníků čistírny a jejich výcvikový program, případně automatizovaný provoz.

Tab. 4 Přístup a nástroje intenzifikace ČOV [7]

1. Analýzy

- Procesní a inženýrské procesy
- Hydraulické výpočty
- Analýza historických dat
- Ohodnocení stavu ČOV a zařízení

- Kontrola pracovního postupu
- 2. Určení faktorů limitujících účinnost ČOV
 - Sloupkový diagram (histogram)
 - Workshopy
 - Obsáhlé ohodnocení
 - Testování v terénu
- 3. Určení možnosti intenzifikace
 - Inženýrské ohodnocení
 - Workshopy
- 4. Zhodnocení způsobů intenzifikace
 - Testování v terénu
 - Pilotní testy
 - Měření
 - Inženýrské výpočty
- 5. Výběr možnosti intenzifikace
 - Analýza efektivity nákladů
 - Kvalitativní ohodnocení
- 6. Provedení
 - Stavba
 - Zkušební provoz
 - Rozvinutí pracovního postupu

4. Možná intenzifikace jednotlivých technologií

Optimalizace můžeme vnímat nejen jako krok ke zlepšení kvality odtoku, ale optimalizací lze dosáhnout i zvýšení kapacity ČOV nebo třeba k výslednému snížení ceny stočného. Při komplexním pohledu na provoz ČOV lze uvažovat s optimalizací následujících faktorů:

- Biologické čištění – biomasa ve vznosu
- Biologické čištění – přisedlá biomasa
- Dosazování
- Chemické čištění
- Terciální stupeň čištění

4.1 Biologické čištění – biomasa ve vznosu

Obecně lze říct, že systémy s biomasou ve vznosu jsou nejpoužívanějším způsobem biologického čištění odpadních vod. Při biologickém čištění je využíváno mikroorganismů, které využívají organickou hmotu z odpadní vody jako zdroj energie. Takto vzniklé organismy jsou pak z odpadní vody separované například sedimentací.

Biologické čištění lze použít pro odstranění dusíku v jeho různých formách. Tímto způsobem lze odstranit amoniakální a organický dusík přeměnou na dusitanový a dusičnanový dusík (nitrifikace) a následně na volný dusík (denitrifikace). Tyto systémy lze použít i pro odstranění fosforu selekcí mikroorganismů schopných akumulovat zvýšené množství intracelulárního fosforu.

Pro oddělení biomasy ve formě kalu od vyčištěné vody se používají dosazovací nádrže. Kal z dosazovacích nádrží je vracen zpět do aktivačních nádrží za účelem udržení požadovaných koncentrací biomasy v aktivaci. Při výpočtu systémů s biomasou ve vznosu se vychází z aplikací kinetiky růstu, substrátové a endogenní respirace. Obecně lze říct, že:

Rychlost akumulace mikroorganismů v systému	=	Rychlost přítoku mikroorganismů do systému	-	Rychlost odtoku mikroorganismů ze systému	+	Skutečný růst mikroorganismů uvnitř systému
---	---	--	---	---	---	---

$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - QX + V(r'_g)$$

Kde $\frac{dX}{dt}$ rychlost růstu mikroorganismů (hmotnost organické sušiny/objem · čas),

V objem reaktoru,

- Q průtok (objem/čas),
 X_0 koncentrace mikroorganismů na přítoku (organická sušina),
 X koncentrace mikroorganismů v reaktoru (organická sušina),
 r'_g skutečná rychlost růstu (hmotnost organické sušiny/ objem · čas),

po dosažení

$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - QX + V\left(\frac{\mu_m X S}{K_s + S} - k_d X\right)$$

předpokládáme

X_0 je zanedbatelné

$\frac{dX}{dt} = 0$ existuje setrvalý vztah

potom

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{\theta} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d$$

θ doba zdržení (V/Q)

Substrátová balance

$$\frac{dS}{dt}V = QS_0 - QS + V\left(-\frac{kXS}{K_s + S}\right)$$

při $dS/dt=0$ bude

$$S_0 - S - \theta \frac{kXS}{K_s + S} = 0$$

θ doba zdržení (V/Q)

Parametry odtoku potom můžeme spočítat následujícím způsobem

$$X = \frac{\mu_m(S_0 - S)}{k(1 + k_d\theta)} = \frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d\theta}$$

$$S = \frac{K_s(1 + k_d\theta)}{\theta(Yk - k_d) - 1}$$

Uvedené vztahy používají celou řadu konstant, které jsou velmi obtížně stanovitelné. Proto se v praxi používají vztahy, které využívají stáří kalu, specifickou rychlost využití substrátu, produkci kalu a zatížení kalu, které stanovit je méně obtížné. [5]

Možným problémem u systému s biomasou ve vznosu je bytnění kalu. Bytnění kalu vzniká přítomností vláknitých organismů. Ty vyvolávají zvýšení objemu vloček aktivovaného kalu, čímž se snižuje hustota. Výsledkem je, že aktivovaný kal se usazuje pomaleji a není kompaktní. Tímto značně klesá účinnost aktivačního procesu, je přetížená dosazovací nádrž a značná část NL uniká do odtoku. Pro zamezení bytnění kalu se používají tři nejčastější způsoby, a to například modifikace provozu s usazovacími charakteristikami kalu (přerušovaný provoz, reaerace kalu, modifikace provozu dosazovací nádrže). Dalším způsobem je desinfekce aktivovaného kalu za účelem redukce populace vláknitých organismů. Posledním způsobem eliminace bytnění kalu je omezení podmínek, které jsou příznivé pro růst vláknitých organismů přidáním nutrientů a zvýšením koncentrace rozpuštěného kyslíku.

4.1.1 Aerace

Jedním z dalších faktorů limitujících růst biomasy je nedostatečný aerační systém. Kapacita aeračního systému je často faktor, který limituje růst biomasy, a proto je nutné tyto systémy intenzifikovat, v případech, kdy je mechanizace zastaralá, systém vyměnit.

Dvěma hlavními úkoly celého aeračního systému je dodat aerobním mikroorganismům potřebné množství kyslíku, obvykle ze vzduchu (oxygenační účinek), a zabezpečit homogenizaci obsahu aktivační nádrže tak, aby bylo dosaženo dostatečného styku organismů v aktivovaném kalu s odpadní vodou a s dodávaným kyslíkem (hydrodynamický účinek). Pro tyto účely se využívá aerace mechanické, pneumatické, hydropneumatické a kombinací výše zmíněných. [11]

4.1.2 Mechanická aerace

Mechanická aerace je založena na rozrušení vodní hladiny. Rychlost přestupu kyslíku závisí na hloubce ponoření oběžného kola, jeho průměru a počtu otáček. Mechanické aerátory se dělí na ponorné a povrchové. Tyto dvě skupiny se dále dělí podle umístění osy na:

- Vertikální – aerační turbíny
- Horizontální – aerační válce

4.1.3 Pneumatická aerace

Základním dělením pneumatické aerace je dělení podle velikosti bublin v souvislosti s pórovitostí materiálu, kterým vzduch proniká

- Jemnobublinná aerace - velikost bublin se pohybuje v rozmezí 1 až 4 mm. Používají se membránové nebo jemnobublinné elementy. Účinnost těchto elementů pro přenos kyslíku do vody je největší. V hloubce 4 m je to 15 až 30 %.
- Středobublinná aerace – velikost bublin je 4 až 10 mm. Tohoto je možno dosáhnout použitím děrovaných trubek nebo vibračních klapek. V tomto případě jde o účinnost poněkud menší, a to 5 až 10 %.
- Hrubobublinná aerace – velikost bublin je nad 10 mm. Bubliny takovéto velikosti je možné dosáhnout použitím trubky s otevřeným koncem. Tento způsob je nejméně účinný, pohybuje se kolem 4 až 6 %.

Pro správnou účinnost je důležité i umístění aeračních elementů v nádrži. Optimální uložení je v hloubce 3 až 6 m, a to z toho důvodu, že vzduchová bublina je dostatečnou dobu v kontaktu s odpadní vodou. Ve větších hloubkách se účinnost již nezvyšuje. Minimální uložení aeračních elementů ode dna je 0,2 m. [11]

Součástí pneumatického aeračního systému je především soustava potrubí, ve kterém je veden vzduch, jenž je vháněn dmychadly, ventilátory nebo kompresory až k aeračním elementům. U sání dmychadel bývá zpravidla osazen filtr, čímž se zvyšuje životnost aerační technologie.

Tab. 5 Typické účinnosti přestupu kyslíku pro různé systémy [12]

SYSTÉM	[kg O ₂ ·kWh ⁻¹]	[%]
Hrubobublinná aerace	0,7-1,0	4-6
Jemnobublinná aerace		
Plošná aerace	1,1-1,5	10-14
Spirálový válec	0,8-1,1	6-8
Trisková aerace	0,7-1,1	10-15
Mechanická aerace		
Nízkorychlostní	0,7-1,3	-
Vysokorychlostní	0,7-1,2	-
Ponorná turbína	0,7-1,1	10-15

Aerační systém je velmi důležitý pro energetickou úsporu celé ČOV. Z toho důvodu je má značný vliv zejména na tyto faktory:

- pokles provozních nákladů,
- zlepšení výkonu ČOV,
- lepší distribuce kyslíku,

- lepší usazování kalu.

Při intenzifikaci je vhodné postupovat takto:

- Důkladnou analýzou zjistit problémová místa na základě rozboru zatížení ČOV.
- Stanovit účinnosti systému na základě měření.
- Výpočet kapacity systému a stanovení nutnosti optimalizace.
- Výběr nejvhodnější alternativy.
- Alternativy musí být zhodnoceny v případě, že:
 - Je nutná zvýšená kapacita,
 - budou dosaženy úspory energie,
 - zlepší se výkon ČOV.
- Vyhodnocení a výběr nejvhodnější varianty.
- Realizace intenzifikace aeračního systému. [2]

4.1.4 Hydropneumatická aerace

Hydropneumatický aerátor se skládá z ponorného čerpadla a směšovací komory, ve které dochází ke smíšení proudu vody a přisátého vzduchu. Voda dodávaná čerpadlem protéká přes speciální trysku, za kterou vzniká podtlak, a tím dochází k přisátí vzduchu (princip vodní vývěvy). Ten je pak smísen s protékající vodou. Jedná se relativně o jednoduchý systém s nízkými nároky na obsluhu a údržbu, ale jeho nevýhodou je vyšší energetická náročnost, nízká účinnost a směrová orientace proudu vody a vzduchu. Pro hydropneumatickou aeraci se užívá ejektorů a injektorů.

4.1.5 Kombinovaná aerace

Kombinovaná aerace se rozšířila především v souvislosti hlubokých oběhových aktivačních nádrží. Skládá se většinou z povrchového aerátoru nebo jemnobublinného aeračního roštu a horizontálního ponorného míchadla. Jedná se o systém s oddílným oxygenačním a hydrodynamickým účinkem, proto je tento systém velmi dobře regulovatelný a dosahuje velmi vysokých účinností. Jeho nevýhodou je poměrná složitost celého systému a v některých případech i speciálně tvarované aktivační nádrže. [11]

Tab. 6 Systémy s biomasou ve vznosu [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Regulace bytnění aktivovaného kalu				
- Chlorace - Přidávání nutrientů - Zvýšení obsahu rozpuštěného O ₂ Odstranění H ₂ S - Selektory	Slabá usazovací schopnost kalu, způsobená nadměrným množstvím vláknitých mikroorganismů a jinými příčinami, jejichž výsledkem je nízká koncentrace sušiny v aktivaci, velká koncentrace suspendovaných látek na odtoku a malé množství suspendovaných látek v přebytečném kalu	- Zlepšení usazovací schopnosti kalu - Zvýšení kapacity způsobené vyšší koncentrací sušiny v aktivaci - Vyšší koncentrace sušiny může způsobit nitrifikaci - Zvýšení kapacity dosazovacích nádrží způsobené zlepšením usazovacích schopností - Snížení hydraulického zatížení na kal. hosp.	- Regulace míry růstu závisí na typu přítomných vláken - Mikroskopické vyhodnocení kalu nutné	- Přímá chlorace kalu, přídavek nutrientů a odstranění H ₂ S - Stálá koncentrace rozpuštěného O ₂ a přídavek selektoru je v některých případech snadné, jinde náročné z hlediska provedení
Biologické odstranění nutrientů				
- Dusík - Fosfor - Dusík a fosfor	- Odstranění nutrientů - N a P - Zintenzivnění procesu	- Odstranění N - Odstranění P - Zlepšení usazovací schopnosti - Snížená spotřeba kyslíku - Snížená potřeba alkality	- Jsou možné volby postupu - Postup procesu může být navržen "na míru" se specifickým cílem	- Vyžaduje přidání mýchadel a recirkulačních čerpadel - Nutná rokonstrukce aeračního systému - Obvykle nutná dostavba nádrží
Změna systému přenosu kyslíku				
- Hrubobublinná - Jemnobublinná - Mechanická - Kombinace mechanické a difúzové aerace	Vysoké náklady na energii způsobené neefektivností systému. Malá mechanická spolehlivost. Nedostatečná zásoba O ₂ , nízká koncentrace O ₂	- Snížení energetických nákladů - Zvýšení spolehlivosti - Zvětšení výkonu - Větší rovnoměrnost, vyšší koncentrace O ₂	- Mnoho voleb postupu - Liší se cenou, efektivností a operačními charakteristikami	- Obecně je požadavek důkladného provedení - Někdy může být provedeno obsluhou čistírny

4.2 Biologické čištění – přisedlá biomasa

Hlavním znakem pro systém s přisedlou biomasou je, že mikroorganismy jsou usazovány na inertním médiu a není tak vyžadována recirkulace kalu. Takovýto systém je možné použít pro odstranění především organické hmoty nitrifikací a denitrifikací, lze ho ale použít i pro odstranění fosforu.

4.2.1 Skrápěný filtr

Tato technologie se v ČR příliš nevyužívá, avšak svoje zastoupení má na evropském trhu (Holandsko, Německo). Biologické filtry jsou nádrže vyplněné kusovým materiálem, který je zkrápěn mechanicky předčištěnou odpadní vodou. Po určité době zapracování se na náplni vytvoří biomasa. Princip čištění je biologický, nejedná se tedy v pravém slova smyslu o filtraci. Ke skrápění se nejčastěji používá Segnerovo kolo. Jedná se o konstrukci, kde je na duté ose příčně instalována perforovaná trubka, ze které je voda rozdělována stejnoměrně po celém povrchu biofiltru.



Obr. 5 Skrápěný biofiltr Segnerovým kolem [13]

Náplň biofiltru může být jakýkoliv materiál, který dostatečně vzdoruje mechanickému otírání, vlivu vlhkosti, chemickým vlivům a má drsný povrch. Jako náplň se

nejčastěji používá štěrk, vápenec, struska a nyní především plasty. Velikost zrna má být v průměru 5 - 10 cm. Plastové náplně mají speciální úpravu s co největším povrchem a s co nejsnazší manipulací. Jde obvykle o desky mřížovitého tvaru, bloky s definovanou velikostí otvorů apod. Přednosti náplně z plastu spočívají zejména ve velkém specifickém povrchu umožňujícím vyšší hydraulické zatížení, v nízké hmotnosti náplně, bezporuchovém provozu (nedochází k ucpávání náplně) i v úspoře elektrické energie.

Biologické filtry snášejí i vysoké zatížení a nacházejí použití i pro čištění poměrně koncentrovaných průmyslových odpadních vod. Výška filtrační vrstvy bývá 1,5 až 4 m. Větrací otvory ve stěně filtru musí mít celkovou plochu nejméně 1 % z půdorysné plochy náplně, aby přirozené větrání stačilo k dostatečnému přísunu kyslíku pro aerobní biochemické pochody probíhající v biofiltru. Proudění vzduchu v biofiltru vzniká v důsledku rozdílu vnější teploty (teploty vzduchu) a teploty odpadní vody. Vyšší vnitřní teplota filtru v zimě způsobuje vzestupné proudění, vyšší teplota vzduchu v létě naproti tomu sestupné proudění. K obratu dochází, dosáhne-li rozdíl teplot 20 °C.

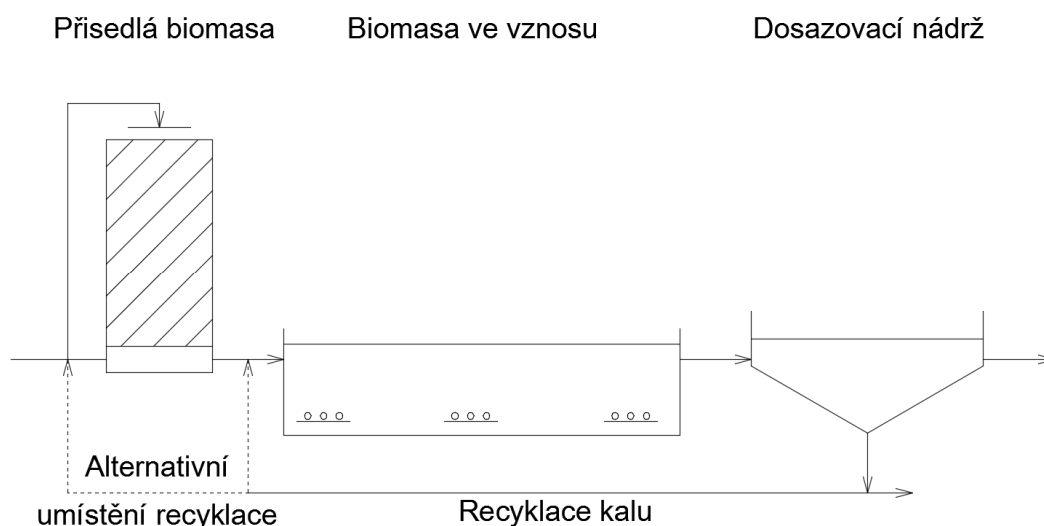
Podle způsobu provozu se dělí biologické filtry na pomalé filtry s čerpáním z akumulární jímky nebo s gravitačním přítokem a na biologické rychlofiltry nepřetržitě skrápěné odpadní vodou.

Biologicky vyčištěná voda je z biologických filtrů odváděna do dosazovacích nádrží. Zatímco za pomalými filtry dosazovací nádrž není nezbytně nutná, musí být za rychlofiltry zařazovány dosazovací nádrže s dobou zdržení asi 1,5 - 2 hodiny, neboť v důsledku vysokého hydraulického zatížení je nadbytečný biologický povlak odplavován čištěnou vodou.

Na pomalých filtrech lze čistit vodu s max. BSK₅ 145 mg/l, na rychlofiltrech 130 mg/l. Aby bylo možno čistit vody koncentrovanější, je nutno snížit jejich BSK₅. K jejich naředění se používá vyčištěná voda, která se recirkuluje. Recirkulováním vody je také umožněno trvalé skrápění biologických rychlofiltrů. [13]

4.2.2 Kombinovaný systém – skrápěný filtr s aktivací

Tyto systémy kombinují technologii aktivace a biofiltru. Uspořádání v technologické lince může být takové, že jako první stupeň je systém s přisedlou biomasou, a v druhém stupni je použita aktivace. Tento postup je častější, používá se však i obrácený postup, kdy za aktivaci je zařazen stupeň s přisedlou biomasou. Výhodou tohoto systému je, že kombinuje výhody obou systémů a minimalizuje nevýhody. Ve výsledku to znamená, že systém s přisedlou biomasou může být intenzifikován přidáním aktivace, a naopak systém s biomasou ve vnosu může být intenzifikován biomasou přisedlou.



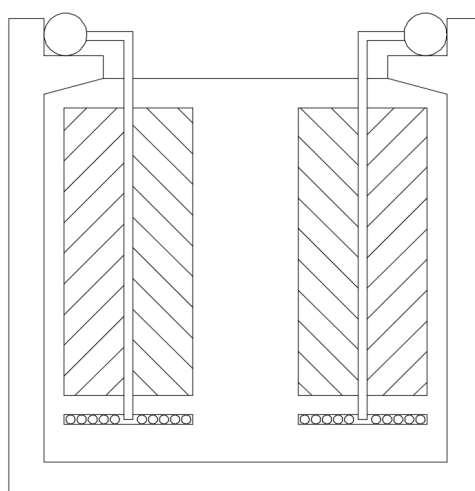
Obr. 6 Schéma skrápěný filtr + aktivace [14]

4.2.3 Zdvojený systém – přisedlá biomasa a biomasa ve vznosu

Zde se jedná o systém, kdy je biomasa ve vznosu a biomasa přisedlá umístěna v jedné nádrži. V těchto aktivačních nádržích se používají následující způsoby aplikací nosných segmentů:

- pěnové elementy používané jako inertní medium,
- media pro skrápěné filtry vložená do aerační nádrže,
- provazce natažené v aerační nádrži nad difuzéry.

Tím, že vzroste koncentrace kalu v aktivační nádrži, vzroste biologická kapacita ČOV. Důležité však je, že vzhledem k tomu, že biomasa je usazována v aktivační nádrži, nevzrůstá látkové zatížení dosazovacích nádrží.



Obr. 7 Aktivační nádrž s vestavěným nosičem biomasy [15]

4.2.4 Biologické filtry

Biologický filtr reprezentují skupiny ponořených, shora dolů protékaných filtrů. Tento způsob je používán pro oxidaci uhlíku, nitrifikaci, kombinaci těchto dvou a denitrifikaci. Existují dva typy těchto filtrů, a to biologický filtr provzdušňovaný a neprovzdušňovaný, takzvaný denitrifikující.

Tyto filtry je možné zařadit pro zlepšení odstraňování BSK₅, amoniakálního dusíku a dusičnanového dusíku. Žádaným efektem je filtrace odpadní vody, což se projevuje na kvalitě vody na odtoku, především u hodnot koncentrací nerozpuštěných látek a patogenních bakterií.

Vyžaduje však nové konstrukce. Průtok přes lože způsobuje ztrátu výšky a obvykle je nutné čerpání. Je nutné zařízení na praní filtru. Tyto zařízení se však ukázala jako efektivní při intenzifikaci řady ČOV. [6]

4.2.5 Rotační biologické kontakory

Jedná se o zařízení skládající se z kotoučů osazených v několika centimetrových vzdálenostech na pomalu se otáčející hřídeli. Kotouče jsou z plastických hmot. Při otáčení zasahují přibližně jednou polovinou do odpadní vody. Na biologickém povlaku vytvořeném na povrchu kotoučů dochází ke stejným pochodům jako na náplni biologických filtrů. Jedná se o poměrně rozšířený způsob, obzvláště pro malé čistírny.

Za biologickými disky musí být vždy zařazena dosazovací nádrž, v níž se oddělí biologický povlak uvolněný z disků od vyčištěné vody. Biologické disky se používají k čištění odpadních vod z malých aglomerací, max. do 5 000 obyvatel. [13]



Obr. 8 Diskový rotační bioreaktor [13]

Tab. 7 Systém s přisedlou biomasou – část 1 [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Skrápěné biofiltry				
- Vysokozatěžované plastické médium - Nahodile uspořádané medium	Výměna existujících zrnitých filtrů s cílem zvýšit povrchovou plochu a zlepšit výkon	- Zvětšení povrchové plochy pro biologický filtr - Snížení BSK5 na odtoku - Zlepšení hydraulických poměrů a ventilace	Instalace prostředí často zdvojená s dalšími modifikacemi	- V některých případech úpravení obsluhy čistírny, jinak s pomocí zvenčí
Systémy s kombinací biologických filtrů a aktivovaného uhlí				
- RF/AS - BF/AS - TF/SC - ABF	Intenzifikací a nebo expanzí existujících biologických filtrů nebo aktivace se dosáhne lepšího odstranění BSK5 a nitrifikace	- Na odtoku snížení množství suspendovaných - Zlepšení usazovacích vlastností - Snížení nákladů	- Je možné několik voleb postupů - Proces mlže být navrženo "na míru" s dosažením	- Vyžadovány nové konstrukce - Mohou být také požadovány modifikace k existující jednotce
Kombinovaný systém s biomasou přisedlou a ve vznosu				
	Zvýšení efektivní koncentrace biomasy v reaktoru bez zvětšení zatížení dosazovacích nádrží	- Zvětšení zásoby biomasy - Hlubší působení na nitrifikaci a BSK5 - Snížení zatížení v dosazovacích nádržích	- Relativně nové - Potřeba O2 zajištěna difúzně nebo mechanicky - Vhodné pro stírané prostředí	- Nutná instalace medií - Může být také požadována výměna aeračního systému - Doporučuje se poloprovozní nebo provozní

Tab. 8 Systém s přisedlou biomasou – část 2 [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Biologické filtry				
<ul style="list-style-type: none"> - Přepady - Clony - Měřicí přístroje a ventily 	Lepší odtok způsobený oxidací, filtrací, denitrifikací	<ul style="list-style-type: none"> - Snížení BSK5 na odtoku - Snížení NL na odtoku - Snížení NH3-N na odtoku - Snížení NO3-N na odtoku 	<ul style="list-style-type: none"> - Filtrace je rys procesu - Modulární konstrukce - Podobné gravitačním filtrům 	<ul style="list-style-type: none"> - Požadovaná konstrukce procesních jednotek - Obvykle nutná čerpací stanice
Biologické rotační kontakory				
<ul style="list-style-type: none"> - Snížení zatížení - Postupně zatěžované - Odstranění H2S - Doplnková aerace - Chemické stripování 	Modifikace procesu s cílem omezit růst Beggiatoa	<ul style="list-style-type: none"> - Snížení zatížení na RBC - Zvýšení odstranění BSK5 - Zvýšení nitrifikace 	<ul style="list-style-type: none"> - Důležité díky slabému výkonu existujících systémů - Použitelné výsledky z rozsáhlých výzkumů 	<ul style="list-style-type: none"> - Většina úkonů zvládnutelná obsluhou ČOV - Obvykle nutná výstavba hlavních jednotek

4.3 Dosazování

Sedimentační nádrže, které se používají k usazování pevných částic v odpadní vodě, jsou klíčová u většiny ČOV. Tyto nádrže mohou být buď předřazeny aktivaci, pak hovoříme o usazovacích nádržích, nebo mohou následovat po aktivaci, a pak hovoříme o nádržích dosazovacích. Usazovací nádrže slouží k sedimentaci usaditelných látek. Dosazovací nádrže mají odlišnou funkci, a to v případě, že následují po stupni s biomasou ve vznosu, anebo po stupni s přisedlou biomasou. V případě, že následují po systému s biomasou ve vznosu, slouží k usazení vloček aktivovaného kalu. Ten může být zpětně recyklován a čerpán do aktivace tak, aby byla udržena potřebná koncentrace kalu. V případě, že se jedná o systém s přisedlou biomasou, slouží dosazovací nádrže k sedimentaci odpadlé biomasy.

Usazovací nádrže jsou mnohdy klíčové pro správný chod celé čistírny odpadních vod a jejich správnou funkci, případně zvýšení výkonnosti lze zajistit těmito způsoby:

- rozdělení přítoku,
- usměrňovače proudění,
- Instalace lamelových usazovacích nádrží.

4.3.1 Rozdělení přítoku

Pro plné využití kapacity každé jednotlivé nádrže je nutné do nich přivést úměrné množství OV tak, aby byly využity dle jejich objemu. V případě, že přítok do nádrží není rovnoměrný, může docházet k tomu, že nádrže mají neúplně využitou svou kapacitu.

Pro rozdělení průtoků jsou nejčastěji používány následující metody [16]:

- Rozdělení průtoků pomocí přepadů, kdy každý přepad slouží jedné jednotce (délka přepadu je úměrná množství OV, která má být do nádrže přivedena).
- Přivedení průtoků přes otvor, který vytváří protékající vodě překážku. Příslušná ztráta spádu je přímo úměrná průtoků, který má být přiveden na jednotku.
- Pomocí měření průtoků a ventilů na přítoku do každé nádrže. Každý ventil nastavuje průtok dle kapacity dané jednotky.

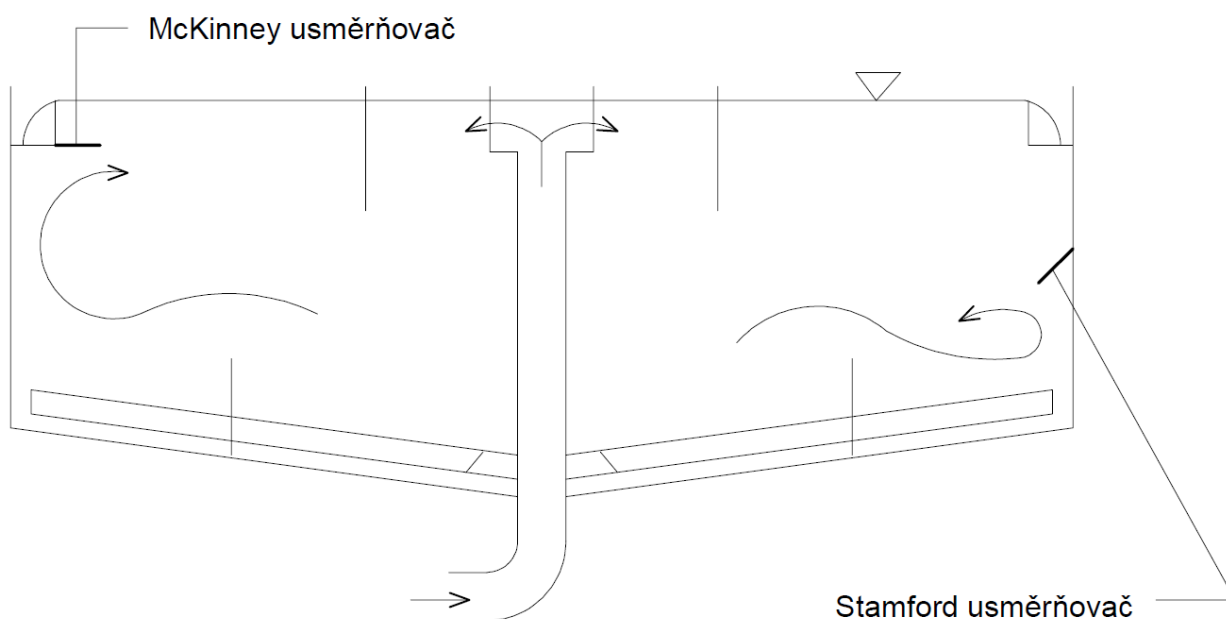
Tento technologický prvek vždy znamená hydraulickou ztrátu. V případě, že je hydraulický spád dostatečný a je k dispozici ztrátová výška, může toto opatření být poměrně snadno instalováno. V případě, že není k dispozici dostatečná ztrátová výška, jsou nutné významnější investice.

4.3.2 Usměrňovače proudění

Řízení přítoku odpadní vody do dosazovacích nádrží má zásadní vliv na usazování pevných částic. Při nesprávném rozvržení přítoku dochází k turbulencím, což značně znesnadňuje sedimentaci. Usměrňovače toku tlumí energii přitékající vody a zaručí nevíření v dosazovací nádrži. Případné usměrňovače na odtoku je možné využít k oddělení a nasměrování pevných částic mimo odtok z dosazovací nádrže.

Přítoková zóna je použita pro flokulaci, utlumení energie a rozdělení průtoku. Přidáním usměrňovače se zlepší výkon dosazovací nádrže. Požadované koncentrace NL jsou dosaženy při vyšším hydraulickém zatížení. Z toho vyplývá, že vzroste i účinnost i kapacita usazovací nádrže. Mohou být poměrně snadno instalovány. Nejčastěji používané materiály jsou laminát, ocel a vodotěsná překližka.

Jako usměrňovače se používají například Mc Kinley usměrňovač, který je horizontální a je umístěn pod odtokovým žlabem. Dalším typem je usměrňovač Stamford, ten je orientován pod úhlem 45° a je umístěn na stěně nádrže.



Obr. 9 Příklady usměrňovačů proudění pro kruhovou dosazovací nádrž [6]

Toto řešení však nezlepší účinnost dosazovací nádrže v případě, že je látkově přetížená. Vyšší látkové zatížení způsobuje akumulaci kalu až do takové míry, že se usazené NL dostávají do odtoku.

4.3.3 Lamelové usazovací nádrže

Lamelové usazovací nádrže slouží primárně pro úpravu vody, jsou však možnou alternativou při intenzifikaci dosazovacích nádrží.

Lamely v usazovací nádrži mají za následek zvýšení kapacity jednotky, však nevýhodou je možné ucpávání lamel. Látky obsažené v odpadní vodě mohou ulpívat a ucpávat lamely a růst na nich. V případě, že se jedná o odbouratelné látky tak začnou zahnívat a způsobují anaerobní aktivitu. V důsledku toho se uvolňuje sirovodík. Je tedy nutné periodické čištění. [6]

Tab. 9 Zlepšení technologie usazování [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Dělení přítoku				
- Přepady - Clony - Měřicí přístroje a ventily	- Kapacita existujících dosazovacích nádrží není využita díky nestejněměrnému a nekontrolovatelnému dělení průtoku	- Zvětšení kapacity - Stabilnější výkon	- Správné dělení průtoku vyžaduje ztráty - Jsou možné oba systémy: pasivní i aktivní	Hydraulická analýza požaduje prověřit, zda požadovaný hydraulický spád je dosažitelný a k navržení efektivního systému
Usměrnovače průtoků				
- Na přítoku - Na odtoku - Na prstenci	Slabá hydraulika dosazovacích nádrží se odráží ve slabém výkonu a nedostatečné kapacitě	- Snížení množství suspendovaných látek na odtoku	- K dispozici řada možností - Zkušenosti usnadňují výběr - Neefektivní pro zahušťování	- Často možnost provést personálem čistírny
Lamelové dosazovací nádrže				
	Dojde ke zvýšení efektivní usazovací plochy a může se také zlepšit hydraulika dosazovacích nádrží	- Snížení množství suspendovaných látek na odtoku - Zvýšení kapacity	- Akumulace lepkavých hnilobných látek na odtoku - Neefektivní pro zahušťování	- Vyžaduje instalaci lamel a zařízení čišťování

4.4 Chemické čištění

Chemikálie jsou jedním běžných prvků, které se používají v procesu čištění odpadních vod. Zejména pro proces koagulace, a to za účelem zvětšení velikosti částic a tím snadnější sedimentaci či filtraci.

Tab. 10 Aplikace chemické koagulace [18]

Chemický proces	Dávka [mg·l ⁻¹]	pH	Poznámka
Vápnó	150-500	9,0-11,0	Pro koagulaci a odstranění P odpadní voda s nízkou KNK _{4,5} a vysokým a variabilním P reakce: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 + \text{CaCO}_3$
Hliník	75-250	4,5-7,0	Odpadní voda s vysokou KNK _{4,5} a nízkým a stabilním P reakce: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$
FeCl ₃ ·FeCl ₂	35-150	4,0-7,0	Odpadní voda s vysokou KNK _{4,5} a nízkým a stabilním P reakce: $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3 + 3\text{HCl}$
FeSO ₄ ·7H ₂ O	70-200	4,0-7,0	Tam kde je unikání železa do odtoku povoleno nebo může být kontrolováno. Kde je k dispozici ekonomický zdroj železa
Kationické polymery	2-5	Beze změny	Pro koagulaci jako pomocný koagulant při srážení kovy. Tam kde je nutno vyloučit interní chemikálie
Anionické a nanionické polymery	0,25-1,0	Beze změny	Používá se jako pomocný flokulant k urychlení flokulace a k zpevnění vloček pro filtraci
jílý	3-20	Beze změny	Používá se pro velmi zředěné koloidní suspenze pro zvýšení hmotnosti částic

4.4.1 Soli kovů

Jako koagulant se pro čištění odpadních vod používají nejčastěji soli hliníku a železa. Z hliníkových solí je to nejčastěji síran hlinitý a chlorid hlinitý a ze solí železa pak síran železitý a chlorid železitý. Tyto koagulanty zlepšují odstranění NL, BSK₅ a P. Účinnosti mohou vzrůst následovně:

- Odstranění NL až na 75-85%
- Odstranění BSK₅ až na 60-60%

Tab. 11 Koncentrace na odtoku dosažitelné při odstraňování těžkých kovů [6]

Kov	Dosažitelná koncentrace na odtoku [mg·l ⁻¹]	Technologie
Arzenik	0,05 0,06 0,005	Srážení siřníky + filtrace Aktivní uhlí Srážení hydroxid železitý
Barium	0,5	Srážení sírany
Kadminum	0,05 0,05	Srážení hydroxidy pH 10-11 Srážení hydroxidem železitým
Měď	0,02-0,07 0,01-0,02	Srážení siřníky Srážení hydroxidy
Olovo	0,01-0,02 0,001-0,01 0,0005-0,005 0,001-0,005	Srážení siřníky Srážení hliníkem Srážení hydroxidem železitým Výměna iontů
Nikl	0,12	Srážení hydroxidy pH 10
Selen	0,05	Srážení siřníky
zinek	0,1	Srážení hydroxidy pH 11

4.4.2 Polymery

Polymery jsou organické látky reprezentující alternativu k anorganickým solím kovů. Mohou být:

- Kationické
- Anionické
- Nonionické

Odpadní voda má většinou záporný náboj, nicméně všechny typy uvedených polymerů mají uplatnění při čištění odpadních vod. Aplikují se jako flokulant a na podporu usaditelnosti koloidních částic.

Dávkování polymerů je možno použít v případě bytnění kalu, aby byly vločky kompaktnější a lépe usaditelné. Je snadno proveditelné a však je nutné pečlivě vybrat bod dávkování. Má zanedbatelný vliv na celkovou produkci kalu na ČOV.

Tab. 12 Technologie chemické úpravy [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Soli kovů				
<ul style="list-style-type: none"> - Hliník - Hlinitan sodný - Chlorid sodný - Chlorid železitý - Síran železitý 	<ul style="list-style-type: none"> - Odstranění fosforu - Zvýšení odstranění BSK5 a NL 	<ul style="list-style-type: none"> - Snížení množství celkového P na odtoku - Snížení množství NL a BSK5 na odtoku *-Zvětšení kapacity - Zvýšení spotřeby alkality 	<ul style="list-style-type: none"> - Je možné dávkování na více místech - Značný vliv na kalové hospodářství - Některé soli kovů jsou korozivní 	<ul style="list-style-type: none"> - Skladovací a dávkovací zařízení jsou snadno doplňitelné - Mohou být požadovány také modifikace kalového hospodářství
Polymery				
<ul style="list-style-type: none"> - Kationotový - Aniontový - Nnoniontový 	<ul style="list-style-type: none"> - Zvýšení odstranění NL 	<ul style="list-style-type: none"> -Snížení množství NL na odtoku a BSK5 -Zvýšená kapacita 	<ul style="list-style-type: none"> -Často používaný ve spojení se solemi kovů -Intenzita dávek ovlivněna cenou 	<ul style="list-style-type: none"> - Skladovací a dávkovací zařízení jsou snadno doplňitelné

4.5 Terciální stupeň čištění

Jako dočišťování odpadních vod se nejvíce u ČOV osvědčily tyto dva procesy:

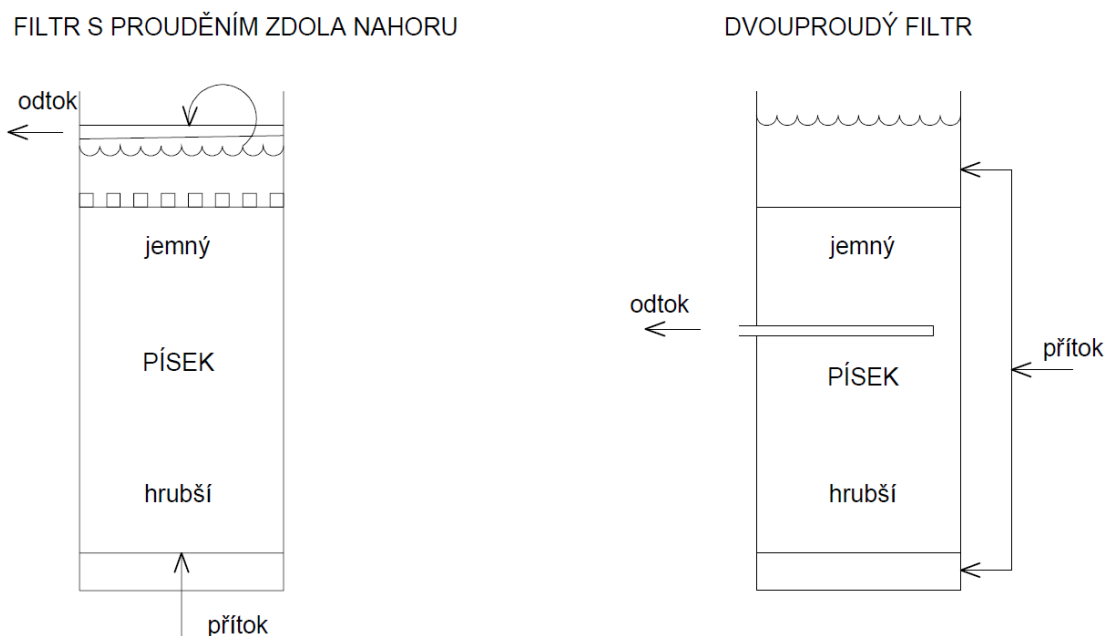
- filtrace odtoku
- filtrace přes aktivní uhlí

4.5.1 Filtrace odtoku

Filtrace se používá především pro odstranění nerozpuštěných látek. Filtr je tvořen nejčastěji pískovým ložem. Pro separaci nerozpuštěných látek se používá několik mechanismů:

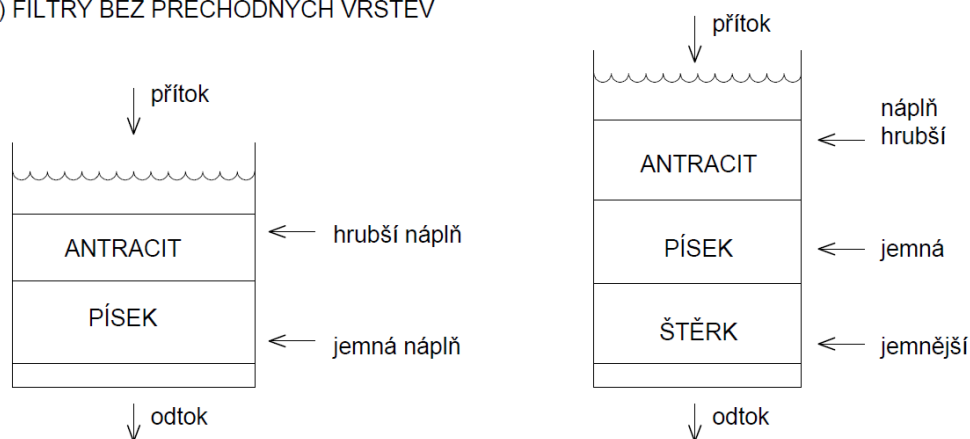
- cezení,
- sedimentace,
- adsorpce,
- absorpce.

Vlivem usazování NL se filtrační lože zanáší a tím vzrůstá tlaková ztráta na jednotce. Ve chvíli, kdy tato ztráta dosáhne určité hodnoty, musí být filtr vyčištěn. Nejčastěji se tak děje zpětným proplachem.

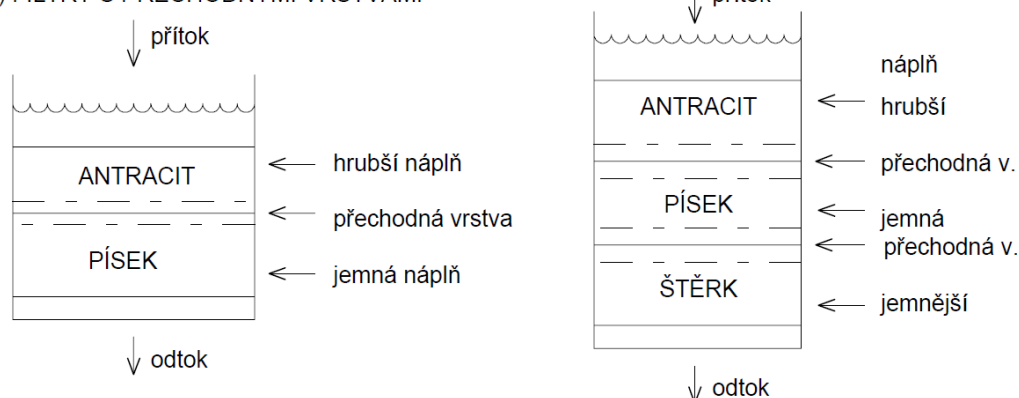


Obr. 10 Příklady klasických pískových filtrů [6]

A) FILTRY BEZ PŘECHODNÝCH VRSTEV



B) FILTRY S PŘECHODNÝMI VRSTVAMI



Obr. 11 Příklady dvou a vícevrstevných filtrů [6]

Při instalaci litrů jsou vyžadované nové konstrukce a zpravidla je vyžadovaná čerpací stanice. Je nutno zvážit vliv prací vody na ČOV.

4.5.2 Filtrace přes aktivní uhlí

Aktivní uhlí je uměle vytvořený materiál, který dokáže díky své struktuře adsorbovat rozpustný materiál z roztoku. Může být granulované nebo práškové, to se přidává rovnou do aktivace, odkud je zpětně čerpáno s vratným kalem. Z kalu je pak možnost zpětně získat práškové aktivní uhlí pomocí vysokého tlaku a teploty se ztratou 10 – 15% PAU. Adsorpční kapacita aktivního uhlí je fixní, takže po nějakém čase musí být regenerováno. To probíhá za vysokých teplot, kdy je adsorbována organická hmota, desorbována a oxidována.

Primárním účinkem je snížení rozpustných organických látek na odtoku a zároveň jsou vody filtrovány. Filtrace přes aktivní uhlí vyžaduje nové konstrukce. Je nutné vybudovat zařízení pro praní filtru. Systém s práškovým aktivním uhlím vyžaduje prostor na skladování PAU a je nutné vybudovat zařízení pro manipulaci s kalem.

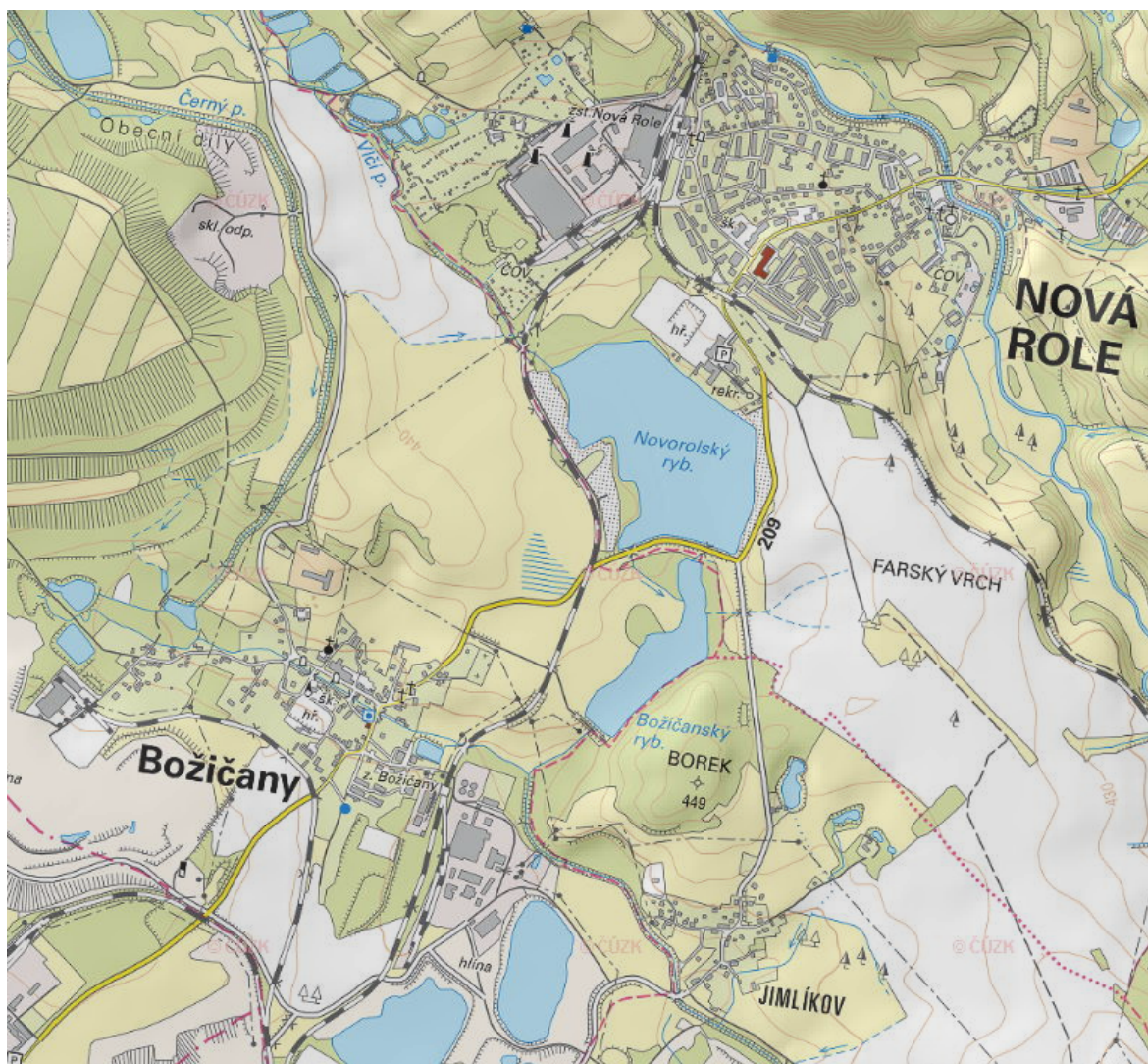
Tab. 13 Třetí stupeň čištění [6]

Technologie	Použití	Důsledky	Charakteristika	Provedení
Filtrace zrnitým prostředím				
	- Redukce množství NL na odtoku	- Snížení množství NL na odtoku - Snížení BSK5, CHSK, N	- Možné jsou různé varianty procesů - Obecně neefektivní pro množství NL větší než 50 mg-l - Vysoce efektivní	Požadována stavební konstrukce - Často jsou požadovány modifikace hydraulického - Musí být brán v úvahu vliv prací vody
Aktivní uhlí				
- Granulované - Práškové	- Regulace biologicky neodbouratelných toxických látek na odtoku	- Snížení odorganických látek na odtoku - Snížení toxicity na odtoku	- Různé varianty k dispozici - Filtrace na odtoku je vlastní některým systémům	- Požadovány dodatečné hlavní konstrukce - Doporučen pilotní provoz

5. Optimalizace provozu na ČOV Nová Role

5.1 Popis lokality ČOV Nová Role

Nová Role je obec nacházející se v okrese Karlovy Vary v Karlovarském kraji. ČOV Nová Role je umístěna na pravém břehu řeky Rolavy v jihovýchodní části obce a je navržena na 5000 EO. Spádovou oblast tvoří obec Nová Role a přilehlé obce, zejména pak Jimlíkov a Božičany. Vyčištěné odpadní vody jsou vedeny do říčního toku Rolava.



Obr. 12 Spádová oblast (Jimlíkov, Božičany, Nová Role) pro ČOV Nová Role [22]

5.1.1 Základní údaje o provozu ČOV

ČOV byla navržena a vybudována jako mechanicko-biologická pro společné čištění splaškových, dešťových a průmyslových odpadních vod s mechanickým předčištěním a biologickým stupněm. Vyčištěná voda odtéká přes měrný objekt do recipientu.

Odpadní vody z obce jsou přiváděny kmenovou stokou o průměru 1000 mm se spádem 4 ‰ a o maximální kapacitě $1\,358\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. do odlehčovací komory. Do čistírny přitéká voda potrubím o DN 400. Přepadající voda nad max. přítok odtéká do řeky Rolavy potrubím o průměru 400 mm. Ředící poměr odlehčovací komory m je 1:5.

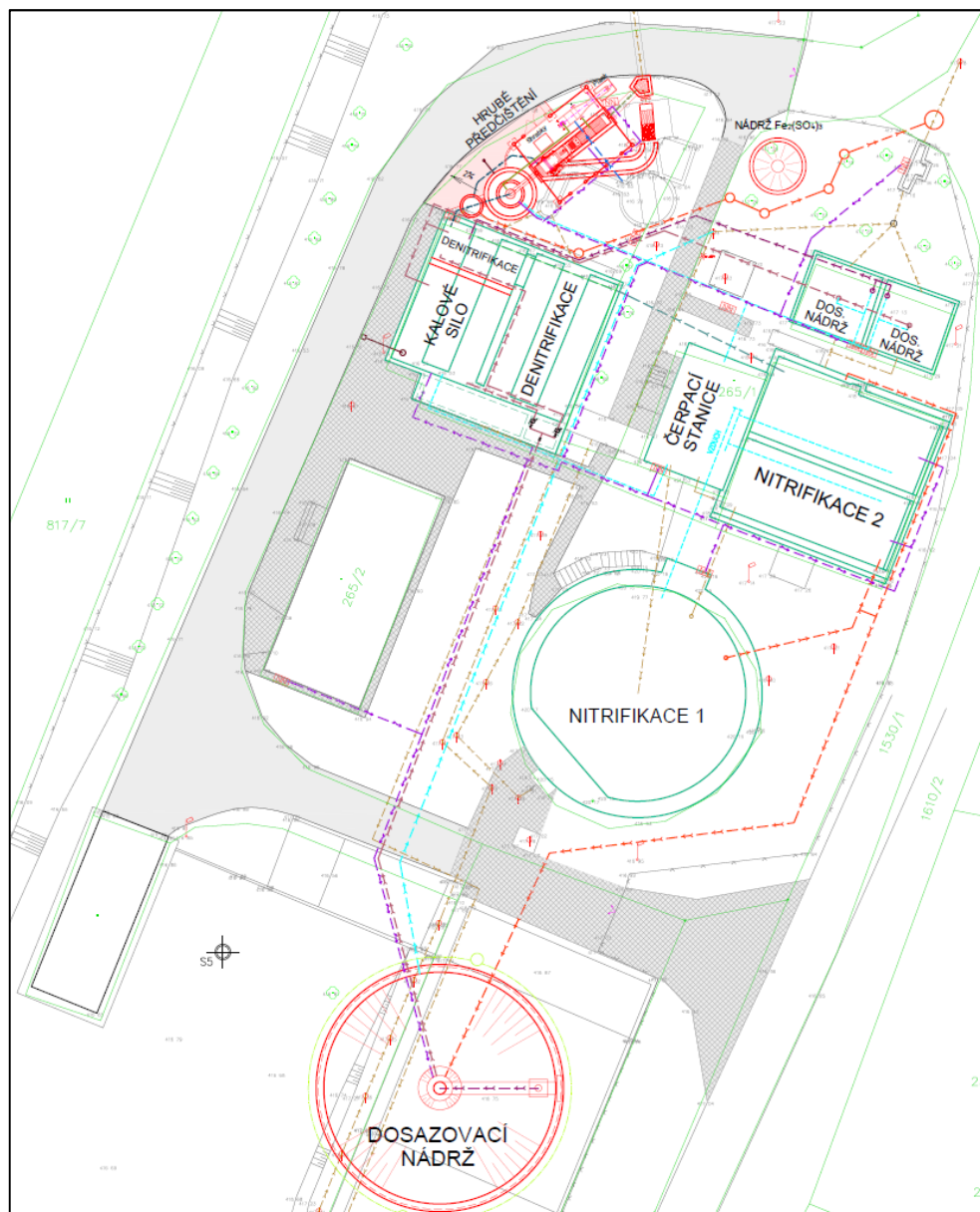
Mechanický stupeň sestává z hrubého předčištění, konkrétně z automatických strojně stíraných česlí a lapáku písku.

Biologický stupeň sestává z denitrifikačních nádrží DN1 a DN2 a nitrifikačních nádrží N1 a N2. Objekt denitrifikace je pro obě nádrže společný ještě s kalovým silem. Míchání v nádržích je zajištěno ponornými vertikálními míchadly. Pro DN1 je to míchadlo s průměrem vrtule 250 mm a pro DN2 je průměr vrtule 900 mm. Objekt nitrifikace N1 je kruhová nádrž, která je provzdušňována jemnobublinnými diskovými aeračními elementy. Objekt aktivace (nitrifikace 2) je železobetonový monolit rozdělený na dva aktivační prostory. Dodávka vzduchu do obou nádrží je řešena stejně jako v případě nitrifikační nádrže N1. Přitékající voda prochází postupným tokem z první do druhé nádrže, kde je na odtoku přepadová hrana, přes kterou odtéká směs vyčištěné odpadní vody a aktivovaného kalu do dosazovací nádrže.

Dosazovací nádrž se skládá z přítokového potrubí, uklidňovacího válce a odtokového potrubí umístěného pod hladinou. Odtokové potrubí je umístěno pod hladinou z důvodu plovoucích nečistot v dosazovací nádrži. Biologicky vyčištěná voda přitéká z objektů denitrifikace a nitrifikace do vtokového uklidňovacího válce, odsazená voda přes odtokové potrubí do recipientu. Vyčištěná voda přepadá do sběrného žlabu. Odtah usazeného vratného kalu se provádí pomocí čerpadla, které je umístěno na dně dosazovací nádrže.

Přepad z odlehčovací komory a odtok vyčištěné odpadní vody se spojují v kanalizační šachtě mimo areál čistírny. Kanalizační potrubí vyústuje na povrch a voda odtéká do recipientu otevřeným korytem přes propustek v ochranné hrázi.

Směs vratného kalu a interní recirkulace je zaústěna do nádržní denitrifikace. Primární kal se zachytí v kalojemu, kde vyhřívá za snížené teploty. Vyhnilý kal ze spodní vrstvy kalového sila je odčerpáván kalovými čerpadly do fekálního vozu a je odvážen na ČOV Karlovy Vary. Zde je kal přímo odvodněn na pásovém lisu CENED, nebo je napuštěn do vyhřívací nádrže kalového hospodářství k další anaerobní stabilizaci. [19]



Obr. 13 Situace ČOV Nová Role [20]

5.1.2 Hodnoty přítoku a odtoku z ČOV

Hodnoty průtoků:

Tab. 14 Hodnoty průtoků na ČOV Nová Role

Průtok/jednotka	[m ³ ·d ⁻¹]	[m ³ ·h ⁻¹]	[l·s ⁻¹]
Q ₂₄	1 180	49,2	13,7
Q _d	1 680	70,0	19,4

- Q₂₄ - Průměrný denní průtok
- Q_d - Maximální denní průtok

Hodnoty znečištění na přítoku na ČOV:

Tab. 15 Hodnoty znečištění na přítoku na ČOV Nová Role

Parametr	[mg·l ⁻¹]	[kg·d ⁻¹]
BSK ₅	254,2	300
NL	233,0	275
CHSK	466,1	550
N	29,7	35
P	8,5	10

- BSK₅ - Biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní
- NL - Nerozpuštěné látky
- CHSK - Chemická spotřeba kyslíku
- N - Dusík
- P - Fosfor

Hodnoty znečištění na přítoku a odtoku z ČOV:

Tab. 16 Hodnoty znečištění na přítoku a odtoku z ČOV Nová Role

	Přítok		Odtok	
	koncentrace	balance (2015)	koncentrace	balance (2015)
	[mg·l ⁻¹]	[t·rok ⁻¹]	[mg·l ⁻¹]	[t·rok ⁻¹]
BSK₅	208,3	103,34	5,24	2,60
NL	311,0	154,29	5,28	2,62
CHSK	508,3	252,17	30,16	14,96
N-NH₄	33,1	16,42	5,98	2,96

- BSK₅ - Biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní
- NL - Nerozpuštěné látky
- CHSK - Chemická spotřeba kyslíku
- N-NH₄ - Amoniakální dusík

V současné době platí povolení k vypouštění odpadních vod v ČOV Nová Role podle č.j. 9593/SÚ/12/Sz ze dne 27.8.2012:

- Q_{rok} - 600 000 m³
- Q_{prům} - 19 l·s⁻¹
- Q_{MAX} - 40 l·s⁻¹
- Q_{měs} - 75 000 m³

Kvalita:

Tab. 17 Kvalita vypouštěných odpadních vod z ČOV Nová Role

ukazatel	bilance [t·rok ⁻¹]	průměr [mg·l ⁻¹]	maximum [mg·l ⁻¹]
BSK ₅	12	25	50
NL	14	30	50
CHSK	38	80	150
N-NH ₄	12	20	40

Platnost tohoto povolení je stanovena do 31.8.2022. [19]

5.1.3 Údaje o vodním recipientu v místě vypouštění OV

- Měření odtoku – Vyčištěná voda z dosazovací nádrže přepadá do odtokového žlabu a odtéká přes Parshallův žlab do recipientu.
- Údaje o recipientu:
 - Recipient: řeka Rolava
 - Hydrologické č. povodí: 1-13-01-165
 - Q₃₅₅: 440 l·s⁻¹
 - Znečištění toku:
 - BSK₅ 4,3 mg·l⁻¹
 - NL 8,0 mg·l⁻¹

Tab. 18 Hodnoty znečištění ve vodním toku Rolava [19]

Parametr	průměr [mg·l ⁻¹]	maximum [mg·l ⁻¹]
BSK ₅	5,241	11,0
NL	5,283	11,0
CHSK	30,160	44,0
N-NH ₄	5,985	27,0

5.2 Spotřeba elektrické energie na ČOV

Spotřeba elektrické energie na ČOV závisí na její velikosti (množství přiváděných vod), množství znečištění, typu použité technologie a konfiguraci terénu. Pro hrubé ekonomické odhady je možné použít níže uvedenou tabulku spotřeb elektrické energie.

Tab. 19 Spotřeba elektrické energie na ČOV [17]

Velikost ČOV [EO]	Roční spotřeba elektrické energie	
	[kWh·rok ⁻¹]	[kWh·EO ⁻¹ ·rok ⁻¹]
7 000	270 000 - 350 000	38 - 50
18 000	550 000 - 900 000	30 - 50
25 000	1 000 000 - 1 250 000	40 - 50
40 000	1 100 000 - 1 500 000	28 - 38
360 000	11 700 000 - 14 000 000	32 - 39

Z tabulky je možné odvodit spotřebu elektrické energie na EO a ta se pohybuje v rozmezí 30 – 50 kWh·EO⁻¹·rok⁻¹, kde vyšší hodnota představuje spotřebu před rekonstrukcí a nižší po energetické optimalizaci prováděné v rámci rekonstrukce ČOV.

Z předešlé tabulky je patrné, že závislost mezi počtem ekvivalentních obyvatel a spotřebou elektrické energie je téměř lineární. Je tedy možné odvodit hodnoty pro 5000 EO. Pro takovýto případ je předpokládána roční spotřeba elektrické energie v rozmezí 185 000 – 250 000 kWh·rok⁻¹ a spotřeba za rok na jednoho ekvivalentního obyvatele by se měla pohybovat v rozmezí 37 – 50 kWh·EO⁻¹·rok⁻¹.

Tab. 20 Energetická náročnost ČOV Nová Role 1. část

NÁZEV ROK	ČOV NOVÁ ROLE					
			2010	2011	2012	2013
LEDEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	14.704	5.531	13.136	12.675
	NÁKLAD	[Kč]	42 763.41	13 121.24	41 171.39	39 424.98
ÚNOR	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.041	13.849	14.447	15.101
	NÁKLAD	[Kč]	38 361.35	40 136.32	44 930.96	46 449.01
BŘEZEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.870	12.553	12.519	13.422
	NÁKLAD	[Kč]	35 108.45	36 670.15	39 286.10	41 528.56
DUBEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.747	13.075	13.949	13.074
	NÁKLAD	[Kč]	32 466.24	37 808.43	43 221.39	40 390.80
KVĚTEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	12.696	14.582	12.426	12.177
	NÁKLAD	[Kč]	34 715.25	41 500.73	39 372.84	37 789.94
ČERVEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	10.755	11.499	11.024	11.770
	NÁKLAD	[Kč]	29 942.82	33 926.49	34 459.03	36 795.50
ČERVENEC	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.701	12.239	11.861	9.974
	NÁKLAD	[Kč]	32 460.11	35 816.22	37 665.27	31 828.17
SRPEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.711	12.375	11.369	10.746
	NÁKLAD	[Kč]	37 462.04	36 261.92	36 203.18	33 884.98
ZÁŘÍ	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.208	11.322	12.557	12.682
	NÁKLAD	[Kč]	36 305.50	33 370.91	39 568.46	39 538.27
ŘÍJEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.078	12.646	14.395	41.438
	NÁKLAD	[Kč]	35 980.18	36 951.61	45 029.14	99 391.29
LISTOPAD	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.411	14.491	11.881	-15.612
	NÁKLAD	[Kč]	36 635.86	41 655.80	37 532.21	-18 813.29
PROSINEC	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	21.346	13.626	18.456	18.099
	NÁKLAD	[Kč]	59 796.84	39 340.72	56 589.54	54 865.81
ROČNÍ SPOTŘEBA	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	161.268	147.788	158.020	155.546
	NÁKLAD	[Kč]	451 998.05	426 560.54	495 029.51	483 074.02

Tab. 21 Energetická náročnost ČOV Nová Role 2.část

NÁZEV	ČOV NOVÁ ROLE				
	ROK		2014	2015	2016
LEDEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	8.876	10.359	-1.069
	NÁKLAD	[Kč]	24 959.53	27 453.70	13 709.17
ÚNOR	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	13.190	16.289	19.815
	NÁKLAD	[Kč]	35 562.01	41 529.81	46 796.52
BŘEZEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.077	13.047	17.092
	NÁKLAD	[Kč]	30 270.50	33 740.23	40 881.18
DUBEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.966	13.209	19.173
	NÁKLAD	[Kč]	32 475.43	34 092.39	45 415.18
KVĚTEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	10.553	12.544	16.729
	NÁKLAD	[Kč]	28 914.98	32 317.14	40 111.25
ČERVEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.596	11.535	17.200
	NÁKLAD	[Kč]	31 689.74	30 165.75	41 074.30
ČERVENEC	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	10.523	12.751	16.329
	NÁKLAD	[Kč]	29 085.07	33 088.37	39 345.12
SRPEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	10.661	15.242	14.802
	NÁKLAD	[Kč]	29 417.51	38 926.05	36 050.53
ZÁŘÍ	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.334	12.689	17.314
	NÁKLAD	[Kč]	31 089.43	33 003.46	41 663.19
ŘÍJEN	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	11.165	11.431	
	NÁKLAD	[Kč]	30 824.20	29 988.97	
LISTOPAD	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	12.733	15.658	
	NÁKLAD	[Kč]	34 456.01	40 005.71	
PROSINEC	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	31.273	39.747	
	NÁKLAD	[Kč]	79 378.12	81 376.25	
ROČNÍ SPOTŘEBA	SPOTŘEBA	[MWh/měsíc]	154.947	184.501	
	NÁKLAD	[Kč]	418 122.53	455 687.83	

Vypočtené hodnoty odpovídají doporučenému rozpětí a jsou následující. Spotřeba elektrické energie se pohybuje v rozmezí od 150 000 – 190 000 kWh·rok⁻¹. V přepočtu na jednoho ekvivalentního obyvatele je to potom 30 – 38 kWh·EO⁻¹·rok⁻¹.

Tab. 22 Porovnání teoretické a skutečné energetické náročnosti ČOV Nová Role

ČOV Nová Role – 5 000 EO		
Předpokládaná spotřeba	185 000 – 250 000 kWh·rok ⁻¹	37 – 50 kWh·EO ⁻¹ ·rok ⁻¹
Skutečná spotřeba	150 000 – 190 000 kWh·rok ⁻¹	30 – 38 kWh·EO ⁻¹ ·rok ⁻¹

5.3 Návrh variant pro optimalizaci ČOV s využitím programu WEST

Návrhy možností uspořádání technologické linky na ČOV Nová Role jsem zpracoval ve dvou variantách. Modelování průběhu čistírenského procesu je simulováno pomocí softwarového nástroje WEST. Jedním z možných výstupů tohoto programu jsou i hodnoty

kvality vody na odtoku z ČOV, což jsou klíčové ukazatele, pro určení nejlepší z navrhovaných variant. Obě varianty budou modelovány jako přidané ke stávajícímu stavu na čistírně. Do původní technologické linky nebude nijak zasahováno.

5.3.1 Software WEST od společnosti MIKE Powered by DHI

Program WEST je určen pro modelování a simulování stavů na čistírnách odpadních vod. Nabízí modelování statické i dynamické a je určen ke zkoumání fyzikálních, chemických nebo biologických procesů na čistírnách odpadních vod, stokách i korytech.

WEST je flexibilní a výkonný nástroj pro posuzování čistíren odpadních vod. Může být použit k simulování většiny procesů a konfigurací v moderních ČOV. Model sestavený pro danou ČOV v programu WEST může být používán k předpovědím chování ČOV a pro testování provozních strategií. WEST slouží pro identifikaci problémových míst, pro odhad nákladů, testování jednotlivých scénářů. Může také sloužit jako důležitý nástroj pro podporu rozhodování provozovatele ČOV, konzultanty nebo vědecké pracovníky.

Software WEST nabízí:

- optimalizace návrhu a provozu ČOV,
- scénáře současného i budoucího nátoku a složení odpadních vod,
- testování zatížení a analýza rizik,
- identifikace a odstranění slabých míst systému,
- optimalizace nákladů na provoz,
- on-line modelování včetně integrace automatických procesů.

Program nabízí uživatelsky přívětivou platformu pro dynamické a statické modelování a simulaci systémů kvality vody. Schéma ČOV se zadává v grafickém uživatelském rozhraní, výběrem jednotlivých segmentů z uživatelské knihovny. Kontrolní strategie řízení může být velmi snadno prováděna výběrem z knihovny a umístění čidla nebo kontrolní jednotky do schématu ČOV. Není nutné žádné dodatečné programování.

WEST má rozsáhlou uživatelskou knihovnu. Obsahuje nejmodernější matematické modely pro simulaci procesů v aktivačních nádržích (ASM, ASM2, ASM2D, ASM3, ASM3 Bio-P) i modely pro biologické a pískové filtry, usazovací, dosazovací a vyhnívací nádrže (ADM1).

Jednotlivé části ČOV jsou graficky reprezentovány ikonami s nastavením parametrů na přítoku a odtoku. WEST nabízí rozsáhlou knihovnu ikon pokrývající většinu typů procesů nacházejících se na ČOV. Pro speciální typy procesů na ČOV lze vytvářet vlastní uživatelské ikony pomocí editoru ikon.

Pro efektivní kalibraci modelu je možno použít několika dalších modulů, které provádějí automatizaci úloh, jako je např. citlivostní analýza, odhad parametrů, simulace na základě metody Monte Carlo a analýzy scénářů. [23]

Software obsahuje několik modulů, které lze využít. Konkrétně WESTforDESIGN, WESTforOPERATORS, WESTforOPTIMIZATION, WESTforAUTOMATION, WESTforIUWS.

- WESTforDESIGN

Umožňuje vzájemné srovnání návrhů a hodnocení různých schémat ČOV v dynamických podmínkách. Po spuštění jednotlivých scénářů, např. pro vysoké nebo nízké zatížení, lze vyhodnotit vliv kontrolních strategií.

- WESTforOPERATORS

Umožňuje provádět krátkodobé (např. dešťová událost) a dlouhodobé (např. odstraňování nutrientů) hodnocení ČOV. Tento přístup umožňuje provozovatelům, aby využili výsledků modelování v prostředí pružného a přizpůsobitelného nástroje. Hodnocení se provádí pro kritická místa systému, simulují se jednotlivé scénáře pro konkrétní přítok a provozní podmínky. WEST lze také aplikovat na hodnocení nákladů vybraných scénářů. Nástroj lze využít i k popisu jednotlivých funkcí ČOV např. při školení obsluhy.

- WESTforOPTIMIZATION

Umožňuje konzultantům a technikům provádět optimalizaci procesů čištění odpadních vod. Flexibilita a skutečně otevřený model (uživatel může změnit jakýkoli model v knihovně), v kombinaci s přídatnými moduly pro snadnější kalibraci (citlivostní analýza, automatický odhad parametrů, analýza scénářů a analýza nejistot) vytváří z WESTforOPTIMIZATION široce využitelný nástroj.

- WESTforAUTOMATION

Umožňuje využít rozšířené nástroje, pomocí kterých lze rychle propojit postupy a výsledky simulací do vlastních aplikací, a to automaticky nebo pomocí programů. Různé SDK (Software Developer Kit) obsahují komplexní a rozsáhlou dokumentaci a jednotlivá nastavení, umožňují propojení WESTU se systémy SCADA nebo jiným simulačním softwarem (Matlab, CFD, Mike Urban, ...)

- WESTforIUWS

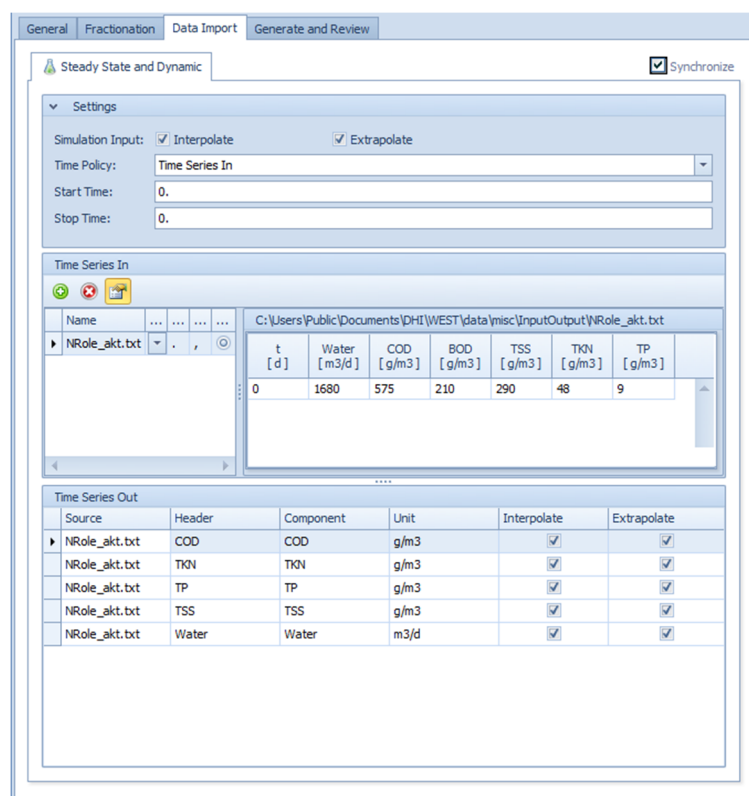
Umožňuje analýzu konkrétního scénáře kvality vody definovaným manažerským systémem (např. přesměrování průtoků, zavedení nádrží, změny v provozu apod.), automatickou optimalizaci provozních parametrů a provádění krátkodobého a dlouhodobého hodnocení.

WEST umožňuje uživateli modelovat a vyhodnocovat široké spektrum typů čistíren odpadních vod. Pomocí hlavních modulů v prostředí WEST může uživatel sestavit model, spustit jednotlivé simulace a paralelně si zobrazovat dynamické výsledky těchto simulací [23]

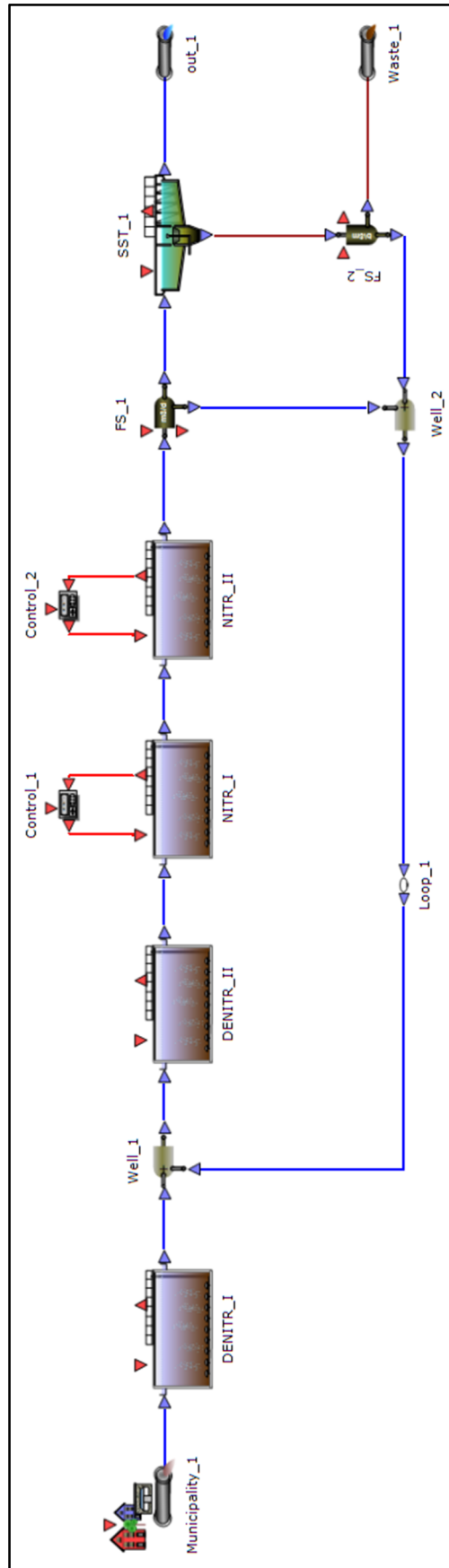
5.3.2 Modelování stávajícího stavu

Pro modelování v programu WEST je možné použít několik rovnicových modelů, které umí řešit odstranění různého znečištění. Pro znečištění v odpadní vodě na čistírně v Nové Roli jsou to ukazatele COD (chemical oxygen demand – chemická spotřeba kyslíku), TKN (total kjeldahl nitrogen – celkový dusík), TP (total phosphorus – celkový fosfor), TSS (total suspended solids – celkové nerozpuštěné látky). Na základě požadavků na odstraňování COD, TKN, TP, TSS jsem se rozhodl použít rovnicový model ASM3P_EAWAG, který umí oproti jiným modelům pracovat s požadavkem na odstranění TP.

Základním požadavkem programu je import dat, ze kterých může vycházet pro další výpočty. Data jsem zajistil od technologa odpadních ze společnosti Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s. za rok 2015. Z důvodu rekonstrukce čistírny jsem uvažoval pouze s daty za rok 2015. Data z roku 2016 byla značně ovlivněna omezeným provozem čistírny. Vzhledem k omezenému množství vstupních dat jsem se rozhodl pouze pro statický výpočet.



Obr. 14 Import dat v uživatelském rozhraní programu WEST



Obr. 15 Výpočtový model stávajícího stavu ČOV

Následuje frakcionace, která je po zadání rovnicového modelu v programu automatická. Jde o to, že program rozdělí parametr znečištění na další složky, jež sledovaný typ znečištění tvoří, např. celkový dusík je tvořen amoniakálním dusíkem, dusičnany a dusitany, organickým dusíkem a anorganickým dusíkem. Takto frakcionované složky znečištění vstupují do výpočtového modelu. Na výstupu z modelu probíhá opačný proces a to defrakcionace, kde rovnicový model automaticky sjednotí složky znečištění do základních ukazatelů COD, TKN, TP a TSS.

Výpočtový model je sestaven s maximální přesností ve srovnání se skutečným stavem. Zahrnuje modelování objektů, průtoků, objemů jednotlivých objektů a dalších návrhových parametrů. Konkrétně pro dosazovací nádrž je to hodnota plochy hladiny a hloubky nádrže a kalového indexu, nebo pro aerátory hodnoty udržované koncentrace kyslíku v aktivačních nádržích. Důležitou složkou modelu je pečlivé rozdělení průtoků pro primární kal, vratný kal a interní recirkulaci. Model je tvořen na základě technologického schématu čistírny, technické zprávy pro ČOV Nová Role a osobní návštěvy provozu.

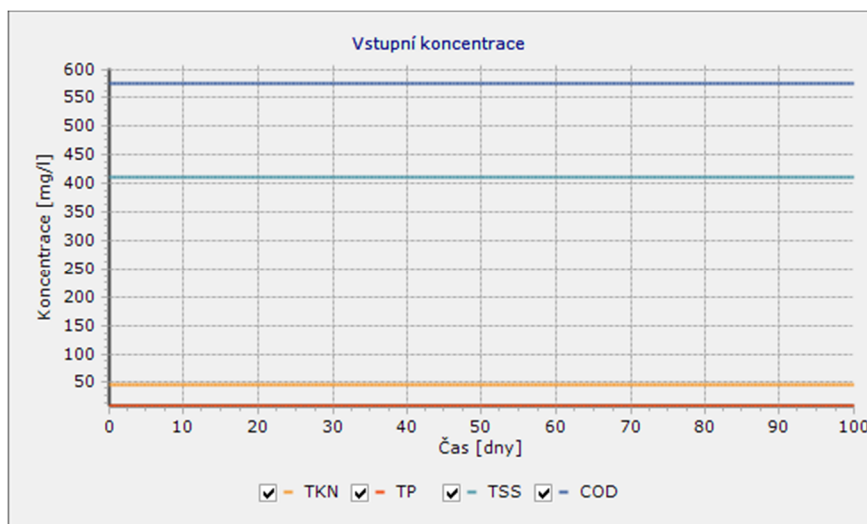
U takto sestaveného výpočtového modelu je nutné provést kalibraci tak, aby kvalita odtoku u modelu byla shodná s kvalitou odtoku na čistírně. Toto lze provést při frakcionaci a defrakcionaci ukazatelů znečištění. Program automaticky provede rozdělení na složky znečištění s tím, že každé složce přiřadí váhu. Tyto váhy jednotlivých složek lze měnit tak, aby bylo dosaženo určité přesnosti při porovnání kvality odtoku v modelu a skutečnosti. Kalibraci jsem provedl tak, aby rozdíl účinnosti mezi modelem a skutečností byl menší než 10 %.

V poslední řadě jsem porovnal výstupní hodnoty znečištění v modelu a skutečně naměřené hodnoty.

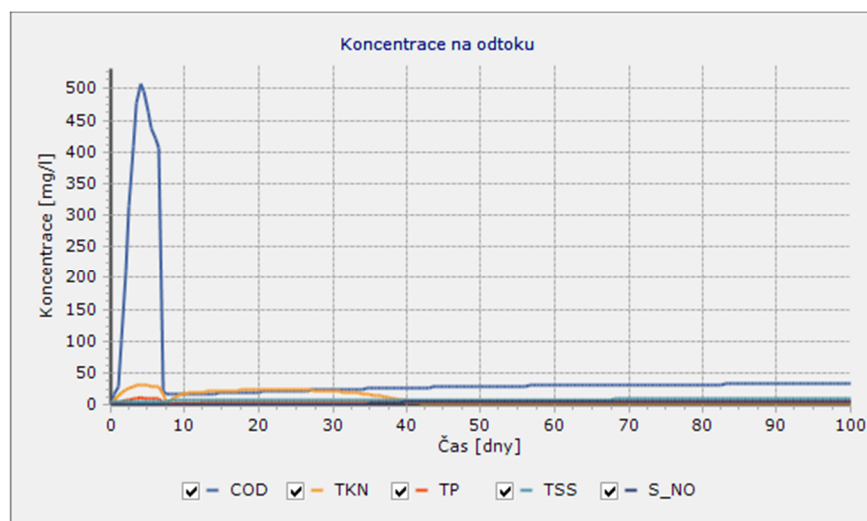
Tab. 23 Porovnání koncentrací pro skutečný stav a model

	Skutečný odtok [mg·l ⁻¹]	Odtok v modelu [mg·l ⁻¹]	Rozdíl [%]
COD	30.16	32.63	8.19
TN	5.98	6.39	6.86
TP	4.53	4.9	8.17
TSS	7.6	8.34	9.74

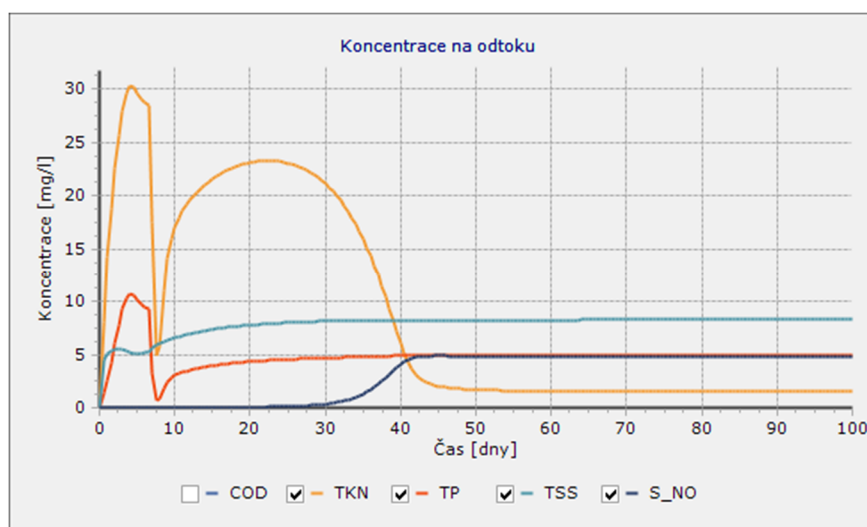
Z hodnot uvedených výše vyplývá, že model je dobře nakalibrován. Hodnoty koncentrací ve stávajícím stavu a v modelu se liší o méně než 10 %.



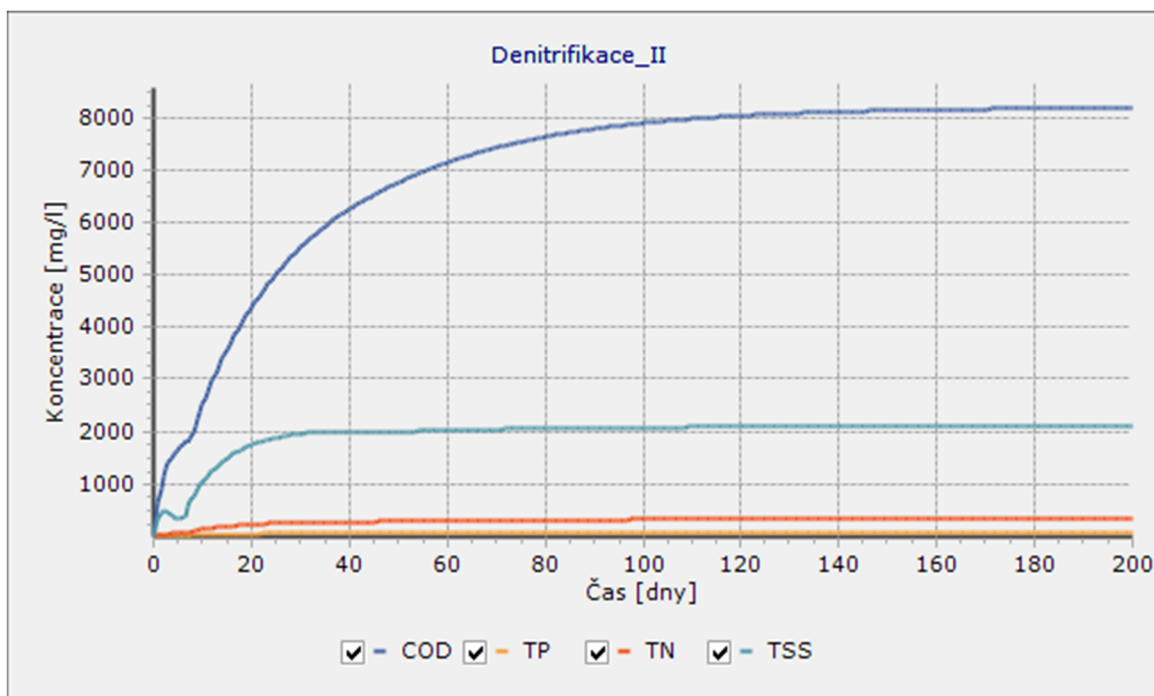
Obr. 16 Graf průběhu vstupní koncentrace znečištění



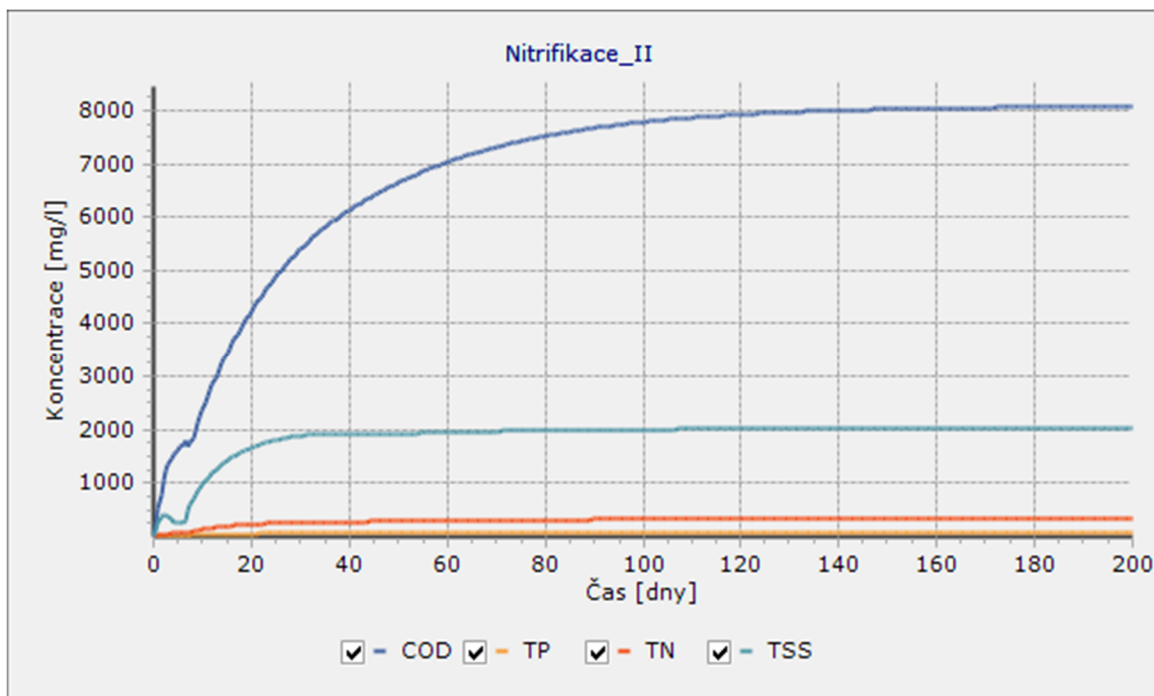
Obr. 17 Graf průběhu koncentrace znečištění na odtoku z ČOV



Obr. 18 Graf průběhu koncentrace znečištění na odtoku z ČOV (bez COD)



Obr. 19 Graf průběhu koncentrace znečištění v denitrifikaci II



Obr. 20 Graf průběhu koncentrace znečištění v nitrifikaci II

Tab. 24 Porovnání účinností skutečného stavu a modelu

	Koncentrace znečištění na přítoku [mg·l ⁻¹]	Koncentrace znečištění na odtoku [mg·l ⁻¹]	Účinnost [%]	Koncentrace znečištění na odtoku v modelu [mg·l ⁻¹]	Účinnost [%]	Rozdíl účinností [%]
COD	575	30.16	94.8	32.63	94.3	0.43
TN	48	5.98	88.5	6.39	86.7	1.81
TP	9	4.53	49.7	4.9	45.6	4.11
TSS	290	7.6	97.4	8.34	97.1	0.26

Při kalibraci modelu jsem se snažil přiblížit odchylce mezi skutečným stavem a modelem menší než 10 %. Tato hodnota nějak výrazně nepopisuje přesnost celého modelu. Poměrně dobrým ukazatelem je porovnání účinností v modelu a skutečného stavu v Tab. 24. Zde je vidět, že rozdíly účinností jsou nepatrné.

Důležitým ukazatelem funkčnosti modelu bylo porovnání vypouštěného znečištění s emisními standardy dle NV 23-2011 Sb.

Tab. 25 Emisní standardy

Kategorie ČOV (EO) ^{1) 7)}	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄ ⁺		N _{celk.} ^{2), 8), 9)}		P _{celk.} ⁹⁾	
	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾	průměr ⁵⁾	m ^{4), 6)}	průměr ⁵⁾	m ^{4), 6)}	průměr ⁵⁾	m ⁴⁾
< 500 ¹¹⁾	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500 - 2 000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2 001 – 10 000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3 ^{40 9)}	8 ^{40 9)}
10 001 – 100 000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100 000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

Přípustné hodnoty (p)³⁾, maximální hodnoty (m)⁴⁾, hodnoty průměru⁵⁾. Koncentrace ukazatelů jsou uvedeny v mg·l⁻¹.

5.3.3 Varianta I – Předsazená sedimentace

V první variantě zařadím do technologické linky čištění odpadních vod před biologickou část sedimentační nádrž. Nádrž bude horizontální obdélníková a jejím primárním úkolem bude snížit hodnoty TSS na odtoku z čistírny.

5.3.3.1 Návrh usazovací nádrže

Návrhové parametry UN:

- Počet jednotek n= 2
- Návrhová vstupní účinnost η= 0,4
- Hloubka kalového prostoru H₅= 0,7m
- Šířka usazovací nádrže B= 5 – 10m

- Účinnost pro odstranění NL $E_{UN,NL} = 88\%$
- Počet ekvivalentních obyvatel $EO = 5000$

Vstupní hodnoty:

- Průtoky od obyvatelstva a průmyslu
 - Koeficient denní nerovnoměrnosti $k_d = 1,375$
 - Koeficient hodinové nerovnoměrnosti $k_h = 2,000$

Tab. 26 Součinitele denní nerovnoměrnosti dle ČSN 73 6701 [21]

do 1.000 obyvatel	1,5
od 1.000 do 5.000 obyvatel	1,4
od 5.000 do 20.000 obyvatel	1,35
od 20.000 do 10.0000 obyvatel	1,25
nad 100.000 obyvatel	individuálně

Tab. 27 Součinitele maximální hodinové nerovnoměrnosti dle ČSN 73 6701 [21]

PO	30	40	50	75	100	300	400	500	1000	2 000	5 000	10 000.	20 000.	30 000	50 000	100 000
k_h	7,2	6,9	6,7	6,3	5,9	4,4	3,5	2,6	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,5

- Průměrný denní průtok $Q_{24,0} = 1\,080 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
- Maximální denní průtok $Q_{d,0} = 1\,485 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 $Q_{d,0} = Q_{24,0} \cdot k_d$
- Maximální hodinový průtok $Q_{h,0} = 123,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 $Q_{h,0} = Q_{d,0} \cdot k_h / 24$
- Balastní vody $Q_B = 108 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 $Q_{24} \cdot 10\%$
- Průtoky biologickou částí ČOV
 - Průměrný denní průtok $Q_{24} = 1\,188 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 $Q_{24} = Q_{24,0} + Q_B$
 - Maximální denní průtok $Q_d = 1\,593 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 $Q_d = Q_{d,0} + Q_B$
 - Maximální hodinový průtok $Q_h = 231,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 $Q_h = Q_{h,0} + Q_B$
- Maximální přítok na ČOV za deště $Q_{\max} = 347,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Výpočet:*Tab. 28 Určení teoretické doby zdržení a povrchového hydraulického zatížení pro UN*

	Teoretická doba zdržení Θ [hod]		Povrchové hydraulické zatížení u [m ³ ·m ⁻² ·hod ⁻¹]	
	Q_d	Q_{max}	Q_d	Q_{max}
Před biofiltry	2 - 4	1	0,7 - 14	2,5
Před aktivací	1 - 3	0,5	1 - 2,8	5

- Výpočet objemu a půdorysné plochy pro Q_d :

- Maximální denní průtok $Q_d = 1\,593 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
- $Q_d = 66,38 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Návrhový průtok (dvě jednotky) $Q_d/2 = 33,19 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Teoretická doba zdržení $\Theta = 1 \text{ hod}$
- Návrhová vstupní účinnost $\eta = 0,4$
- Objem UN při uvažovaném Q_d $V_{dp} = 82,97 \text{ m}^3$
- Povrchové hydraulické zatížení $u = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$
- Návrhový průtok $Q_d \cdot 0,5$ $Q_d = 33,19 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Půdorysná plocha UN $S_{dp} = 33,19 \text{ m}^2$

$$V_{dp} = \frac{\theta \cdot Q_d \cdot 0,5}{\eta}$$

$$S_{dp} = \frac{Q_d}{u}$$

- Výpočet objemu a půdorysné plochy pro Q_{max} :

- Maximální přítok za deště $Q_{max} = 347,63 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Návrhový průtok (dvě jednotky) $Q_{max}/2 = 173,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Teoretická doba zdržení $\Theta = 0,5 \text{ hod}$
- Návrhová vstupní účinnost $\eta = 0,4$
- Objem UN při uvažovaném Q_{max} $V_{max} = 217,27 \text{ m}^3$
- Povrchové hydraulické zatížení $u = 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$
- Návrhový průtok $Q_{max} \cdot 0,5$ $Q_{max} = 173,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Půdorysná plocha UN $S_{max} = 34,76 \text{ m}^2$

$$S_{max} = \frac{Q_{max}}{u}$$

- Návrh rozměrů nádrže:
 - Objem UN $V_{UN} = 217,27 \text{ m}^3$

$$V_{UN} = \text{MAX}\{V_{dp}; V_{max}\}$$
 - Půdorysná plocha UN $S_{UN} = 34,76 \text{ m}^2$

$$S_{UN} = \text{MAX}\{S_{dp}; S_{max}\}$$
 - Šířka usazovací nádrže $B = 5 - 10 \text{ m}$
 - Délka usazovací nádrže $l = 3:1 - 6:1$
 - Navržené rozměry
 - Skutečná šířka UN $B = 5 \text{ m}$
 - Skutečná délka UN (3:1) $l = 15 \text{ m}$
 - Skutečná plocha UN $S_{sk} = 75,0 \text{ m}^2$

$$S_{sk} = B \cdot l$$
 - Návrhová hloubka UN $H_2 = 2,89 \text{ m}$

$$H_2 = \frac{V_{UN}}{S_{sk}}$$
 - Skutečná hloubka UN $H_{2,sk} = 2,9 \text{ m}$

- Výpočet skutečné účinnosti horizontální usazovací nádrže:

Tab. 29 Skutečná účinnost na základě poměru výšky a délky nádrže

h/l		1/4	1/8	1/12	1/16	1/20	1/24
		0.250	0.125	0.083	0.063	0.050	0.042
HORIZONTÁLNÍ	η	0.4	0.42	0.45	0.5	0.58	0.65
RADIÁLNÍ	η	0.22	0.38	0.44	0.45	0.42	0.32

- Poměr hloubky ku délce $H_2/l = 1,93$
- Interpoláčnı hodnota skutečné účinnosti $\eta_{sk} = 0,409$
- Posouzení doby zdržení
 - Skutečná plocha UN $S_{sk} = 75,0 \text{ m}^2$
 - Skutečný objem UN $V_{sk} = 217,5 \text{ m}^3$

$$V_{sk} = S_{sk} \cdot H_{2,sk}$$
 - Skutečná účinnost $u_{sk} = 0,409$
 - Doba zdržení pro $Q_d > 1 \text{ hod}$ $\Theta = 2,68 \text{ hod} - \text{VYHOVUJE}$

$$\Theta = \frac{V_{sk} \cdot \eta_{sk}}{Q_d \cdot 0,5}$$
 - Doba zdržení pro $Q_{max} > 0,5 \text{ hod}$ $\Theta = 0,512 \text{ hod} - \text{VYHOVUJE}$

$$\Theta = \frac{V_{sk} \cdot \eta_{sk}}{Q_{max} \cdot 0,5}$$

- Posouzení povrchového zatížení
 - Povrch. zatížení pro $Q_d < 1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$ $u = 0,443 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$

$$u = \frac{Q_d \cdot 0,5}{S_{sk}} \quad \text{- VYHOVUJE}$$
 - Povrch. zatížení pro $Q_{max} < 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$ $u = 2,318 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$

$$u = \frac{Q_{max} \cdot 0,5}{S_{sk}} \quad \text{- VYHOVUJE}$$
- Produkce kalu
 - Je uvažováno s $0,8 - 1,5 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{os}^{-1}$ sušiny. Pro čerpání kalu je v odpadní vodě udržován poměr 3 % sušiny.
 - V přepočtu se jedná o $4 - 7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$ sušiny pro 5 000 EO
 - Průtok směsi kalu a odpadní vody z usazovací nádrže je tedy $190 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$.

5.3.3.2 Konstrukční parametry usazovací nádrže

Usazovací nádrž je řešena jako horizontální předsazená nádrž před biologický stupeň. Konstrukční rozměry nádrže jsou:

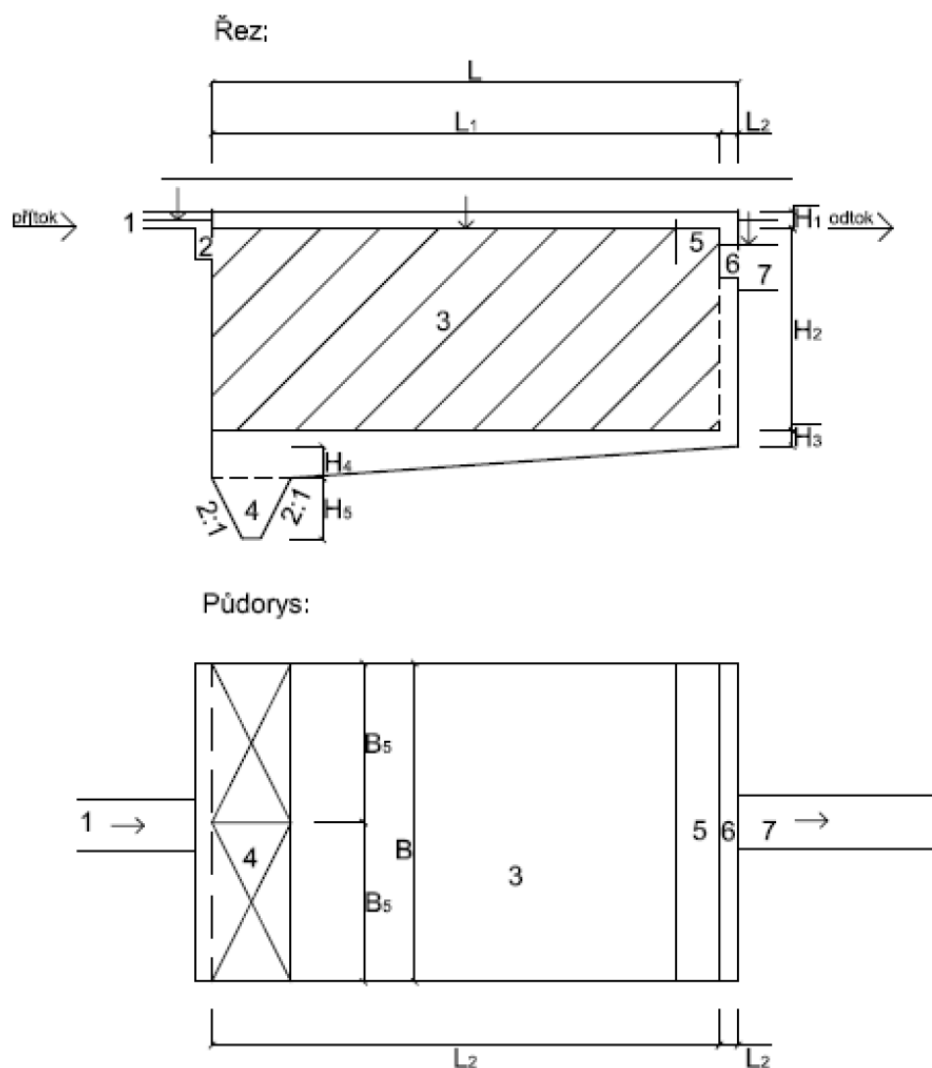
- $l_c = l_1 + l_2$
- $H_c = H_1 + H_2 + H_3 + H_4$

- l_1 – Délka usazovací části
- l_2 – Šířka odtokového žlabu (0,5m)

- H_1 – Bezpečnostní výška (0,5m)
- H_2 – Výška usazovací části
- H_3 – Výška pro stírací mechanismus
- H_4 – Výška daná sklonem dna nádrže
- Celková délka UN $l_c = 15,5 \text{ m}$
- Výška daná sklonem dna nádrže $H_4 = 0,24 \text{ m}$

$$H_4 = \frac{l}{100/2}$$
- Celková výška UN $H_c = 3,94 \text{ m}$

Skutečný objem usazovací nádrže je $V_{sk} = 217,5 \text{ m}^3$. Doba zdržení v této nádrži je $\Theta = 2,68 \text{ hod}$ s hydraulickým povrchovým zatížením $\eta = 2,318 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$.



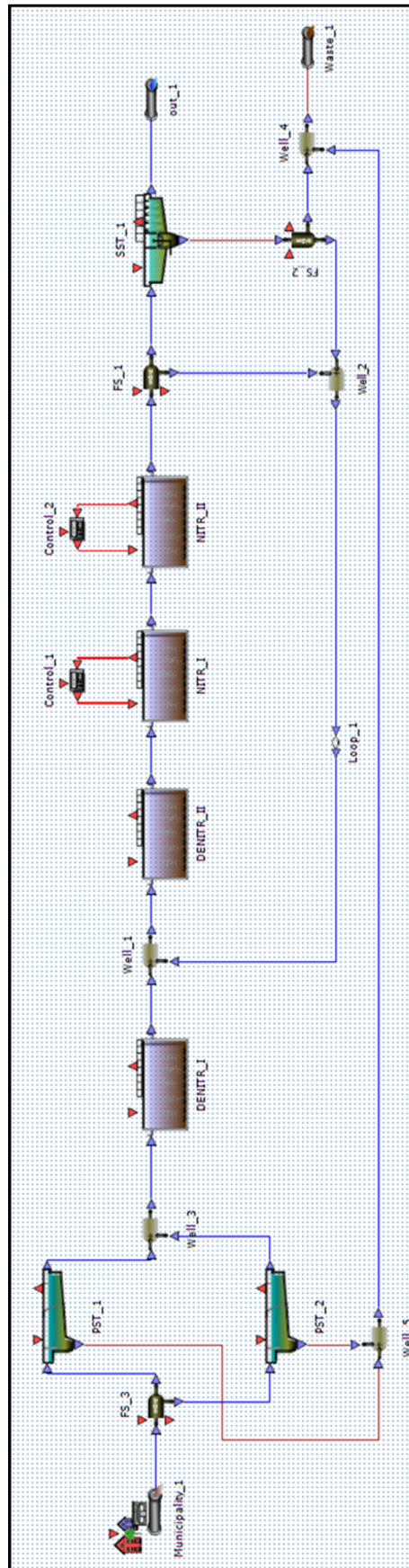
Obr. 21 Schéma horizontální usazovací nádrže

5.3.3.3 Modelování v programu WEST

Základním parametrem pro modelování usazovací nádrže v programu je produkce kalu. Ta byla výpočtem stanovena na hodnotu $190 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$. Po zařazení usazovacích nádrží do technologické linky na ČOV se parametry změnila následovně:

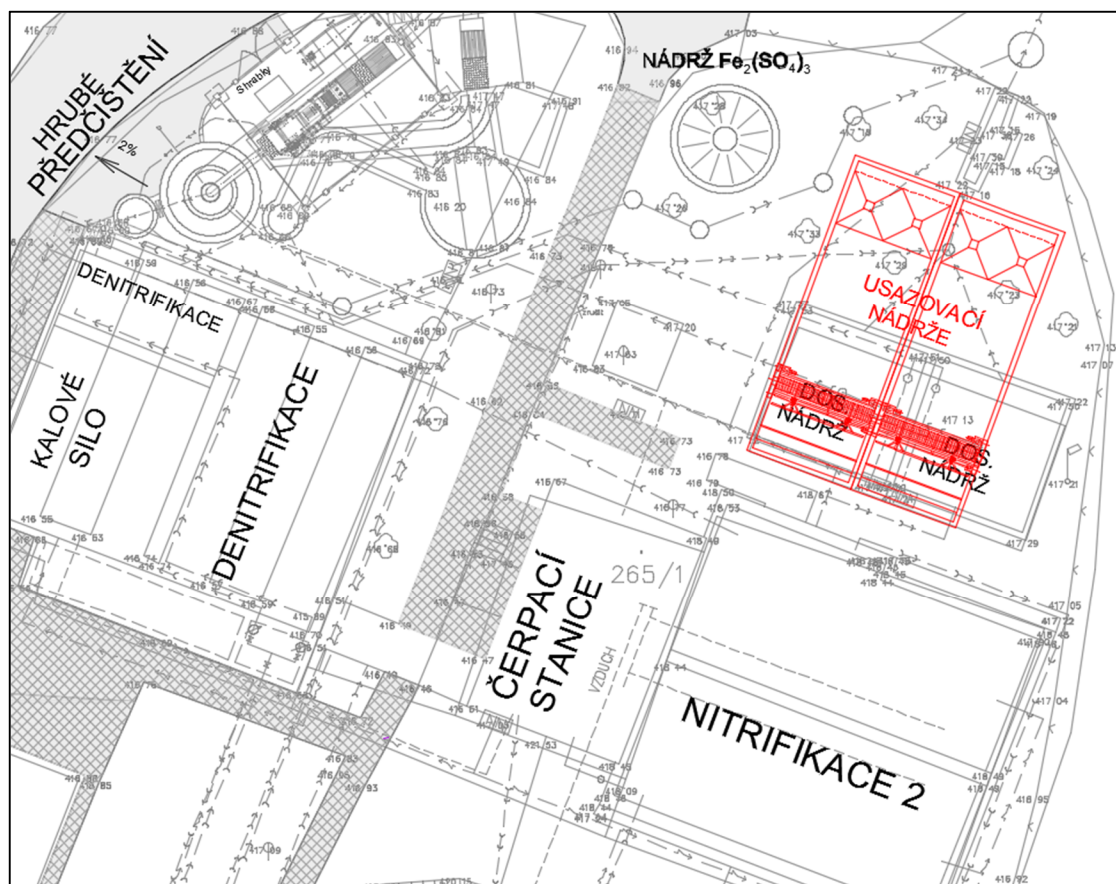
Tab. 30 Porovnání výstupních koncentrací bez usazovacích nádrží a s nimi

	Odtok bez UN [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]	Odtok s UN [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]
COD	32.63	18.18
TN	6.39	5.24
TP	4.90	4.44
TSS	8.34	5.80



Obr. 22 Umístění předřazené usazovací nádrže v modelu

Pro snížení nákladů při budování usazovacích nádrží bude možné využít stávající dosazovací nádrže, které v současné době nejsou nijak využívány. Do budoucna je uvažováno, že by sloužily jako dešťová zdrž, nicméně v současnosti nejsou využity.



Obr. 23 Situační výkres studie s přidánými usazovacími nádržemi

5.3.4 Varianta II – Terciální stupeň čištění – membránový reaktor

Ve variantě č. II uvažuji s doplněním technologické linky o třetí stupeň čištění. V tomto stupni čištění bude použit membránový bioreaktor.

5.3.4.1 Návrh membránového bioreaktoru

Vstupní hodnoty:

- Maximální denní průtok $Q_d = 1\,485 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$
 $Q_d = 61\,875 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$
- Průtok membránou (flux) $fl = 12,0 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Výpočet:

- Potřebný povrch membrán $A_{MBR} = 5\,156,3 \text{ m}^2$

$$A_{MBR} = Q_d / fl$$

Pro tuto potřebnou plochu je možné navrhnout membrány od nejrůznějších výrobců. Pro řešený případ jsem vybral výrobce Martin systém, a to z důvody nízkých pořizovacích nákladů a velké plochy membrány na jednom MBR. Do linky jsem navrhnul 5x reaktor LFM 20124 a 1x FM6164.

Tab. 31 Navržené membránové bioreaktory Martin Membrane Systems

LFM 20124 – 960 m ²		FM 6164 – 400 m ²	
Počet kusů	5	Počet kusů	1
Plocha membrán	4 800 m ²	Plocha membrán	400 m ²
Šířka	3 740 m	Šířka	2 688 m
Výška	3 972 m	Výška	2 775 m
Tloušťka	730 m	Tloušťka	642 m

Celková plocha membrány je tedy 5 200 m². Membránové reaktory jsou umístěny v nádrži, jež musí být nově zbudována. Rozměry této nádrže jsou:

- šířka – 4,0 m,
- délka – 5,0 m
- výška – 4,5 m.
- Množství vzduchu pro membránu
 - Koeficient přestupu kyslíku k membránám $k_{fm} = 0,7 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$
 - Celková plocha membrán $P_{celk} = 5\,200 \text{ m}^2$
 - Množství vzduchu pro membránu $Q_{VZ,M} = 3\,640 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

$$Q_{VZ,M} = P_{celk} \cdot k_{fm}$$

5.3.4.1 Konstrukční parametry MBR

Navrženy jsou deskové membránové moduly. Membrána v reaktoru je z polyethersulfonu (PES) a nosná část je z nerezové oceli. Dle velikosti pórů 0,1 μm se jedná o ultrafiltraci. Membránový reaktor je tvořen 6 membránovými filtry. Jedná se o 5 modelů LFM 20124 s filtrační plochou 960 m² a jeden model FM 6164 s filtrační plochou 400 m². Na základě rozměrů jednotlivých membránových filtrů jsem stanovil rozměry reaktoru takto:

- šířka – 4,0 m,
- délka – 5,0 m,
- výška – 4,5 m.

5.3.4.2 Modelování v programu WEST

Základním parametrem pro modelování membránového bioreaktoru v programu je plocha membrány. Tak byla výpočtem stanovena na hodnotu 5 200 m². Po zařazení MBR do technologické linky na ČOV se parametry změnilly následovně:

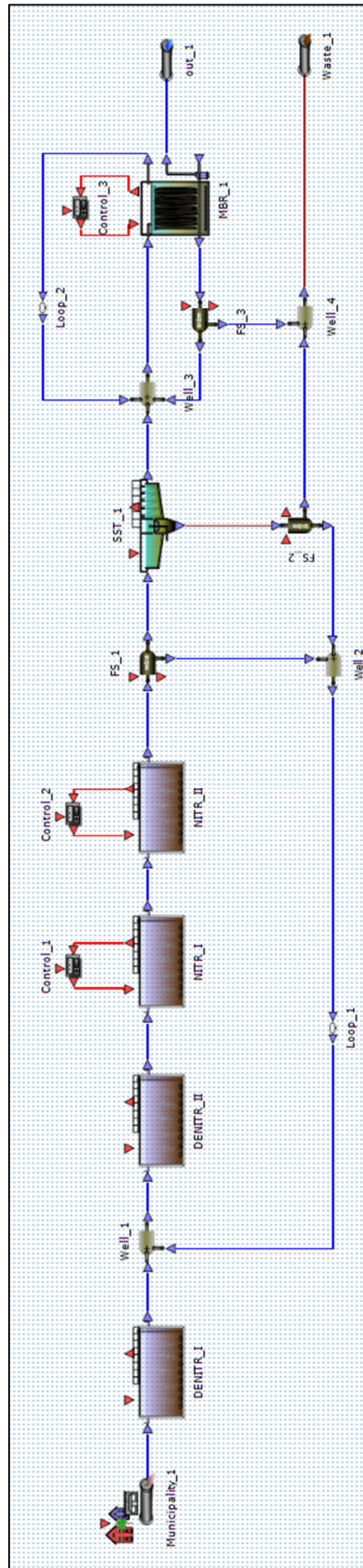
Tab. 32 Porovnání výstupních koncentrací bez MBR a s ním

	Odtok bez MBR [mg·l ⁻¹]	Odtok s MBR [mg·l ⁻¹]
COD	32.63	11.35
TN	6.39	0.24
TP	4.90	4.21
TSS	8.34	0.36



Obr. 24 Situační výkres studie s přidáním membránového bioreaktorem

MBR je možné umístit do volného nezastavěného prostoru vedle stávající dosazovací nádrže. Tento prostor je patrný viz Foto 6 Dosazovací nádrž.



Obr. 25 Zařazení MBR jako terciální stupeň čištění v modelu

5.4 Posouzení a vyhodnocení variant

Po zařazení usazovacích nádrží i membránového bioreaktoru došlo k znatelnému snížení hodnot znečištění na odtoku v modelu. Porovnání účinnosti čistícího procesu se zařazením nových objektů je následovné:

- Hodnoty na odtoku dle modelu s UN
 - COD 18,18 mg·l⁻¹
 - TN 5,24 mg·l⁻¹
 - TP 4,44 mg·l⁻¹
 - TSS 5,80 mg·l⁻¹
- Hodnoty na odtoku dle modelu s MBR
 - COD 11,35 mg·l⁻¹
 - TN 0,24 mg·l⁻¹
 - TP 4,22 mg·l⁻¹
 - TSS 0,36 mg·l⁻¹

Z těchto hodnot vyplývá, že z hlediska účinnosti odstranění znečištění z odpadní vody je účinnější membránový bioreaktor. Toto řešení však nemusí být nutně výhodnější, a to vzhledem k tomu, že při výpočtu nebyly uvažovány investiční a provozní náklady pro usazovací nádrže a MBR. Výpočet byl ze zadání situován na zlepšení sledovaných parametrů na odtoku.

Důvěryhodnost výsledku jsem ověřoval porovnáním výsledků s teoretickou účinností MBR. Dosažitelné výstupní hodnoty pro membránový bioreaktor jsou následující:

- COD < 20 mg·l⁻¹
- TKN < 1 mg·l⁻¹
- TSS < 1 mg·l⁻¹ [27]

U všech parametrů bylo simulováním čistírenského procesu na ČOV dosaženo hodnot, které splňují teoretickou účinnost MBR.

Tab. 33 Porovnání výstupních koncentrací

	Skutečný odtok [mg·l ⁻¹]	Odtok s UN [mg·l ⁻¹]	Odtok s MBR [mg·l ⁻¹]
COD	30.16	18.18	11.35
TN	5.98	5.24	0.24
TP	4.53	4.44	4.22
TSS	7.60	5.80	0.36

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo zpracovat v rešeršní části přehled o možnostech optimalizace provozu na čistírnách odpadních vod a v druhé části práce pak provést optimalizaci provozu na stávající ČOV s využitím softwarového nástroje WEST. Při popisu možností optimalizace jsem se věnoval především výpisu možností optimalizace objektů na ČOV. V druhé části práce jsem zpracoval tři modely čistírenského procesu. První model znázorňuje stávající stav čistírny odpadních vod a další dva modely pak nově zařazené objekty pro zvýšení výkonu ČOV.

Při návrhu optimalizace na stávající čistírně jsem se rozhodl pro čistírnu v Nové Roli v Karlovarském kraji. Především pro dobrou dostupnost vzhledem k mému bydlišti. ČOV Nová Role je čistírna nejen pro samotné město, ale i pro přilehlé obce. Celková spádová oblast tvoří 5000 EO. Odpadní vody jsou zde vypouštěny do vodního toku Rolava.

Praktická část práce byla zaměřena na optimalizaci provozu se zaměřením na zlepšení sledovaných hodnot na odtoku. Pro modelování v programu WEST mi byla poskytnuta data o průtocích a koncentracích znečištění na čistírně od pracovníků společnosti Vodárny a kanalizace Karlovy Vary při exkurzi do zdejšího provozu. V rámci diplomové práce jsem navštívil čistírnu v Nové Roli a měl jsem možnost vše si projít a seznámit se se zdejším provozem.

V závěru práce jsem modeloval stávající stav na ČOV Nová Role v programu WEST. Po vytvoření výpočtového schématu a nastavení parametrů pro správnou reprezentaci stávajícího stavu jsem provedl kalibraci. Kalibrací se mi podařilo přiblížit se k hodnotám koncentrací na ČOV s menší odchylkou než 10 %. Pro takto kalibrovaný model jsem potom ve dvou variantách doplnil další objekty do technologické linky. V první variantě to byla předsazená usazovací nádrž a ve druhé variantě jsem technologickou linku doplnil o terciální stupeň čištění. V tomto případě jsem zvolil membránový bioreaktor.

Výsledky modelování byly jednoznačné. V obou případech došlo ke zlepšení sledovaných hodnot na odtoku z čistírny odpadních vod. Při vyhodnocení variant jsem zohledňoval pouze jedno kritérium a to účinnost. Při porovnání účinnosti usazovacích nádrží a membránového bioreaktoru je lepším řešením doplnit čistírnu odpadních vod o membránový bioreaktor.

Příloha č.1 - Fotodokumentace



Foto 1 Objekt mechanického předčištění



Foto 2 Mechanicky stírané česle



Foto 3 Nádrže denitrifikace I a II



Foto 4 Nitrifikace I



Foto 5 Nitrifikace II



Foto 6 Dosazovací nádrž



Foto 7 Zaústění vratného kalu do denitrifikace I



Foto 8 Zaústění interní recirkulace do denitrifikace II



Foto 9 Čerpadla v čerpací stanici



Foto 10 Dmyhadla v dmychárně



Foto 11 Odtokový objekt



Foto 12 Odtok z odlehčovací komory

Použitá literatura

- [1] Tuhovčák L.: Terminologie, 1. přednáška z předmětu CP03 – Operační a systémová analýza, Brno 2016
- [2] Hlavínek P.: Metodika návrhu intenzifikací čistíren odpadních vod, habilitační práce, leden 1996
- [3] Randal C, W, Barnard J. L., Stensel H.: Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal.
- [4] U.S. Environmental Protection Agency 1989. Handbook – Retrofitting POTWs. U.S.EPA, EPA/625/6-89/020.
- [5] International institute for hydraulics and environmental engineering – cyklus přednášek – Modul I, Delft, 1991
- [6] Hlavínek P., Novotný D.: Intenzifikace čistíren odpadních vod, Brno 1996
- [7] Daiger, Glen T.: Upgrading Wastewater Treatment Plants, Lancaster, Pa: Technomic Pub. 1992
- [8] Design and Operation of Large Wastewater Treatment Plants, Vienna, Austria 19-23, Pergamon Press, 1984 Development in Design and Operation of Large Wastewater Treatment Plants: IAWPRC workshop Budapest, Hungary, 14-18 September 1987, Pergamon Press 1988
- [9] Tempus konference – čištění odpadních vod – sborník přednášek, KZI FS ČVUT, IHE Delft, Praha, 7.-11.9.1992
- [10] Dolejš J.: Metoda multikriteriální optimalizace, disertační práce, červen 2011, dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10761/Disertacni%20prace%20-%20Dolejs%20-%20Finalni%20verze%20.pdf?sequence=1>
- [11] Ondráček M.: Aerace na čistírnách odpadních vod, bakalářská práce, VUT v Brně, FAST, květen 2015
- [12] Water Pollution Control Federation. 1988. Aeration Manual of Practice FD-13. Alexandria, Virginia: WPCF.
- [13] VSB Technická univerzita Ostrava. Multimediální učební text zaměřený na problematiku úpravu a čištění odpadních vod. Biologické čištění odpadních vod, dostupné z: http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Radka_2010/bio.html

- [14] Harrison, J.R., G.T. Daigger and J.W. Filbert, : A Survey of Combined Trickling Filter and Activated Sludge Processes, Jour. Water Pollution Control Fed. 56:1073-1079
- [15] Chudoba J., Dohányos M., Wanner J. : Biologické čištění odpadních vod, SNTL 1991, Praha
- [16] Keinath, T.M. and V.D. Laquidara, 1982: Clarification Failure Control Strategies, J. Environ. Eng. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 108:1121-1127
- [17] SOVAK, Seminář – Energetická náročnost ČOV, přednáška – Raclavský J., Dopady stavu stokové sítě na energetickou náročnost ČOV, Brno 2010
- [18] International institute for hydraulics and environmental engineering - cyklus přednášek - Modul II, Delft, 1991
- [19] Kanalizační řád – Nová Role, Mezirolí, Božičany. Vodakva, Vodárny a kanalizace Karlovy Vary, a.s., Karlovy Vary 2015, dostupné z www.vodakva.cz
- [20] Darivčák T., VP PROJEKTING, s.r.o. Dokumentace technických a technologických zařízení ČOV Nová Role, výkres C.4 Celková situace, Karlovy Vary 2014
- [21] ČSN 73 6701 - Stokové sítě a kanalizační přípojky
- [22] Mapové podklady, dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>
- [23] Modelování v oblasti vodního hospodářství, WEST – Software pro modelování procesů na ČOV, Praha říjen 2011, dostupné z: <https://worldwide.dhigroup.com/-/media/shared%20content/presences/emea/czech>
- [24] Tuhovčák L.: Grafické řešení úloh lineárního programování, 2. přednáška z předmětu CP03 – Operační a systémová analýza, Brno 2016
- [25] Tuhovčák L.: Simplexova metoda, 2. přednáška z předmětu CP03 – Operační a systémová analýza, Brno 2016
- [26] Tuhovčák L.: Duální úloha, 4. přednáška z předmětu CP03 – Operační a systémová analýza, Brno 2016
- [27] Vilím D., Vojtěchovský R.: Membránové ČOV, přednáška společnosti envi-pur, dostupné z: <http://www.mpo.cz/assets/dokumenty/50487/57288/612437/priloha001.pdf>

Seznam tabulek

Tab. 1 Faktory vedoucí k optimalizaci	- 15 -
Tab. 2 Přepokládané hodnoty na odtoku pro jednotlivé technologie čištění [mg/l] [5].-	19 -
Tab. 3 Sumarizace limitujících procesů [4]	- 25 -
Tab. 4 Přístup a nástroje intenzifikace ČOV [7]	- 27 -
Tab. 5 Typické účinnosti přestupu kyslíku pro různé systémy [12].....	- 32 -
Tab. 6 Systémy s biomasou ve vznosu [6]	- 34 -
Tab. 7 Systém s přisedlou biomasou – část 1 [6]	- 39 -
Tab. 8 Systém s přisedlou biomasou – část 2 [6]	- 40 -
Tab. 9 Zlepšení technologie usazování [6].....	- 44 -
Tab. 10 Aplikace chemické kagulace [18].....	- 45 -
Tab. 11 Koncentrace na odtoku dosažitelné při odstraňování těžkých kovů [6]	- 46 -
Tab. 12 Technologie chemické úpravy [6].....	- 47 -
Tab. 13 Třetí stupeň čištění [6].....	- 50 -
Tab. 14 Hodnoty průtoků na ČOV Nová Role	- 53 -
Tab. 15 Hodnoty znečištění na přítoku na ČOV Nová Role	- 54 -
Tab. 16 Hodnoty znečištění na přítoku a odtoku z ČOV Nová Role	- 54 -
Tab. 17 Kvalita vypouštěných odpadních vod z ČOV Nová Role	- 55 -
Tab. 18 Hodnoty znečištění ve vodním toku Rolava [19].....	- 55 -
Tab. 19 Spotřeba elektrické energie na ČOV [17]	- 56 -
Tab. 20 Energetická náročnost ČOV Nová Role 1. část	- 56 -
Tab. 21 Energetická náročnost ČOV Nová Role 2.část	- 57 -
Tab. 22 Porovnání teoretické a skutečné energetické náročnosti ČOV Nová Role	- 57 -
Tab. 23 Porovnání koncentrací pro skutečný stav a model	- 62 -
Tab. 24 Porovnání účinností skutečného stavu a modelu.....	- 65 -
Tab. 25 Emisní standardy.....	- 65 -
Tab. 26 Součinitele denní nerovnoměrnosti dle ČSN 73 6701 [21]	- 66 -
Tab. 27 Součinitele maximální hodinové nerovnoměrnosti dle ČSN 73 6701 [21].....	- 66 -
Tab. 28 Určení teoretické doby zdržení a povrchového hydraulického zatížení pro UN -	67 -
Tab. 29 Skutečná účinnost na základě poměru výšky a délky nádrže.....	- 68 -
Tab. 30 Porovnání výstupních koncentrací bez usazovacích nádrží a s nimi	- 70 -
	- 86 -

Tab. 31 Navržené membránové bioreaktory Martin Membrane Systems	- 73 -
Tab. 32 Porovnání výstupních koncentrací bez MBR a s ním.....	- 74 -
Tab. 33 Porovnání výstupních koncentrací	- 76 -

Seznam obrázků

Obr. 1 Kapacita zařízení	- 16 -
Obr. 2 Scénáře růstu ČOV	- 18 -
Obr. 3 Kategorizace typů ČOV	- 23 -
Obr. 4 Metody pro dosažení požadované kvality odtoku	- 24 -
Obr. 5 Skrápěný biofiltr Segnerovým kolem [13]	- 35 -
Obr. 6 Schéma skrápěný filtr + aktivace [14].....	- 37 -
Obr. 7 Aktivační nádrž s vestavěným nosičem biomasy [15]	- 37 -
Obr. 8 Diskový rotační bioreaktor [13].....	- 38 -
Obr. 9 Příklady usměrňovačů proudění pro kruhovou dosazovací nádrž [6].....	- 42 -
Obr. 10 Příklady klasických pískových filtrů [6]	- 48 -
Obr. 11 Příklady dvou a vícevrstevných filtrů [6]	- 49 -
Obr. 12 Spádová oblast (Jimlíkov, Božičany, Nová Role) pro ČOV Nová Role [22]	- 51 -
Obr. 13 Situace ČOV Nová Role [20].....	- 53 -
Obr. 14 Import dat v uživatelském rozhraní programu WEST	- 60 -
Obr. 15 Výpočtový model stávajícího stavu ČOV	- 61 -
Obr. 16 Graf průběhu vstupní koncentrace znečištění	- 63 -
Obr. 17 Graf průběhu koncentrace znečištění na odtoku z ČOV	- 63 -
Obr. 18 Graf průběhu koncentrace znečištění na odtoku z ČOV (bez COD)	- 63 -
Obr. 19 Graf průběhu koncentrace znečištění v denitrifikaci II	- 64 -
Obr. 20 Graf průběhu koncentrace znečištění v nitrifikaci II	- 64 -
Obr. 21 Schéma horizontální usazovací nádrže	- 70 -
Obr. 22 Umístění předřazené usazovací nádrže v modelu.....	- 71 -
Obr. 23 Situační výkres studie s přidanými usazovacími nádržemi.....	- 72 -
Obr. 24 Situační výkres studie s přidaným membránovým bioreaktorem	- 74 -
Obr. 25 Zařazení MBR jako terciální stupeň čištění v modelu	- 75 -

Seznam fotografií

Foto 1 Objekt mechanického předčištění.....	- 78 -
Foto 2 Mechanicky stírané česle	- 78 -
Foto 3 Nádrže denitrifikace I a II	- 79 -
Foto 4 Nitrifikace I	- 79 -
Foto 5 Nitrifikace II	- 80 -
Foto 6 Dosazovací nádrž.....	- 80 -
Foto 7 Zaústění vratného kalu do denitrifikace I.....	- 81 -
Foto 8 Zaústění interní recirkulace do denitrifikace II	- 81 -
Foto 9 Čerpadla v čerpací stanici.....	- 82 -
Foto 10 Dmychadla v dmychárně.....	- 82 -
Foto 11 Odtokový objekt.....	- 83 -
Foto 12 Odtok z odlehčovací komory.....	- 83 -

Seznam použitých zkratk a symbolů

A_{MBR}	-	Potřebný povrch membrán
B	-	Šířka usazovací nádrže
BSK_5	-	Biochemická spotřeba kyslíku
COD	-	Chemical oxygen demand
ČOV	-	Čistírna odpadních vod
DN1	-	Denitrifikace I
DN2	-	Denitrifikace II
EO	-	Ekvivalentní obyvatel
$E_{\text{UN,NL}}$	-	Účinnost pro odstranění NL
f_l	-	Průtok vzduchu membránou
H_1	-	Bezpečnostní výška usazovací nádrže
H_2	-	Návrhová hloubka usazovací nádrže
H_2	-	Výška usazovací části v UN
$H_{2,\text{sk}}$	-	Skutečná hloubka usazovací nádrže
H_3	-	Výška pro stírací mechanismus
H_4	-	Výška daná sklonem dna nádrže
H_5	-	Hloubka kalového prostoru
H_c	-	Celková výška usazovací nádrže
CHSK	-	Chemická spotřeba kyslíku
k_d	-	Koeficient denní nerovnoměrnosti
k_{fm}	-	Koeficient přestupu kyslíku k membránám
k_h	-	Koeficient hodinové nerovnoměrnosti
l	-	Délka usazovací nádrže
l_1	-	Délka usazovací nádrže
l_2	-	Šířka odtokového žlabu usazovací nádrže
l_c	-	Celková délka usazovací nádrže
MBR	-	Membránový bioreaktor
N1	-	Nitrifikace I
N2	-	Nitrifikace II
NL	-	Nerozpuštěné látky
N-NH_4	-	Amoniakální dusík
P	-	Fosfor
P_{celk}	-	Celková plocha membrán
Q_{24}	-	Průměrný denní průtok
Q_{24}	-	Průměrný denní průtok
$Q_{24,0}$	-	Průměrný denní průtok, obyvatelstvo

Q_{355}	-	Minimální průtok v korytě
Q_B	-	Balastní vody
Q_d	-	Maximální denní průtok
Q_d	-	Maximální denní průtok
$Q_{d,O}$	-	Maximální denní průtok, obyvatelstvo
Q_h	-	Maximální hodinový průtok
$Q_{h,O}$	-	Maximální hodinový průtok, obyvatelstvo
Q_{max}	-	Maximální průtok na ČOV za deště
$Q_{m\acute{e}s}$	-	Průměrný měsíční průtok
Q_{rok}	-	Průměrný roční průtok
$Q_{VZ,M}$	-	Množství vzduchu pro membránu
S_{dp}	-	Půdorysná plocha usazovací nádrže
S_{max}	-	Půdorysná plocha nádrže pro Q_{max}
S_{sk}	-	Skutečná plocha usazovací nádrže
S_{UN}	-	Plocha usazovací nádrže
TKN	-	Total Kjeldahl nitrogen
TP	-	Total phosphorus
TSS	-	Total suspended solids
u	-	Povrchové hydraulické zatížení
UN	-	Usazovací nádrž
V_{dp}	-	Objem usazovací nádrže
V_{max}	-	Objem usazovací nádrže pro Q_{max}
V_{sk}	-	Skutečný objem usazovací nádrže
V_{UN}	-	Objem usazovací nádrže
η	-	Návrhová vstupní účinnost
η_{sk}	-	Skutečná účinnost usazovací nádrže
Θ	-	Teoretická doba zdržení

Summary

The main focus of the first part of the diploma thesis is a research on possible options of optimization of an operation of sewage treatment plants. The second part aims to optimize an operation on the concrete sewage water treatment plant using the programme WEST. Firstly, I focused on description of possibilities of optimization of objects in sewage water treatment plants. The other part consists of designing three water treating processes. First model describes current state of the sewage water treatment plant and the other two models reflect new installations for improving performance of the sewage water treatment plant.

For the optimization I have chosen the sewage water treatment plant in Nová Role in Karlovy Vary region due to the short distance from my hometown. The SWTP Nová Role is treating water for the town and adjacent villages. The total gradient area consists of 5000 inhabitants. Wastewater is discharged into the Rolava stream there.

In the closing part of the thesis, I have modelled current state of the SWTP Nová Role using the WEST programme. After designing computational scheme and setting right parameters for representation of the current state, I proceeded to the calibration, which allowed me to get figures of concentration on the SWTP with deviation less than 10%. After creating this model, I have added two variations of objects into the technological line. The first variation was the separate storage and the second was complemented with the tertiary level of treating wastewater for which I have chosen membrane bioreactor.

The results of modelling are unequivocal. In both cases, the figures of drainage improved. The only criterion taken into consideration was effectiveness. When comparing effectiveness of a separate storage with a membrane bioreactor, the bioreactor is better solution.