

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidatka:

Sabina Kolbl

Prezračevalni sistemi na KČN in njihova primerjava na CČN Ljutomer in Murska Sobota

Diplomska naloga št.: 122

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Panjan

Somentor:

dr. Darko Drev

Ljubljana, 23. 6. 2009

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **SABINA KOLBL** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»PREZRAČEVALNI SISTEMI NA KČN IN NJIHOVA PRIMERJAVA NA CČN LJUTOMER IN MURSKA SOBOTA«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 23.06.2009

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 628.32(043.2)

Avtor: Sabina Kolbl

Mentor: izr. prof. dr. Jože Panjan

Somentor: doc. dr. Darko Drev

Naslov: Prezračevalni sistemi na KČN in njihova primerjava na CČN
Ljutomer in Murska Sobota

Obseg in oprema: 126 str., 34 tabel, 47 slik, 17 grafov, 78 enačb

Ključne besede: prezračevalni sistemi, vpihovanje zraka, mejna plast, prenos kisika,
biološko aerobno čiščenje

Izvleček:

V diplomskem delu obravnavam sisteme prezračevanja na KČN ter primerjam prezračevanje na ČN Ljutomer in Murska Sobota. V prvih štirih poglavjih so podane teoretične osnove prezračevanja in prezračevalnih sistemov na ČN. V uvodnem delu je na kratko predstavljeno biološko čiščenje odpadnih voda in osnovni procesi, ki pri tem potekajo. Opisane so osnovne enačbe po ATV-DVWK-A 131E za hitrost porabe kisika in količino kisika, ki ga potrebujemo za razgradnjo ogljikovega materiala. Na prenos kisika vplivajo različni faktorji kot so: nasičenost kisika, temperatura, lastnosti odpadne vode, globina potopitve difuzorjev ter barometrični tlak. Pri prenosu nas zanima predvsem prenos med plinsko in tekočo fazo. Opisana je teorija mejne plasti s pripadajočimi enačbami. Pri prezračevanju moramo upoštevati tudi določene korekcijske faktorje, če želimo določiti dejansko hitrost prenosa kisika pri obratovalnih pogojih. V tretjem poglavju so podane in opisane enačbe za dimenzioniranje sistemov prezračevanja. Pri obratovalnih pogojih mora hitrost prenosa kisika zadostovati potrebam biomase v prezračevalnem bazenu. Maksimalna hitrost prenosa kisika nastopi, ko je koncentracija kisika v raztopini enaka nič. Opisana je tudi energetska učinkovitost čiščenja odpadne vode in kontrolni sistemi na ČN. Na KČN Ljutomer in Murska Sobota je vgrajen sistem prezračevanja z difuzorji, ki proizvajajo majhne mehurčke. Za oba primera je glede na obremenitev izračunana količina potrebnega zraka za vpihovanje v reaktor, učinkovitost prenosa kisika pri standardnih pogojih. Zajeti so tudi stroški prezračevanja in učinkovitost čiščenja odpadne vode.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 628.32(043.2)
Author: Sabina Kolbl
Supervisor: assoc. prof. dr. Jože Panjan
Cosupervisor: doc. dr. Darko Drev
Title: Municipal wastewater treatment plant aeration systems and their comparison at WWTP Ljutomer and Murska Sobota
Notes: 126 p., 34 tab., 47 fig., 78 eq.
Key words: aeration systems, air flow, two film theory, oxygen transfer, aerobic biological treatment

Abstract

Graduation thesis discusses aeration systems at wastewater treatment plants (WWTP), and compares the operation of the WWTPs at Ljutomer and Murska Sobota. The first four chapters cover the theoretical fundamentals of WWTP aeration and aeration systems. In the introductory section of thesis, the biological treatment of wastewater and its basic processes are briefly discussed. According to the DVWK-ATV-A 131E standards, fundamental equations are discussed for both the rate of consumption and the amount of oxygen needed for the decomposition of biological material. Oxygen transfer is affected by a variety of factors such as oxygen saturation, temperature, wastewater characteristics, immersion depth of diffusers, and barometric pressure. Concerning oxygen transfer, we are mainly interested in transfer between the liquid and gaseous phase. The two film theory with corresponding equations is discussed. Concerning aeration, we must also consider certain correction factors, if we are to determine the actual oxygen transfer rate in realistic plant operating conditions. In the third section, formulae for the design of aeration systems are presented and discussed. In operating conditions, the oxygen transfer rate must be sufficient to meet the needs of the biomass in the aeration tank. The oxygen transfer rate is at a maximum when the oxygen concentration in the solution is zero. The energy efficiency characteristics of wastewater treatment and control systems at WWTPs are described. At WWTPs Ljutomer and Murska Sobota, the aeration system is fitted with diffusers, which produce small bubbles. In both of these examples, the amount of air injected into the reactor and the standard oxygen transfer

efficiency (SOTE) is calculated according to the reactor load. The economic costs of aeration and the efficiency of wastewater treatment are also included.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju, izr. prof. dr. Jožetu Panjanu, in somentorju, doc. dr. Darku Drevu.

Zahvalila bi se tudi svojima staršema in bratu, ki so mi skozi vsa leta študija nudili pomoč in mi pomagali vsak dan narediti lepši in pestrejši.

KAZALO VSEBINE

0 UVOD	1
1 BIOLOŠKO ČIŠČNJE ODPADNE VODE	3
1.1 Biološko odstranjevanje dušika	5
1.1.1 Nitrifikacija	6
1.1.2 Denitrifikacija.....	6
1.2 Hitrost porabe kisika in količina kisika za razgradnjo ogljikovega materiala	7
2 MEJNA PLAST IN PRENOS KISIKA	13
2.1 Prenos s pomočjo difuzije.....	13
2.2 Teorija mejne plasti - prenos med plinom in tekočino	21
2.2.1 Absorpcija	23
2.3 Faktorji, ki vplivajo na prenos kisika.....	26
2.3.1 Nasičenost kisika, C_{∞}^*	26
2.2.2 Temperatura	29
2.2.3 Odpadna voda.....	33
2.2.4 Potopljenost.....	34
2.2.5 Barometrični pritisk.....	36
2.3 Koeficient prenosa kisika, K_{La}	37
2.3.1 Temperatura	37
2.3.2 Odpadna voda.....	39
2.4 Koncentracija raztopljenega kisika v tekočini, C_L	46
3 ENAČBE ZA DIMENZIONIRANJE	48
3.1 Hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih, SOTR.....	48
3.2 Specifična kapaciteta oksigenacije, OC	49
3.3 Kapaciteta prenosa kisika v čisti vodi, OC[kg/h]	50
3.4 Kapaciteta prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata, α OC[kg/h].....	51
3.5 Standardna učinkovitost prezračevanja	51
3.6 Meritve pretokov plinov	54
3.7 Standardna učinkovitost prenosa kisika, SOTE.....	59
3.8 Učinkovitost prenosa kisika, $OC_{L,h}$ [g/m ³ N m] ali OA_h [%/m].....	60

3.9 Uporaba enačb pri obratovalnih pogojih	61
3.10. SBR proces	61
3.11 Oksidacijski jarek	63
3.12 Energijska učinkovitost čiščenja odpadne vode	65
3.13 Kontrolni sistemi na ČN	67
3.13.1 Struktura kontrolnega sistema	68
4 NAČINI PREZRAČEVANJA	71
4.1 Vnos zraka s stisnjenim zrakom	71
4.1.1 Delovanje prezračevanja z difuzorji	76
4.2 Mehanski prezračevalniki	79
5 PREZRAČEVANJE NA CČN LJUTOMER IN MURSKA SOBOTA	80
5.1 Centralna čistilna naprava v Ljutomeru	80
5.1.1 Tehnologija prezračevanja	84
5.2 CČN Murska Sobota	101
5.2.1 Prezračevalni bazen	106
5.3 Primerjava rezultatov	118
6 ZAKLJUČEK	122
VIRI	123

KAZALO SLIK

- Slika 1: Masni prenos skozi elementarni volumen.
- Slika 2: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = 0$.
- Slika 3: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = \frac{1}{2} t$ neskončno.
- Slika 4: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = t$ neskončno.
- Slika 5: Prenos kisika iz zraka v vodo samo z difuzijo.
- Slika 6: Prenos kisika v vodo s pomočjo difuzije in konvekcije.
- Slika 7: Absorpcija: Shematski prikaz mejne plasti plina in tekočine ter difuzija plinov.
- Slika 8: Desorpcija: Shematski prikaz prehoda plina skozi prehodno plast v tekočini v prehodno plast v plinu.
- Slika 9: Zveza med nasičeno koncentracijo raztopljenega kisika (C_s), koncentracijo raztopljenega kisika v času $t = 0$ (C_0), koncentracijo v času t (C_t) in deficitom raztopljenega kisika.
- Slika 10: Vpliv temperature na zasičenost s kisikom.
- Slika 11: Vpliv TDS na nasičenost s kisikom.
- Slika 12: Vpliv globine potopitve difuzorjev na nasičenost s kisikom.
- Slika 13: Vpliv barometričnega tlaka na nasičenost s kisikom
- Slika 14: Vpliv temperature na koeficient prenosa kisika $K_L a$ v čisti vodi za kupole in statična prezračevala.
- Slika 15: Vpliv pretoka zraka na θ za kupole in statična prezračevala.
- Slika 16: Vpliv turbulence na prenos kisika v čisti vodi.
- Slika 17: Vpliv turbulence na prenos kisika v odpadni vodi.
- Slika 18: α faktor pri različnih režimih toka.
- Slika 19: Rabljena EPDM membranska cev po čiščenju. Hitrost pretoka zraka znaša 5,10 m³_N/h. Do neenakomerne porazdelitve mehurčkov pride zaradi obraščanja odprtih, ki se sprostijo z zračnim tlakom dovedenega zraka.
- Slika 20: Razmerje med standardno učinkovitostjo prenosa kisika za novi in očiščeni rabljeni difuzor. Na horizontalni osi je podan tok zraka v različnih enotah. Oznake so povprečne vrednosti dinamičnega mokrega tlaka (DWP).

- Slika 21: Vpliv odpora masnega prenosa aktivnega blata na potrebno koncentracijo kisika.
- Slika 22: Vpliv temperature na prenos kisika, ko je koncentracija raztopljenega kisika enaka nič.
- Slika 23: Zbiralni pokrov za meritve pretokov plinov.
- Slika 24: Prezračevalni bazen okrogle oblike in ovalne oblike z različnimi postavitvami difuzorjev.
- Slika 25: Shematski prikaz zvez v prezračevalnem bazenu pri prezračevanju z difuzorji.
- Slika 26: Možnost določanja meritve pretokov plina.
- Slika 27: Šaržni biološki reaktor.
- Slika 28: Shematski prikaz oksidacijskega jarka.
- Slika 29: Porazdelitev rabe energije na tipični čistilni napravi z aktivnim blatom.
- Slika 30: Osnovna struktura in komponente kontrolne zanke, uporabljene za kontrolo raztopljenega kisika pri biološkem čiščenju z aktivnim blatom.
- Slika 31: Shematski prikaz proporcionalnega nadzora za raztopljen kisik.
- Slika 32: Keramični disk.
- Slika 33: Keramična cev.
- Slika 34: Keramična kupola.
- Slika 35: Mrežasta razporeditev disk difuzorjev.
- Slika 36: Enojno in dvojno spiralno kroženje.
- Slika 37: Faze SBR sistema.
- Slika 38: Zaporedje obratovanja SBR reaktorja.
- Slika 39: Shematski prikaz cevnega Flexair Magnum difuzorja.
- Slika 40: Različni modeli cevnih difuzorjev Flexair Magnum.
- Slika 41: Selektor (levo) in sekvenčna bazena (desno) na CČN Ljutomer.
- Slika 42: CČN Murska Sobota iz zraka.
- Slika 43: Membranski diski v prezračevalnem bazenu na CČN Murska Sobota.
- Slika 44: Vgradnja potopnih banana mešal na CČN Murska Sobota.
- Slika 45: Prezračevalna bazena na CČN Murska Sobota.
- Slika 46: Pogled na prazen prezračevalni bazen na CČN Murska Sobota.
- Slika 47: Shema bazena 1 in bazena 2 na CČN Murska Sobota.

KAZALO TABEL

- Tabela 1: Faktorji maksimumov za hitrost porabe kisika (za pokritje dvournih viškov v primerjavi s 24-urnim povprečjem, če meritve niso na voljo).
- Tabela 2: Specifična poraba kisika $OU_{C,BPK}$ [kg O₂/kg BPK₅].
- Tabela 3: Tipični opazovani razponi koeficientov molekularne difuzije, turbulentne ali vrtnčaste difuzije, disperzije.
- Tabela 4: Specifična gostota čiste vode pri izbranih temperaturah.
- Tabela 5: Parni tlak čiste vode v stiku z zrakom pri določenih temperaturah.
- Tabela 6: Henryjeva konstanta za kisik kot funkcija temperature.
- Tabela 7: Vpliv temperature na hitrost prenosa kisika dC/dt , pri temperaturah, ki so tipične za procese aktivnega blata v prezračevalnih bazenih. Individualno je vrednost za koncentracijo kisika v raztopini $C = 2$ mg/l in za $K_L a = 5$ h⁻¹.
Srednja vrednost za $\frac{dC}{dt} = 36,66 \pm 1,65\%$.
- Tabela 8: Vrednosti α za različne prezračevalne naprave.
- Tabela 9: Standardni pogoji za specifikacijo delovanja prezračevalne opreme.
- Tabela 10: Energijski vpliv novih tehnologij na čiščenje odpadne vode.
- Tabela 11: Tipični primeri nadzorovanih in manipuliranih parametrov.
- Tabela 12: Volumen potrebnega zraka in učinkovitost prenosa kisika, ki se spreminja glede na velikost zračnega mehurčka pri prezračevanju z difuzorji.
- Tabela 13: Učinkovitost prenosa kisika v čisti vodi (SOTE) za porozne cevi.
- Tabela 14: Učinkovitost prenosa kisika v čisti vodi za različne vrste difuzorjev.
- Tabela 15: Predvidene (ocenjene) obremenitve čistilne naprave Ljutomer.
- Tabela 16: Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji.
- Tabela 17: Obratovalni cikel sekvenčnih bazenov.
- Tabela 18: Izračuni in karakteristike prezračevalnih bazenov.
- Tabela 19: Izračuni in karakteristike prezračevalnih bazenov pri dejanskem stanju.
- Tabela 20: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika in maksimalna temperatura v prvem prezračevalnem bazenu in izmerjene koncentracije BPK₅ na vtoku ČN Ljutomer po posameznih mesecih za leto 2008.

- Tabela 21: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika in maksimalna temperatura v drugem prezračevalnem bazenu in izmerjene koncentracije BPK₅ na vtoku ČN Ljutomer po posameznih mesecih za leto 2008.
- Tabela 22: Učinek čiščenja KPK, BPK ter celotnega fosforja in dušika v letu 2008.
- Tabela 23: Poraba električne energije za prezračevanje na CČN Ljutomer.
- Tabela 24: Predvidene (ocenjene) obremenitve čistilne naprave Murska Sobota.
- Tabela 25: Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji.
- Tabela 26: Izračuni in karakteristike pred vgradnjo dodatnih prezračeval.
- Tabela 27: Izračuni in karakteristike po vgradnji dodatnih prezračeval.
- Tabela 28: Izmerjene vrednosti BPK₅ na vtoku in iztoku iz čistilne naprave Murska Sobota.
- Tabela 29: Povprečne vrednosti temperature in pH odpadne vode na ČN Murska Sobota.
- Tabela 30: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih na različnih merilnih mestih za različne mesece, povzeto po Petrol d. d.
- Tabela 31: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih po podatkih SCADA.
- Tabela 32: Predvidena poraba električne energije in stroškov prezračevanja glede na povprečno porabo energije na mesec.
- Tabela 33: Primerjava rezultatov za prezračevanje na ČN Ljutomer in ČN Murska Sobota.
- Tabela 34: Učinek čiščenja BPK, KPK in celotnega fosforja na ČN Ljutomer in ČN Murska Sobota.

KAZALO GRAFIKONOV

- Grafikon 1: Temperatura v prezračevalnem bazenu.
- Grafikon 2: Izmerjena obremenitev z BPK_5 za različne mesece v letu 2008.
- Grafikon 3: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu za meseca januar in februar 2008.
- Grafikon 4: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (marec, april).
- Grafikon 5: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (maj, junij).
- Grafikon 6: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (julij, avgust).
- Grafikon 7: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (september, oktober 2008).
- Grafikon 8: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (november, december 2008).
- Grafikon 9: Povprečna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu za leto 2008 ob času meritev BPK in KPK na vtoku in iztoku.
- Grafikon 10: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika v prvem bazenu v letu 2008 po mesecih iz meritev SCADA.
- Grafikon 11: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika v drugem bazenu v letu 2008 po mesecih iz meritev SCADA.
- Grafikon 12: Delež porabe energije posameznih delov ČN Ljutomer.
- Grafikon 13: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec oktober 2008 po podatkih SCADA.
- Grafikon 14: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec november 2008 po podatkih SCADA.
- Grafikon 15: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec december 2008 po podatkih SCADA.
- Grafikon 16: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec januar 2009 po podatkih SCADA.
- Grafikon 17: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec februar 2009 po podatkih SCADA.

KAZALO PRILOG

PRILOGA A:	Koncentracija raztopljenega kisika v vodi c' za različne temperature in koncentracije kloridov; $c = 20,9\%$ O_2 v zraku; $p_{zrak} = 760bar$.
PRILOGA B:	Povprečne koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu v času meritev BPK in KPK glede na trajanje cikla na ČN Ljutomer.
PRILOGA C:	Izmerjene obremenitve na vtoku in iztoku iz ČN Murska Sobota ter učinek čiščenja za konec leta 2008 in začetek leta 2009.
PRILOGA D:	Podatki o meritvah na vtoku in iztoku iz ČN Ljutomer za leto 2008.
PRILOGA E:	Načrt zunanje ureditve ČN Ljutomer.
PRILOGA F:	Tehnološka shema postopka čiščenja na ČN Ljutomer.
PRILOGA G:	Načrt sekvenčnega bazena, različni prerezi.
PRILOGA H:	Tlorisni pogled na sekvečni bazen na ČN Ljutomer.
PRILOGA I:	Prezračevalni bazen na ČN Murska Sobota.
PRILOGA J:	Linija vode na ČN Murska Sobota.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

BPK	Biokemijska potreba po kisiku
BPK ₅	Biokemijska potreba po kisiku po petih dneh
KPK	Kemijska potreba po kisiku
TSS	Celotne suspendirane snovi
VSS	Hlapne suspendirane snovi
VFA	Hlapne maščobne kisline
OUR	Hitrost porabe kisika
SOUT	Specifična hitrost porabe kisika
SRT	Čas zadrževanja trdnih snovi
AORT	Dejanska hitrost prenosa kisika pri obratovalnih pogojih
SORT	Standardna hitrost prenosa kisika v čisti vodi (T=20 °C) brez raztopljenega kisika
SOUR	Specifična hitrost porabe kisika
EPDM	Etilen propilen kavčuk
SAN	Styrol-acrylnitril
PTFE	Polytetrafluorethlen
PVC	Polivinilklorid
MLSS	Suspendirane snovi v aktivnem blatu
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Absorpcija	Vsrkavanje snovi v maso druge snovi, kot raztapljanje plina v tekočini.
Aerobni pogoji	Opis pogojev, kjer je prisoten kisik.
Aerobno čiščenje	Čiščenje odpadne vode s pomočjo aerobnih mikroorganizmov pri aerobnih ali anoksičnih pogojih.
Aktivno blato	Biološka masa (kosmi), ki se proizvede med čiščenjem odpadne vode z rastjo mikroorganizmov v aerobnih ali anoksičnih pogojih.
Avtortofni organizmi	Organizmi, ki vključno z nitrifikacijskimi bakterijami in algami, ki za sintezo celic uporabljajo kot vir ogljika ogljikov dioksid.
BPK	Masna koncentracija raztopljenega kisika, ki se pri določenih pogojih porabi za biološko oksidacijo organskih spojin.
Delci	Običajno ločene suspendirane trdne snovi v vodi ali odpadni vodi, ki se lahko v veliki meri razlikujejo po velikosti, obliki, gostoti in naboju.
Difuzor	Priprava različne izvedbe, ki prenaša kisik iz zraka v tekočino ali porozna plošča, cev ali druga priprava, skozi katero prodira zrak, ki se nato porazdeli v zelo majhne mehurčke, za razpršitev v telo.
Ejektor	Priprava za premikanje tekočine ali trdnih snovi s prenosom le-teh z veliko hitrostjo toka ali zraka ali vodnega curka.
Endogeno dihanje	Poraba kisika za lastno dihanje organizmov brez dodajanja substrata.
KPK	Masna koncentracija ekvivalenta kisika za količino porabljenega dikromata pri določenih pogojih.

Koncentracija kisika Masa kisika, raztopljenega na volumsko enoto vode ali odpadne vode.

Oksidacijski jarek Vrsta prezračevalnika, ki ima po navadi obliko krožno povezanih vzporednih reaktorjev ali kanalov.

Prenos kisika Izmenjava kisika med plinasto in tekočinsko fazo; tudi množina kisika, absorbiranega v tekočino glede na množino hrane v tekočini, s prezračevanjem ali prezračevalno napravo.

Prezračevalni bazen Reaktor, v katerem se meša odpadna voda z aktivnim blatom in se prezračuje.

Prezračevanje Vnašanje zraka ali kisika.

Substratno dihanje Poraba kisika organizmov zaradi biorazgradnje dodanega substrata (skupno dihanje minus endogeno dihanje).

0 UVOD

Resnejše investicije v čiščenje odpadnih voda v Sloveniji so se zgodile že v sedemdesetih in osemdesetih letih preteklega stoletja. Z naraščanjem industrije in večanjem potreb potrošniške družbe postaja okolje vedno bolj obremenjeno z raznovrstnimi odpadnimi produkti, ki negativno vplivajo na naše okolje. Zavedanje za čisto in zdravo okolje, še zlasti za zdravo pitno vodo ter skrb za naravo in posledično tudi njeno ohranjanje za naslednje generacije ter trajnostni razvoj, je zato ključnega pomena. Manjša naselja so predvidoma brez kanalizacijskega omrežja, starejše čistilne naprave pa so že zastarele in potrebne rekonstrukcije, saj je učinek čiščenja premajhen, da bi zadovoljil veljavno zakonodajo.

Komunalne čistilne naprave so ene izmed zelo pomembnih ukrepov pri boju z onesnaženjem voda. Slovenija se je šele z uskladitvijo z evropsko zakonodajo in na osnovi obvez, ki izhajajo iz določb direktive o odvajanju in čiščenju komunalnih odpadnih voda, z desetletnim predhodnim obdobjem sistematično lotila načrtovanja izgradnje komunalne infrastrukture za čiščenje odpadnih voda.

Najbolj razširjeni biološki procesi za čiščenje odpadne vode so procesi z aktivnim blatom. Njihova učinkovitost je odvisna od gostote mikrobiološke populacije, ki je pri aerobnih pogojih pomešana z odpadno vodo. Za vse aerobne biološke procese potrebujemo kisik. Z neomejeno količino hrane in kisika lahko dosežemo zelo veliko hitrost rasti mikroorganizmov in dihanje. Pri tem se porabljajo prisotne organske snovi, kot oksidirani končni produkti (H_2O , CO_2 , NO_3 , SO_4 , PO_4) ali pa pride do biosinteze novih mikroorganizmov. Dušik in fosfor igrata ključno vlogo pri rasti mikroorganizmov. Pri čiščenju odpadne vode ju moramo odstraniti, saj sestavine lahko povzročijo porabo kisika ali pa so lahko toksične za organizme, ki se nahajajo v odvodnikih. Če v odvodnik spustimo neprimerno nitrificirano očiščeno odpadno vodo, se poveča dihanje in s tem poraba kisika. To stanje privede do pomanjkanja kisika in lahko resno škoduje organizmom v vodi.

Procesi z aktivnim blatom potekajo v dveh fazah. V prvi fazi poteka prezračevanje, v drugi pa usedanje blata. Prezračevanje ima dvojno funkcijo: (1) oskrba s kisikom za dihanje aerobnih mikroorganizmov in (2) mešanje odpadne vode za zagotovitev dobrega stika med površino kosmov in odpadno vodo in njeno obdržanje v suspenziji. To neprestano mešanje zagotovi zadostno količino hrane in maksimalni gradient koncentracije kisika za zadosten masni prenos. Prav tako pomaga razpršiti končne produkte presnove znotraj kosma. V večini

primerov je hitrost porabe kisika odvisna od masnega prenosa kisika. Če želimo pospešiti biološke procese, moramo povečati površino mejne plasti med plinom in vodo in hitrost specifičnega masnega prenosa, ki se dogaja ob difuziji in konvekciji. Procesi so zapleteni in med seboj povezani.

1 BIOLOŠKO ČIŠČNJE ODPADNE VODE

Prvotni namen biološkega čiščenja odpadne vode v preteklosti je bil: (1) odstranjevanje organskih sestavin v odpadni vodi, da bi preprečili pomanjkanje raztopljenega kisika v prejemnikih očiščenje odpadne vode, (2) odstranjevanje koloidnih in suspendiranih trdnih snovi, da bi preprečili akumulacijo trdnih snovi in ustvarjanje neugodnih razmer v odvodnikih očiščene odpadne vode in (3) zmanjšanje koncentracij patogenih organizmov, ki so jih izpustili v odvodnik. Standardi, ki jih je določila U.S. EPA za sekundarno čiščenje, so še zmeraj učinkoviti in so večinoma osredotočeni na odstranjevanje BPK in TSS (celotno suspendirane trdne snovi).

Pri biološkem čiščenju odpadne vode ločimo sisteme s pritrjeno biomaso in sisteme z razpršeno biomaso. Pri postopkih s pritrjeno biomaso je biomasa pritrjena na podlago. Sem štejemo naprave, kot so precejalniki, biofiltri in potopniki oziroma biodiski. Za postopke z razpršeno biomaso je značilno, da je biomasa razpršena v odpadni vodi. Sistemi z razpršeno aktivno biomaso večinoma potekajo v aerobnih pogojih, za katere je značilna visoka koncentracija mikroorganizmov (biomase) skozi recikel bioloških trdnih snovi. Mikroorganizmi pretvorijo biološko razgradljive organske sestavine odpadne vode in določene anorganske frakcije v nove mase celic in stranske produkte, ki jih lahko naknadno odstranimo iz sistema s pomočjo odvzemanja plinov (gaseous stripping), z usedanjem in ostalimi fizikalnimi načini (Vesilind, 2003).

Osnovi sistem z razpršeno biomaso je sestavljen iz med seboj povezanih komponent (Vesilind, 2003):

- En prezračevalni bazen ali več prezračevalnih bazenov, ki so načrtovani kot popolnoma premešani reaktor, cevni reaktor ali vmesni stili. Njihova velikost omogoča adekvaten zadrževalni čas trdnih snovi, organsko obremenitev ali druge kriterije. Hidravlični čas zadrževanja po navadi traja od 1 do 24 ur.
- Vir kisika in oprema, ki razprši atmosferski zrak ali zrak pod tlakom ali obogaten zrak s kisikom v prezračevalni bazen pri dovolj veliki hitrosti, da je sistem v aerobnem stanju.
- Mešalna naprava, ki zagotavlja vsebino prezračevalnega bazena v mešanju. S tem zagotovimo, da suspendirane snovi ostanejo v suspenziji in na takšen način

zagotovimo boljši stik med mikroorganizmi in raztopljenim organskim materialom ter kisikom.

- Sekundarni usedalnik, ki loči MLSS od odpadne vode. V sekvenčnem batch reaktorju po nekem času prenehamo s prezračevanjem in mešanjem, da se lahko MLSS usedejo - več stopenj procesa. Ne rabimo sekundarnega usedalnika.
- Metoda za zbiranje usedlih trdnih snovi v usedalniku in njihovo vračanje v prezračevalni bazen.
- Sredstva za odstranitev odvečnega blata iz sistema.

Karakteristike odpadne vode, okoljski pogoji, dimenzioniranje procesov in način delovanja določajo prevladujočo skupino mikroorganizmov, ki se bo razvila. Uspešno delovanje čistilne naprave je odvisno od razvoja mikrobiološke združbe, ki bo asimilirala določen odpadni material in tvorila kosme biomase, ki jih brez težav odstranimo z usedanjem (Vesilind, 2003). Pri mikrobiološki populaciji prevladujejo heterotrofni organizmi, ki za pridobivanje energije in celično sintezo potrebujejo biološko razgradljivo organsko snov. Med te mikroorganizme sodijo bakterije, glive in nekateri enoceličarji. Avtotrofne bakterije, vključno s tistimi, ki oksidirajo amonijak v nitrit in nitrat, imajo sposobnost, da lahko anorganske snovi uporabijo za energijo in celično sintezo. Ti avtotrofi so prisotni v različnih koncentracijah. Njihova relativna prisotnost je odvisna od različnih pogojev, med temi sta tudi način delovanja čistilne naprave in koncentracija biomase ter organskih in anorganskih snovi v reaktorju.

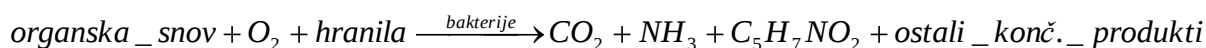
Veliko enoceličarjev in kotačnikov v sistemih z razpršeno biomaso je plenilcev, ki se hranijo z bakterijami. Do okrepljenega kosmičenja in bistrenja pride zaradi hranjenja z razpršenimi organskimi snovmi in organizmi. Enoceličarji in kotačniki predstavljajo do 5 % mase organizmov v sistemu. Včasih lahko pride do pojava nadležnih mikroorganizmov, ki lahko zmanjšajo uspešno delovanje čistilne naprave. Večina problemov, ki jih ti mikroorganizmi povzročijo, je povezanih s slabim usedanjem trdnih delcev in tvorbo težke pene (heavy foam, scum) (Vesilind, 2003).

Metabolizem mikroorganizmov poteka po dveh ločenih poteh. Pri presnovi se tvorijo nove celice (sinteza), mikroorganizmi pa začnejo z lastnim dihanjem (respiracija). Energija, ki se potroši pri sintezi, nastane pri prehodu prostih elektronov na kisik. Tako sinteza kot

respiracija potekata vzporedno. Končna produkta presnove sta ogljikov dioksid in voda, sprosti pa se tudi nekaj energije (Roš, 2001).

Pretvorba organske snovi pri aerobni oksidaciji poteka s pomočjo različnih kultur bakterij (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003, str. 609):

Oksidacija in sinteza:



Endogeno dihanje:



Mikroorganizmi porabijo kisik na različne načine. Porabo kisika za pridobitev energije, s katero razgradijo dodatni substrat v odpadni vodi, imenujemo substratno dihanje. Porabo kisika, ki ga mikroorganizmi potrebujejo za lastno dihanje, brez dodajanja substrata, pa imenujemo endogeno dihanje (Roš, 2001).

Osnovne sisteme z aktivnim blatom, ki jih uporabljamo za odstranitev ogljikove biokemične potrebe po kisiku (BPK), lahko s pomočjo modifikacije uporabimo tudi za nitrifikacijo, odstranjevanje fosforja in dušika (Vesilind, 2003).

Biokemijska potreba po kisiku (BPK) je merilo za količino kisika, ki jo potrebujejo mikroorganizmi za oksidacijo prisotnih organskih snovi v odpadni vodi med 5-dnevno poizkusno dobo. Proces odstranjevanja BPK lahko zapišemo z naslednjo enačbo (ABJ):



1.1 Biološko odstranjevanje dušika

Dušik, ki ga najdemo v surovi odpadni vodi, se pojavlja kot organski dušik in kot amonijev dušik. Vrednosti, ki jih navajajo v različnih literaturah, se gibljejo od 20 do 85 mg/l (kot N),

srednja vrednost je okrog 40 mg/l (Metcalf and Eddy v ASCE, 1998). Proces nitrifikacije lahko razdelimo v dva koraka:

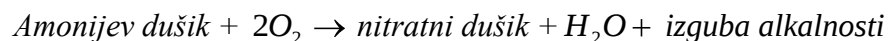
- **Nitrifikacija** - amonijev dušik se s pomočjo prisotnosti kisika in bakterij pretvori v nitrat.
- **Denitrifikacija** - nitrat se ob odsotnosti kisika pretvori v dušikov plin. Ker biološka nitrifikacija poteka samo na nitratnem ionu, je nitrifikacija ključna za popolno odstranjevanje dušika.

1.1.1 Nitrifikacija

Pri biološki nitrifikaciji pride do dveh zaporednih reakcij (ABJ):

- Pretvorba amonija v nitrit s pomočjo *Nitrosomonas* mikroorganizmov
 $\text{amonijev dušik} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{nitrit} + \text{H}_2\text{O} + \text{izguba alkalnost}$
- Pretvorba nitrita v nitrat s pomočjo *Nitrobacter* mikroorganizmov
 $\text{Nitritni dušik} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{nitratni dušik}$

Celotno reakcijo nitrifikacije lahko zapišemo kot (ABJ):



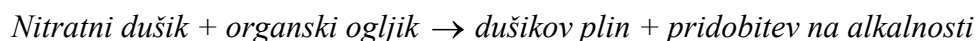
Amonijev dušik je oksidiran v nitrat s pomočjo avtotrofnih mikroorganizmov, kot so *Nitrosomonas* in *Nitrobacter*. Vsak gram amonija, ki je oksidiran v nitrat, vodi v (ASCE, 1998):

- porabo 4,6 g kisika (3,43 g O₂/g za produkcijo nitrita in 1,14 g O₂/g za oksidacijo NO₂-v nitrat),
- uničenje 7,1 g alkalnosti (kot kalcijev karbonat),
- proizvodnjo 0,15 g novih celic.

1.1.2 Denitrifikacija

Pri procesu biološke denitrifikacije se nitrati pretvorijo v dušikov plin N₂. Plin se nemudoma sprosti v atmosfero. Za razliko od nitrifikacije denitrifikacija poteka ob odsotnosti kisika in

kot vir ogljika uporablja organske sestavine, ki so prisotne v odpadni vodi. Energija se pridobi z oksidacijo organskih substratov. Med procesom denitrifikacije se nitrat ob odsotnosti prostega kisika obnaša kot sprejemnik elektrona. Celotna enačba za denitrifikacijo je naslednja (ABJ):



1.2 Hitrost porabe kisika in količina kisika za razgradnjo ogljikovega materiala

Hitrost porabe kisika lahko zapišemo z naslednjo enačbo (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$r_0 = -r_{su} - 1,42r_g$$

Kjer pomenijo:

r_0 - hitrost porabe kisika [g O₂/m³/d]

r_{su} - hitrost porabe substrata [g bsKPK/g VSS]

1,42 - KPK celičnih tkiv [g bsKPK/g VSS]

r_g - hitrost rasti biomase [g VSS/m³/d]

Negativni predznak pred r_{su} nakazuje, da koncentracija substratov v primerjavi s porabo substratov sčasoma pada. Pri procesih z razpršeno biomaso naj bo koncentracija kisika v celotnem prezračevalnem bazenu med 1,5 in 2 mg/l. Višja koncentracija kisika (nad 2 mg/l) lahko v reaktorjih, ki imajo visoko obremenitev z BPK, pospeši proces nitrifikacije. Vrednosti nad 4 mg/l pa ne izboljšajo delovanja, ampak samo povečajo stroške obratovanja. S kombinacijo hitrosti porabe kisika (OUR) in koncentracijo hlapnih suspendiranih snovi v aktivnem blatu (MLVSS) dobimo specifično hitrost porabe kisika (SOUR), ki jo imenujemo respiracijska hitrost. SOUR je mera za količino kisika, ki ga porabijo mikroorganizmi in je izražena v [mg O₂/g MLVSS h] (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Količino kisika, ki ga potrebujemo za razgradnjo ogljikovega materiala, določimo iz masnega ravnotežja. Uporabimo koncentracijo bKPK odpadne vode in količino odpadne biomase iz sistema v enem dnevu. Pri pogoju, da celoten bKPK oksidira v CO_2 , H_2O in NH_3 , je koncentracija bKPK enaka količinam kisika, ki ga potrebujemo. Vendar bakterije del bKPK oksidirajo za pridobitev energije, preostali del pa za rast. Del kisika se porabi tudi za endogeno dihanje, količina pa je odvisna od časa zadrževanja trdnih snovi (SRT) v sistemu. Če poznamo čas zadrževanja trdnih snovi (SRT), lahko masno ravnotežje dosežemo v situaciji, ko je količina bKPK enaka količini porabljenega kisika. Zraven pa moramo prišteti še biomaso hlapljivih suspendiranih trdnih snovi (VSS), ki so ostale. Za procese z razpršeno maso je količina potrebnega kisika za odstranitev BPK brez nitrifikacije izražena z naslednjo enačbo (Tschobanoglous, Buston, Stensel, 2003):

kol. potrebnega kisika = odstranjen bKPK - KPK odpadne vode

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42 \cdot P_{X,bio}$$

Kjer pomenijo:

R_0 - količina potrebnega kisika [g/dan]

$P_{X,bio}$ - preostala odpadna (wasted) biomasa, izražena kot hlapne suspendirane trdne snovi [kg/dan] - vključuje aktivno biomaso in ostanke celic

S_0 - koncentracija topnih substratov na vtoku [g BPK ali bsKPK/m³]

S - koncentracija topnih substratov na iztoku [g BPK ali bsKPK/m³]

Če v procesu upoštevamo še nitrifikacijo, je količina potrebnega kisika enaka kisiku, ki je potreben za odstranjevanje ogljikovega materiala, plus kisik, ki ga potrebujemo za amonijak in nitritno oksidacijo v nitrate. Enačba je naslednja (Tschobanoglous, Buston, Stensel, 2003):

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42 \cdot P_{X,bio} + 4,33Q(NO_x)$$

Kjer pomenijo:

NO_x - količina dušika po Kjeldahlu, ki oksidira v nitrat [mg/L]

Q - vtok [m³/d]

Po ATV-DVWK-A 131E standardu je za odstranjevanje ogljika potrebna naslednja količina kisika, ki je podana z enačbo:

$$OU_{d,C} = B_{D,BPK} \cdot \left(0,56 + \frac{0,15 \cdot t_{SS} \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot t_{SS} \cdot F_T} \right)$$

Kjer pomenijo:

$OU_{d,C}$ - količina kisika za odstranitev ogljika, nanašajoč se na BPK₅ [kg/kg]

$B_{D,BPK}$ - dnevna obremenitev z BPK₅ [kg BPK₅/d]

t_{SS} - starost blata, ki se nanaša na volumen prezračevalnega bazena (V_{AT}) [d]

F_T - temperaturni faktor za endogeno dihanje [-]

$C_{BPK,IAT}$ - koncentracija BPK₅ v homogeniziranem vzorcu vtoka v prezračevalni bazen [mg/l]

$C_{KPK,IAT}$ - koncentracija KPK v homogeniziranem vzorcu vtoka v prezračevalni bazen [mg/l]

Koeficienti v prejšnji enačbi veljajo za $\frac{C_{KPK,IAT}}{C_{BPK,IAT}} \leq 2,2$. Če se izkaže, da je z meritvami to

razmerje večje od 2,2, potem je potrebno določiti porabo kisika prezračevalnega objekta s pomočjo KPK (ATV-DVWK-A 131E).

Poraba kisika za nitrifikacijo po AVT-DVWK-A 131E znaša 4,3 kg O₂/kg oksidiranega dušika, pri upoštevanju metabolizma nitrifikantov. Enačba je naslednja (AVT-DVWK-A 131E):

$$OU_{d,N} = Q_d \cdot 4,3 \cdot (S_{NO3,D} - S_{NO3,IAT} + S_{NO3,EST}) / 1000$$

Kjer pomenijo:

$OU_{d,N}$ - dnevna količina kisika za nitrifikacijo [kg O₂/d]

Q_d - dnevna hitrost dotoka [m³/d]

$S_{NO3,D}$ - koncentracija nitratnega dušika za denitrifikacijo [mg/l]

$S_{NO3,IAT}$ - koncentracija nitratnega dušika iz vzorca na vtoku v prezračevalni bazen [mg/l]

$S_{NO3,EST}$ - koncentracija nitratnega dušika iz vzorca na iztoku iz naknadnega usedalnika [mg/l]

Z upoštevanjem odstranjevanja ogljika se za denitrifikacijo porabi 2,9 kg O₂/denitrificiran nitratni dušik. Po AVT-DVWK-A 131E je enačba naslednja:

$$OU_{d,D} = Q_d \cdot 2,9 \cdot S_{NO3,D} / 1000$$

Hitrost porabe kisika pri dnevni konici (OU_h) dobimo s pomočjo naslednje enačbe (AVT-DVWK-A 131E):

$$OU_h = \frac{f_C \cdot (OU_{d,C} - OU_{d,D}) + f_N \cdot OU_{d,N}}{24}$$

Kjer pomenijo:

f_C - faktor maksimuma za ogljikovo dihanje [-]

f_N - faktor maksimuma za oksidacijo amonija [-]

Faktor maksimuma f_C predstavlja razmerje med hitrostjo porabe kisika za odstranitev ogljika ob urni konici in povprečno dnevno hitrostjo porabe kisika. Zaradi izenačevalnega efekta hidrolize trdnih snovi to ni razmerje ustreznih obremenitev z BPK₅. Faktor maksimuma f_N je enakovreden razmerju med obremenitvijo s TKN v dvourni konici in povprečno obremenitvijo. Pri normalnih pogojih dotoka lahko vrednosti f_C in f_N odčitamo iz tabele 1 (AVT-DVWK-A 131E).

Tabela 1: Faktorji maksimumov za hitrost porabe kisika (za pokritje dvournih viškov v primerjavi s 24-urnim povprečjem, če meritve niso na voljo) (AVT-DVWK-A 131E).

	Starost blata (d)					
	4	6	8	10	15	25
f_C	1,3	1,25	1,2	1,2	1,15	1,1
f_N za $B_{d,BPK,I} \leq 1200 \text{ kg/d}$	-	-	-	2,5	2,0	1,5
f_N za $B_{d,BPK,I} > 6000 \text{ kg/d}$			2,0	1,8	1,5	-

Tabela 2: Specifična poraba kisika $OU_{C,BPK}$ [kg O₂/kg BPK₅] (AVT-DVWK-A 131E).

T (°C)	Starost blata (d)					
	4	8	10	15	20	25
10	0,85	0,99	1,04	1,13	1,18	1,22
12	0,87	1,02	1,07	1,15	1,21	1,24
13	0,92	1,07	1,12	1,19	1,24	1,27
18	0,96	1,11	1,16	1,23	1,27	1,30
20	0,99	1,14	1,18	1,25	1,29	1,32

Za nepretrgoma prezračevane bazene je potreben prenos kisika (AVT-DVWK-A 131E):

$$\text{potreben } \alpha OC = \frac{C_s}{C_s - C_x} \cdot OV_h$$

Kjer pomenijo:

αOC - prenos kisika prezračevalne naprave v aktivnem blatu s $C_x = 0$, $T = 20$ °C in $p = 1013$ hPa [kg O₂/h]

OV_h - hitrost sprejema kisika [kg/h]

C_s - nasičena koncentracija kisika, odvisna od temperature in parcialnega tlaka [mg/l]

C_x - koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu (DO) [mg/l]

Pri prezračevanju s presledki je potrebno upoštevati obdobja brez prezračevanja. Enačba je naslednja (AVT-DVWK-A 131E):

$$\text{potreben } \alpha OC = \frac{C_s}{C_s - C_x} \cdot OV_h \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_D}{V_A}}$$

Kjer pomenijo:

V_D - volumen biološkega reaktorja za denitrifikacijo [m³]

V_A - volumen biološkega reaktorja (prezračevalnega bazena) [m³]

Koncentracija raztopljenega kisika v prezračevanem delu bazena za dimenzioniranje prezračevanja naj bo $C_x = 2 \text{ mg/l}$. Za prezračevalne bazene, kjer je tok odpadne vode krožen

- 12 Kolbl S., Prezračevalni sistemi na KČN in njihova primerjava na CČN Ljutomer in Murska Sobota.
Dipl. nal. - UNI - Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.
-

(na primer oksidacijski jarek), prezračevanje pa poteka s pomočjo površinskih prezračeval, je potrebno računati na koncentracijo $C_x = 0,5 \text{ mg/l}$ za simultano denitrifikacijo.

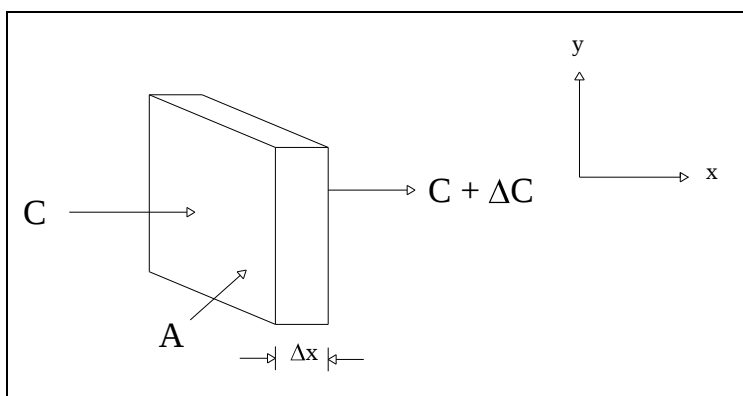
2 MEJNA PLAST IN PRENOS KISIKA

Za vse aerobne biološke procese potrebujemo kisik. Po navadi je hitrost navzemanja s kisikom odvisna od masnega prenosa kisika. Če želimo povečati hitrost teh procesov, moramo povečati mejno plast med plinom in vodo ter povečati hitrost specifičnega masnega prenosa, ki je sestavljen iz difuzije in konvekcije.

2.1 Prenos s pomočjo difuzije

Narava teži k ohranjanju ravnovesja. Naključno gibanje molekul barvila, ki ga vlijemo v neko prostornino vode, povzroči, da je koncentracija barvila v vodi enakomerna zaradi termalne energije molekul barvila. Za primer vzemimo, da imamo v neki posodi pregrado in bi v eni polovici posode imeli čisto vodo, v drugi pa bi ta bila pomešana z barvilom (enakomerne koncentracije). Če pregrado umaknemo, ne da bi povzročili kakršno koli motnjo v eni in drugi polovici vode, potem bi prišlo do mrežastega gibanja barvila z leve proti desni, dokler ne bi bila dosežena enakomerna koncentracija po vsej prostornini (Droste 1997).

Na sliki 1 je prikazan masni prenos plina skozi neki elementarni volumen, s pomočjo katere lahko zapišemo zgornjo enačbo na naslednji strani.



Slika 1: Masni prenos skozi elementarni volumen (Droste, 1997).

Eksperimentalno je dokazano, da je gibanje mase na enoto časa v pozitivni x smeri sorazmerno površini elementa in koncentracijskemu gradientu čez element. Masni prenos v

smeri padanja koncentracije (na primer $C + \Delta C$ je manj kot C) zahteva negativni predznak v enačbi (Droste, 1997):

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \propto -A \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad \text{ali} \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} = -D \cdot A \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

Kjer pomenijo:

m - masa [kg]

t - čas [s]

A - površina elementa [m^2]

C - koncentracija [g/cm^3]

x - razdalja [m]

D – koeficient difuzije [m^2/s]

Hitrost specifičnega masnega transferja nam podaja prvi Fickov zakon (Droste, 1997):

$$J_D = -D \frac{dc}{dx}$$

Kjer pomeni:

J_D - hitrost specifičnega masnega transferja [$\text{mol}/\text{m}^2\text{h}$]

D je koeficient difuzije. Če je c koncentracija raztopljenega kisika v vodi, potem je $D = D_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}}$ koeficient difuzije kisika v vodi. Lahko ga izračunamo s pomočjo Einsteinove enačbe ali pa Nernst-Einsteinove enačbe (Bird et al., 1962 v Wiesmann et al., 2007):

$$D = KT \frac{w_{\text{O}_2}}{F_{\text{O}_2}} [\text{m}^2 / \text{h}]$$

Pri tem je $K = 1,380 \cdot 10^{-23} [\text{J} / \text{K}]$ (Boltzmannova konstanta), T temperatura v $^{\circ}\text{K}$, $w_{\text{O}_2} [\text{mol} \cdot \text{m} / \text{h}]$ hitrost difuzije molekul kisika in $F_{\text{O}_2} [\text{J} \cdot \text{mol} / \text{m}]$ moč upora molekul kisika.

Moč upora molekul kisika lahko pridobimo iz Stokesovega zakona gibanja, ki je ovirano z velikimi silami trenja ($Re \ll 1$) (Wiesmann et al., 2007):

$$F_{O_2} = 6\pi\eta \cdot w_{O_2} R_{O_2} [J \cdot mol / m]$$

Pri tem je $\eta [g / m \cdot h]$ dinamična viskoznost vode in $R_{O_2} [m]$ molekularni radij kisika. Z združitvijo zgornjih dveh enačb dobimo naslednjo enačbo (Wiesmann et al., str. 83):

$$D = \frac{KT}{6\pi\eta \cdot R_{O_2}} [m^2 / h]$$

Koeficient trenja za okrogle delce je podan (po Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003) z naslednjo enačbo:

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta \cdot R_{O_2} N}$$

Kjer pomenijo:

R - plinska konstanta [8,3143 J/K mol]

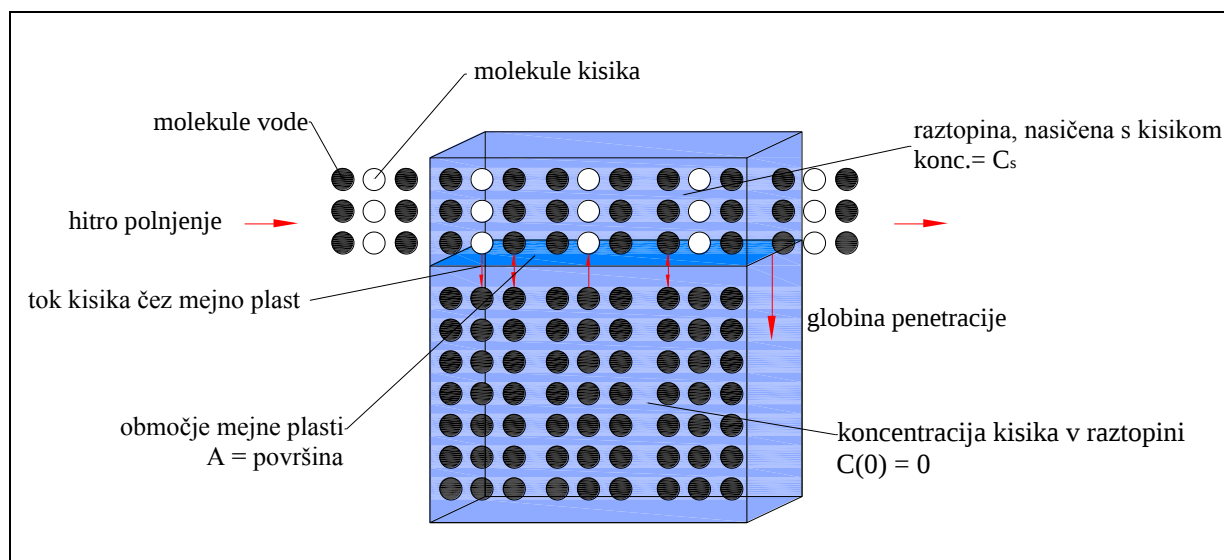
N - Avogadrovo število [$6,02 \times 10^{23}$ molekul/mol K]

$6\pi\eta R_p N$ se sklada s koeficientom trenja delca, kot to definira Stokesov zakon. Pri laminarnem toku je hitrost plasti tekočine daleč stran od telesa enaka hitrosti v nemotenem toku, plast tekočine tik ob telesu pa miruje glede na telo. Zato je strižna hitrost različna od nič, z njo povezana strižna sila pa ima komponento v smeri, nasprotni relativni hitrosti. Skupno silo upora dobimo z integracijo prispevkov komponente strižne sile po celotni površini telesa. Račun je zapleten in le za kroglo analitično izvedljiv; rezultat je Stokesov zakon (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003), (Panjan, 2000).

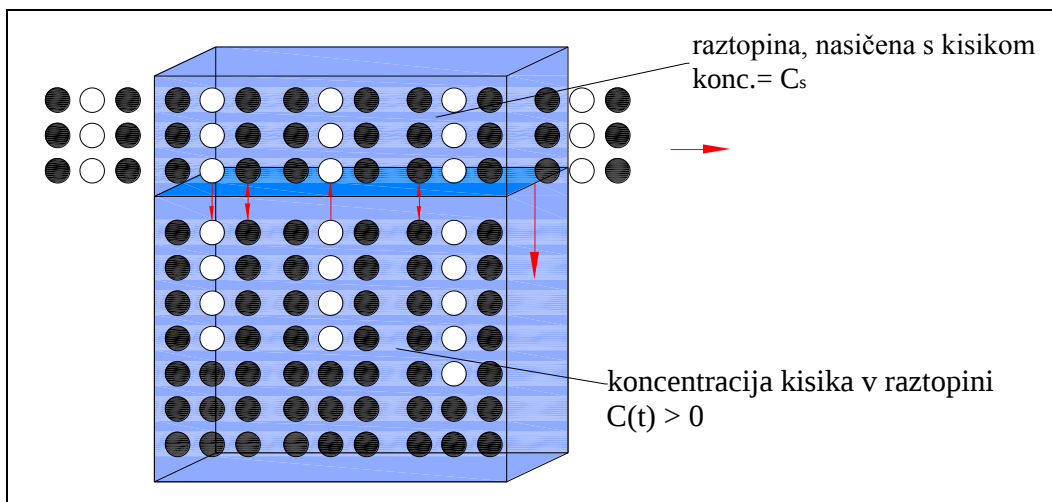
Koeficient difuzije za delce s polmeri 10^{-7} m (0,01 μm), ki so enako veliki kot najmanjše bakterije, pri pogojih, da je temperatura $T=20$ °C, viskoznost $\eta = 1,002 \times 10^{-3}$ Ns/m² znaša (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$D_m = \frac{R \cdot T}{6\pi \cdot r_p \cdot N} = 2,145 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

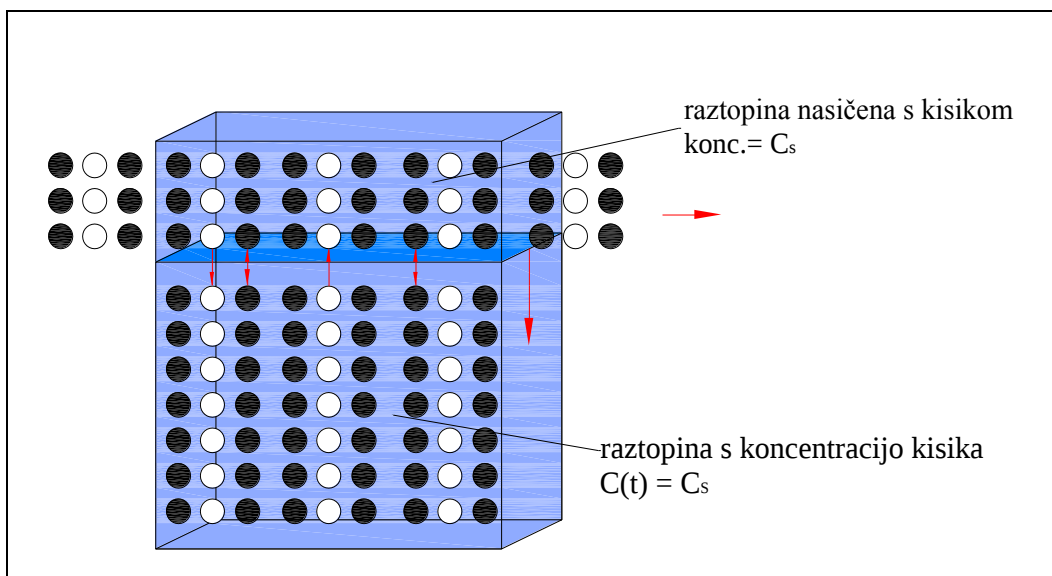
Iz tega lahko sklepamo, da čim manjši je delec, tem večja je molekularna difuzija. Glede na režim toka lahko koeficient molekularne difuzije zamenjamo s turbulentnim koeficientom difuzije (D_e) ali koeficientom disperzije (D). Koncentracijski gradient nastane zaradi razlik v ravnotežju dveh tokov (faz). Za procese, pri katerih pride do ravnotežnega kontakta, pa sta značilni dve posebnosti. To sta doseganje ravnotežnih pogojev in priprava oziroma pogoj mejnih stanj, do katerih lahko pride v povezanih fazah ali pa v ločenih nepovezanih fazah oziroma stopnjah (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).



Slika 2: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = 0$ (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 3: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = \frac{1}{2} t$ neskončno (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 4: Shematični prikaz difuzije kisika za raztopine v mirovanju, $t = t$ neskončno (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Slika 2 nam prikazuje difuzni prenos molekul kisika v rezervoar za vodo pri pogojih mirovanja. Zgornja plast tekočine nad območjem mejne plasti je nasičena s kisikom, medtem ko je spodnja plast pod območjem mejne plasti na začetku brez kisika. Brownovo gibanje povzroči, da se molekule vode in kisika transportirajo čez mejno plast med dve plasti. Kisik

se začne transportirati pod območje mejne plasti. Na sliki 3 je prikazana situacija pod mejno plastjo, ko je polovica celotnega volumna dosegla nasičenje. Globina saturacije na vseh mestih zaradi narave procesa difuzije ni enaka. Pri neskončnem času, kot je prikazano na sliki 4, je celoten volumen pod mejno plastjo zasičen.

Negativni predznak pred D_m ponazarja, da se prenos kisika vrši v smeri od višje koncentracije proti nižji (Shaw v Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003). Pri turbulentnih pogojih (na primer mešanje) brez pretoka mikroskalna turbulentna, znana kot turbulentna ali vrtinčasta difuzija, povzroča masni prenos. Ta koeficient difuzije označimo z D_e ali E . Pri turbulentnih pogojih s pretokom difuzija povzroča longitudinalno širjenje sledi. V tem primeru je namesto koeficienta molekularne difuzije uporabljen koeficient disperzije D , ki upošteva vplive disperzije, povzročene zaradi: advekcije (transport, povzročen zaradi različnih hitrosti tekočine), turbulentnih vrtincev (vrtinčasta difuzija) in molekularne difuzije. Medtem ko je magnituda (velikost) molekularne difuzije odvisna od kemijskih in tekočinskih lastnosti, sta turbulentna ali vrtinčasta difuzija in disperzija odvisni od režima toka (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Tabela 3: Tipični opazovani razponi koeficientov molekularne difuzije, turbulentne ali vrtinčaste difuzije, disperzije (Schnoor, Shaw v Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

	Simbol	Razpon vrednosti (cm²/s)
Molekularna difuzija	D_m	$10^{-8} - 10^{-4}$
Turbulentna ali vrtinčasta difuzija	D_e, E	$10^{-4} - 10^{-2}$
Disperzija	D	$10^2 - 10^6$

Koeficient difuzije je po Drosteju (1997) torej odvisen od številnih različnih faktorjev: I. velikosti in drugih karakteristik difuzne substance, II. difuznega medija, III. temperature, IV. mešanja. Tako na primer difuzija pri manjših molekulah poteka hitreje kot pri velikih. Privlačne sile med substanco in medijem prav tako vplivajo na mobilnost difuzne substance.

Primarni vpliv predstavlja gostota medija. Tako bo difuzija pri plinu, ki potuje skozi druge pline, potekala veliko hitreje, kot če bi plin potoval skozi tekočino. Temperatura vpliva tudi na kinetično energijo in naključno gibanje molekul - Brownovo gibanje (Droste, 1997).

V splošnem velja zveza (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$D \gg D_e \gg D_m$$

Wilke in Chang sta za temperaturo 20 °C izračunala koeficient molekularne difuzije, ki znaša $D_{20} = 6,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{h}$, in predlagala, da se temperaturni vpliv upošteva z naslednjo enačbo, kjer θ znaša 1,029 (Wiesmann et al., 2007):

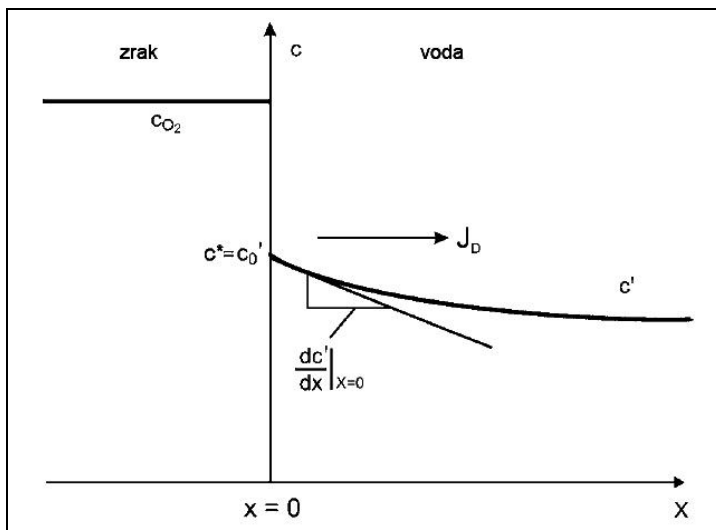
$$D_T = D_{20} \cdot \theta^{T-20}$$

Na mejni plasti med plinom in tekočino je specifični prenos kisika v vodi, izračunan s pomočjo enačbe $J_D = -D \frac{dc}{dx}$, majhen, če poteka samo difuzija. Razloga za to sta majhen koeficient difuzije in majhna topnost kisika v vodi. Lahko napišemo enačbo s pomočjo Henryjevega zakona (Wiesmann et al., 2007):

$$c = H \cdot c^*$$

Enačba velja za območje, ko je tlak kisika skoraj $p = 10 \text{ bar}$ ($c = \frac{p}{RT}$). Henryjeva konstanta H se zmanjšuje pri višanju temperature in koncentraciji kloridov (Wiesmann et al., 2007).

Pri deionizirani vodi temperature 20 °C znaša $H = 32,6$, kar pomeni, da je pri koncentraciji 298,7 mg/l kisika v zraku v vodi raztopljenega 9,17 mg/l kisika. Torej je prenos kisika v vodo z difuzijo počasen proces zaradi majhnega koeficienta difuzije in majhne topnosti. Slika 5 nam prikazuje prenos kisika iz zraka v vodo samo s procesom difuzije.



Slika 5: Prenos kisika iz zraka v vodo samo z difuzijo (Wiesmann et al., 2007).

Če želimo uporabljati kisik za kemijske in biološke procese v vodi, potem moramo (Wiesmann et al., 2007):

- zraven difuzije uporabljati še konvekcijo,
- povečati površino med mejno plastjo plin/tekočina.

Z ustvarjanjem majhnih mehurčkov, ki se dvigajo proti površini vode, lahko ustvarimo prenos kisika v vodo in do suspendiranih mikroorganizmov.

Za razliko od prej bomo sedaj masni prenos povečali še s pomočjo konvekcijskega gibanja. Koncentracija kisika v zraku ostane lokalno konstantna kot prej, kot rezultat visokega koeficienta difuzije kisika v zraku. V vodi se pa situacija popolnoma spremeni. Razen molekularnega gibanja na maso tekočine vplivajo tudi hidrodinamične sile, kot so pritisk, vztrajnostne sile in sile trenja v neposredni bližini dvigajočega se zračnega mehurčka.

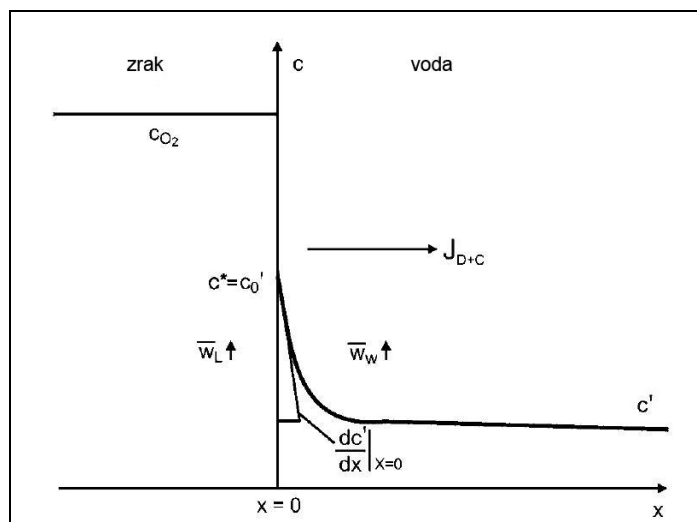
Konvekcijski prenos poveča lokalni naklon koncentracije na meji $\frac{dc'}{dx}\big|_{x=0}$ in specifično hitrost masnega prenosa (Wiesmann et al., 2007):

$$J_{D+C} = -D \frac{dc'}{dx}\bigg|_{x=0} [\text{mol}/(\text{m}^2\text{h})]$$

Gradianta ne moremo izmeriti, lahko ga izračunamo samo za majhne hitrosti pretoka tekočine. V nasprotju s tem pa lahko razliko med koncentracijama $c^* - c'$ preprosto izmerimo (Weismann et al., 2007):

$$J_{D+C} = k_L (c^* - c') \text{ [mol (m}^2\text{h)}^{-1}\text{]}$$

Pri tem je $k_L = \frac{D}{\delta}$ in δ je debelina mejne plasti. Proporcionalni faktor k_L je odvisen od koeficienta difuzije D , hitrosti mehurčka $\bar{w}$, kinematične viskoznosti in površinske napetosti σ (Weismann et al., 2007).



Slika 6: Prenos kisika v vodo s pomočjo difuzije in konvekcije (Wiesmann et al, 2007).

2.2 Teorija mejne plasti - prenos med plinom in tekočino

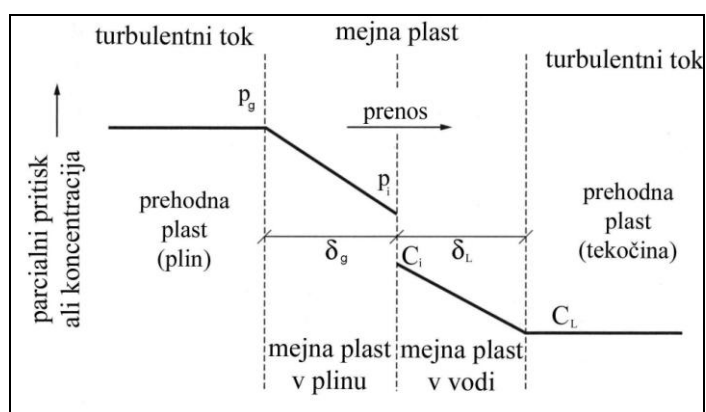
Za boljše razumevanje masnega transferja med plinom in tekočino so bili razviti trije modeli: Higbijev (1935) in Danckwertsev (1951, 1971) model površinskega obnavljanja; Kingov (1964) model »still surface« in model »two film« Whitmana in Lewisa (1923). Najbolj preprosta in najbolj pogosto uporabljena teorija za mejno plast je teorija Lewisa in Whitmana. Penetracijski model, ki ga je predlagal Higbie (1935), in model površinskega obnavljanja sta bolj teoretična. V 95 % so pri teoriji mejne plasti rezultati bolj ali manj enaki kot pri bolj

kompleksnih teoretičnih modelih. Prav zaradi tega je ta teorija najbolj uporabljena (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

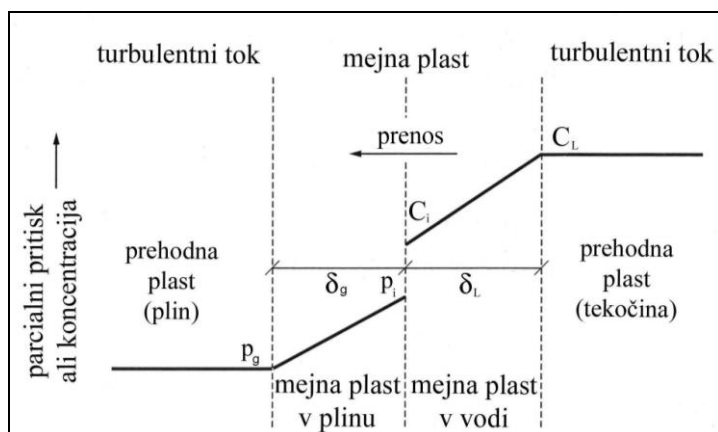
Teorija mejne plasti temelji na fizikalnem modelu, pri katerem se pojavi mejna plast med plinom in tekočino. Za nas je pomembna mejna plast pri vnosu kisika iz atmosfere v vodo. Pri tem je pomembna topljivost plinov. Prenos kisika se vrši v treh korakih (Gray, 2004):

- difuzija kisika iz plasti plina skozi mejno plast v plinu na »skupno« mejno plast (interface),
- prehod čez »skupno« mejno plast,
- difuzija skozi mejno plast v vodi (tekočini) v plast v tekočini.

Pri absorpciji plin prehaja iz plinske faze v tekočo fazo. Pri desorpciji pa plini, ki so raztopljeni v tekočini, prehajajo iz tekoče faze v plinsko fazo. Kot upor prehodu plinskih molekul med tekočo in plinsko fazo se ustvarja mejna plast med plinom in vodo. Pri tem predpostavimo, da sta koncentracija in parcialni pritisk v tekoči in plinski fazi konstantna (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003). Absorpcija ali prehod plina iz plinske faze skozi mejno plast v plinu in v vodi v tekočinsko stanje je ponazorjena na sliki 7, na sliki 8 pa je prikazana desorpcija ali prehod plina iz prehodne plasti tekočine v plin (Panjan, 2000).



Slika 7: Absorpcija: Shematski prikaz mejne plasti plina in tekočine ter difuzija plinov (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).



Slika 8: Desorpcija: Shematski prikaz prehoda plina skozi prehodno plast v tekočini v prehodno plast v plinu (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

2.2.1 Absorpcija

Pri absorpciji v mirnem stanju mora biti količina masnega prenosa plina skozi mejno plast v plinu enaka količini prenosa skozi mejno plast v tekočini. Če uporabimo 1. Fickov zakon, lahko masni prenos za vsako stanje za primer absorpcije (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003) napišemo z naslednjo enačbo:

$$J = \frac{dm}{dt \cdot A} = k_g \cdot (p_g - p_i) = k_L \cdot (C_i - C_L)$$

Kjer pomenijo:

J - količina masnega prenosa na površino in enoto časa

k_g - koeficient masnega prenosa mejne plasti v plinu

p_g - parcialni pritisk sestavine (sestavnega dela) A v prehodnem plinastem stanju / parcialni pritisk plina v prehodni plasti plina

p_i - parcialni pritisk sestavine (plina) A v mejni plasti v ravnotežju s koncentracijo C_i sestavin A v tekočini

k_L - koeficient masnega prenosa mejne plasti v tekočini

C_i - koncentracija sestavine (plina) A v mejni plasti v ravnotežju s parcialnim pritiskom P_i sestavin A v plinu ali koncentracija plina v mejni plasti v vodi

C_L - koncentracija sestavin A v prehodni plasti v tekočini ali koncentracija plina v prehodni plasti v vodi

Koeficient masnega prenosa mejne plasti v plinu k_g in koeficient masnega prenosa mejne plasti v tekočini k_L sta odvisna od stanj v mejni plasti. Izraza $(p_g - p_i)$ in $(C_i - C_L)$ vsak zase predstavljata gonilno silo (razlika v koncentracijah) za prehod v plinasto in tekoče stanje. Če izraza $(p_g - p_i)$ in $(C_i - C_L)$ vsakega zase razdelimo glede na njegovo debelino sloja, lahko gonilno silo napišemo v izrazih za debelino. Na takšen način lahko stopnjo masnega pretoka povečamo tako, da zmanjšamo debelino filma (mejne plasti), glede na to, katera mejna plast je opazovana (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Hitrost masnega prenosa $\frac{dm}{dt}$ je sorazmerna površini A mejne plasti in deficitu (primanjkljaju) kisika $(C_i - C_L)$ ter je obratno sorazmerna debelini mejne plasti v vodi. Maksimalna hitrost prenosa se bo zgodila, ko bo $C_L = 0$. Turbulence izven mejne plasti v vodi bodo zmanjšale debelino δ_L , kar poveča stopnjo prenosa. Stopnja turbulence je omejena z velikostjo in geometrijsko konfiguracijo prezračevalnega bazena, vrsto prezračevalne naprave in stopnjo prezračevanja glede na globino potopitve, kadar gre za mehanska prezračevala ali vpihovanje zraka, ko gre za prezračevanje z difuzorji. Povečanje površine mejne plasti prav tako poveča učinkovitost prenosa kisika (Gray, 2004).

Molekule v plinski fazi so veliko bolj mobilne kot molekule v tekoči fazi. Zaradi tega je debelina mejne plasti v plinu veliko manjša od debeline mejne plasti v vodi. To pomeni, da je $k_L \ll k_g$ (Droste, 1997). Zaradi izredno težkega merjenja vrednosti k_g in k_L v mejni plasti uporabimo celotni koeficient masnega prenosa v vodi K_L in celotni koeficient masnega prenosa v plinu K_g , ki sta odvisna od masnega pretoka, glede na to, ali je upor masnega pretoka na plinasti ali tekočinski strani (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Pri zelo veliki Henryjevi konstanti upor v tekočem stanju kontrolira proces masnega prenosa. Pri slabo topljivih plinih nastane na mejni plasti v tekočini upor zaradi masnega prenosa, pri zelo topljivih plinih pa primarni upor v plinu. Plini, ki so srednje topljivi, naletijo na upor na obeh straneh mejne plasti. Ustrezno količino masnega prenosa (zmožnost spajanja s kisikom

pri standardnih pogojih) na enoto volumna in enoto časa lahko izračunamo z naslednjo enačbo (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$J_v = K_L \cdot \frac{A}{V} \cdot (C_s - C_t) = K_L \cdot a \cdot (C_s - C_t)$$

Kjer pomenijo:

J_v - količina masnega prenosa kisika na enoto volumna in enoto časa [O_2 v kg/h m^3]

$K_L a$ - volumetričen koeficient masnega prenosa kisika [$1/\text{s}$]

A - kontaktna površina, skozi katero se vrši masni prenos [m^2]

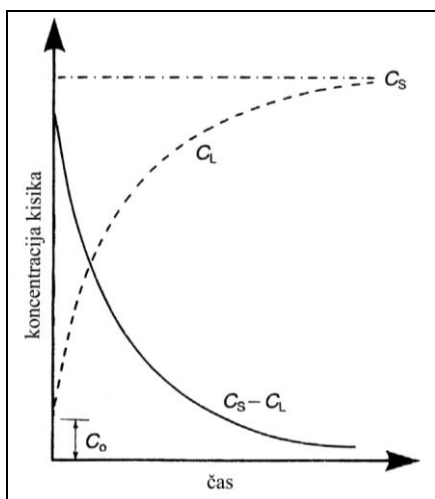
A - medploskovna površina za masni prenos na enoto volumna (A/V); [m]

K_L - celotni tekočinski koeficient masnega prenosa [m/s]

C_t - koncentracija v tekočem stanju ob določenem času [mg/L]

C_s - koncentracija pri ravnotežju s plinom [kg/m^3]

V - volumen [m^3]



Slika 9: Zveza med nasičeno koncentracijo raztopljenega kisika (C_s), koncentracijo raztopljenega kisika v času $t = 0$ (C_0), koncentracijo v času t (C_t) in deficitom raztopljenega kisika (Gray, 2004).

Kapaciteto kisika, ki še manjka do popolnega nasičenja prezračevalnega bazena s kisikom oziroma učinkovitost sistema ocenimo oziroma preračunamo v čisti vodi pri standardnih

pogojih. Po Degremontu (1991) znaša temperatura pri standardnih pogojih 10 °C, normalni zračni tlak 1,013 mbar, koncentracija raztopljenega kisika pa 0 mg/l.

Volumetrični koeficient masnega prenosa kisika K_L je odvisen od kakovosti vode, vrste prezračevalne opreme in je enkraten za vsako situacijo. Številčne vrednosti za K_L določamo eksperimentalno.

Če je C_t oziroma C_L manjši od C_S , potem se masni prenos vrši v tekočino. Če pa je C_t oziroma C_L večji od C_S , potem se masni prenos vrši ven iz tekočine. Masni prenos poteka tako, da koncentracije plina in tekočine zadostijo zahtevam Henryjevega zakona (Droste, 1997).

2.3 Faktorji, ki vplivajo na prenos kisika

Faktorji, ki vplivajo na prenos kisika so:

- nasičenost kisika, C_∞^* ,
- temperatura,
- lastnosti odpadne vode,
- globina potopitve difuzorjev,
- barometrični tlak.

2.3.1 Nasičenost kisika, C_∞^*

S pomočjo Henryjevega zakona lahko rečemo, da je vrednost nasičenja kisika funkcija koncentracije kisika v plinski fazi in Henryjeve konstante. Iz zakona za idealne pline lahko zapišemo (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$C_g = \frac{nM}{V} = \frac{pM}{RT}$$

Pri tem je p parcialni pritisk obravnavanega plina v plinastem stanju, V prostornina, ki jo plin zaseda vključno z ostalimi plini, n število molov obravnavanega plina, R splošna plinska konstanta in T (°K) temperatura plina.

Ker je pri umetnem prezračevanju vode zrak zasičen z vodno paro, mora biti parcialni tlak kisika v zraku v resnici manjši. Odstotek kisika v suhem zraku znaša 20,95 %. Parcialni pritisk kisika p v zvezi s totalnim pritiskom p_t je po Muellerju, Boyleu in Pöpelu (2002) podan z enačbo:

$$p = 0,2095 \cdot (p_t - p_v)$$

Kjer pomeni:

p_v - tlak hlapov vode [kPa]

Za odprte sisteme prezračevanja je parni tlak vode p_{vsat} domnevno nasičen pri temperaturi tekočine in temperatura plina nima vpliva na p_{vsat} ali na C_G (koncentracija kisika v celotni plinski fazi). Samo v dobro premešanih zaprtih sistemih, kjer prihaja do pomembnejših razlik pri temperaturi v plinski in tekoči fazi, bi parni tlak pri temperaturi plinske faze deloval koristno (Mueller v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Totalni pritisk lahko zapišemo (Mueller v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002) z naslednjo enačbo:

$$p_t = p_b + p_{d_e}$$

Kjer pomenijo:

p_b - lokalni barometrični pritisk [Pa]

p_{d_e} - efektivni pritisk (povečan pritisk zaradi potopitve prezračevala) [Pa]

Efektivni pritisk (povečan zaradi potopitve prezračevalne naprave) p_{d_e} lahko zapišemo tudi kot $p_{d_e} = \gamma \cdot h$. Pri tem je h [m] globina potopitve prezračevala. Določimo ga s pomočjo obratovalnih podatkov za specifično opremo. Prejšnje teoretične zveze so se izkazale za napačne, saj je mešanje v prezračevalnem sistemu zelo kompleksno (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Za primer vzemimo potopljen zračni mehurček, ki smo ga pravkar spustili v vodo s potopljenim prezračevalom. Potopljen mehurček je podvržen totalnemu pritisku, enakemu lokalnemu barometričnemu pritisku in efektivnemu pritisku zaradi potopitve prezračevala. Zračni mehurček pri stiku z vodo hitro doseže temperaturo vode in postane nasičen z vodno paro (vodnimi hlapci), tako da je sedaj pritisk suhega zraka v mehurčku enak $p_b + p_{d_e} - p_{vsat}$.

Parcialni pritisk kisika blizu difuzorja bi tako bil $0,20946 \cdot (p_b + \gamma \cdot h - p_{vsat})$ (Sykes, Walker, 2003).

Efektivni pritisk se ob dvigovanju zračnega mehurčka zmanjšuje. Kisik iz potopljenega mehurčka se absorbira v vodo, ki ga obkroža, zato volumski odstotek kisika v mehurčku pada. Posledično za povprečno topljivost kisika v prezračevalnem bazenu potrebujemo povprečen hidrostatični tlak in pritisk mehurčka kisika (bubble oxygen pressure). Enačba je naslednja (Sykes, Walker, 2003):

$$C_s = 0,20946 \cdot \bar{f} \cdot K_H \cdot (p_b + \frac{1}{2} \gamma \cdot h - p_{vsat})$$

Kjer pomenijo:

$\bar{f}$ - kvocient ali razmerje globina - povprečje parcialnega pritiska kisika na kateri koli globini do prvotnega parcialnega pritiska kisika [-]

h - globina potopitve difuzorja [m]

γ - specifična gostota vode [N/m³]

p_{vsat} - tlak hlapov vode pri temperaturi 20° [Pa]

Učinkovitost prenosa kisika se giblje okrog 10 %, vrednost $\bar{f}$ je po navadi okrog 0,95. Srednja topnost kisika v prezračevalnem bazenu, popravljena za vse te vplive, je povezana s standardno topnostjo kisika z naslednjo enačbo (Sykes, Walker, 2003):

$$\bar{C}_s = C_s' \cdot \frac{\bar{f}}{c} \cdot \frac{p_b + \frac{1}{2} \gamma \cdot h - p_{vsat}}{p_{sa}}$$

Kjer pomeni:

$\bar{C}_s$ - topnost kisika pri povprečni globini [kg/m³]

Tabela 4: Specifična gostota čiste vode pri izbranih temperaturah (Dean v Sykes, Walker, 2003).

Temperatura (°C)	Gostota vode (kg/m ³)	Specifična gostota vode (N/m ³)	Temperatura (°C)	Gostota vode (kg/m ³)	Specifična gostota vode (N/m ³)
0	999,84	9805,1	25	997,04	9777,6
5	999,96	9806,2	30	995,65	9764,0
10	999,70	9803,7	35	994,03	9748,1
15	999,09	9797,7	40	992,02	9728,4
20	998,20	9789,0	45	990,21	9710,6

Razmerje $\frac{\bar{f}}{c}$ se giblje med 0,96 in 1,05 pri dvigu temperature od 0 do 45 °C. V poletnih pogojih pa znaša razmerje okrog 0,99.

Tabela 5: Parni tlak čiste vode v stiku z zrakom pri določenih temperaturah (Dean v Sykes, Walker, 2003).

Temperatura (°C)	Parni tlak (kPa)	Parni tlak (lbf/in. ²)	Temperatura (°C)	Parni tlak (kPa)	Parni tlak (lbf/in. ²)
0	0,615	0,0892	25	3,192	0,4629
5	0,879	0,1275	30	4,275	0,6201
10	1,237	0,1794	35	5,666	0,8218
15	1,717	0,2490	40	7,432	1,0780
20	2,356	0,3417	45	9,623	1,3956

2.2.2 Temperatura

Ravnotežje oziroma stanje nasičene koncentracije plina, ki je raztopljen v tekočini, je funkcija vrste plina in parcialnega tlaka plina pri stiku s tekočino. Zvezo med molsko frakcijo plina v

atmosferi, ki je nad tekočino in molsko frakcijo plina, ki je v tekočini, nam podaja naslednja oblika Henryjevega zakona (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$p_g = \frac{H}{P_T} \chi_g$$

Kjer pomenijo:

p_g - molska frakcija plina v zraku, [mol plina/mol zraka]

H - Henryjeva konstanta, $\left[\frac{\text{atm (mol plina/mol zraka)}}{(\text{mol plina/mol zraka})} \right]$

P_T - totalni pritisk, po navadi 1 atm

χ_g - molska frakcija plina v vodi, [mol plina/mol vode] = $\left[\frac{\text{mol plina } (n_g)}{\text{mol plina } (n_g) + \text{mol vode } (n_w)} \right]$

Zvezo med koncentracijami na mejni površini lahko zapišemo z naslednjo enačbo (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$\frac{C_g}{C_s} = H_u$$

Kjer pomenijo:

C_g - koncentracija konstituenta (sestavine) v plinski fazi [mg/l]

C_s - nasičena koncentracija konstituenta v vodi [mg/l]

H_u - Henryjeva konstanta [-]

Koncentracije na mejni površini imajo enako aktivnost oziroma kemijski potencial. Henryjeva konstanta H_u v tem primeru nima enot (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002), vendar če pogledamo bolj natančno, bi bila enota [(mg/l)_{plin}/(mg/l)_{tekočina}].

Henryjeva konstanta H_u je funkcija vrste plina, temperature in narave tekočine. A in B sta empirični konstanti in sta približek, njuna vrednost pa niha glede na vir in metodo, ki je bila uporabljena (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Zgornjo enačbo lahko zapišemo tudi na drugačen način. Po Henryjevem zakonu je koncentracija raztopljenega plina v tekočini sorazmerna parcialnemu pritisku plina v plinski fazi (Brezonik v Sykes, Walker, 2003):

$$C = K_H \cdot p$$

Kjer pomenijo:

C - koncentracija raztopljenega plina v tekočini [kg/m^3]

K_H - Henryjeva konstanta [$\text{kg/m}^3 \text{ Pa}$]

p - parcialni pritisk raztopljenega plina v plinski fazi [Pa]

Tabela 6: Henryjeva konstanta za kisik kot funkcija temperature (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	$C_s^*(\text{mg} / \text{L})$	$H \frac{(\text{mg} / \text{L})_{\text{zrak}}}{(\text{mg} / \text{L})_{\text{tekočeka}}} (*)$
0	14,62	20,3
10	11,29	25,1
20	9,09	29,8
30	7,56	34,0
40	6,41	37,6
$(*)H = \frac{5530(14,7 - p_v(\text{psia}))}{C_s^*T(^{\circ}\text{K})}$		

Henryjeva konstanta H se ob povišanju temperature in koncentraciji trdnih snovi poveča, kar povzroči redukcijo vrednosti nasičenja s kisikom. Tabela 6 prikazuje Henryjevo konstanto za kisik, ki je izračunana iz vrednosti izmerjenih nasičenih koncentracij kisika po Benson in Krausu (1984) s standardno metodo, pri totalnem pritisku 1 atm in brez raztopljenih trdnih snovi (APHA et al., v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

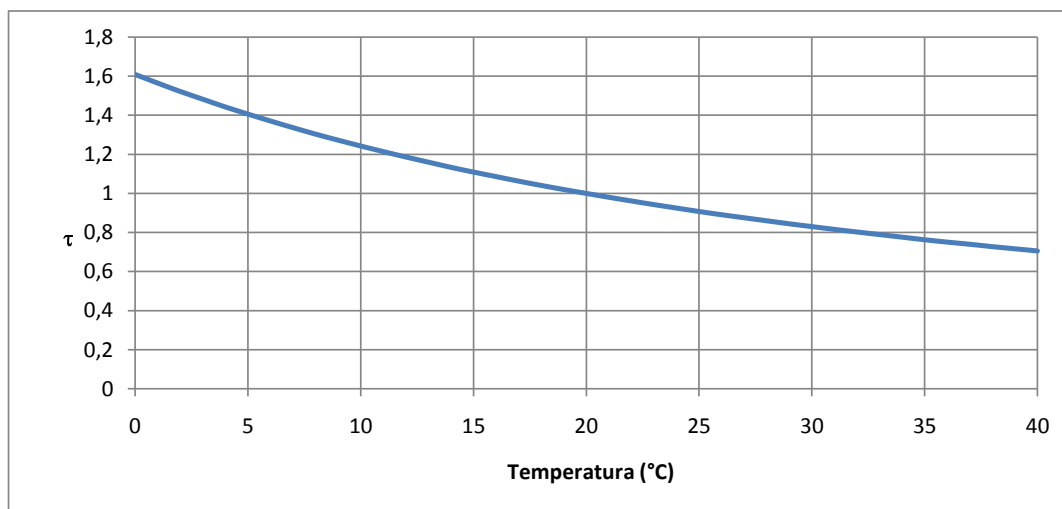
Za natančno delovanje prezračevala uporabimo standardne pogoje pri 20 °C in nasičeno vrednost pri totalnem pritisku 1 atm. Temperaturni korekcijski faktor τ je podan z naslednjo enačbo in prikazan na sliki x (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{C_{st}^*}{C_{s20}^*} \\ C_{s20}^* &= 9,09 \frac{mg}{L} \end{aligned} \right\}$$

Kjer pomenijo:

C_{sT}^* - nasičena koncentracija kisika na površini pri temperaturi T(°C) [mg/l]

C_{s20}^* - nasičena koncentracija kisika na površini pri temperaturi 20 °C [mg/l]



Slika 10: Vpliv temperature na zasičenost s kisikom.

Iz slike 10 je razvidno, da se z višanjem temperature temperaturni korekcijski faktor τ zmanjšuje. Pri temperaturi 0 °C se vrednost τ giblje okrog 1,6, pri temperaturi 20 °C pa je $\tau=1$.

2.2.3 Odpadna voda

Nečistoče v odpadni vodi, kot so soli, razni delci in površinsko aktivne snovi, bodo vplivale na zasičeno koncentracijo kisika v primerjavi s čisto vodo pri isti temperaturi. Zato uvedemo korekcijski faktor β (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003). Enačba je naslednja:

$$\beta = \frac{C_s(\text{odpadna...voda})}{C_s(\text{čista...voda})}$$

Kjer pomeni:

β - korekcijski faktor odpadne vode za nasičenje s kisikom [-]

Največji vpliv na zasičeno koncentracijo kisika v odpadni vodi imajo raztopljeni anorganski trdni delci. To povečanje predvideva, da je sestava anorganskih sestavin podobna tistim v morski vodi. Dogovorjeno je (ASCE Committee on oxygen transfer standards), da je ta povečani faktor dovolj natančen, da ga lahko uporabimo v praksi (ASCE v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

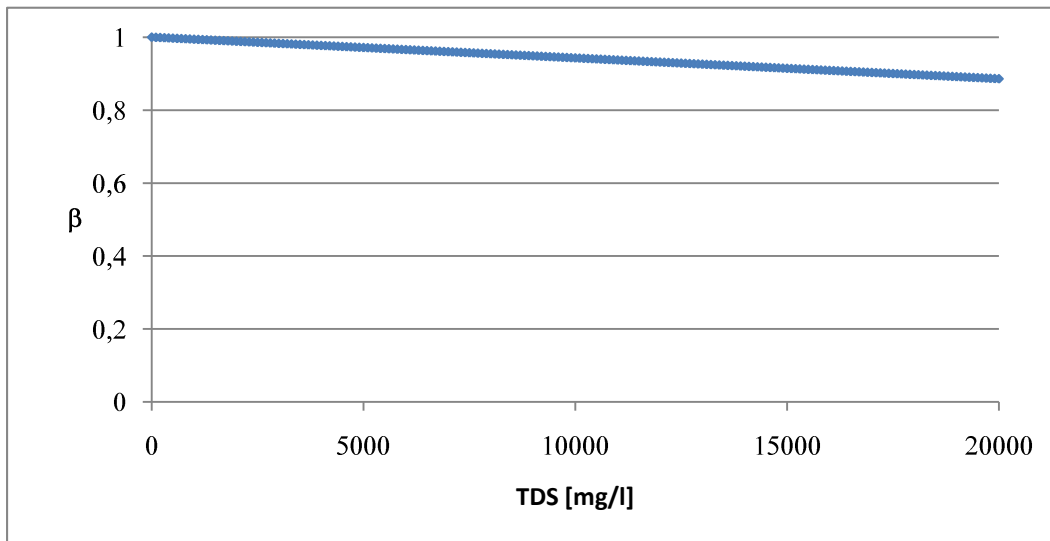
$$\beta = 1 - 5,7 \times 10^{-6} \times TDS$$

Vrednosti za β se gibljejo od 0,7 do 0,99. Najbolj pogosto uporabljena vrednost za komunalno odpadno vodo (pri $TDS < 1500$ mg/l) je 0,99, za industrijsko odpadno vodo, kot so na primer odpadne farmacevtske vode (pri $TDS = 10.000$ mg/l), pa se bo vrednost β gibala pod 0,94 (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Pri večanju koncentracije celotnih raztopljenih trdnih snovi (TDS) se vrednost korekcijskemu faktorju odpadne vode za nasičenje s kisikom manjša, kot je prikazano na sliki 11.

Po ATV standardih za komunalne odpadne vode je faktor $\beta = 1,0$. Vrednost β lahko izračunamo tudi s pomočjo vsebnosti celotno raztopljenih trdnih snovi ($TDS[\text{mg/l}]$) (ATV M 209E):

$$\beta = 1,00 - 0,01 \cdot \frac{TDS}{1000}$$



Slika 11: Vpliv TDS na nasičenost s kisikom.

2.2.4 Potopljenost

Pri standardnih pogojih, ko je temperatura odpadne vode 20 °C in tlak 1 atm, lahko z globinskim korekcijskim faktorjem nasičenja s kisikom δ zapišemo vpliv potopljenosti difuzorjev na nasičenost s kisikom (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\delta = \frac{C_{\infty 20}^*}{C_{s20}^*} = \frac{P_s + p_{de} - p_v}{P_s - p_v}$$

Kjer pomenijo:

P_s - standardni barometrični pritisk, 101,325 kPa, 14,696 psia

p_v - parni pritisk [kPa]

p_{de} - efektivni pritisk (povečan pritisk zaradi potopitve prezračevala) [Pa]

$C_{\infty 20}^*$ - nasičena koncentracija kisika v čisti vodi na globini potopitve difuzorja pri temperaturi 20 °C [mg/l]

Vpliv potopitve difuzorjev na nasičenost s kisikom lahko z uporabo naslednjih dveh enačb Yunta, Muellerja in Sauerja za majhne in velike mehurčke tudi grafično upodobimo, kot je

prikazano na sliki 12. Vrednosti korekcijskega faktorja δ so za prezračevanje z majhnimi mehurčki in jet prezračevanje večje kot pri prezračevanju z velikimi mehurčki.

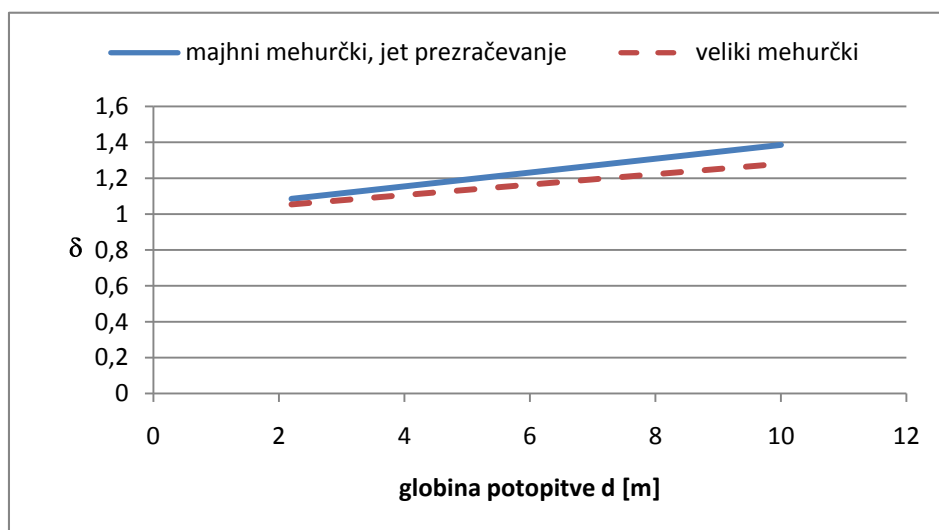
Vrednost δ lahko izmerimo in napišemo enačbo za efektivni pritisk (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$p_{d_e} = (\delta - 1)(P_s - p_v) = \gamma_w d_e$$

Kjer pomenijo:

γ_w - specifična teža vode [N/m^3]

d_e - efektivna globina (totalna globina potopitve prezračevala) [m]



Slika 12: Vpliv globine potopitve difuzorjev na nasičenost s kisikom.

V študiji Yunta, Muellerja in Sauerja je za določitev globinskega korekcijskega faktorja nasičenja kisika δ na terenu bilo uporabljeno sedem vrst difuzorjev. Enote z velikimi mehurčki v primerjavi z drobnimi mehurčki in prezračevanju z jet prezračevali zagotavljajo manjšo nasičenost s kisikom. Rezultati so podani na sliki 12. Uporabljene so bile različne enačbe za drobne in velike mehurčke (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

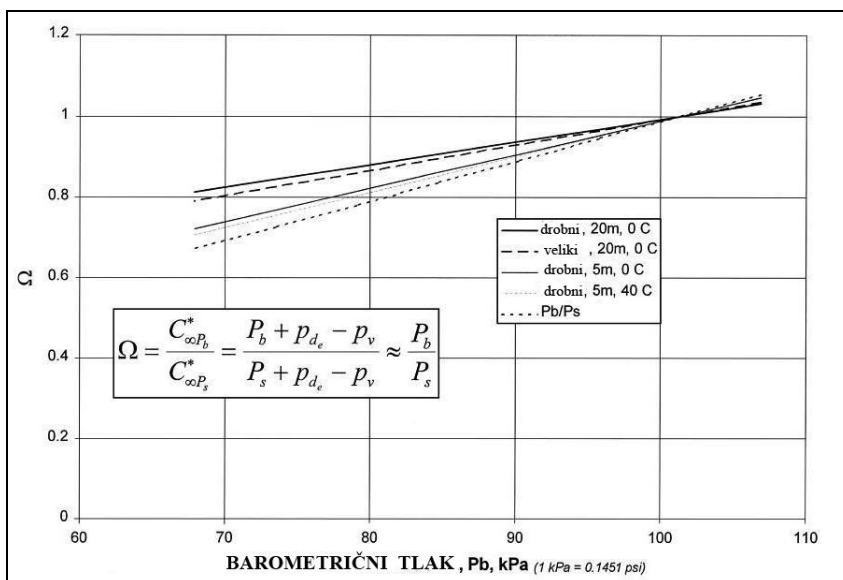
$$\left. \begin{array}{l} d_e = 0,4d \\ \delta = 1,00 + 0,03858d(m) \end{array} \right\} \text{drobni mehurčki in jet prezračevanje}$$

$$\left. \begin{aligned} d_e &= 0,3d \\ \delta &= 0,99 + 0,0291d(m) \end{aligned} \right\} \text{veliki mehurčki}$$

2.2.5 Barometrični pritisk

Vpliv barometričnega pritiska na nasičenost s kisikom je podan s faktorjem Ω (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\Omega = \frac{C_{\infty P_b}^*}{C_{\infty P_s}^*} = \frac{P_b + p_{d_e} - p_v}{P_s + p_{d_e} - p_v} \approx \frac{P_b}{P_s}$$



Slika 13: Vpliv barometričnega tlaka na nasičenost s kisikom (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Kjer pomenijo:

$C_{\infty P_b}^*$ - nasičena koncentracija kisika v čisti vodi pri barometričnem pritisku [mg/l]

$C_{\infty P_s}^*$ - nasičena koncentracija kisika v čisti vodi pri standardnem barometričnem pritisku (1013,25 hPa) [mg/l]

Približek, ki nam zmeraj da nižje vrednosti kot v resnici so, je pri barometričnem pritisku, ki od standardnega atmosferskega pritiska ne odstopa za več kot 5 %, zadovoljiv za bazene, ki niso globlji od 6 metrov (ASCE, 1991 v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

2.3 Koeficient prenosa kisika, $K_L a$

Na koeficient prenosa kisika in mejno plast, čez katero se vrši prenos kisika, vpliva prezračevalna oprema, ki jo uporabljamo, in nivo turbulence v sistemu. Podatki, ki jih dobimo od proizvajalcev prezračevalne opreme, so podani za delovanje v čisti vodi in so funkcija pretoka zraka ali dovedene moči pri temperaturi 20 °C. Zato je potrebno podatke prilagoditi temperaturi v prezračevalnem bazenu in sestavi odpadne vode (Panjan, 2000).

2.3.1 Temperatura

Z višanjem temperature se poviša tudi vrednost koeficienta prenosa kisika $K_L a$. Velja naslednja zveza (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

$$K_L a_{(T)} = K_L a_{(20^\circ\text{C})} \cdot \theta^{T-20}$$

θ - temperaturni korekcijski faktor za koeficient prenosa kisika [-]

$K_L a_{(T)}$ - koeficient masnega prenosa kisika pri temperaturi T [s⁻¹]

$K_L a_{(20^\circ\text{C})}$ - koeficient masnega prenosa kisika pri temperaturi 20 °C [s⁻¹]

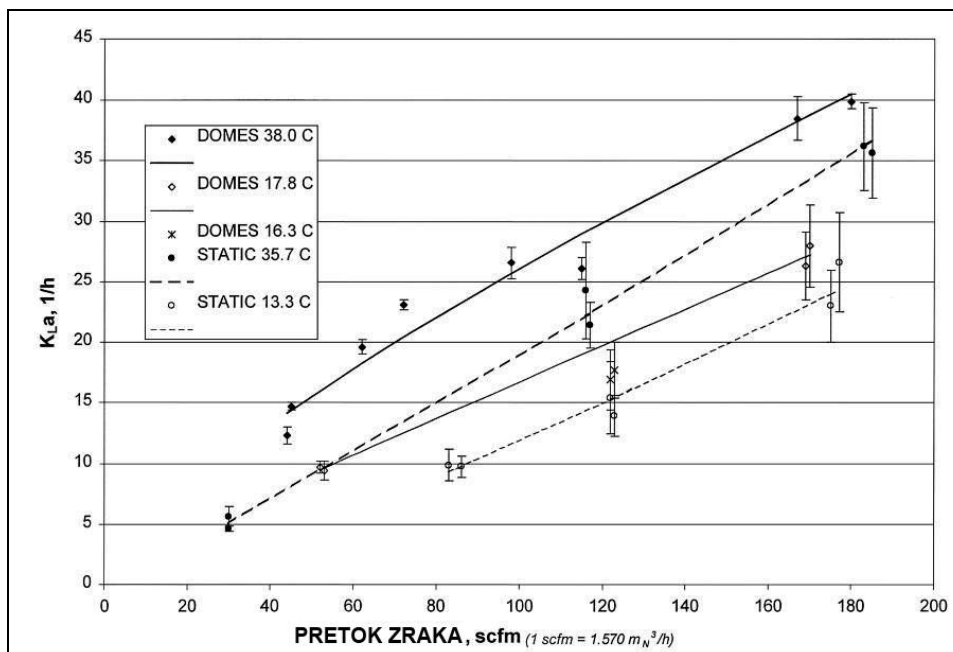
Vrednosti temperaturnega korekcijskega faktorja θ se gibljejo med 1,015 in 1,040. Vrednost 1,024 je tipična za mehansko prezračevanje in prezračevanje z difuzorji. Pri računanju $K_L a$ je vpliv temperature na C_s približno podoben, ampak obraten kot pri $K_L a$, zato iz praktičnih razlogov lahko vpliv temperature na $\frac{dC}{dt}$ zanemarimo. To nam prikazuje tabela 7 (Gray, 2004).

Temperatura prav tako vpliva na viskoznost in površinsko napetost, zato lahko pride tudi do sprememb pri mejni plasti in koeficientu mejne plasti v tekočini K_L (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

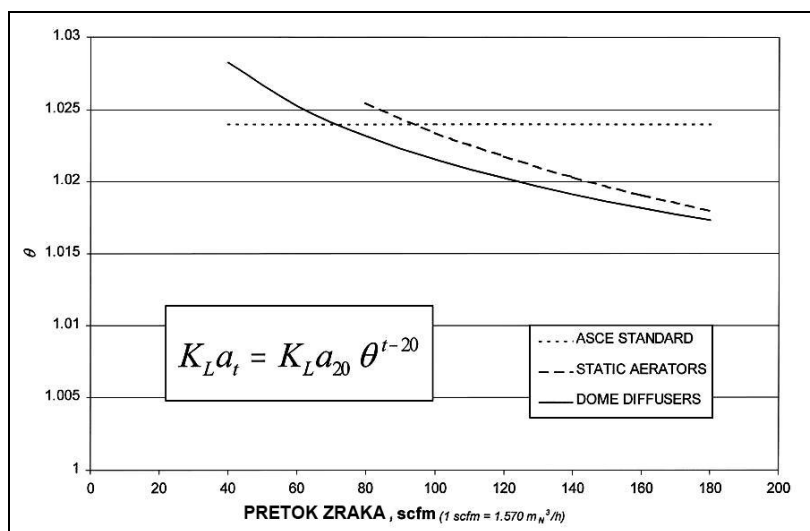
Tabela 7: Vpliv temperature na hitrost prenosa kisika dC/dt , pri temperaturah, ki so tipične za procese aktivnega blata v prezračevalnih bazenih. Individualno je vrednost za koncentracijo kisika v raztopini $C = 2 \text{ mg/l}$ in za $K_L a = 5 \text{ h}^{-1}$. Srednja vrednost za $\frac{dC}{dt} = 36,66 \pm 1,65\%$ (Gray, 2004).

Temperatura T(°C)	$C_s \text{ (mg/l)}$	$K_L a_{(T)}$	$\frac{dC}{dt}$
14	10,29	4,34	35,95
12	10,77	4,14	36,27
10	11,28	3,94	36,60
8	11,84	3,76	37,01
6	12,45	3,59	37,49

Z večanjem pretoka zraka se poveča tudi vrednost koeficientu prenosa kisika. Na sliki 14 je prikazan vpliv temperature na koeficient prenosa kisika pri različnih hitrostih pretoka zraka.



Slika 14: Vpliv temperature na koeficient prenosa kisika $K_L a$ v čisti vodi za kupole in statična prezračevala (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 15: Vpliv pretoka zraka na θ za kupole in statična prezračevala (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Slika 15 prikazuje vpliv pretoka zraka na θ za kupole in statična prezračevala. Po ASCE standardih je vrednost θ vedno enaka 1,024, vendar je razvidno, da v praksi to ne drži vedno. Vrednosti θ so do pretoka zraka okrog 75 scfm za kupole in do okrog 95 scfm za statična prezračevala, višja od 1,024, nato pa začnejo padati.

2.3.2 Odpadna voda

Velik vpliv na $K_L a$ ima prisotnost raztopljenih organskih snovi v odpadni vodi. Po navadi je ta vpliv veliko večji kot vsi ostali faktorji, združeni skupaj. Vpliv odpadne vode lahko zapišemo z eksperimentalno izmerjenim faktorjem α (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

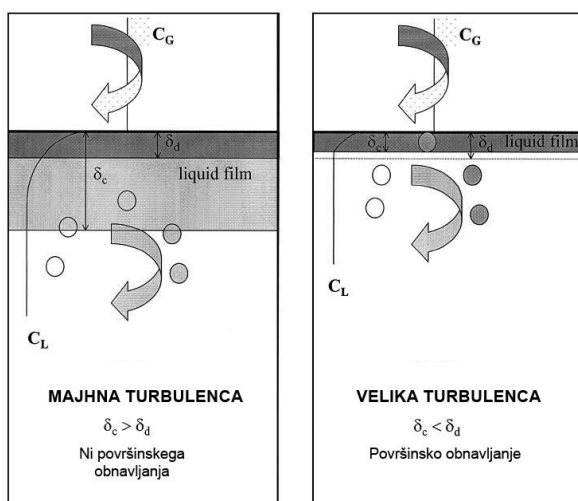
$$\alpha = \frac{K_L a(\text{odpadna...voda})}{K_L a(\text{čista...voda})} = \frac{K_L a_f}{K_L a}$$

α - korekcijski faktor odpadne vode za koeficient prenosa kisika [-]

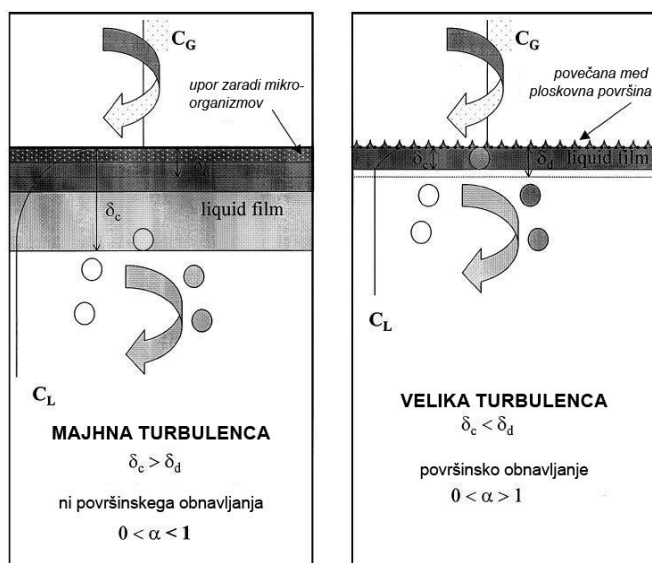
Pri podobnih pogojih imajo nižji režimi toka (lower flow regime) plin - voda mejnih plasti (pri prezračevanju z drobnimi mehurčki) v splošnem nižje vrednosti α kot višji režimi toka

mejnih plasti (prezračevanje z velikimi mehurčki, površinsko prezračevanje) (Stenstrom and Gilbert, 1981 v Rosso, Stenstrom, 2006). Ugotovljeno je, da imajo različni načini prezračevanja različen korekcijski faktor α . Pri prezračevanju z majhnimi mehurčki v času obratovanja sčasoma pride do zmanjšanja vrednosti α , predvsem zaradi oblaganja ali luščenja (Rosso, Stenstrom, 2006). Korekcijski faktor α je pri sistemih z majhnimi mehurčki funkcija srednjega zadrževalnega časa blata (MCRT) in hitrosti pretoka zraka (Rosso et al., 2005 v Rosso, Stenstrom, 2006). Medploskovno nabiranje površinsko aktivnih snovi povzroči povečanje medploskovne togosti (dvig koeficienta upora), zmanjšanje internega kroženja plina in hitrosti medploskovnega obnavljanja (Rosso, 2005 v Rosso, Stenstrom, 2006).

Na slikah 16 in 17 je prikazan vpliv turbulence in površinsko aktivnih snovi na proces prenosa. Za mejne plasti v čisti vodi in pri majhni turbulenci vrtinec, ki ga povzroči mešanje, ne seže do površja. Debelina koncentracijske mejne plasti δ_c je večja kot debelina difuzivne podplasti δ_d (~ 40 mikronov), tako da časa za nasičenja vrtinca z difuzijo ni dovolj, saj se le ta prej vrne v raztopino. Za velike turbulence je značilno, da vrtinec doseže površje in v času izpostavljanja (~ 1 s) postane nasičen, nato se pa pomeša v tekočino. Pri teh stopnjah turbulence je debelina koncentracijske mejne plasti δ_c manjša kot debelina difuzivne podplasti δ_d . Difuzija ima dovolj časa, da se vrtinec, preden zapusti površino, nasiči (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 16: Vpliv turbulence na prenos kisika v čisti vodi (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

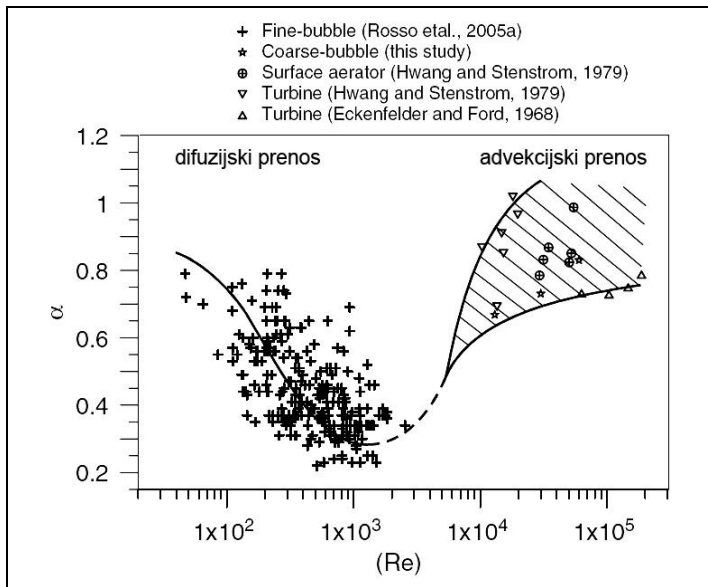


Slika 17: Vpliv turbulence na prenos kisika v odpadni vodi (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Eckenfelder (1970) navaja, da je pri laminarnem toku ali mirnih pogojih upor prenosu kisika velik in prekrije površinski upor, ki ga povzročajo površinsko aktivne snovi. Pri nizkih turbulentah je upor na prenos reduciran. Medploskovni upor površinsko aktivnih snovi povzroči pomemben upad pri hitrosti prenosa. Pri pogojih, ko nastopi velika turbulenca, je prenos kisika odvisen od površinskega obnavljanja in difuzija skozi medploskovni upor nima pomembnega vpliva. Pri teh pogojih je lahko $\alpha > 1$ predvsem zaradi povečane mejne površine v vodi (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Slika 17 prikazuje razvoj faktorja α s povečevanjem Reynoldsovega števila za različne vrste prezračevanja. Trendna linija na sliki potrjuje obnašanje faktorja α glede na turbulenco, kar sta že napovedala Eckenfelder in Ford (1968). Črtasti del trendne linije označuje medploskovni režim toka, ki ga pri prezračevanju po navadi ne srečamo. V območju, ko je $Re < 10$, tok ne vpliva na faktor α , saj je upor prenosa plina v največji meri posledica prehoda v tekočino. V področjih prehodnega toka, kjer poteka prezračevanje s finimi mehurčki, povečanje Reynoldsovega števila pripelje do zmanjšanja faktorja α . V tem območju $60 < (Re) < 5000$ je prenos plina nadzorovan z medploskovnim prehajanjem površinsko aktivnih snovi, ki je večje pri večjem Re . V laminarnem režimu (na primer v dosegu prezračevanja z majhnimi mehurčki) bo povečanje Reynoldsovega števila povečalo prenos površinsko aktivnih snovi in zaradi tega zmanjšanje faktorja α . Z večanjem Reynoldsovega

števila v turbulentnem režimu postane hitrost površinskega obnavljanja dovolj velika, da s površine odseka površinsko aktivne snovi, kar pa privede do povečanja faktorja α (Rosso, Stenstrom, 2006).



Slika 18: α faktor pri različnih režimih toka (Rosso, Stenstrom, 2006).

Vrednosti α se razlikujejo glede na različne tipe prezračevalnih naprav, geometrijo prezračevalnega bazena, intenziteto mešanja in karakteristike odpadne vode. Gibljejo se med 0,3 in 1,2. Tipične vrednosti za difuzijsko in mehansko opremo za prezračevanje so od 0,4 do 0,8 in od 0,6 do 1,2. Pri izbiri vrednosti α je potrebna velika previdnost v primeru, če se oblika prezračevalnega bazena močno razlikuje od tiste, v kateri je bila prezračevalna oprema preizkušena (Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Za procese staranja uvedemo dodaten faktor F (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

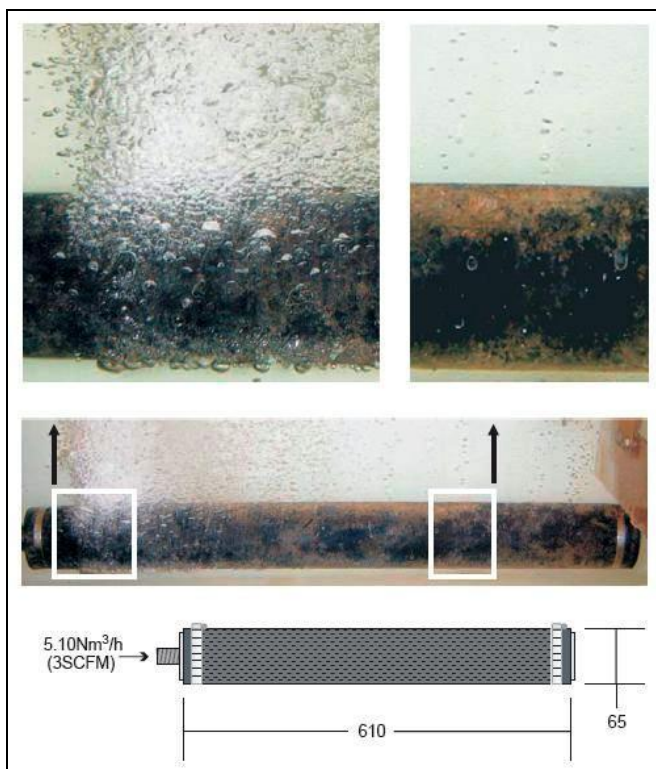
$$F = \frac{K_L a_{f_{rabljen}}}{K_L a_{f_{novi}}}$$

Faktor staranja difuzorjev F , ki vpliva na koeficient prenosa kisika, uporabljamo pri difuzorjih s finimi porami, ko pride do mašenja ali krhkosti. Obračanje (organsko) in

luščenje (anorgansko) predstavljata slabo lastnost difuzorjev z majhnimi porami. Eden izmed pokazateljev pojava obraščanja in luščenja je meritev tlačnih izgub čez difuzor, ki je poimenovan kot dinamični mokri tlak (dynamic wet pressure, DWP) (Kim and Boyle v Rosso et al., 2008). Zaradi kemijske sestave in morfologije materialov, iz katerih so narejeni difuzorji, je mašenje in luščenje odvisno od stanja procesa, kakovosti vode, vrste difuzorja in dolžine časa v obratovanju (US EPA v Rosso et al., 2008). Zato je difuzorje z majhnimi mehurčki potrebno rutinsko čistiti. Da bi zmanjšali upad učinka prenosa za manj kot 25 % začetne učinkovitosti, je potrebno čiščenje vsaj na vsakih 24 mesecev (Rosso, Stenstrom, 2006 v Rosso et al., 2008). Metoda in pogostost čiščenja omogočita dolgotrajno učinkovitost in koristi pri čiščenju s finimi mehurčki (Rosso et al., 2008).

Tabela 8: Vrednosti α za različne prezračevalne naprave (Roš, 1993).

Prezračevalna naprava	α faktor	Odpadna voda
Difuzor s finimi mehurčki	0,4 - 0,6	Pitna voda, ki vsebuje detergent.
Krtače	0,8	Komunalna (domestic) odpadna voda
Difuzor z grobimi mehurčki, razpršilec	0,7 - 0,8	Komunalna (domestic) odpadna voda
Difuzor z grobimi mehurčki, širok spekter	0,65 - 0,75	Pitna voda, ki vsebuje detergent.
Difuzor z grobimi mehurčki, razpršilec	0,55	Prezračevalni bazen v kontaktu z aktivnim blatom (activated sludge contact tank).
Statični prezračevalnik	0,6 - 0,95	Aktivno blato močno onesnažene industrijske odpadne vode.
Statični prezračevalnik	1,0 - 1,1	Pitna voda, ki vsebuje detergent.
Površinsko prezračevanje	0,6 - 1,2	α faktor narašča z dovajanjem moči (pitna voda, ki vsebuje detergent in majhno količino aktivnega blata).
Turbinska prezračevala	0,6 - 1,2	α faktor narašča z dovajanjem moči (pitna voda, ki vsebuje detergent).

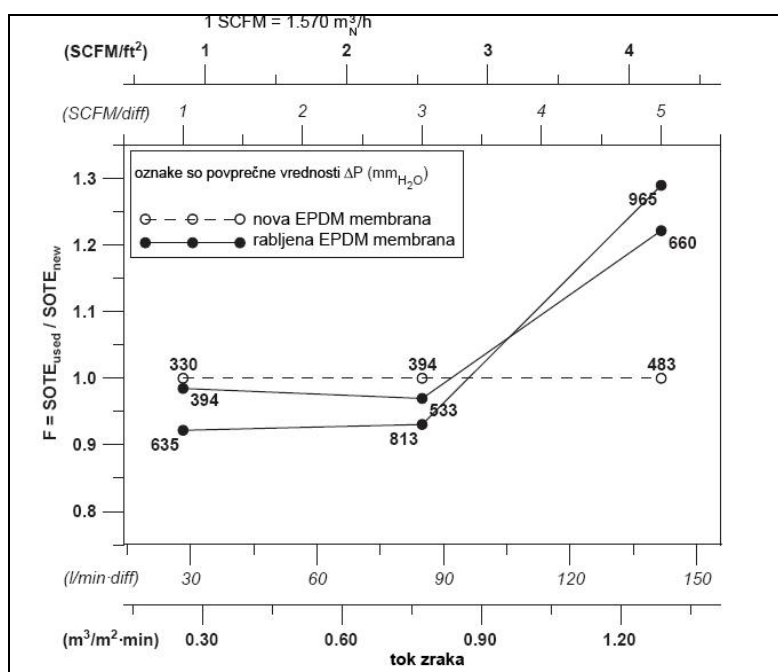


Slika 19: Rabljena EPDM membranska cev po čiščenju. Hitrost pretoka zraka znaša 5,10 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$. Do neenakomerne porazdelitve mehurčkov pride zaradi obraščanja odprtin, ki se sprostijo z zračnim tlakom dovedenega zraka (Rosso et al., 2008).

Na sliki 19 je prikazana EPDM cev po čiščenju. Hitrost pretoka zraka znaša 5,10 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$. V detajlih je prikazan vzorec porazdelitve mehurčkov, kjer se večina mehurčkov sprosti v bližini glave difuzorja, vzdolž difuzorja pa količina mehurčkov začne upadati. Do neenakomerne porazdelitve pride zaradi obraščanja odprtine (ustja), ki ga premagamo z zračnim tlakom blizu dotoka zraka. Prav tako je prikazano površinsko obraščanje/luščenje, ki je predvsem iz biološkega materiala in anorganskih oborin (Rosso et al., 2008).

Slika 20 prikazuje faktor mašenja za rabljeni in očiščeni difuzor. Na horizontalni osi so enote za hitrost toka zraka na enoto površine in difuzor. Oznake so povprečne vrednosti dinamičnega mokrega tlaka (DWP). Z definicijo imajo novi difuzorji pri vseh hitrostih toka zraka faktor staranja $F=1$. Pri nizkih hitrostih toka zraka je delovanje novih difuzorjev boljše kot že rabljenih, zmanjšan pa je tudi dinamični mokri tlak. Pri hitrostih toka zraka nad $100 \text{ l} / \text{min} \cdot \text{difuzor}$ ($\sim 3 \text{SCFM} / \text{difuzor}$) lahko rabljeni difuzorji dosežejo 20 % večjo specifično

učinkovitost v primerjavi z novimi, predvsem na račun 100-odstotnega ali večjega dviga dinamičnega mokrega tlaka. To lastnost lahko pripišemo utrjevanju membrane, ki preprečuje odprtine, da bi se raztegnile. Zaradi močnega povečanja v padcu tlaka se skozi odprtine sproščajo manjši mehurčki. V praksi puhalo za dovajanje zraka ne morejo preseči povečanega DWP, predvsem zaradi okvar, ki bi nastale na puhalih. V ekonomskem vidiku je prednost v povečanju standardne učinkovitosti prenosa kisika izničena oziroma izravnana s stroški za dodaten DWP, kar pa privede do povečanja obratovalnih stroškov, povezanih z obraščanjem difuzorjev (Rosso et al., 2008).



Slika 20: Razmerje med standardno učinkovitostjo prenosa kisika za novi in očiščeni rabljeni difuzor. Na horizontalni osi je podan tok zraka v različnih enotah. Oznake so povprečne vrednosti dinamičnega mokrega tlaka (DWP) (Rosso et al., 2008).

Difuzor, ki za nedoločen čas ostane v uporabi, bo nedvomno imel majhne hitrosti prenosa in bo deloval samo s 50-odstotno učinkovitostjo, kar pa poveča stroške prezračevanja (Rosso and Stenstrom v Rosso et al., 2008).

2.4 Koncentracija raztopljenega kisika v tekočini, C_L

Za določitev vrednosti koncentracije raztopljenega kisika moramo poznati minimalno koncentracijo raztopljenega kisika, da ohranimo maksimalno hitrost porabe kisika v aktivnem blatu. Prav tako moramo upoštevati različne potrebe po kisiku glede na spremembe v toku in organski obremenitvi (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Kot že prej omenjeno, je večina aktivnega blata sestavljena iz kosmov mikroorganizmov. Podatki Borkowskega in Johnsona (1967) kažejo, da znaša najmanjša koncentracija, ki ohrani celotno aktivnost razpršenih mikroorganizmov, ki oksidirajo ogljikove organske snovi, 0,0004 mg/l. Če želi kisik doseči aktivno stran celične membrane v bakteriji, potem mora najprej prodreti skozi tanko plast vode, ki obdaja kosme, nato pa se difundirati skozi matrico kosma v posamezno bakterijo. Celična membrana je tista, ki nadzoruje prehod raztopljenih snovi in dušikovih spojin v celico in izločanje odpadnih snovi in stranskih produktov metabolizma iz celice. Padec koncentracije raztopljenega kisika od površine okroglega kosma v njegovo središče pri pogoju, da je hitrost porabe kisika konstantna, je podan z naslednjo enačbo (Wuhrmann v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$C_L = C_m + \frac{A\gamma_f d_f^2}{24D_f}$$

Kjer pomenijo:

C_L - koncentracija kisika v tekoči fazi [mg/l]

C_m - koncentracija kisika v centru kosma [mg/l]

γ_f - specifična teža suhega kosma [kg/m³]

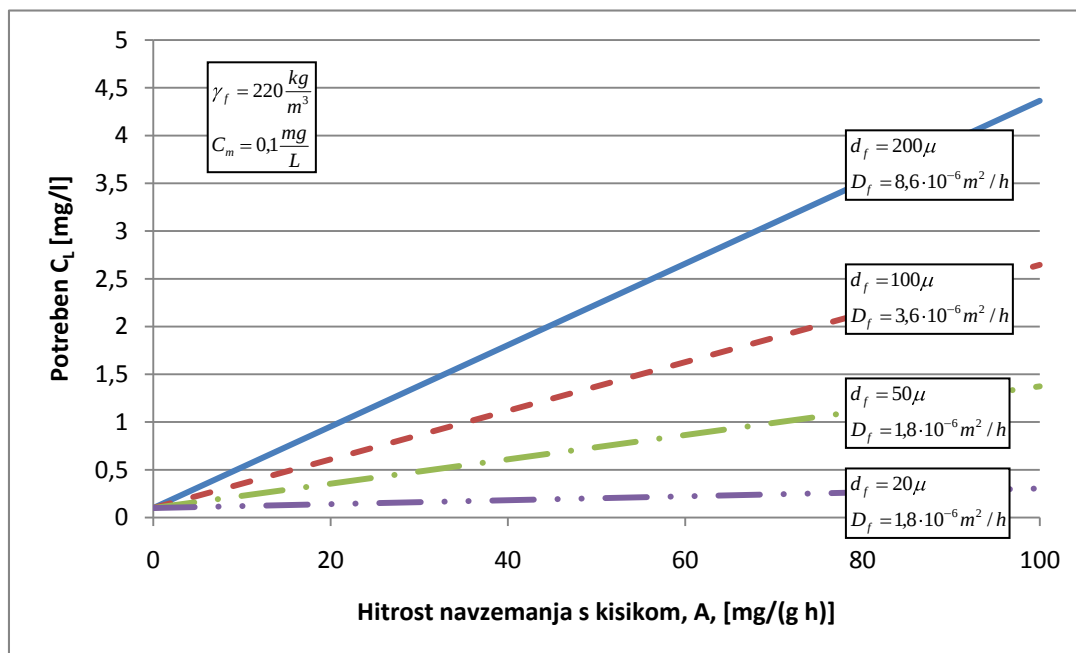
D_f - difuznost kosma [m²/h]

d_f - premer kosma [m]

A - specifična hitrost porabe kisika [mg/g-h]

Čim večji so kosmi in čim višja je hitrost porabe kisika, tem večja mora biti vrednost raztopljenega kisika v odpadni vodi; kot je prikazano na sliki 21. Večja je velikost kosmov, večje so efektivne difuznosti. Po Argamanu velja, da efektivna difuznost naraste s

povečanjem indeksa volumna blata, specifično površinsko območje (specifična zunanja površina) pa najverjetneje zaradi povečane poroznosti kosma (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 21: Vpliv odpora masnega prenosa aktivnega blata na potrebno koncentracijo kisika.

3 ENAČBE ZA DIMENZIONIRANJE

Pri načrtovanju sistemov za prezračevanje je za osnovno analizo uporabljena enačba

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L a \cdot (C_{\infty}^* - C_L) \text{ in predstavlja temeljno enačbo, ki opisuje prenos kisika v dejanskem}$$

prezračevalnem sistemu. Maksimalna hitrost prenosa nastopi, ko je koncentracija kisika v raztopini enaka nič. Enačbo modificiramo za razmere, pri katerih proizvajalci prezračevalne opreme navajajo njihovo sposobnost. Specifikacije temeljijo na podatkih za čisto vodo pri standardnih pogojih, ki so navedeni v spodnji tabeli (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Tabela 9: Standardni pogoji za specifikacijo delovanja prezračevalne opreme (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Parameter	Vrsta vode	Temperatura vode	C_L	Barometrični tlak	Pretok zraka
Evropski pogoji	Pitna voda	20 °C	0 mg/L	1 atm	0 % relativna vlažnost $\rho = 1,293 \text{ kg zrak} / \text{m}^3$ $\approx 300 \text{ g O}_2 / \text{m}^3$

3.1 Hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih, SOTR

SOTR je definirana kot količina prenesenega kisika na enoto časa v določen volumen vode pri standardnih pogojih. V Evropi se hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih nanaša na kapaciteto oksigenacije (OC). Enačba za SOTR je naslednja (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$SOTR = V \left(\frac{dC_L}{dt} \right)_{STD} = K_L a_{20} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot V$$

Kjer pomeni:

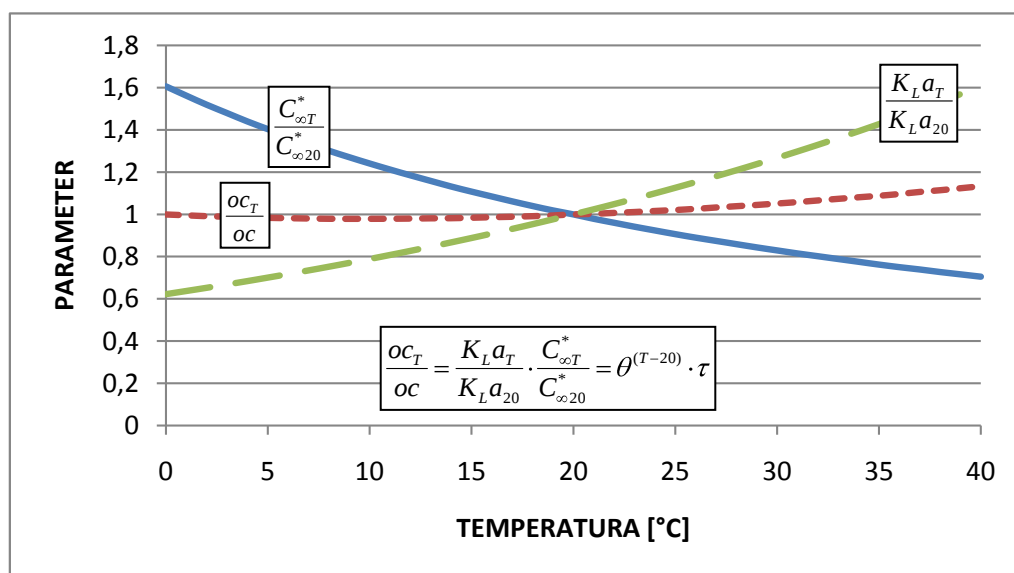
SOTR - hitrost prenosa kisika pri standardnih pogojih [kg/h]

3.2 Specifična kapaciteta oksigenacije, OC

Ta parameter je pogosto uporabljen v evropski literaturi in označuje hitrost spremembe koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$oc = \left(\frac{dC_L}{dt} \right)_{STD} = K_L a_{20} \cdot C_{\infty 20}^* = \frac{SOTR}{V} = SOTR_V$$

oc - specifična kapaciteta oksigenacije v čisti vodi [mg/l-h]



Slika 22: Vpliv temperature na prenos kisika, ko je koncentracija raztopljenega kisika enaka nič.

Zgornja slika prikazuje, da je vpliv temperature na zmnožek veliko manjši kot na hitrost prenosa kisika ali vrednost nasičenja kisika (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

$$\frac{oc_T}{oc} = \frac{K_L a_T}{K_L a_{20}} \cdot \frac{C_{\infty T}^*}{C_{\infty 20}^*} = \theta^{T-20} \tau = \frac{OTR_V}{SOTR_V}$$

Kjer pomeni:

τ - temperaturni korekcijski faktor za nasičenje s kisikom [-]

3.3 Kapaciteta prenosa kisika v čisti vodi, OC[kg/h]

OC masa kisika [kg], ki se s pomočjo prezračevalne opreme v eni uri prenese v prezračevalni bazen določene oblike, ki je napolnjen s čisto vodo, pri pogojih, da je koncentracija raztopljenega kisika $C = 0$ mg/l, temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in normalni atmosferski pritisk 1013 hPa . Enačba je naslednja: (ATV M 209E):

$$OC = \frac{V \cdot k_L a_{20} \cdot C_{S,20}}{1000}$$

Kjer pomenijo:

OC - kapaciteta prenosa kisika v čisti vodi, pri standardnih pogojih ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_0=1013\text{ hPa}$, $C=0$) [kg/h]

V - volumen [m^3]

$k_L a_{20}$ - koeficient prenosa kisika v čisti vodi pri temperaturi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [h^{-1}]

$C_{S,T}$ - izmerjena nasičena koncentracija kisika ali izračunana nasičena koncentracija kisika pri testu v čisti vodi pri temperaturi $T(^{\circ}\text{C})$ [mg/l]

Določitev nasičene koncentracije kisika je možna samo s testom v čisti vodi. Za pretvorbo nasičene vrednosti $C_{S,T}$, izmerjene pri temperaturi T , v standardne pogoje, se uporabljajo vrednosti za standardno nasičenje, upošteva pa se tudi dejanski atmosferski tlak (ATV M 209E):

$$C_{S,20} = C_{S,T} \cdot \frac{C_{SS,20}}{C_{SS,T}} \cdot \frac{1013}{p}$$

Kjer pomenijo:

$C_{SS,T}$ - standardna nasičena koncentracija raztopljenega kisika (zrak, nasičen z vodno paro, $p=1013\text{ hPa}$) pri temperaturi $T(^{\circ}\text{C})$ [mg/l]

p - atmosferski tlak [hPa], $p_0 = 1013\text{ hPa}$

Za prezračevanje z difuzorji lahko tlak na polovici globine potopitve difuzorjev, ki temelji na izkušnjah, uporabimo kot približek za računanje nasičene vrednosti (ATV M 209E):

$$C_{s,T} = C_{ss,T} \cdot \left(1 + \frac{h_E}{20,7} \right)$$

Če v enem bazenu uporabljamo površinsko prezračevanje in prezračevanje z difuzorji, potem moramo vrednost nasičenja s kisikom določiti na terenu s testom v čisti vodi (ATV M 209E).

3.4 Kapaciteta prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata, α OC[kg/h]

α OC je masa [kg] kisika, ki se s pomočjo prezračevalne opreme v eni uri prenese v prezračevalni bazen določene oblike, ki je napolnjen z odpadno vodo (suspenzijo aktivnega blata), pri pogojih, da je koncentracija raztopljenega kisika $C = 0$ mg/l, temperatura 20 °C in normalni atmosferski pritisk 1013 hPa. Enačba je naslednja: (ATV M 209E):

$$\alpha OC = \frac{V \cdot \alpha k_L a_{20} \cdot \beta \cdot C_{s,20}}{1000}$$

Kjer pomenijo:

αOC - kapaciteta prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata pri standardnih pogojih [kg/h]

$\alpha k_L a_T$ - koeficient prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata [h^{-1}]

β - faktor slanosti [-]

3.5 Standardna učinkovitost prezračevanja

SAE je hitrost prenosa kisika na enoto vnosa energije, ki lahko temelji na dovedeni moči (DP) ali wire power (WP). Enačba je naslednja (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\left. \begin{aligned} SAE &= \frac{SOTR}{DP} \\ SAE &= \frac{SOTR}{WP} \end{aligned} \right\}$$

SAE – učinkovitost prezračevanja pri standardnih pogojih [kg/kWh]

OP je prenos kisika v čisti vodi (OC), deljen z dovedeno močjo P [kW] inštalacije prezračevanja, vključno z inštalacijo za mešanje. Lahko zapišemo (ATV M 209E):

$$OP = \frac{OC}{P}$$

Kjer pomeni:

OP_{20} – učinkovitost prezračevanja v čisti vodi [kg/kWh]

Učinkovitost prezračevanja v suspenziji aktivnega blata αOP_{20} [g/kWh] lahko zapišemo z naslednjo enačbo (ATV M 209E):

$$\alpha OP = \frac{\alpha OC}{P}$$

Kjer pomeni:

αOP - prenos kisika v suspenziji aktivnega blata, deljeno s porabo žične moči prezračevalne inštalacije in inštalacije za mešanje [kg/kWh]

Celotna učinkovitost e prezračevalne opreme je produkt individualnih učinkovitosti mehanske opreme. Tipične učinkovitosti (EPA, 1983 v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002) posameznih komponent so: pihalnik (50 % za starejše in 80 % za bolj nove enote), motorji (95 %), gredna vez (95 %), okrov z zobniki (gear box) (95 %). Po navadi se porabljen žična (wire) moč povezuje s tisto energijo, ki je dovedena do zraka za prezračevanje z difuzorji ali do tekočine za mehansko prezračevanje (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$WP = \frac{DP}{e}$$

Za prezračevanje z difuzorji dovedena moč pihalnika temelji na adiabatno kompresijski enačbi, AP (Yunt, 1979 v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$DP = AP = \frac{wRT_a}{K} \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^K - 1 \right]$$

Kjer pomenijo:

DP - dovedena moč [kW, hp]

K - koeficient; 0,2857 za suh zrak [-]

w - hitrost masnega pretoka zraka [kg/h]

P_d - absolutni tlak dolvodno od pihalnika [kPa]

P_a - absolutni tlak gorvodno od pihalnika [kPa]

T_a - absolutna temperatura zraka, ki se steka v pihalnik [°K]

AP - adiabatno dovedena moč [kW, hp]

R - plinska konstanta pri standardnih pogojih; $287 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]$

Hitrost masnega pretoka zraka w je povezana z gostoto zraka in hitrostjo volumetričnega toka dotekajočega zraka, ki je podan pri standardnih pogojih (glej tabelo 9) (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$w = \rho_s G_s$$

Kjer pomenijo:

ρ_s - gostota standardnega plina [kg/m³]

G_s - hitrost pretoka zraka pri standardnih pogojih [m_N^3 / h]

Enačba za adiabatno dovedeno moč je naslednja (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$AP(kW) = 0,100 \cdot G_s (m_N^3 / h) \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^K - 1 \right]$$

Za tlak na izpustu upoštevamo globino vode, v katero so potopljene difuzorji, tlačne izgube v ceveh in sistemu difuzorjev. Dovodni tlak v pihalnik je nekoliko manjši kot atmosferski, predvsem zaradi sistema filtriranja zraka in dovodne napeljave (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

$$P_d = P_s + \rho_w d + \Delta p_d$$

$$P_a = P_s - \Delta p_a$$

Kjer pomenijo:

Δp_a - padec tlaka pri vstopu v filtre in cevi do pihalnika [kPa]

Δp_d - padec tlaka v ceveh in difuzorjih, dolvodno od pihalnika [kPa]

d - globina prezračevalnega bazena [m]

γ_w - specifična gostota vode [N/m³]

Pri vseh prezračevalnih napravah lahko s pomočjo vatmetra izmerimo točno žično moč.

3.6 Meritve pretokov plinov

Meritve pretokov plinov so možne samo pri bazenih z aktivnim blatom, katerih prezračevanje poteka s pomočjo difuzorjev. Izmerijo se naslednje stvari: meritev hitrosti pretoka plina $Q_{L,e}$ [m³/h], volumetrična frakcija kisika pri meritvi pretokov plinov X_e , okoliški zrak X_i , temperatura pri merjenju pretokov plinov T_L , raztopljen kisik (DO) in temperatura suspenzije aktivnega blata pod pokrovom. Izmerjena vrednost metode meritve pretokov plinov je volumetrična hitrost navzemanja kisika OV_R^* [g/m³·h]. S pretokom zraka $Q_{L,i}$ in $Q_{L,e}$ v enotah [m³/h] lahko zapišemo (ATV M 209E):

$$OV_R^* = 1000 \cdot \rho_{O_2} \cdot \frac{Q_{L,i} \cdot X_i - Q_{L,e} \cdot X_e}{A_A \cdot h_w}$$

Kjer pomenijo:

OV_R^* - volumetrična hitrost navzemanja kisika suspenzije aktivnega blata, izračunana iz meritev pretokov plinov [g/m³h]

- $Q_{L,i}$ - hitrost toka zraka v volumen pod projekcijo površine pokrova, določenega z meritvami pretokov plinov, popravljena za standardne pogoje [m_N^3 / h]
- $Q_{L,e}$ - hitrost toka plinov pri meritvah, popravljena za standardne pogoje [$m_N^3 / m^3 \cdot h$]
- X_i - volumetrična frakcija kisika v suhem vbrizganem zraku, brez CO₂ [-]
- X_e - volumetrična frakcija kisika v suhih, brez CO₂ meritev pretokov plinov [-]
- A_A - površina zbiralnega pokrova za meritve pretokov plinov [m²]
- h_w - globina vode v bazenu (pri mirnih pogojih) [m]

Iz hitrosti navzemanja kisika lahko napišemo enačbo za koeficient prenosa kisika (ATV M 209E):

$$\alpha k_L a_{20} = OV_R \cdot \frac{1}{\beta \cdot C_{S,T} - C} \cdot 1,024^{(20-T)}$$

Kjer pomenijo:

- $C_{S,T}$ - izmerjena nasičena koncentracija kisika ali izračunana nasičena koncentracija kisika pri testu v čisti vodi pri temperaturi T(°C) [mg/l]
- β - faktor slanosti [-]
- $\alpha k_L a_{20}$ - koeficient prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata pri temperaturi T°C [h⁻¹]

Pri pogoju, da v procesu denitrifikacije ni odstranjeno nič N₂, je število molov N₂ na vtoku zraka enako kot pri meritvah pretokov plinov. Potem lahko zapišemo enačbo za dejansko učinkovitost prenosa kisika αOA^* [%] (ATV M 209E):

$$\alpha OA^* = \frac{MV_i - MV_e}{MV_i} \cdot 100$$

Kjer pomenijo:

- αOA^* - učinkovitost prenosa kisika v suspenziji aktivnega blata, izračunana iz meritev pretokov plinov [%]
- MV_i - molsko razmerje; mol O₂/mol N₂ za suh zrak, brez CO₂, $MV_i = 0,266$
- MV_e - molsko razmerje; mol O₂/mol N₂ za suh zrak, meritve pretokov plina brez CO₂

Sedaj lahko zapišemo učinkovitost prenosa kisika za standardne pogoje (ATV M 209E):

$$\alpha OA_h = \left(1 - \frac{MV_i}{MV_i}\right) \cdot \frac{100}{h_e} \cdot \frac{\beta \cdot C_{s,T}}{\beta \cdot C_{s,T} - C} \cdot \frac{C_{ss,20}}{C_{ss,T}} \cdot 1,024^{(20-T)}$$

Kjer pomeni:

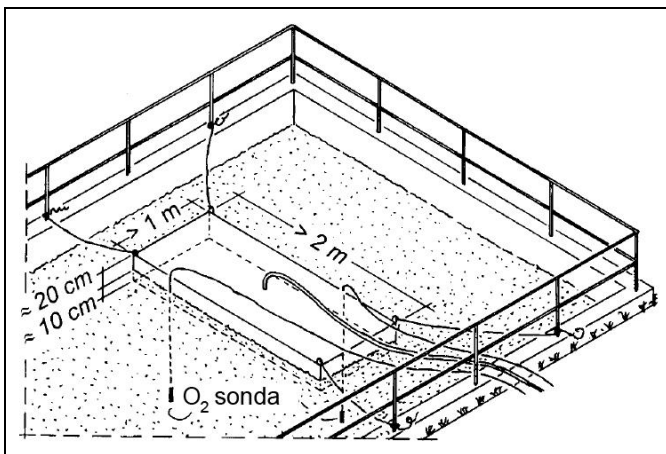
OA_h - učinkovitost prenosa kisika v čisti vodi pri standardnih pogojih glede na globino potopitve difuzorjev [%/m]

Pri izvedbi testa moramo upoštevati atmosferski tlak (ATV M 209E):

$$C_{s,T} = C_{ss,T} \cdot \left(1 + \frac{h_E}{20,7}\right) \cdot \frac{p}{1013}$$

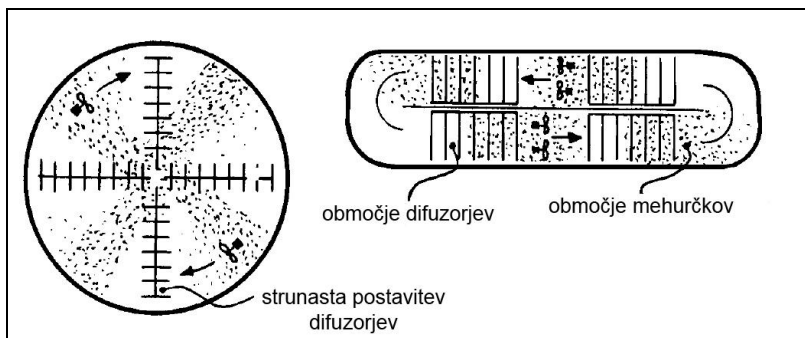
Test se izvaja za območja koncentracije kisika $C \leq 0,5 C_{s,T}$ (ATV M 209E).

Meritve pretokov plinov naj bodo vedno izvedene v bazenih z določenim pretokom zraka in naj bodo izmerjene zelo točno. Število meritev, potrebnih za zadovoljive rezultate, je odvisno od številnih faktorjev. Ne glede na obliko in velikost prezračevalnega bazena je potrebno izvesti vsaj 10 meritev pri isti hitrosti pretoka zraka, na različnih točkah bazena, pri koncentraciji raztopljenega kisika $1,0 \text{ mg/L} \leq C \leq 0,5 \cdot C_{s,T}$ (ATV M 209E).



Slika 23: Zbiralni pokrov za meritve pretokov plinov (ATV M 209E, str. 20).

V oksidacijskih jarkih, kjer so difuzorji postavljeni v »poljih«, se na površini vode pojavljajo območja z mehurčki in območja brez mehurčkov. V takšnih prezračevalnih bazenih je potrebno narediti več meritev v vsakem območju z mehurčki posebej (ATV M 209E).



Slika 24: Prezračevalni bazen okrogle oblike in ovalne oblike z različnimi postavitvami difuzorjev (ATV M 209E).

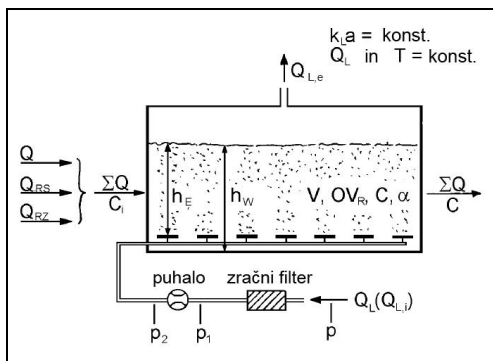
Kot že prej omenjeno, je pretok zraka določene prezračevalne opreme odvisen od:

- nadmorske višine čistilne naprave,
- atmosferskega tlaka v okolici,
- tlačnih izgub dolvodno od puhalu (fitingi, zračni filter, dušilnik), $p - p_1$,
- protitlaka na izstopu puhalu, p_2 (globina difuzorjev, fitting, cevi).

Nominalno delovanje puhalu je vedno podano kot hitrost toka dovodnega zraka, $Q_L \sqrt{h_N^3 / h_2}$, pri suhem zraku, temperaturi $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ in tlaku $p = 1013 \text{ hPa}$ za določen protitlak $p_2 [\text{hPa}]$. Dotok zraka lahko določimo iz karakterističnih krivulj puhalu za dane vrednosti p_1 in p_2 (AVT M 209E).

Pri merjenju pretokov plinov lahko volumetrično hitrost toka zraka, ki jo dovedemo v neki volumen vode pod pokrovom, izračunamo kot (ATV M209E):

$$q_{L,H} = \frac{Q_{L,i}}{A_A \cdot h_w}$$



Slika 25: Shematski prikaz zvez v prezračevalnem bazenu pri prezračevanju z difuzorji (ATV M 209E, str. 41).

Za vsako meritev je mogoče izračunati hitrost volumetričnega prenosa kisika ($\alpha OC_{R,H} [g / m^3 \cdot h]$) za volumen suspenzije aktivnega blata pod pokrovom (ATV M 209E):

$$\alpha OC_{R,H} = \alpha OA_h \cdot q_{L,H} \cdot h_E \cdot \frac{0,299}{100}$$

Če poznamo pretok zraka, ki ga dovajamo v prezračevalni bazen (Q_L), potem lahko izračunamo volumetrično hitrost pretoka zraka (ATV M 209E):

$$q_{L,R} = \frac{Q_L}{V_{BB}}$$

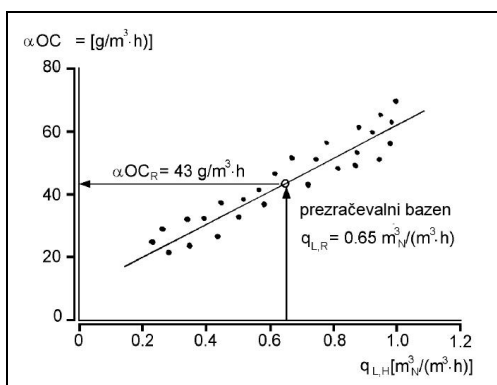
Kjer pomenijo:

$q_{L,R}$ - volumetrična hitrost pretoka zraka v prezračevalni bazen, popravljena za standardne pogoje [$m_N^3 / (m^3 \cdot h)$]

Q_L - hitrost pretoka zraka, ki se nanaša na standardne pogoje ($T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, $p_o = 1013 \text{ hPa}$, suho) [m_N^3 / h]

V_{BB} - volumen prezračevalnega bazena [m^3]

Za serijo meritev pri enakih nastavitvah puhal na grafičnem prikazu $\alpha OC_{R,H}$ in $q_{L,H}$ tvorita ravno linijo. Hitrost volumetričnega prenosa kisika za prezračevalni bazen, $\alpha OC_{R,H} [g / m^3 \cdot h]$, lahko odčitamo iz slike 26.



Slika 26: Možnost določanja meritve pretokov plina (ATV M 209E).

3.7 Standardna učinkovitost prenosa kisika, SOTE

Standardna učinkovitost prenosa kisika je definirana kot frakcija kisika, ki je dovedena v prezračevalni bazen, in je dejansko prenesena ali raztopljena v tekočino pri standardnih pogojih. Gre za zelo pomemben parameter pri prezračevanju (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$SOTE = \frac{SOTR}{w_o}$$

Kjer pomeni:

w_o - hitrost masnega toka kisika [kg/h]

Masna frakcija kisika za suh zrak (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\frac{w_o}{w} = 0,2095 \frac{\text{mol } O_2}{\text{mol zrak}} \times 32 \frac{\text{g } O_2}{\text{mol } O_2} \times \frac{\text{mol zrak}}{28,964 \text{ g zrak}} = 0,2315 \frac{\text{g } O_2}{\text{g zrak}}$$

Sedaj dobimo (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$w_o (\text{kg/h}) = 0,2315 \times 1,293 G_s = 0,30 G_s (m_N^3 / h)$$

Zapis učinkovitosti prenosa kisika pri standardnih pogojih kot funkcija toka zraka (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$SOTE = \frac{SOTR(kg/h)}{0,30G_s(m_N^3/h)}$$

Kjer pomeni:

SOTE – učinkovitost prenosa kisika pri standardnih pogojih [%]

3.8 Učinkovitost prenosa kisika, $OC_{L,h}$ [g/m³ N m] ali OA_h [%/m]

Učinkovitost prenosa kisika, izražena kot g kisika na m³ zraka in m globine difuzorja ($OC_{L,h}$) ali kot % kisika, ki se absorbira na m globine difuzorja (AO_h), uporabljamo za primerjavo prezračevalnih sistemov z difuzorji. Z raziskovanjem je bilo ugotovljeno, da sta $OC_{L,h}$ in AO_h do globine difuzorjev $h_E = 6,0$ do $8,0$ m v veliki meri neodvisna od globine potopitve difuzorjev. Naslednje uporabimo s hitrostjo pretoka dovoda suhega zraka pri temperaturi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in tlaku 1013 hPa (Q_L [m³_N/h]) in pripisano gostoto kisika v zraku, ki znaša $0,299\text{ kg/m}^3$ (ATV M 209E):

$$OC_{L,h} = \frac{OC}{Q_L \cdot h_E} \cdot 1000$$

$$OA_h = \frac{100 \cdot OC}{h_E \cdot (Q_L \cdot 0,299)}$$

Pri dimenzioniranju puhala naj bo temperatura dovodnega zraka $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. V primeru, da dovodni zrak uporabljamo za hlajenje puhala, je potrebno skladno s tem izbrati višjo temperaturo (ATV M 209E).

Tipična učinkovitost prenosa za prezračevanje z velikimi mehurčki znaša od 9 do 13 %. Prezračevala s finimi mehurčki so bolj draga, rabijo čistejši zrak in jih je potrebno redno čistiti, vendar pa je učinkovitost prenosa kisika večja kot pri velikih mehurčkih in znaša od 15 do 40 %. Glede na današnje visoke cene energije je tudi najbolj cenovno učinkovita (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

3.9 Uporaba enačb pri obratovalnih pogojih

Pri obratovalnih pogojih mora hitrost prenosa kisika zadostovati potrebam biomase v prezračevalnem bazenu. Količina raztopljenega kisika v bazenu bo zmeraj stremela h koncentraciji, ki uravnoteži hitrost prenosa glede na potrebe. Enačba za hitrost prenosa pri obratovalnih pogojih je naslednja (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$OTR_f = V \left(\frac{dC_L}{dt} \right)_{\text{obratovanj}} = K_L a \cdot (C_{\infty f}^* - C_L) \cdot V$$

Kjer pomeni:

OTR_f - hitrost prenosa kisika pri obratovalnih pogojih [kg/h]

Razmerje med dejansko hitrostjo prenosa kisika in hitrostjo prenosa pri standardnih pogojih je naslednje (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\frac{OTR_f}{SOTR} = \frac{K_L a \cdot (C_{\infty f}^* - C_L)}{K_L a_{20} \cdot C_{\infty 20}^*}$$

Če upoštevamo prej opisane korekcijske faktorje za koeficient prenosa kisika in mejno nasičeno vrednost, dobimo naslednje razmerje (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$\frac{OTR_f}{SOTR} = \frac{oc_f}{oc} = \frac{AE_f}{SAE} = \frac{OTE_f}{SOTE} = \frac{\alpha \theta^{T-20} (\tau \beta \Omega C_{\infty 20}^* - C_L)}{C_{\infty 20}^*}$$

3.10. SBR proces

SBR je »napolni-in-izprazni« vrsta sistema z aktivnim blatom z enim popolnoma premešanim reaktorjem. Za komunalno čiščenje odpadne vode s stalnim pretokom rabimo vsaj dva prezračevalna bazena/reaktorja. Prvi je v načinu polnjenja, drugi pa gre skozi naslednje stopnje: reakcija, usedanje, izpust in mirovanje. V enem dnevu lahko postopek izvedemo

večkrat. Cikel po navadi traja tri ure, prezračevanje dve uri, pol ure poteka usedanje, prav tako izpust. Proces je fleksibilen in z njim lahko odstranimo dušik in fosfor. Pri SBR sistemu nimamo povratnega blata. Uporablja se za čiščenje odpadnih vod pretoka do 220 l/s in tudi čiščenje vrste industrijskih odpadnih vod (Panjan, 2000).

Pri načinu polnjenja v prezračevalnem bazenu napolnimo s surovo odpadno vodo ali primarnim vtokom ter substrati. Nivo tekočine v prezračevalnem bazenu se dvigne od 75 % kapacitete (na koncu prazne periode) do 100 % kapacitete. Če uporabljamo dva prezračevalna bazena, lahko proces polnjenja traja okrog 50 % časa celotnega cikla. Med polnjenjem je reaktor premešan ali premešan in prezračevan z namenom, da pospeši biološke reakcije v odpadni vodi.

V periodi reakcije biomasa v kontroliranih okolijskih pogojih porabi substrat. V stopnji usedanja se trdni delci pri mirnih pogojih ločijo od tekočine. Dobimo razbistren supernatant, ki ga lahko izločimo kot iztok. V fazi izpusta odstranimo razbistren iztok. Lahko uporabimo različne mehanizme. Najbolj uporabljan je plavajoči preliv ali prilagodljiv preliv. Perioda mirovanja se uporablja pri sistemih z več prezračevalnimi bazeni, saj na takšen način zagotovimo čas za en reaktor, da dokonča fazo polnjenja, preden preidemo na drugo enoto. Mirovanje ni nujna faza, zato jo včasih izpustimo (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

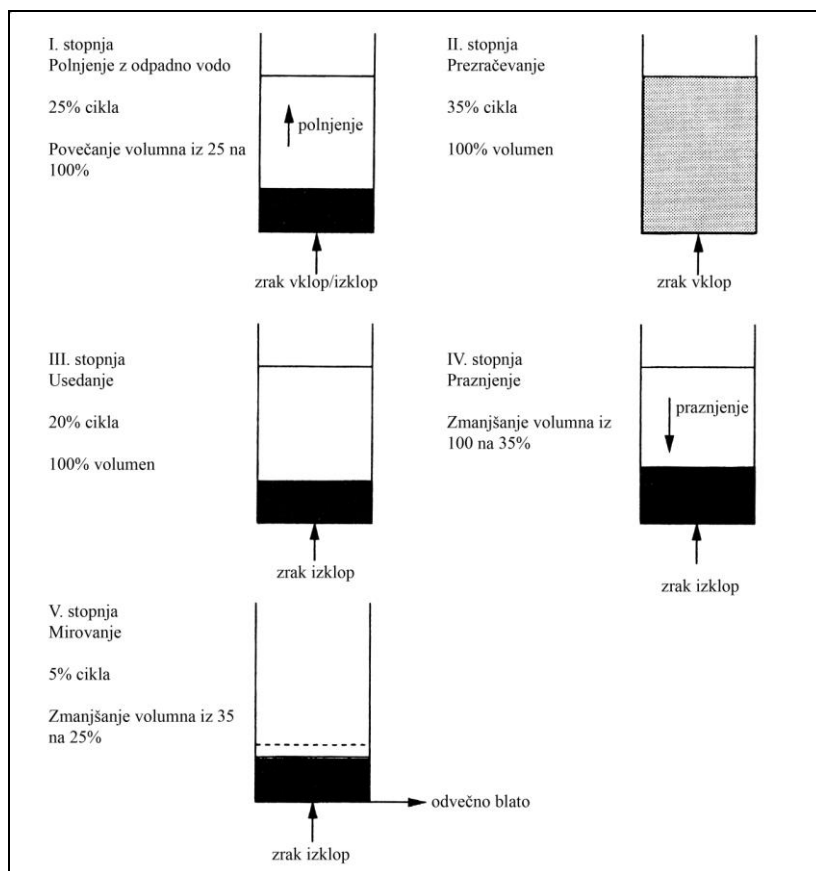
Prednosti SBR procesa:

- fleksibilnost in preprosto upravljanje,
- trdni delci suspenzije aktivnega blata ne morejo biti izprani z veliko hidravlično obremenitvijo (hydraulic surges) zaradi izenačevalca toka,
- usedanje pri mirnih pogojih omogoča, da je koncentracija totalno suspendiranih trdnih delcev (TSS) na iztoku nizka,
- lahko dosežemo od 5 do 8 mg/l TN.

Omejitve SBR procesa:

- potrebnih je več enot za zanesljivo upravljanje, razen če lahko prezračevalni sistem vzdržujemo brez drenaže prezračevalnega bazena,
- bolj kompleksen sistem za dimenzioniranje,
- kakovost iztoka je odvisna od spretnosti prelivanja,

- lahko rabi izenačevalec batch iztoka pred filtracijo in dezinfekcijo.



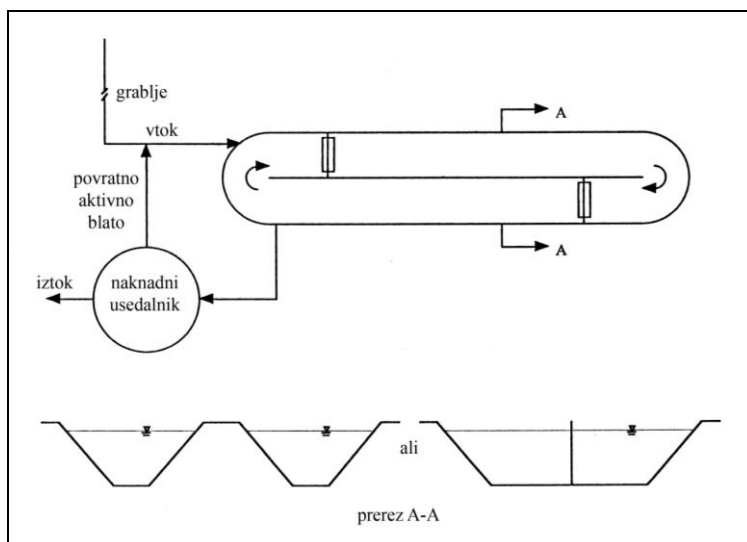
Slika 27: Šaržni biološki reaktor (Gray, 2004).

3.11 Oksidacijski jarek

V klasičnih oksidacijskih jarkih s pomočjo krtač, rotorjev ali drugih mehanskih prezračevalnih naprav ter črpalne opreme, nameščene na več točkah vzdolž kroženja toka, poganjamo odpadno vodo in suspenzijo aktivnega blata po ovalnem jarku. Ko odpadna voda gre čez prezračevalo, koncentracija raztopljenega kisika zelo hitro naraste, vendar pada, ko tok kroži po ovalu. Oksidacijski jarki delujejo v načinu podaljšanega prezračevanja z dolгим hidravličnim časom zadrževanja (24 ur) in dolгим časom zadrževanja trdnih snovi (od 20 do 30 dni). Doseganje nitrifikacije in denitrifikacije je odvisno od relativne lokacije vtoka in odtoka odpadne vode, povratnega blata in prezračevalne opreme. Za odstranitev BPK in nitrifikacijo odpadna voda vstopa v oksidacijski jarek blizu prezračevala, iztok odpadne vode pa je gorvodno od dotoka.

Na oksidacijske jarko lahko gledamo kot popolnoma premešane reaktorje, čeprav imajo, ko tok potuje po jarku, tudi nekatere karakteristike cevni reaktorjev. Vzrok za štetje k popolnoma premešanim sistemom je v tem, da je koncentracija substratov na vtoku v oksidacijski jarek z močnim tokom suspenzije aktivnega blata nemudoma razredčena na vrednost, ki je enaka iztoku iz biološkega reaktorja.

Globina oksidacijskih jarkov se giblje med 0,9 in 5,5 m, hitrosti v kanalu pa od 0,24 do 0,37 m/s. Nujno je posvetovanje z dobavitelji individualne opreme, saj le tako lahko zagotovimo, da bo oblika oksidacijskega jarka kompatibilna z napravami za prezračevanje in mešanje. Z mehanskimi krtačami, površinskimi turbinami in jet napravami odpadno vodo prezračujemo in vzdržujemo v gibanju (Vesilind, 2003).



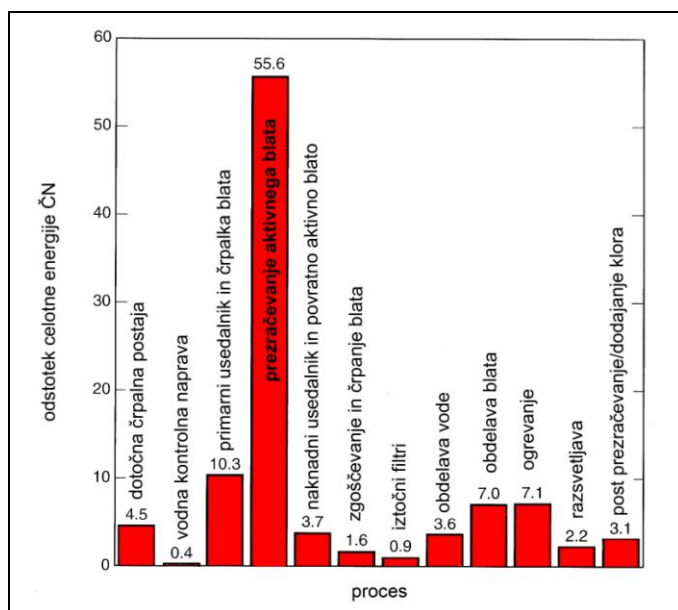
Slika 28: Shematski prikaz oksidacijskega jarka (Shundar Lin, 2004).

Čas prezračevanja znaša od 8 do 36 ur, starost blata (SRT) pa od 20 do 30 dni (WEF in ASCE, 1992 v Shundar Lin). Obremenitev z BPK_5 je nizka in se giblje od 0,08 do 0,48 kg $BPK_5/m^3/dan$. Razmerja f/m so od 0,05 do 0,30 na dan, koncentracija MLSS pa od 1.500 do 5.000 mg/L. Aktivno blato v oksidacijskem jarku odstrani organske snovi in jih spremeni v celično protoplazmo. V oksidacijskem jarku odstranimo od 85 do 95 % BPK_5 . V sistemu pride tudi do nitrifikacije. V zimskem času lahko površinske prezračevalnike pokrije led, zato je potrebno omogočiti ogrevanje na kritičnih mestih (Shundar Lin, 2001).

3.12 Energijska učinkovitost čiščenja odpadne vode

Poraba energije na čistilni napravi znaša okrog 30 % obratovalnih stroškov celotnega proračuna čistilne naprave. V naslednjih 20 do 30 letih se bodo potrebe po elektriki za čiščenje odpadne vode zvišale za dodatnih 30 do 40 %. V obdobju, ko prihaja do nihanj pri dobavi goriv in ceni energije ter do višjih nivojev čiščenja, ki porabijo več energije, je načrtovanje in obratovanje čistilnih naprav osredotočeno na izboljšanje učinkovitosti izrabe električne energije in na zmanjšanje stroškov čiščenja. Pri konvencionalnem čiščenju se največ energije porabi za (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003):

- biološko čiščenje s procesi aktivnega blata (prezračevanje) ali za precejalnike,
- črpalne sisteme,
- opremo za obdelavo blata.



Slika 29: Porazdelitev rabe energije na tipični čistilni napravi z aktivnim blatom (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

V splošnem je ena izmed izhodiščnih nalog pri presojanju ocena največjih porabnikov energije, kot so prezračevanje pri procesih z aktivnim blatom in črpalni sistem pri čistilnih napravah s precejalniki. Okrog 60 % celotne energije na čistilni napravi z aktivnim blatom se porabi za prezračevanje, zato je potrebno z ukrepi pri vodenju doseči zmanjšanje porabe

energije in stroškov (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003). Rosso in Stenstrom (2007) navajata, da se za prezračevanje porabi od 40 do 75 % celotne energije.

Napredne čistilne naprave potrebujejo še večje količine električne energije. Naprave z biološkim čiščenjem za odstranjevanje dušika in filtracijo porabijo od 30 do 50 % več elektrike za prezračevanje, črpanje in obdelavo blata, kot konvencionalne naprave z aktivnim blatom (Burton v Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Z uvedbo novih tehnologij se bodo spremenile potrebe po energiji. Magnituda potencialnih vplivov je podana v tabeli 10. Vplivi se lahko vidijo v zmanjšanju energije zaradi bolj učinkovite opreme ali sistemov, v povečanju energije zaradi potreb po spremembi kapacitete ČN ali dodatne stopnje čiščenja v novih tehnologijah, katerih delovanje temelji na električni energiji. To so na primer membransko čiščenje, UV dezinfekcija in avtotermalno aerobno gnitje (ATAD v Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Tabela 10: Energijski vpliv novih tehnologij na čiščenje odpadne vode (Burton v Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Tehnologija	Energijski vpliv	
	kWh/Mgal	MJ/1.000 m ³
Difuzorji z majhnimi porami	-125 do -150	-120 do -140
Nadzorni sistem za koncentracijo raztopljenega kisika (v primerjavi z ročno kontrolo)	-180 do -220	-170 do -210
Nadzorni sistem za puhala	-50 do -150	-48 do -95
Energijsko učinkovita puhala za prezračevanje (v primerjavi s puhali z dovodno vodilno lopato)	-100 do -150	-95 do -140

Temelj energijske učinkovitosti katerega koli aerobnega procesa z aktivnim blatom je zmožnost prilagoditve količine kisika glede na nihanja in spremembe v toku in obremenitve z BPK. Z vstopnim dušenjem, prilagoditvijo vstopnih ventilov ali izpustom difuzorjev in variabilnim frekvenčnim pogonom spremenimo količino izstopnega zraka iz centrifugalnih

puhalnikov. Koncentracija kisika pri procesih z aktivnim blatom se po navadi giblje med 1,0 in 1,5 mg/l. Za učinkovito obratovanje in kontrolo je nujno, da opravljamo točne meritve raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Čistilne naprave, na katerih potekata tudi nitrifikacija in denitrifikacija, imajo izboljšano učinkovitost prenosa kisika (OTE), kar posledično zmanjša potrebe po energiji (Rosso, Stenstrom, 2005 v Rosso, Stenstrom, 2007). Izboljšan prenos je posledica večjega srednjega zadrževalnega časa (MCRT), ki je povezan s povečanimi faktorji (od 0,2 do 0,5 za konvencionalno čiščenje, od 0,4 do 0,7 samo za nitrifikacijo ter od 0,5 do 0,75 za nitrifikacijo in denitrifikacijo), kar pa s strani inženirjev ni vedno upoštevano. Prednosti selektorjev so v odstranjevanju frakcij ogljikovih obremenitev, kot so na primer hitro biološko razgradljiv KPK (rbKPK), ki je delno sestavljen iz površinsko aktivnih snovi, ki jih po navadi izločimo kot maščobne kisline, olja, mila in detergenti. Površinsko aktivne snovi zaradi njihove amfifilne narave se nabirajo na mejni plasti dvigajočega mehurčka med zrakom in vodo in zmanjšujejo učinkovitost prenosa. Odstranjevanje rbKPK lahko izboljša učinkovitost prenosa kisika in zmanjša obratovalne stroške za prezračevanje (Rosso, Stenstrom, 2007).

3.13 Kontrolni sistemi na ČN

Tudi z največjo voljo in naporji je nemogoče v celoti odpraviti motnje v delovanju. Da bi ohranjali optimalno učinkovitost in zanesljivost procesa, je zaradi motenj potrebno kompenzirati in spremeniti nekatere parametre v procesu. Parametri v procesu, ki jih vzdržujemo na določenih vrednostih, se imenujejo nadzorovani parametri. Parametri v procesu, ki jih lahko za vzdrževanje kontroliranih parametrov direktno spremenimo na določeno vrednost, se imenujejo obratovalni parametri (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

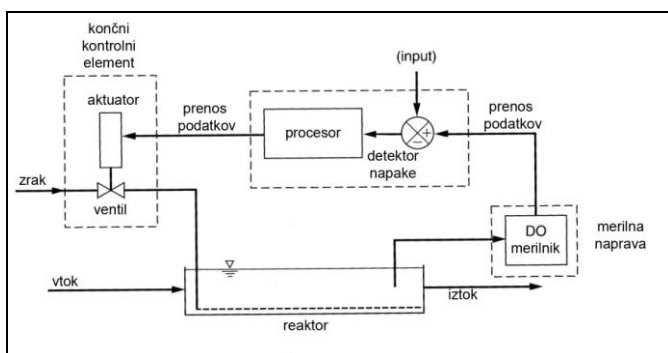
Tabela 11 prikazuje nadzorovane in obratovalne parametre v procesih z aktivnim blatom. Tako na primer lahko koncentracijo kisika do stanja nasičenosti v prezračevalnem bazenu spreminjamo s hitrostjo dobave kisika oziroma s hitrostjo toka zraka v prezračevalni bazen.

Tabela 11: Tipični primeri nadzorovanih in obratovalnih parametrov (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Proces	Nadzorovan parameter	Obratovalni parameter
Primarno čiščenje in peskolov	Globina blata	Hitrost odstranjevanja blata
Aktivno blato	Koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu	Hitrost dobave kisika
	Globina blata v usedalniku	Hitrost pretoka povratnega blata
	Zadrževalni čas trdnih snovi	Hitrost odstranjevanja blata
Kloriranje	Ostanek klora	Doziranje klora
Flotacija	Razmerje zrak/trdne snovi	Tok zraka
	TSS v supernatantu	Tok polimerov
Gravitacijsko zgoščevanje blata	Odstotek trdnih snovi	Obremenitev s trdnimi snovmi
	Odstotek zajema	Hitrost toka polimerov

3.13.1 Struktura kontrolnega sistema

Tipična struktura kontrolnega sistema je izražena kot kontrolna zanka in zajema inštrument za vnesene meritve, kontrolor za izračunanje dejanja končnega kontrolnega elementa, končni kontrolni element, ki implementira kontrolno dejanje in signalni prenosnik za komunikacijo med ostalimi elementi. Na ČN se sistemi s kontrolno zanko uporabljajo za kontrolo toka, tlaka, nivoja vode, koncentracijo prisotnih snovi, temperature in ostalih obratovalnih nihanj (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).



Slika 30: Osnovna struktura in komponente kontrolne zanke, uporabljene za kontrolo raztopljenega kisika pri biološkem čiščenju z aktivnim blatom (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

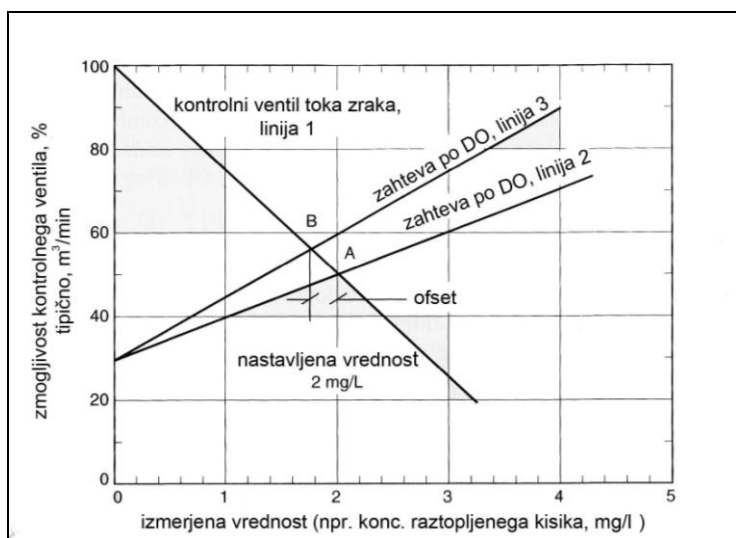
3.13.2 Prednosti avtomatske kontrole

Glede na spremljanje obratovanj čistilnih naprav v preteklosti in pri tem zabeležene podatke sistemi z avtomatsko kontrolo zmanjšajo delovno obremenitev in omogočajo bolj točno kontrolo parametrov v procesih. Vendar so se v preteklosti lahko pojavili resni problemi, če je kakšen element (instrument) avtomatskega sistema za kontrolo odpovedal, saj kontrolni algoritem ni prepoznal takšne napake in sistem se ni primerno odzval. Z razvojem računalnikov in programske opreme so moderni kontrolni sistemi sposobni delovati učinkovito tudi v primerih, če katera komponenta odpove. Ostale prednosti avtomatske kontrole so še manjše število zaposlenih, nespremljanje izmen, avtomatsko logiranje podatkov in shranjevanje (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

3.13.3 Kontrolni algoritmi

Obstaja več metodologij za računanje obratovalnih spremenljivk pri sistemih z avtomatsko kontrolo. Razdelimo jih lahko v tri temeljne vrste kontrol:

- feedback,
- feed-forward,
- kombinacija feed-forward in feedback.



Slika 31: Shematski prikaz proporcionalnega nadzora za raztopljen kisik (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Na sliki 31 je prikazan proporcionalni nadzor (feedback kontrola) nad raztopljenim kisikom v prezračevalnem bazenu. Linija 1 predstavlja obseg potrebnega signala za tok zraka. Predvidevamo, da je nastavljena vrednost 2 mg/l raztopljenega kisika dosežena v točki A. Linija 2, ki predstavlja zvezo med potrebnim pretokom zraka in raztopljenim kisikom, seka kontrolno linijo 1. Ko se obremenitev z BPK poveča, se zveza med pretokom zraka in raztopljenim kisikom spremeni, kar predstavlja linija 3. Novim potrebam po zraku bomo zadovoljili v točki B in sistem bo dosegel novo ravnotežje. Razliko med novo vrednostjo nadzorovane spremenljivke in nastavljeno vrednostjo pri ravnotežnih pogojih imenujemo offset (Tschobanoglous, Burton, Stensel, 2003).

Vgradnja avtomatske kontrole raztopljenega kisika lahko prepreči premočno prezračevanje, pa tudi prešibko prezračevanje nekega sistema. S tem pri prezračevanju prihranimo energijo in izboljšamo kontrolni sistem.

4 NAČINI PREZRAČEVANJA

Glavne naloge prezračevanja so:

- zagotoviti zadostno in trajno oskrbo aerobnih mikroorganizmov s kisikom,
- obdržati premešano odpadno vodo v suspenziji (lebdečem stanju),
- mešanje prihajajoče odpadne vode in mešanje tekočine (odpadne vode) za zagotovitev dobrega stika mikroorganizmov s hranljivimi snovmi,
- odstranjevanje presežka raztopljenega CO₂, ki je rezultat oksidacije organskih snovi.

Vse načine prezračevanja lahko razdelimo na:

- vnos zraka pod pritiskom difuzorjev;
- globoko prezračevanje s puhalnikom in kompresorjem;
- površinsko in mehansko prezračevanje:
 - površinsko prezračevanje s prezračevali pri nizkih hitrostih,
 - prezračevanje s pomočjo motorja pri veliki hitrosti,
 - horizontalni rotorji,
 - potopljeni turbinski prezračevalniki,
 - prezračevanje s pomočjo aspiratorja - priprava za vsesavanje zraka;
- prezračevanje s čistim kisikom:
 - zaprti sistem - reaktor s kisikovo atmosfero,
 - odprti sistem.

4.1 Vnos zraka s stisnjenim zrakom

Pri difuznem prezračevanju po vsej površini dna vpihujemo zrak pod pritiskom ali s kisikom obogaten zrak. Pri tem se pojavijo toki mehurčkov, ki povzročijo kroženje in mešanje odpadne vode, med zračnim mehurčkom in obkrožujočo odpadno vodo pa se vrši prenos kisika. Turbulenca, ki jo povzročijo zračni mehurčki na površini vode, pospeši stopnjevanje prenosa kisika. Glede na velikost mehurčka ločimo:

- prezračevanje z drobnimi mehurčki,

- prezračevanje s srednjimi mehurčki,
- prezračevanje z velikimi mehurčki.

Premer drobnih mehurčkov je manjši od 1,5 mm, premer velikih mehurčkov je večji od 3,0 mm, medtem ko se premer srednjih mehurčkov giblje med 1,5 in 3,0 mm. Bolj drobni so mehurčki, večji je med ploskovni prostor med zrakom in vodo na enoto volumna dobavljenega zraka, kar pripomore k bolj učinkovitemu prenosu kisika v tekočino (odpadno vodo). Odpadna voda je premešana zaradi delovanja mehurčkov. Torej, večji je zračni mehurček, večji je potreben volumen zraka na kg BPK, ki ga odstranimo v prezračevalnem bazenu (Gray, 2004), (Panjan, 2005).

Tabela 12: Volumen potrebnega zraka in učinkovitost prenosa kisika, ki se spreminja glede na velikost zračnega mehurčka pri prezračevanju z difuzorji (Gray, 2004).

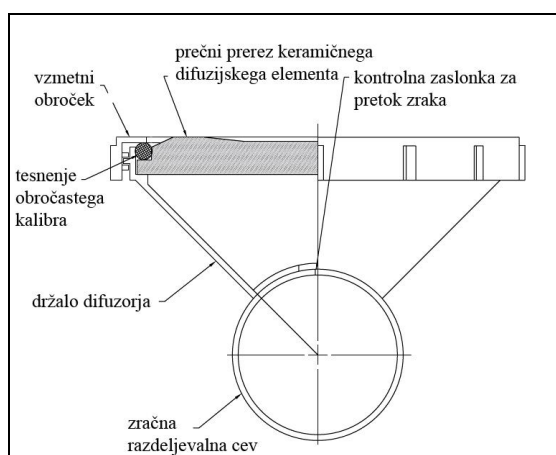
Velikost mehurčka [mm]	Volumen potrebnega zraka [m³] na kg BPK, ki je bil odstranjen	Učinkovitost prenosa kisika [%]
Drobni mehurčki (1,5 mm)	36-72	11
Srednji mehurčki (1,5 - 3,0 mm)	60-120	6,5
Veliki mehurčki (3,0 mm)	70-140	5,5

Pri prezračevanju zraka pod pritiskom (difuzorji) uporabljamo več vrst difuzorjev. Porozni difuzorji imajo različne oblike. Najbolj pogosto uporabljeni so kupole (dome), diski, membrane in palice. V preteklosti so bile zelo popularne plošče, ampak se jih zaradi visoke cene montiranja in težavnega vzdrževanja ne uporablja več veliko. Glede na fizikalne karakteristike prezračevalne opreme so definirane tri kategorije difuzorjev:

- porozni ali difuzorji z majhnimi porami (luknjicami),
- neporozni difuzorji,
- ostale difuzijske naprave, kot so prezračevanje s curkom (jet aeration), prezračevanje z aspiracijo (aspirating aerators) in U-cev prezračevanje (U-tube aerators).

Najbolj pogosto uporabljeni materiali, iz katerih so narejeni difuzorjih, so keramika, porozna plastika in perforirane membrane.

Keramika je najstarejši in najbolj pogost porozni material, ki se ga uporablja pri prezračevanju odpadne vode. Zrak pride na plano na zunanji strani por, velikost por, površinska napetost in hitrost zračnega toka pa ustvarita karakteristično velikost mehurčka. Keramični materiali pogosto vsebujejo aluminij, aluminijev silikat in kremen (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

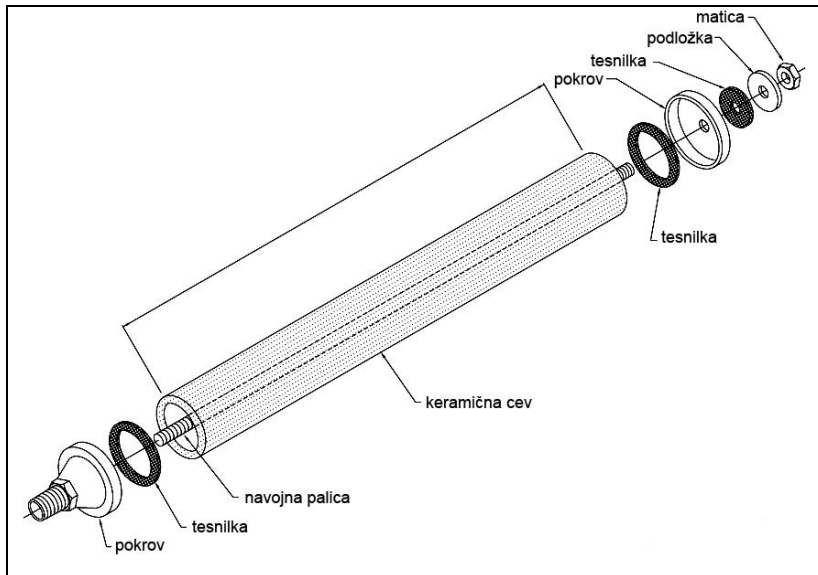


Slika 32: Keramični disk (Sanitaire)

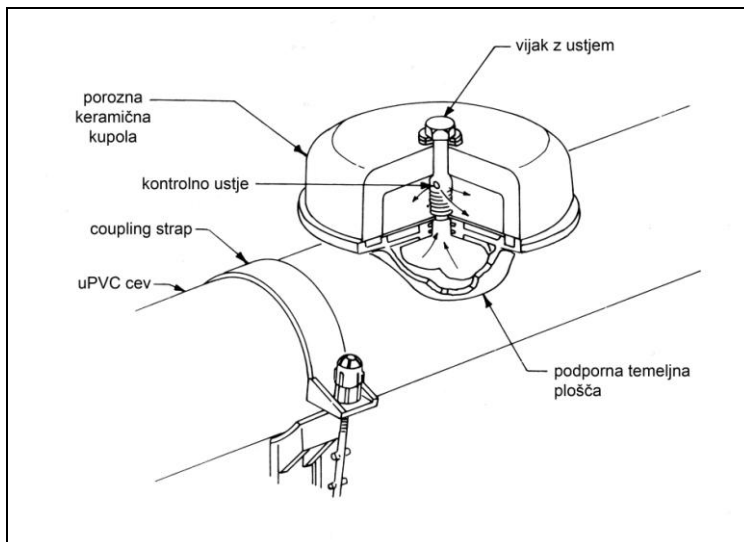
Toga porozna plastika je narejena iz nekaj termoplastičnih polimerov, vključno s polietilenom, PVDF - polyvinylidenefluoridom, EVA - ethylen/vinylacetatom, SAN - styrol-acrylnitrilom in PTFE - polytetrafluorethlenom (EPA v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002). Za prezračevanje vode najbolj pogosto uporabljamo material HDPE - polyethylene in SAN. V primerjavi s keramičnim materialom je plastični material lažji in cenejši, vendar v ZDA ni tako priljubljen, saj je kontrola kakovosti pomanjkljiva, konkurenco na področju cen pa predstavljajo preostali difuzorji z drobnimi porami (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Membranski difuzorji se od keramičnih difuzorjev in difuzorjev iz toge porozne plastike razlikujejo po tem, da nimajo mreže medsebojnih prehodov za prenos zraka. Namesto tega se uporabljajo mehanski načini, s pomočjo katerih v membranskem materialu ustvarimo vnaprej izbrane majhne odprtine, ki skozi material omogočajo pretok zraka. Večina perforiranih membran je oblikovanih tako, da se, ko ni pretoka zraka oziroma je pretok zraka prekinjen,

ustvari zapora med membrano in podporno ploščo. S tem se prepreči ali pa vsaj minimizira povratni tok odpadne vode v prezračevalni sistem (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 332: Keramična cev (Sanitaire).



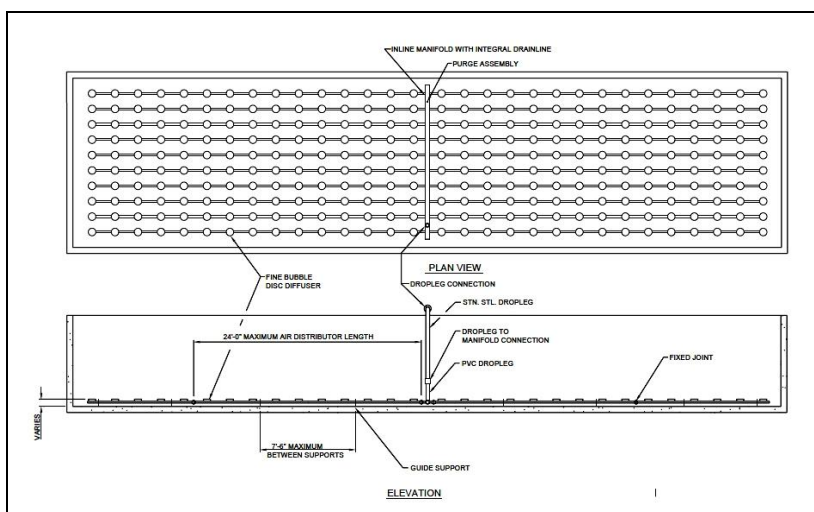
Slika 34: Keramična kupola (Gray, 2004, str. 506).

Pri neporoznih difuzorjih zrak vpihujemo skozi večje luknjice kot pri poroznih difuzorjih. Poznali so jih že leta 1893, na trgu pa se dobi več različnih modelov, ki se razlikujejo po

obliki in materialu. V primerjavi s poroznimi difuzorji je pri neporoznih difuzorjih velikost zračnega mehurčka večja, posledično pa imajo zaradi tega nižjo učinkovitost prezračevanja. Po drugi strani pa z njimi nimamo toliko stroškov, vzdrževanje pa je manj zahtevno kot pri poroznih difuzorjih.

Pri dimenzioniranju prezračevalnega sistema je potrebno upoštevati geometrijo bazena, globino potopitve difuzorjev ter gostoto in razporeditev difuzorjev, saj vse to vpliva na delovanje sistema. Danes uporabljamo naslednje razporeditve (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

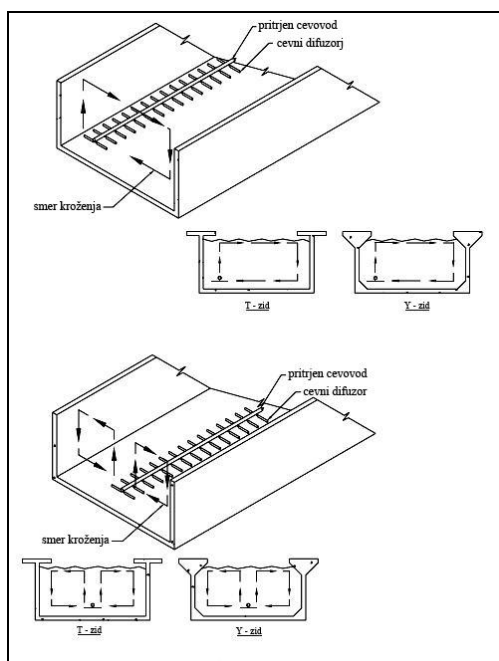
- enojno spiralno kroženje (single spiral roll),
- center (Mid-Width),
- dvojno spiralno kroženje,
- prečno kroženje (Cross roll),
- celotno pokritje tal.



Slika 35: Mrežasta razporeditev disk difuzorjev (Sanitaire).

Za mrežasto razporeditev po celotnih tleh je značilno, da je dno v celoti prekrito z difuzorji. Difuzorji s svojo lego ne povzročajo nekega vzorca kroženja.

Pri enojnem spiralnem kroženju imamo dobro premešanje prostornine, ampak slab prenos kisika. Da bi ga izboljšali, so razvili dvojno spiralno kroženje, ki ohranja dobro mešanje, nizke stroške gradnje in lahko dostopnost do difuzorjev.



Slika 36: Enojno in dvojno spiralno kroženje (Sanitaire).

4.1.1 Delovanje prezračevanja z difuzorji

Enačba $\frac{dC_L}{dt} = K_L a \cdot (C_\infty^* - C_L)$ je osnova za opis prenosa kisika v vodo. Trije temeljni parametri, ki opisujejo prenos kisika za določeni prezračevalni sistem, so $K_L a$, C_∞^* in C_L . Pri vrednotenju danega prezračevalnega sistema bo število bistvenih parametrov vplivalo na hitrosti prenosa kisika in učinkovitost, vključno z diagramom pretoka, obliko delovanja procesa, uporabljeno metodologije kontrole in vzdrževanjem opreme. Za prezračevanje z difuzorji so ti faktorji (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

- vrsta difuzorja,
- postavitve difuzorjev,
- gostota difuzorjev,
- hitrost toka zraka na enoto površine,
- geometrija prezračevalnega bazena in globina potopitve difuzorjev,
- karakteristike odpadne vode in okolja,
- vrsta procesa in režim toka,

- obremenitev procesa,
- kontrola raztopljenega kisika,
- stopnja obraščanja, luščenja in kvarjenja,
- mehanska integriteta prezračevalnega sistema.

Pri prezračevanju z difuzorji se zračni mehurčki, ki se ustvarijo pri luknjici difuzorja blizu dna prezračevalnega bazena, odtrgajo in skozi vodo potujejo proti površju vode. Ko mehurčki začnejo izhajati iz luknjice, se mejna plast zrak - voda nepretrgoma ustvarja in povzroča visoko hitrost površinskega obnavljanja in posledično visoko hitrost prenosa. Ko se mehurček odtrga od odprtine, doseže največjo hitrost dviganja, efektivna debelina mejne plasti v vodi ali hitrost površinskega obnavljanja pa postaneta konstantni. Vrtinčasti tokovi, ki se pojavijo v prezračevalnem bazenu, vplivajo na hitrosti dviganja mehurčka, ki so vsota končne hitrosti mehurčka v_s , in na hitrost tekočine za dvigajoče pline - tekočina tokove v_w . Ko mehurčki izbruhnejo na površje, se film, nasičen s kisikom, prelije na površinske plasti. Nekaj površinskega prezračevanja se zgodi tudi zaradi površinske turbulence (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Velikost mehurčka v vodi je odvisna od premera odprtine na difuzorju, površinske napetosti in gostote tekočine pri nizkih tokih zraka (manj kot 100 mehurčkov na minuto). Pri prezračevanju odpadne vode so hitrosti toka zraka večje, velikost mehurčka pa je funkcija hitrosti toka plina G_s , medtem ko je pogostost tvorjenja konstanta, ki ustreza naslednjemu empiričnemu izrazu (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002):

$$d_b = C_1 \cdot G_s^n$$

Kjer pomeni:

d_b - premer mehurčka [mm]

C_1 in n sta empirični konstanti. Za porozne difuzorje (majhne mehurčke), kjer je velikost luknjice med 0,1 in 0,3 mm, je vrednost n manjša od 1, premer mehurčkov pa se giblje med

1,5 in 3,0 mm. Za grobe mehurčke se domneva, da z večanjem toka zraka turbulenca razdeli večje mehurčke v manjše (Eckenfelder v Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Tabela 13: Učinkovitost prenosa kisika v čisti vodi (SOTE) za porozne cevi (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

		Hitrost toka zraka	SOTE (%) za globino			
Vrsta	Postavitev	$(m_N^3 / h / enoto)$	2,1 m	3,0 m	4,6 m	6,1 m
Porozna plastika	Mreža	3,8 - 6,3	-	-	28 - 32	-
	Dvojno spiralno vrtenje	4,7 - 11,0	-	10 - 16	16 - 24	22 - 32
	Dvojno spiralno vrtenje	14,1 - 17,3	-	10 - 14	15 - 17	21 - 26
	Spiralno vrtenje	3,1 - 11,0	-	12 - 15	15 - 20	22 - 25
	Spiralno vrtenje	12,6 - 18,8	-	10 - 15	10 - 17	22
Perforirane membrane	Mreža	4,7	-	-	-	45
	Mreža	3,0 - 10,0	-	27 - 28	-	-
	Spiralno vrtenje	0,8 - 10,0	13 - 19	17 - 21	26 - 35	-
	Dvojno spiralno vrtenje	0,8 - 18,8	10 - 20	15 - 21	21 - 36	27 - 36

Velikost in oblika mehurčkov na več načinov vplivata na masni prenos kisika. Razmerje med volumnom in površino posameznega mehurčka se bo zmanjšalo s povečanjem velikosti mehurčka in bo direktno vplivalo na koeficient masnega prenosa $K_L a$. Zadrževalni čas mehurčka v prezračevalnem bazenu je odvisen od oblike in velikosti mehurčka. Največja hitrost dviganja mehurčka v_g in njegova oblika sta povezani z Reynoldsovim številom. Pri $Re < 300$ so mehurčki sferične oblike, njihovo dviganje pa je spiralno ali pa premočrtno (Aiba et al., v Mueller, Boyle, Pöpel). Pri $300 < Re < 400$ je oblika mehurčkov elipsoidna, dvigajo pa se premočrtno ali gugalno (rocking motion). Obliko sferičnih klobukov mehurčki dobijo, ko je $Re > 4000$. Celotna površina mehurčkov v bazenu je produkt ločene površine mehurčka v času t in distribucijskega zadrževalnega časa mehurčka. Celotno območje površine plina v bazenu se zmanjša z naraščanjem hitrosti mehurčka (Mueller, Boyle, Pöpel,

2002). Tipične vrednosti za standardno učinkovitost prenosa kisika (SOTE) in hitrost toka zraka za različne vrste difuzorjev so podane tabelah v 13 in 14.

Tabela 14: Učinkovitost prenosa kisika v čisti vodi za različne vrste difuzorjev (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).

Vrsta difuzorja in postavitev	Hitrost toka zraka ($m_N^3 / h / difuzor$)	SOTE (%) pri globini difuzorjev 4,6 m
Keramični disk - mreža	0,6 - 5,3	25 - 40
Keramične kupole - mreža	0,8 - 3,9	27 - 39
Porozni plastični diski - mreža	0,9 - 5,5	24 - 35
Perforirani membranski diski - mreža	0,8 - 3,9	16 - 38
Cevi iz rigidne porozne plastike		
Mreža	3,8 - 6,2	28 - 32
Dvojno spiralno vrtenje	4,7 - 17,3	17 - 28
Enojno spiralno vrtenje	3,1 - 18,8	13 - 25
Perforirane membranske cevi		
Mreža	1,6 - 6,2	22 - 29
Srednja širina	3,1 - 9,4	16 - 19
Srednja širina	3,1 - 18,8	21 - 31
Enojno spiralno vrtenje	3,1 - 9,4	15 - 19

4.2 Mehanski prezračevalniki

Mehanske prezračevalnike lahko razdelimo v dve skupini, ki temeljita na načrtovanju in obratovalnih značilnostih: prezračevala z vertikalno osjo in prezračevala s horizontalno osjo. Obe skupini lahko razdelimo na površinska in potopljena prezračevala. Pri površinskih prezračevalnikih izkoriščamo kisik iz atmosfere, prav tako pri nekaterih potopljenih prezračevalnikih. Obstajajo pa tudi takšni potopljene prezračevalniki, kjer dovajamo čisti kisik na dnu prezračevalnega bazena. V vseh primerih s pomočjo črpalke ali agitatorja vsebino prezračevalnega bazena vzdržujemo v mešanju (Panjan, 2005).

5 PREZRAČEVANJE NA CČN LJUTOMER IN MURSKA SOBOTA

5.1 Centralna čistilna naprava v Ljutomeru

CČN Ljutomer je bila zgrajena leta 2005. Komunalno stanovanjsko podjetje Ljutomer d. o. o. izvaja gospodarsko javno službo odvajanja in čiščenja komunalnih ter padavinskih odpadnih vod na področju občin Ljutomer, Križevci, Veržej in Sveti Jurij ob Ščavnici.

Dejavnost službe odvajanja in čiščenja odpadne vode obsega (www.ksp-ljutomer.si):

- vzdrževanje in upravljanje čistilnih naprav,
- vzdrževanje in upravljanje pripadajočega kanalizacijskega sistema z vsemi objekti in napravami,
- praznjenje greznic in čiščenje grezničnih gošč,
- visokotlačno čiščenje kanalizacij in zamašenih cevovodov,
- izvajanje kanalizacijskih cevovodov in hišnih priključkov,
- izdaja projektnih pogojev, soglasij, smernic in mnenj za priključitev na javno kanalizacijo
- vodenje vseh evidenc, ki jih zahteva Pravilnik o odvajanju in čiščenju komunalne odpadne in padavinske vode (Ur. l. RS, št. 105/02).

Prispevno področje Čistilne naprave Ljutomer obsega občino Ljutomer ter občino Križevci. Sem sodijo mesto Ljutomer in naselja Noršinci, Stročja vas, Podgradje, Šalinci, Babinci, Mota, Cven, Spodnji Kamenščak, Radomerje, Križevci pri Ljutomeru, Vučja vas, Zasadi, Bučecovci, Dobrava, Stara Nova vas, Iljaševci, Križevci, Boreci, Ključarovci in Lukavci. Potrebno je poudariti, da vsa naselja še niso priključena na čistilno napravo.

Obstoječi sistem kanalizacije v Ljutomeru je izveden kot mešani sistem. V naseljih Stročja vas, Podgradje, Mota, Cven, Spodnji Kamenščak, Noršinci, Babinci in Šalinci je predvidena gradnja ločenega kanalizacijskega sistema. V občini Križevci še ni zgrajena kanalizacija. Izveden bo sistem ločene kanalizacije v kombinaciji gravitacijskih in tlačnih kanalov in potrebnih črpališč. Na prispevnem območju ČN Ljutomer je tudi nekaj industrijskih obratov s tehnološkimi odpadnimi vodami. To so predvsem usnjarna, Mlekopromet (zbiranje in

predelava mleka), Ljutomerčan (vinogradništvo, predelava grozdja, kletarjenje, stekleničenje) ter Krka Ljutomer (farmacija).

Kapaciteta ČN Ljutomer znaša 23.000 PE. Odvodnik očiščene odpadne vode je reka Ščavnica, ki sodi med manjše vodotoke z zelo spremenljiv pretokom. Nizek vodostaj se običajno pojavlja v zimskem in poletnem obdobju. Reka Ščavnica sodi v IV. kakovostni razred, ima nizko vsebnost kisika, BPK_5 in KPK sta visoka, povišane so vsebnosti dušikovih spojin in detergentov (IEI d. o. o., 2005).

Mejne vrednosti oziroma ocenjene obremenitve naprave so podane v tabeli 15.

Tabela 15: Predvidene (ocenjene) obremenitve čistilne naprave Ljutomer (IEI d. o. o., 2005).

Število priključenih enot	23.000 PE
BPK_5	1.380 kg BPK_5 / d
KPK	2.760 kg KPK/d
Suspendirane snovi	1.250 kg/d
Dnevni dotok vode pri sušnem vremenu	4.110 m ³ / d
Sušni dotok Q_t	263 m ³ / h
Deževni dotok Q_m	416 m ³ / h
TKN	276 kg TKN/d
Celokupni fosfor	46 kg/d
Najnižja temperatura vode	10 °C
Nadmorska višina	175,80 m.n.m.
Končna stopnja čiščenja	stabilizacija blata, nitri in denitrifikacija, kemijsko čiščenje fosforja, dezinfekcija z UV

Področje sprejemnika iztoka iz CČN Ljutomer je s študijo presoje vpliva na okolje opredeljeno kot občutljivo področje. Uredba o emisiji pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav (Ur. l. RS št. 35/96) določa posebne zahteve v zvezi z emisijo snovi pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav, in sicer:

- mejne vrednosti parametrov odpadne vode,
- mejne vrednosti učinka čiščenja odpadne vode,
- posebne ukrepe v zvezi z načrtovanjem in obratovanjem komunalnih čistilnih naprav.

Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji so glede na njihovo zmogljivost čiščenja določene v tabeli 16.

Tabela 16: Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji (Ur. l. RS št. 35/96):

Parameter	Izražen kot	Enota	Zmogljivost čiščenja, izražena v PE			
			<2.000	>2.000 <10.000	>10.000 <100.000	>100.000
Neraztopljene snovi		mg/l	-	60	35	35
Amonijev dušik	N	mg/l	-	10	10	10
KPK	O ₂	mg/l	150	125	110	100
BPK ₅	O ₂	mg/l	30	25	20	20
Celotni dušik	N	mg/l	-	18	15	10
Učinek čiščenja celotnega dušika		%	-	65	70	80
Celotni fosfor	P	mg/l	-	3	2	2
Učinek čiščenja celotnega fosforja		%	-	70	80	80

ČN Ljutomer je sekvenčna biološka naprava z aerobno stabilizacijo blata. Proces čiščenja zajema nitrifikacijo, denitrifikacijo in kemično odstranjevanje čiščenje fosforja. Naprava obsega naslednje tehnološke objekte:

- vhodno črpališče z grobimi grabljami in merilnikom pretoka,
- mehansko predčiščenje (fine greblje, peskolov in lovilec maščob),
- sekvenčni bazen,
- iztočna kineta,
- priprava in doziranje sredstva za obarjanje fosforja,
- postaja za sprejem gošč iz greznic in malih ČN,
- zgoščevalec in zalogovnik blata,
- strojno zgoščanje blata in doziranje apna,
- začasna deponija blata,
- kompresorska postaja,
- skladišče,

- elektroagregat,
- upravni prostori,
- kotlovnica,
- cisterna za kurilno olje,
- pretakališče $FeCl_3$,
- trafo postaja,
- vodomerni jašek.

Vhodno črpališče z grobimi grabljami in merilnikom pretoka

Odpadna voda doteka v vhodno črpališče, kjer so vgrajene grobe elektromotorne grablje, ki odstranijo večje kosovne dele. S pomočjo treh potopnih črpalk se odpadna voda črpa po podzemnem tlačnem cevovodu v mehansko predčiščenje. Na tlačnem cevovodu za črpanje vode iz črpališča v mehansko predčiščenje je vgrajen cevni induktivni merilnik pretoka kompaktne izvedbe (IEI d. o. o., 2005).

Mehansko predčiščenje komunalnih odpadnih vod

Odpadna voda se po tlačnem cevovodu prečrpava preko vtočnega jaška v napravo za mehansko predčiščenje, ki obsega fine rotacijske grablje, peskolov in lovilec maščob. V peskolovu se odstranijo specifično težke snovi, kot so pesek, prod, gramoz, pepel ter druge hitro usedljive snovi organskega in neorganskega izvora. Pesek iz dna peskolova se s spiralnim transporterjem odvaja k zajemu spiralnega izdvajalca peska, ki ga transportira v zabojnik za pesek. Maščobe, olja in masti ter ostale plavajoče snovi se odstranijo v lovilcu maščob, saj lahko njihova prisotnost preprečuje nadaljnje procese v čistilni napravi in poslabša izgled iztoka očiščene odpadne vode iz naprave. V lovilcu maščob izločene plavajoče snovi se prečrpavajo v zabojnik za odpadke iz grabelj (IEI d. o. o., 2005).

Iztočna kineta

Očiščena odpadna voda se po cevovodu preliva v kineto iz armiranega betona. V kineti se s pomočjo nameščene opreme izvajajo meritve KPK, NO_3-N . Na iztočnem mestu kinete se nahaja tudi odvzemno mesto za vzorčenje iztoka očiščene odpadne vode iz čistilne naprave (IEI d. o. o., 2005).

Priprava in doziranje FeCl_3

Dozirno sredstvo za obarjanje fosfatov se še ne uvaja.

Postaja za sprejem gošč iz greznic

Postaja za sprejem gošč iz greznic je nameščena v upravni stavbi. Gošča, očiščena mehanskih delcev, se iz naprave za sprejem gošč po cevovodu izteka v zbirni bazen gošče, od tam pa se preko elektromotorne zapornice ponoči spušča v vhodno črpališče (IEI d. o. o., 2005).

Zgoščevalec in zalogovnik blata

V sekvenčnih bazenih so nameščene črpalke za črpanje presežnega blata, ki črpajo to presežno blato v zgoščevalec in zalogovnik blata, ki je izveden v sklopu sekvenčnih bazenov. Presežno blato se črpa po dveh cevovodih, ki se pred distributorjem blata združita, kjer se blato prelija v zgoščevalec. V zgoščevalcu se blato zgošča in useda na dno bazena, odcejena blatenica pa se preko prelivnikov prelija v vtični del prezračevalnih bazenov. V zgoščevalnem bazenu sta nameščeni dve potopni mešali, ki mešata vsebino zgoščevalnega bazena (IEI d. o. o., 2005).

Strojno zgoščanje blata in doziranje apna

V centrifugo za zgoščanje blata s pomočjo vijačne črpalke črpamo blato iz zgoščevalca in zalogovnika blata. Iz centrifuge centrat izteka v interno kanalizacijo čistilne naprave nazaj v vhodno črpališče. Zgoščeno blato izpada iz centrifuge v spiralni transporter. Spiralni transporter ima priključek za doziranje negašenega apna v prahu. Obratovanje sistema je ročno ali avtomatsko (IEI d. o. o., 2005).

5.1.1 Tehnologija prezračevanja

Prezračevanje odpadne vode na CN Ljutomer poteka v sekvenčnem bazenu, kjer odpadna voda izmenično doteka po cevovodu z dvema odcepoma v dva sekvenčna bazena. Posamezen cikel obratovanja se začne z odpiranjem elektromotorne zapornice. Ko se zapornica odpre, se začne faza polnjenja in prezračevanja, ki traja dve uri.

Na vtočnem delu sekvenčnih bazenov so vgrajeni selektorji, zaradi katerih v ciklusu obratovanja sekvenčnega bazena ni potrebna anoksična mešalna faza, ampak je ta faza

vključena v fazi polnjenja in prezračevanja. V relativno majhnem volumnu je mikroorganizmom na voljo visoka koncentracija topnega BPK. V takšni situaciji se ustvari veliko razmerje med hrano in mikroorganizmi (F/M), ki mikroorganizmom omogoča maksimalno biosorpcijo hrane. Selektor poenostavi potek procesa in zagotavlja biološko selekcijo mikroorganizmov, ki večinoma tvorijo kosme pri vseh obremenitvah, predvsem pa pri obremenitvah, ki so manjše od projektirane obremenitve. Biološki selektor omogoča potek procesa ob krajših časovnih ciklih kot drugi sekvenčni sistemi, kar pomeni manjše bazene in manjše stroške obratovanja. Volumen selektorja znaša približno od 10 do 15 % celotnega volumna prezračevalnega bazena.

Selektor torej obratuje pri anoksičnih do anaerobnih pogojih, kjer se lahko razgradljiva organska frakcija odpadne vode hitro odstrani z encimskimi mehanizmi. Prezračevalni sistem selektorja obsega cevne prezračevalnike PRSEL1.1 za grobo vpihovanje zraka, ki so nameščeni na nosilni konstrukciji. Možna je regulacija višine in vodoravnosti prezračevalnikov. S prezračevali se občasno premeša in odvaja na dnu usedlo biološko blato. Zrak je v prezračevala doveden iz cevovoda za dovod zraka iz kompresorske postaje v sekvenčni bazen.

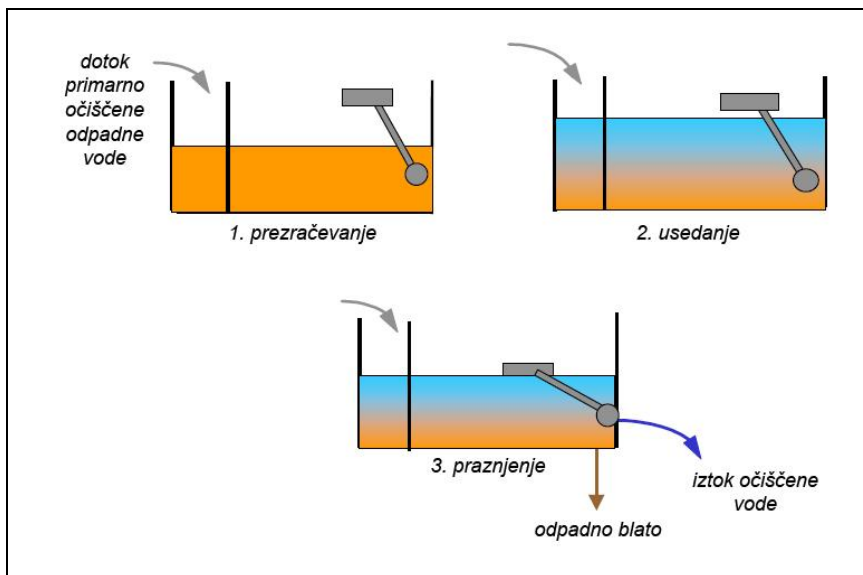
Z uporabo osemurnega cikla in vračanja aktivnega blata nazaj v selektor se ustvarijo optimalni pogoji za razvoj mikroorganizmov, ki tvorijo kosme ter mikroorganizmov, ki akumulirajo fosfat. Tako se lahko učinkovito zmanjša nastanek filamentnih mikroorganizmov, ki povzročajo nabrekanje in penjenje blata ter slabo usedanje kosmov (IEI d. o. o., 2005).

Iz selektorjev se odpadna voda preliva v glavni del sekvenčnih bazenov, kjer potekajo tri faze:

- faza polnjenja in prezračevanja,
- faza usedanja blata (mirovanje),
- faza praznjenja.

V glavnem delu sekvenčnih bazenov poteka postopek nitrifikacije in denitrifikacije. Obratovanje v sekvenčnih bazenih je vodeno računalniško. Glede na izmerjen dotok na napravo računalnik izbira obratovalni režim, ki je lahko deževni ali sušni cikel obratovanja.

Normalna dolžina cikla temelji na povprečnem sušnem dotoku (ADWF) in najmanjšem sušnem dotoku (PDWF) na čistilno napravo. Sušni cikel se uporablja pri močnih nalivih (Sanitaire).



Slika 37: Faze SBR sistema (ABJ).

Vodna gladina v sekvenčnih bazenih ciklično niha, tako kot se izmenično praznijo posamezni bazeni. Na čistini napravi se sekvenčna bazena polnita izmenično in sta načrtovana za dva obratovalna ciklusa. Dolžina obratovanja je podana v tabeli 17.

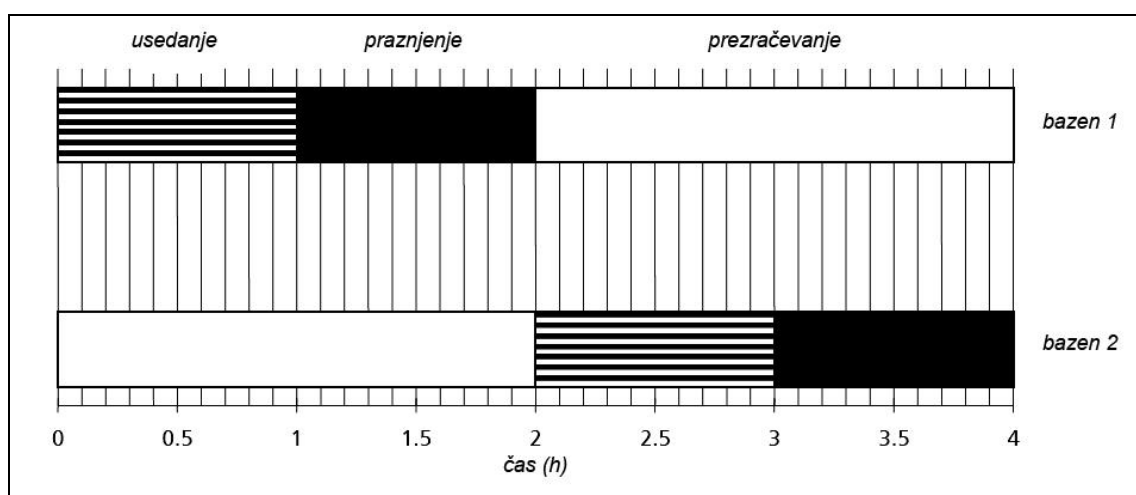
V kompresorski postaji so nameščena tri puhalja za prezračevanje šaržnega biološkega reaktorja. Od tega dve puhalji izmenično dovajata zrak, tretje pa je v rezervi. S frekvenčnim regulatorjem je omogočeno prilagajanje potrebam po vpihanem zraku. Obratovanje puhal krmili procesni računalnik. Kot referenčna vrednost za krmiljenje puhal je merilnik koncentracije kisika (IEI d. o. o., 2005).

Prezračevanje reaktorja poteka z vpihovanjem stisnjenega zraka skozi na dnu položena cevna samozaporna membranska prezračevala. Prezračevanje ob začetku je manj intenzivno, potem pa začne intenzivnost naraščati. Intenzivnost prezračevanja se prilagaja karakteristikam odpadne vode. Na ta način je možno doseči optimalno delovanje naprave glede na učinek čiščenje BPK in dušikovih spojin ter možnost prekomernega prezračevanja in s tem motnost iztoka iz čistilne naprave (IEI d. o. o., 2005).

Tabela 17: Obratovalni cikel sekvenčnih bazenov (IEI d. o. o., 2005)

Faza	Sušni dotok	Deževni dotok
Polnjenje/prezračevanje	2/2	2/2
Usedanje blata	1	1
Praznjenje	1	1
Skupna dolžina cikla	4	4

Cevna prezračevala so dolge palice, po navadi dolžine od 51 do 61 cm in s premerom od 6,4 cm do 7,7 cm. Narejena so iz SAN kopolimerov, poroznega HDPE ali iz perforiranih membran. Difuzorji se lahko nahajajo samo na eni strani glavnega cevovoda za dovod zraka ali pa na obeh straneh. Večina delov cevi je iz nerjavečega jekla ali pa odporne plastike. Pretok zraka kontroliramo z zaslonko. Zrak potuje skozi posebej narejene luknjice ali odprtine v cevi in se distribuira na površino membrane, od tam naprej pa v odpadno vodo. Tvorijo se majhni mehurčki, ki se dvigajo proti površini vode. Membrane niso perforirane na mestih, kjer zrak vstopi v cev, saj se membrana, ko ni pretoka zraka, sesede in zatesni na podporno strukturo. Tako pri prenehanju prezračevanja v SBR sistemih s prezračevanjem s pomočjo membranskih cevi ne pride do zamažitve difuzorjev. Hitrost pretoka zraka se giblje od 1,6 do 15,7 m³_N/h na difuzor (Mueller, Boyle, Pöpel, 2002).



Slika 38: Zaporedje obratovanja SBR reaktorja (ABJ).

Glede na projektno dokumentacijo so bile za prezračevalni bazen izračunane karakteristike, ki so podane v tabeli 18. Ker volumetrični koeficient kisika K_{La} ni podan v projektni dokumentaciji, niti ga ne vedo na čistilni napravi, sem si za računanje nekaterih parametrov pomagala z računalom podjetja EDI, ki je dostopno na internetu (www.wastewater.com).

EDI Flexair Magnum je cevni difuzor, ki je narejen iz fleksibilne membrane. Trojni integralni kontrolni ventil preprečuje povratni tok odpadne vode v difuzor in je zato primeren za prezračevanje s presledki. Podporna cev membranskega difuzorja je narejena iz PVC plastike in omogoča veliko kemijsko odpornost na zunanje vplive, prav tako pa je mehansko vzdržljiva. Največja hitrost zraka v cevovodih je 12 m/s, dobavljena količina zraka po projektni dokumentaciji pa znaša $2.900 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ na bazen. Specifičen vnos kisika pri standardnih pogojih je minimalno $0,017 \text{ kgO}_2 / \text{m}^3_{\text{N}} \text{ m}$. Difuzorji so nameščeni na nosilnem in razvodnem cevnem omrežju, ki je narejeno iz nerjavnega jekla ali PVC cevi in je na betonska tla pritrjeno z nosilci na globini 4,12 m (IEI d. o. o., 2005).

Tabela 18: Izračuni in karakteristike prezračevalnih bazenov (IEI d. o. o., 2005).

Sušni dotok	73 l/s ($263 \text{ m}^3/\text{h}$)
Deževni dotok	115 l/s ($416 \text{ m}^3/\text{h}$)
BPK ₅	1.380 kg BPK ₅ /d
TKN	276 kg/d
Celokupni fosfor	46 kg/d
Najmanjša temperatura vode	10 °C
TKN/BPK ₅	0,2
Delovna prostornina bazenov	$1.380 / (0,04 \times 5) = 6.900 \text{ m}^3$
Potrebna akumulacija	$263 \times 2 \times 2 = 1.052 \text{ m}^3$
Skupna prostornina bazenov	7.952 m^3
Število bazenov	2
Tlorisne dimenzije bazena	17,0 x 49,5 m
Največja globina vode v bazenu	5,00 m
Najmanjša globina vode v bazenu	3,75 m
Dolžina dekanterja	$5,00 \text{ m} (525 / (0,75 \times 3,6)) = 195 \text{ l/s} > 38 \text{ l/(s m}^{-1}\text{)}$

Prostornina selektorja	222 in 297 m ³
Povprečni zadrževalni čas v selektorju	1 h
Trajanje ciklov	2 + 1 + 1 = 4 h
Nadmorska višina	172,8 m
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu pozimi	11 °C
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu poleti	21 °C
Dejanska konc. O ₂ v odpadni vodi	2 mg/l
Količina kisika za biološko čiščenje	2,3 kg O ₂ /kg
Količina kisika za ogljikovo oksidacijo pri obratovalnih pogojih	1.380 x 2,3 = 3.174 kg O ₂ /d
Kisik za celotno nitrifikacijo*	1.198,53 kg O ₂ /d
Celotne potrebe po kisiku (AOR)*	120,11 kg O ₂ /h
Alfa faktor	0,65
Beta faktor	0,98
AOR/SOR pozimi*	0,45224
AOR/SOR poleti*	0,42455
SOR*	282,9 kg O ₂ /hr
Nasičena konc. O ₂ pri st. pogojih*	10,5
Srednja globina vpihavanja	4,12 m
Trajanje prezračevanja	12 h/d
Specifični vnos kisika v vodo	min. 0,017 kg O ₂ /m ³ _N m ¹
Potrebna dnevna količina zraka na bazen	3.174/((0,017x4,12x0,65)x2)=34.859 m ³ _N /d
Potrebna urna količina zraka na bazen	34.859/12 = 2.900 m ³ _N /h bazen
Število puhal	3
Zmogljivost puhala	3 x 1.572 m ³ _N /h
Efektivna moč	31,70 kW

*izračunani glede na podjetje EDI (online kalkulator: www.wastewater.com)

Dejansko stanje na čistilni napravi se razlikuje od projektiranega. Količina dovedene odpadne vode na ČN je veliko manjša, saj nekatera naselja, ki so bila upoštevana pri določanju

velikosti ČN, nimajo zgrajenega kanalizacijskega omrežja in ne prispevajo še nič odpadne vode za čiščenje. Povprečna koncentracija kisika v prezračevalnem bazenu pri dejanskem stanju se je gibala okrog 3,1 mg/l, obremenitev z BPK₅ pa je bila 1.078,8 kg/d. Po projektni dokumentaciji je obremenitev z BPK₅ znašala 1.380 kg/d. Izračunana dejanska potreba po kisiku pri obratovalnih pogojih (AOR) za konkretni primer znaša 65,32 kg O₂/h, medtem ko je pri načrtovanju izračunana predvidena dejanska potreba po kisiku (AOR) znašala 120,11 kg/h. Količina potrebnega kisika pri standardnih pogojih (SOR) je večja pri projektni dokumentaciji, kjer znaša 282,9 kg O₂/hr, pri konkretnem primeru pa 153,8 kg O₂/hr. Zaradi tega je posledično količina dovedena zraka manjša kot pri projektni dokumentaciji. Nasičena koncentracija kisika v prezračevalnem bazenu pri standardnih pogojih se ni spremenila. Potrebna dovedena količina zraka v en prezračevalni bazen znaša 1.219,15 m³_N/h, kar je manj od izračunov projektne dokumentacije in je tudi pokazatelj, da na ČN zaenkrat še niso priključeni vsi upoštevani onesnaževalci.

Tabela 19: Izračuni in karakteristike prezračevalnih bazenov pri dejanskem stanju.

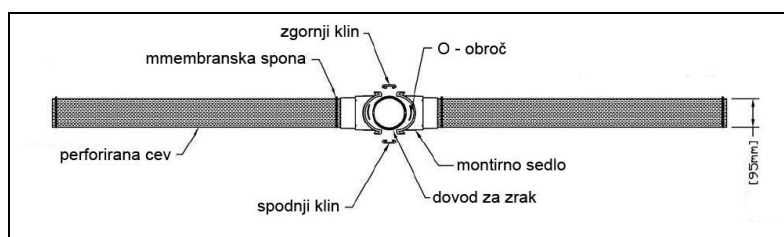
Količina očiščene odpadne vode	2.099 m ³ /d (mesec februar)
BPK ₅	514 mg/l; 1.078,8 kg/d
Amonij	26,1 mg/l
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu pozimi	11 °C
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu poleti	21 °C
Dejanska konc. O ₂ v odpadni vodi	3,1 mg/l
Količina kisika za ogljikovo oksidacijo pri obratovalnih pogojih*	1.316 kg O ₂ /d
Kisik za celotno nitrifikacijo*	251,97 kg O ₂ /d
Celotne potrebe po kisiku (AOR)*	65,32 kg O ₂ /h
Alfa faktor	0,65
Beta faktor	0,98
AOR/SOR pozimi*	0,45224
AOR/SOR poleti*	0,42455
SOR*	153,8 kg O ₂ /hr

Se nadaljuje...

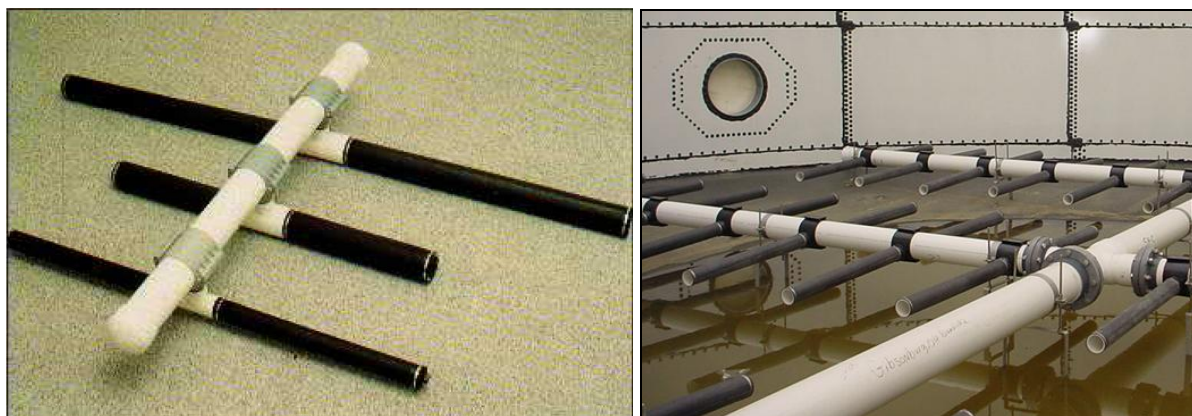
...nadaljevanje

Nasičena konc. O ₂ pri st. pogojih*	10,54 mg/l
Srednja globina vpihavanja	4,12 m
SOTE *	21,28 %
Trajanje prezračevanja	12 h/d
Potrebna količina zraka*	2.438,29 m ³ _N /h = 1.219,15 m ³ _N /h bazen

*izračunani glede na podjetje EDI (online kalkulator: www.wastewater.com)



Slika 39: Shematski prikaz cevnega Flexair Magnum difuzorja (EDI).



Slika 40: Različni modeli cevnih difuzorjev Flexair Magnum (EDI).

V fazi polnjenja in prezračevanja posameznega bazena obratuje potopna črpalka za mešanje blata, ki je nameščena na dnu prezračevalnika.

Po končani fazi polnjenja in prezračevanja se začne faza mirovanja, kjer vsebine reaktorja več ne prezračujemo in ne mešamo. Suspenzija aktivnega blata in vode se hitro umiri in blato se začne usedati na dno prezračevalnega bazena. Faza mirovanja traja eno uro. Ob koncu te faze se odvečno blato izčrpa iz bazena s pomočjo potopne črpalke za črpanje presežnega blata po cevovodu v zgoščevalec in zalogovnik blata. Nato sledi faza praznjenja, kjer se očiščena voda

preko prelivnika, ki se spusti do nivoja vode v bazenu, preliva v iztočno kineto. Globino potopitve prelivnika uravnava računalniški sistem. Bazeni se prazni predvideni čas, ne glede na višino vode v bazenu po končani fazi polnjenja in prezračevanja. Po končanem praznjenju se cikel čiščenja ponovi (IEI d. o. o., 2005).



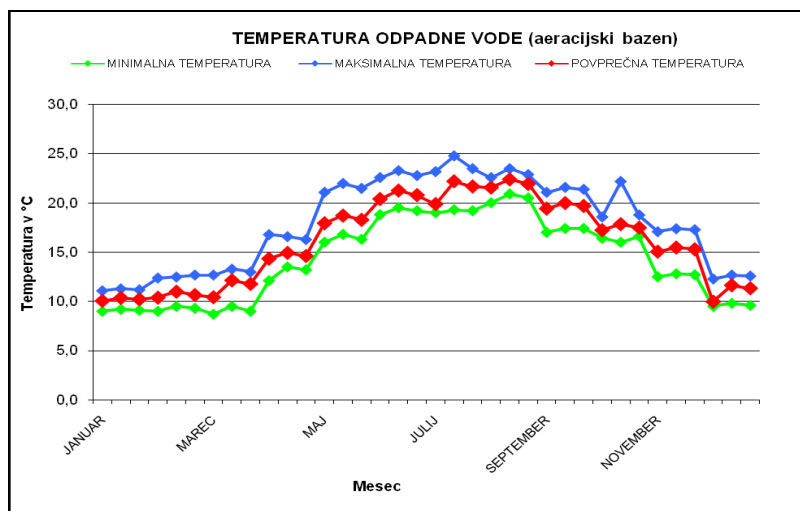
Slika 41: Selektor (levo) in sekvenčna bazena (desno) na CČN Ljutomer (KPS Ljutomer).

V vsakem prezračevalnem bazenu se nahaja tudi merilnik pretoka vode, ki beleži trenutne in kumulativne vrednosti pretoka. V bazenu so tudi merilnik nivoja voda, merilnik kisika in merilnik temperature odpadne vode. S pomočjo respirometrije se v reaktorju lahko sledi tudi metabolizmu mikroorganizmov v aktivnem blatu, zvezno pa se regulira dolžina in intenzivnost prezračevanja sekvenčnih bazenov (IEI d. o. o., 2005).

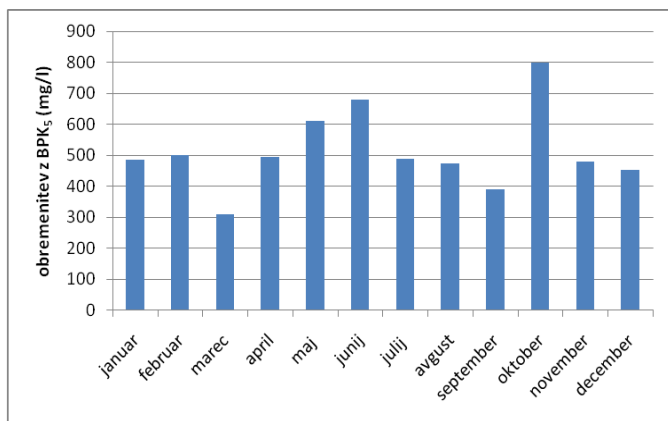
Zaradi dodajanja tople vode, ki jo uporabljamo v gospodinjstvu in industriji, je temperatura odpadne vode po navadi višja kot pri lokalni oskrbi z vodo. Temperatura odpadne vode skozi leto niha. Razen v poletnih mesecih, je temperatura odpadne vode višja od temperature lokalnega zraka. Po podatkih, pridobljenih na čistilni napravi za leto 2008, je bila maksimalna temperatura odpadne vode na CČN Ljutomer v mesecu juliju in je znašala 24,8 °C, minimalna temperatura 8,7 °C pa je bila v začetku meseca maja. Letna temperaturna nihanja za posamezni mesec so podana na zgornjem grafikonu temperature odpadne vode v prezračevalnem bazenu.

Poročilo o obratovalnem monitoringu za leto 2008 je podano v prilogi D. V njem so podani podatki o meritvah na vtoku in iztoku ČN Ljutomer. Vsak mesec se ob določeni uri izvede

meritev za naslednje parametre: pretok odpadne vode Q , temperatura, pH, koncentracija neraztopljenih snovi, amonijev dušik, KPK, BPK_5 , koncentracija usedljivih snovi, koncentracija celotnega fosforja in koncentracija celotnega dušika. Meritve za nitratni in nitritni dušik ter dušik po Kjeldahlu niso bile izvedene.



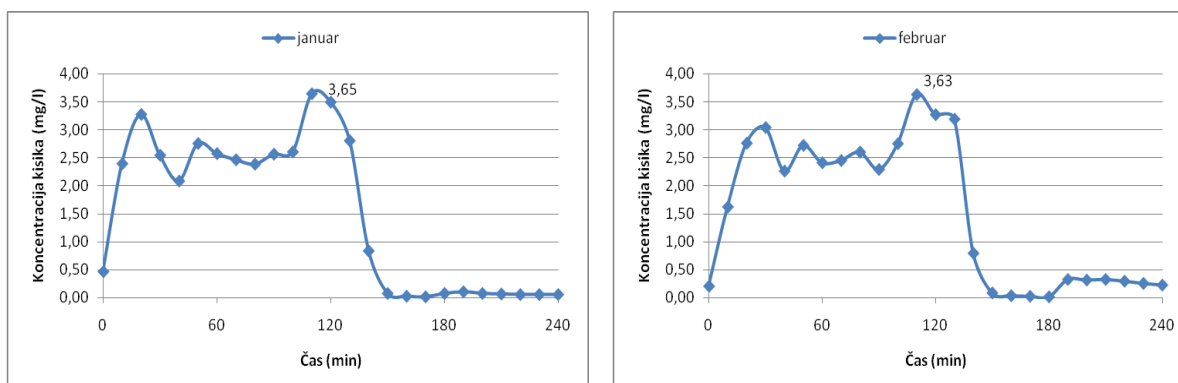
Grafikon 1: Temperatura v prezračevalnem bazenu (KSP Ljutomer).



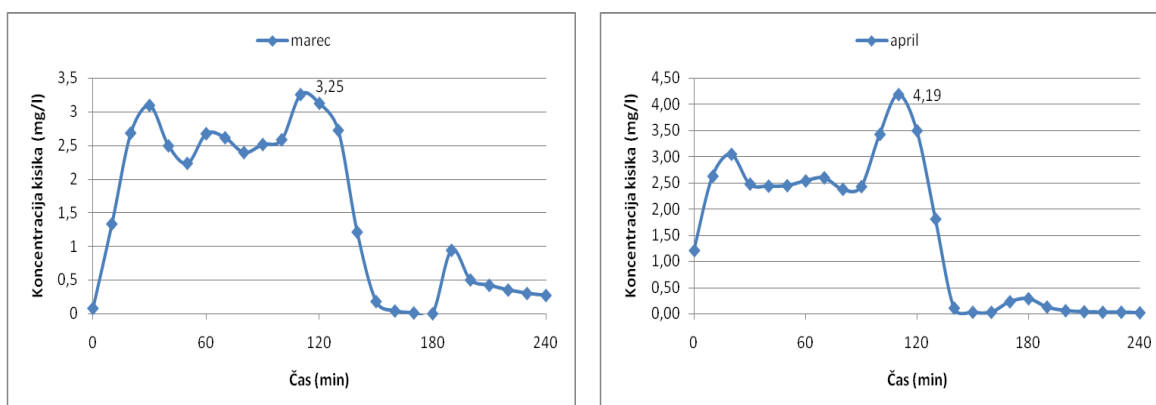
Grafikon 2: Izmerjena obremenitev z BPK_5 za različne mesece v letu 2008 (KSP Ljutomer).

Z merilnikom kisika, ki je nameščen v vsakem prezračevalnem bazenu, je omogočena regulacija obratovanja sekvenčnega bazena. Iz dobljenih podatkov merilnika kisika sem izdelala grafikone nihanja koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu za različne mesece. Iz grafikonov je razvidno, da v fazi polnjenja in prezračevanja koncentracija kisika skokovito naraste in se giblje med 3 in 4 mg/L, po prenehanju prezračevanja pa začne strmo padati.

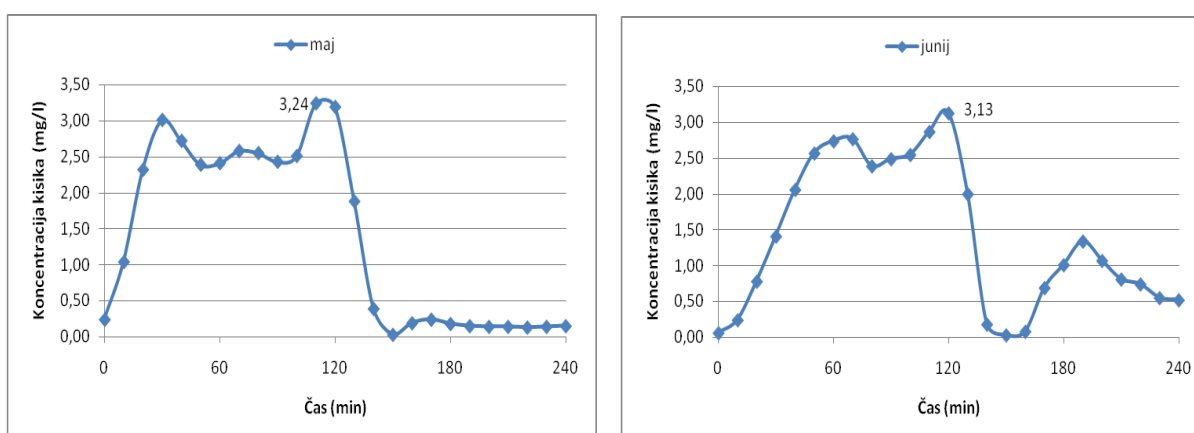
Gibanje koncentracij kisika v biološkem reaktorju v letu 2008 v času meritev na vtoku in iztoku iz čistilne naprave:



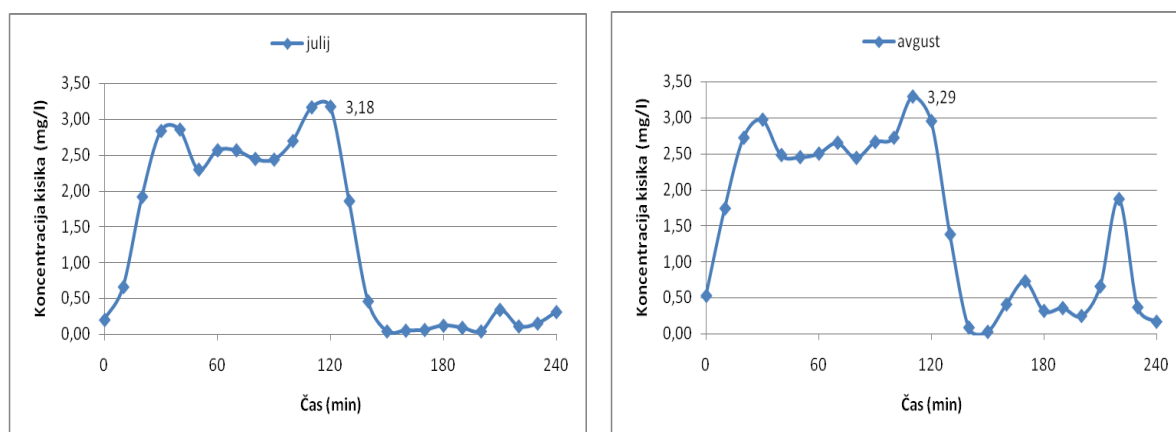
Grafikon 3: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (januar, februar 2008).



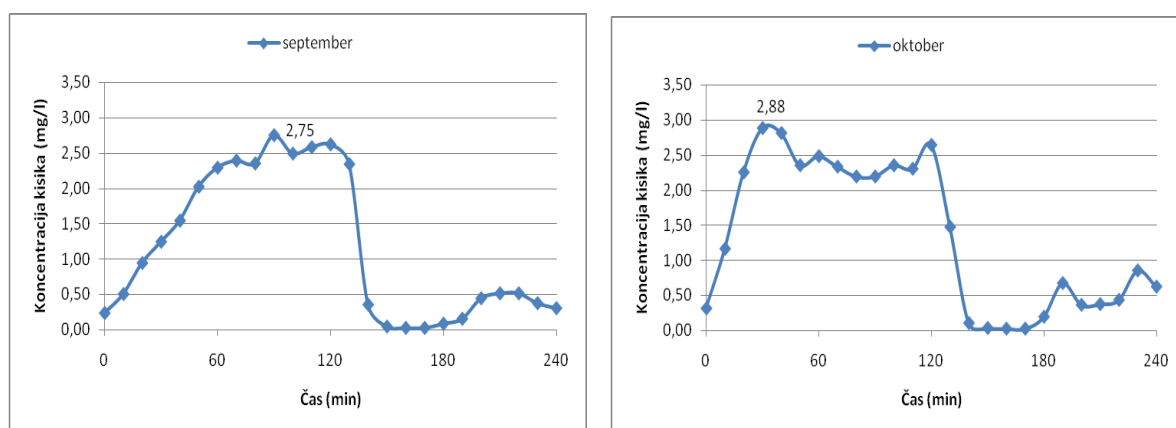
Grafikon 4: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (marec, april 2008).



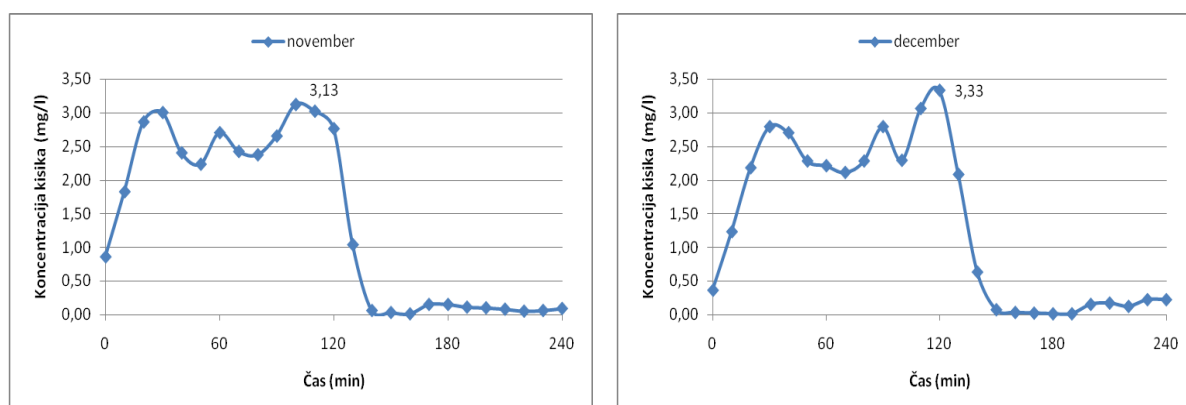
Grafikon 5: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (maj, junij 2008).



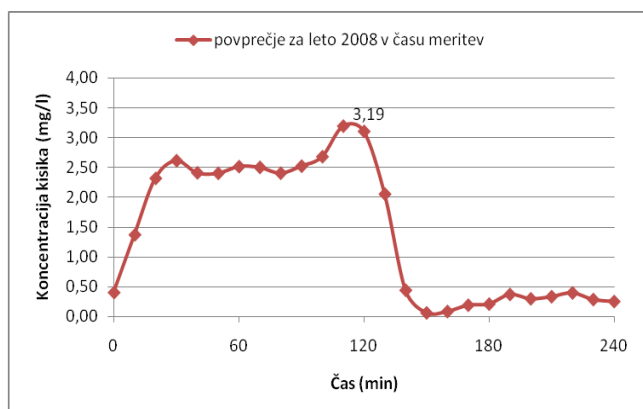
Grafikon 6: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (julij, avgust 2008).



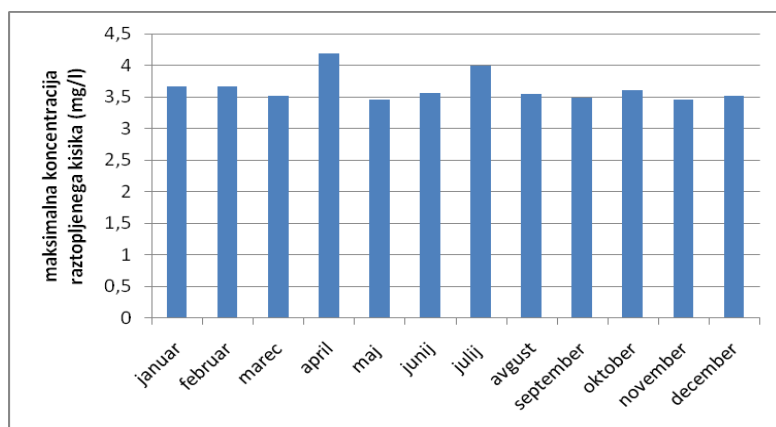
Grafikon 7: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (september, oktober 2008).



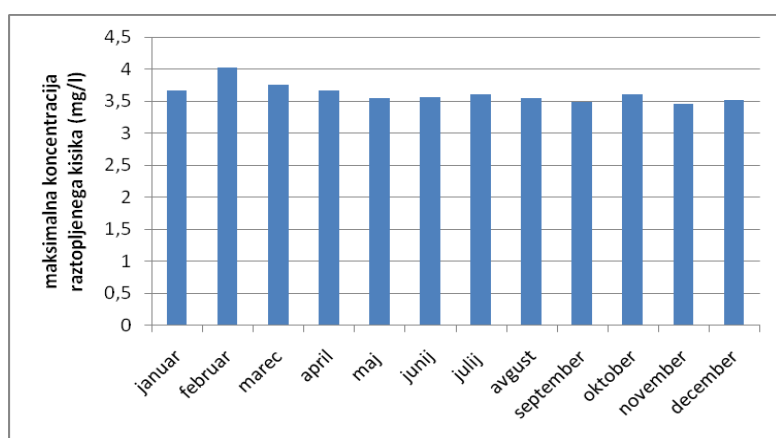
Grafikon 8: Nihanje koncentracije kisika v prezračevalnem bazenu (november, december 2008).



Grafikon 9: Povprečna koncentracija raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu za leto 2008 ob času meritev BPK in KPK na vtoku in iztoku. Vrednosti so podane v prilogi B.



Grafikon 10: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika v prvem prezračevalnem bazenu v letu 2008 po mesecih iz meritev SCADA.



Grafikon 11: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika v drugem prezračevalnem bazenu v letu 2008 po mesecih iz meritev SCADA.

Na grafikonih 10 in 11 je podana maksimalna koncentracija kisika v mesecih za leto 2008 v prvem in drugem bazenu glede na podatke iz tabel 20 in 21.

Maksimalna koncentracija kisika v prvem prezračevalnem bazenu je bila meseca aprila in je znašala 4,19 mg/l, izmerjena koncentracija BPK₅ na vtoku pa je bila 496 mg/l. Pri ostalih obremenitvah z BPK₅ koncentracija kisika ni presegla meje 4,00 mg/l. Pri maksimalni temperaturi odpadne vode 24,84 °C v prvem bazenu, izmerjeni z vgrajenim merilnikom temperature, je obremenitev z BPK₅ znašala 488 mg/l, koncentracija raztopljenega kisika pa je bila 3,99 mg/l.

Tabela 20: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika in maksimalna temperatura v prvem prezračevalnem bazenu in izmerjene koncentracije BPK₅ na vtoku ČN Ljutomer po posameznih mesecih za leto 2008.

Mesec	Maksimalna koncentracija O ₂ v prvem bazenu [mg/l]	T _{max} (°C)	Koncentracija BPK ₅ na vtoku [mg/l]	Količina očiščene vode (m ³ /leto)
januar	3,67	11,34	486	766.165
februar	3,66	15,53	502	
marec	3,51	13,34	311	
april	4,19	16,64	496	
maj	3,46	22,03	611	
junij	3,56	23,34	678	
julij	3,99	24,84	488	
avgust	3,55	23,54	474	
september	3,48	21,64	390	
oktober	3,61	22,24	799	
november	3,46	17,44	479	
december	3,51	12,74	452	

Maksimalna koncentracija kisika v drugem prezračevalnem bazenu je bila meseca februarja in je znašala 4,02 mg/l, izmerjena koncentracija BPK₅ na vtoku pa je bila 502 mg/l. Pri ostalih obremenitvah z BPK₅ je koncentracija kisika zmeraj pod 4,00 mg/l. Pri maksimalni temperaturi odpadne vode 27,37 °C v drugem bazenu, izmerjeni z vgrajenim merilnikom temperature, je obremenitev z BPK₅ znašala 799 mg/l, koncentracija raztopljenega kisika pa je bila 3,61mg/l.

Sistem za prezračevanje je avtomatsko voden. Nastavljena ciljna vrednost koncentracije kisika na ČN Ljutomer je po podatkih vodje nastavljena na 3,5 mg/l, nekajkrat pa je bila tudi 4 mg/l. Dejanske vrednosti so se gibale med 3,46 in 4,02 mg/l.

Tabela 21: Maksimalna koncentracija raztopljenega kisika in maksimalna temperatura v drugem prezračevalnem bazenu in izmerjene koncentracije BPK₅ na vtoku ČN Ljutomer po posameznih mesecih za leto 2008.

Mesec	Maksimalna koncentracija O ₂ v drugem bazenu [mg/L]	T _{max} (°C)	Koncentracija BPK ₅ na vtoku [mg/l]
januar	3,67	11,32	486
februar	4,02	13,91	502
marec	3,76	13,31	311
april	3,67	16,62	496
maj	3,55	21,82	611
junij	3,56	23,12	678
julij	3,6	24,32	488
avgust	3,55	27,73	474
september	3,48	21,79	390
oktober	3,61	25,33	799
november	3,46	17,31	479
december	3,51	12,51	452

Iz tabele 22 je razvidno, da je učinek čiščenja KPK in BPK na ČN Ljutomer zelo velik in se giblje nad 96 %. Prav tako so doseženi veliki učinki čiščenja dušikovih spojin in fosforja, vedno nad 90 %, razen v mesecu septembru in novembru, ko je učinek odstranjevanja fosforja 80-odstoten.

Tabela 22: Učinek čiščenja KPK, BPK ter celotnega fosforja in dušika v letu 2008 (KSP Ljutomer, d. o. o.).

Mesec	KPK [mg/l]			BPK [mg/l]			Celotni fosfor [mg/l]			Celotni dušik [mg/l]		
	dotok	iztok	učinek čiščenja [%]	dotok	iztok	učinek čiščenja [%]	dotok	iztok	učinek čiščenja [%]	dotok	iztok	učinek čiščenja [%]
januar	798	< 30	97	486	< 8	99	9,84	0,34	97	53,6	1,91	97
februar	983	32	96	502	< 8	98	8,27	0,82	87	49,9	2,56	93
marec	618	< 18,6	98	311	< 1,7	100	7,12	0,15	98	38,1	1,51	96
april	758	< 30	97	496	< 8	99	9,63	0,20	98	53,8	2,06	96
maj	1.161	< 30	98	611	< 1,7	100	14,75	0,75	95	62,8	1,78	97
junij	1.104	< 30	98	678	< 8	99	11,90	0,61	95	53,5	1,28	98
julij	991	< 18,6	99	488	< 8	99	11,45	1,18	90	48,3	2,35	95
avgust	1.121	< 30	98	474	< 8	99	10,80	0,71	93	46,1	1,37	97
september	533	< 18,6	98	390	< 8	99	10,30	2,07	80	38,0	1,64	96
oktober	1.151	< 30	98	799	< 8	99	14,20	1,40	90	58,2	1,32	98
november	802	< 18,6	99	479	< 8	99	9,92	1,91	81	46,6	1,61	97
december	855	< 30	97	452	< 8	99	11,20	0,19	98	38,0	0,83	98

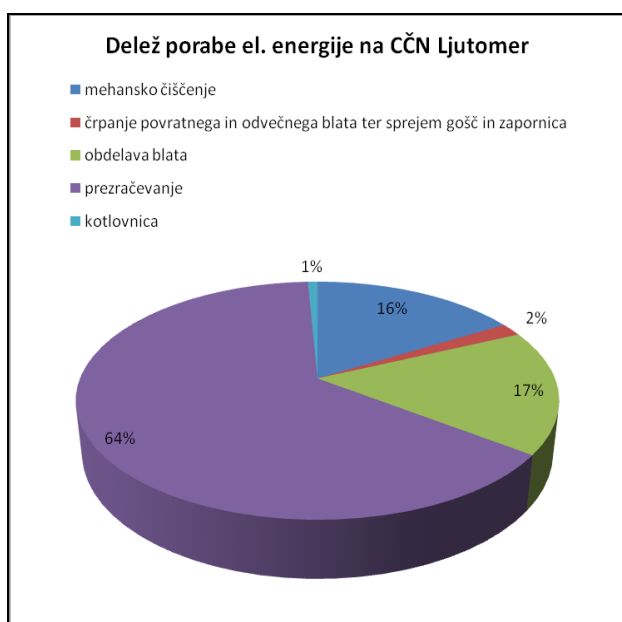
Iz projektnih podatkov za ČN Ljutomer sem izračunala delež porabe električne energije prezračevanja glede na vso porabljeno električno energijo, ki znaša okoli 64 %. Razmerja med posameznimi stopnjami so podana na grafikonu 12. Ker na objektu za prezračevanje ni merilca porabe električne energije, sem predpostavila, da se ta delež v obratovanju ni spremenil. Tako sem dobila rezultate za mesečno porabo elektrike samo za prezračevanje ter povprečno porabo energije za prezračevanje na PE. Rezultati so podani v tabeli 23. Največ energije se je porabilo meseca oktobra, stroški za prezračevanje so znašali 33.290,88 kWh

oziroma 1,447 kWh/PE. Najmanjši stroški prezračevanja so bili januarja, znašali so 1,447 kWh/PE. Povprečni mesečni stroški prezračevanja znašajo 1,339 kWh/PE.

Tabela 23: Poraba električne energije za prezračevanje na CČN Ljutomer.

Leto 2008	celotna poraba (kWh)*	Stroški prezračevanje (kWh)	Stroški prezračevanje (kWh/PE)	Povprečje stroškov (kWh/PE)
Januar	45.455	29.091,2	1,265	1,339
Februar	46.088	29.496,32	1,282	
Marec	51.712	33.095,68	1,439	
April	46.903	30.017,92	1,305	
Maj	47.993	30.715,52	1,335	
Junij	50.659	32.421,76	1,410	
Julij	47.555	30.435,2	1,323	
Avgust	47.715	30.537,6	1,328	
September	45.519	29.132,16	1,267	
Oktober	52.017	33.290,88	1,447	
November	48.842	31.258,88	1,359	
December	47.039	30.104,96	1,309	
SKUPAJ	577.497	369.598,08	16,069	16,069

*vir KSP Ljutomer d. o. o.



Grafikon 12: Delež porabe energije posameznih delov ČN Ljutomer.

5.2 CČN Murska Sobota

Leta 1970 je bila v Murski Soboti zgrajena čistilna naprava kapacitete 25.000 PE. To je bila prva čistilna naprava v Sloveniji z aerobno stabilizacijo blata. Z razvojem industrije in večanjem potreb po čiščenju skozi leta ter zaradi dotrajanosti stare čistilne naprave je mestna občina Murska Sobota dobila novo čistilno napravo velikosti 42.000 PE, ki zajema štiri stopnje čiščenja:

- mehansko predčiščenje,
- biološko čiščenje,
- tercialno čiščenje s filtracijo in flokulacijo,
- dezinfekcija.

V mestni občini Murska Sobota je na javno kanalizacijsko omrežje priključenih več kot dve tretjini prebivalstva. Koncesijo za upravljanje s čistilno napravo je dobilo podjetje Petrol d. d. Sistem kanalizacije v Murski Soboti je mešan. Prispevno področje CČN Murska Sobota obsega področje mesta Murska Sobota in primestna naselja Veščica, Kupšinci, Polana, Černelavci, Markišavci, Nemčavci, Rakičan, Satahovci, Bakovci Krog in naselje Borejci, ki se nahaja v občini Tišina. Odvodnik očiščene odpadne vode je potok Ledava, ki sodi v 3. kakovostni razred. Njegov najmanjši pretok je $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$, biološki minimum je $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, srednji povprečni pretok je $1,86 \text{ m}^3/\text{s}$, največji pretok pa je od 30 do $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Ker je samočistilna sposobnost potoka Ledava zaradi počasnega toka majhna, poteka na ČN terciarno čiščenje, da ne pride do eutrofikacije vodotoka (IEI d. o. o., 2004).

Mejne vrednosti oziroma ocenjene obremenitve naprave so podane v tabeli 20.

Področje sprejemnika iztoka iz CČN Murska Sobota je s študijo presoje vpliva na okolje opredeljeno kot občutljivo področje. Uredba o emisiji pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav (Ur. l. RS št. 35/96) določa posebne zahteve v zvezi z emisijo snovi pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav, in sicer:

- mejne vrednosti parametrov odpadne vode,
- mejne vrednosti učinka čiščenja odpadne vode,
- posebne ukrepe v zvezi z načrtovanjem in obratovanjem komunalnih čistilnih naprav.

Tabela 24: Predvidene (ocenjene) obremenitve čistilne naprave Murska Sobota (IEI d. o. o., 2004).

Število priključenih enot	42.000 PE
BPK_5	2.520 kg BPK_5 / d
KPK	5.040 kg KPK/d
Suspendirane snovi	1.805 kg/d
Dnevni dotok vode pri sušnem vremenu	9.660 m ³ / d
Sušni dotok Q_t	540 m ³ / h
Deževni dotok Q_m	1080 m ³ / h
TKN	335 kg TKN/d
Celokupni fosfor	40 kg/d
Najnižja temperatura vode	10 °C
Nadmorska višina	189,20/187,80 m. n. m.
Končna stopnja čiščenja	stabilizacija blata, nitri in denitrifikacija, kemijsko čiščenje fosforja, dezinfekcija

Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji so glede na njihovo zmogljivost čiščenja določene v tabeli 25.

Tabela 25: Mejne vrednosti parametrov odpadnih vod za nove komunalne čistilne naprave in za komunalne čistilne naprave v rekonstrukciji (Ur. l. RS št. 35/96):

Parameter	Izražen kot	Enota	Zmogljivost čiščenja, izražena v PE			
			<2.000	>2.000 <10.000	>10.000 <100.000	>100.000
Neraztopljene snovi		mg/l	-	60	35	35
Amonijev dušik	N	mg/l	-	10	10	10
KPK	O ₂	mg/l	150	125	110	100
BPK_5	O ₂	mg/l	30	25	20	20
Celotni dušik	N	mg/l	-	18	15	10
Učinek čiščenja celotnega dušika		%	-	65	70	80
Celotni fosfor	P	mg/l	-	3	2	2
Učinek čiščenja celotnega fosforja		%	-	70	80	80



Slika 42: CČN Murska Sobota iz zraka (Petrol d. d.).

CČN Murska Sobota je klasična pretočna biološka čistilna naprava z dodatnim čiščenjem v peščenih filtrih in aerobno stabilizacijo blata. Na ČN potekajo nitrifikacija, denitrifikacija in kemijsko čiščenje fosforja. Naprava je dimenzionirana po priporočilih združenja ATV. Štirje glavni tehnološki sklopi čiščenja so razdeljeni na naslednje podsklope (IEI d. o. o., 2004):

- vhodno črpališče in sprejem gošč iz malih ČN,
- grablje,
- prezračeni peskolov in lovilec maščob,
- prezračevalni bazen,
- distributor dotoka v naknadni usedalnik,
- naknadni usedalnik,
- zbirni jašek iztoka iz naknadnega usedalnika,
- črpališče povratnega in presežnega blata,
- sprejem in doziranje sredstva za obarjanje fosforja,
- zgoščevalec in zalogovnik blata,
- strojno zgoščanje blata,
- upravna stavba (kompresorska postaja, elektroagregat, kotlovnica, prostor za elektroomare, upravni prostori),

- odlaganje strojno zgoščenega blata,
- peščeni filter,
- dezinfekcija iztoka in merilnik pretoka,
- trafo postaja,
- zračni biofilter,
- razdelilni jašek pred peščenim filtrom,
- jašek za maščobe iz peskolova,
- jašek merilnika pretoka za peskolovom,
- temelj plinske cisterne,
- deževni bazen.

Vhodno črpališče sprejem gošč iz malih ČN

Odpadna voda doteka v obstoječi deževni bazen za razbremenjevanje dotoka. Iz deževnega bazena se s pomočjo treh potopnih črpalk odpadna voda črpa v vstopni jašek kinete grabelj. Ob vhodnem črpališču je zgrajen zbirni bazen za gošče iz malih ČN in naprava za sprejem gošč iz malih ČN. Na vstopnem cevovodu naprave so vgrajeni cevni magnetno induktivni merilnik pretoka, merilnik pH in merilnik prevodnosti (IEI d. o. o., 2004).

Grablje

Odpadna voda se iz vhodnega črpališča črpa v zbirno kineto grabelj, kjer so v posebnem prostoru vgrajene dvojne elektromotorne grablje. V zbirno kineto grabelj se črpa tudi vsebina iz deževnega bazena. Obratovanje obeh grabelj upravlja diferencialni merilnik nivoja vode v kineti grabelj (IEI d. o. o., 2004).

Prezračeni peskolov in lovilec maščob

Po predčiščenju na grabljah se odpadna voda preliva v dvostezni prezračeni peskolov in lovilec maščob, kjer se na dnu peskolova izločajo določene težke snovi, kot so pesek, prod, pepel in ostale hitro usedljive snovi, v lovilcu maščob pa se izločajo plavajoče snovi, kot so na primer maščobe in olja. Elektromotorno strgalo posnema na dnu usedli pesek in ga strga v dva lijaka peskolova. Od tu se mešanica peska in vode s posebnima potopnima črpalkama

prečrpava v izdvajalec peska, ki je nameščen nad kineto obeh elektromotornih grabelj. Peskolov je prezračevan s perforiranimi cevmi, ki proizvajajo velike mehurčke. Iz peskolova se odpadna voda preko dvojnega preliva odvaja skozi dva podzemna cevovoda v oba prezračevalna bazena. Dvojni preliv omogoča popolnoma enakomerno razdelitev dotoka v oba prezračevalna bazena (IEI d. o. o., 2004).

Prezračevalni bazen

Delovanje in opis prezračevalnih bazenov je opisano v poglavju 5.2.1.

Distributor dotoka v naknadni usedalnik

Iz prezračevalnih bazenov se voda v distributorju dotoka preko dveh prelivov gravitacijsko preliva v dva naknadna usedalnika. Dvojni preliv omogoča popolnoma enakomerno razdelitev dotoka v oba naknadna usedalnika, zapornice pa po potrebi omogočijo izločitev posameznega bazena iz obratovanja. Na distributorju dotoka sta vgrajena merilnik NH₄-N, ki omogoča nastavitev in optimizacijo vsebnosti kisika v prezračevalnih bazenih in merilnik PO₄-P, ki omogoča nastavitev in optimizacijo doziranja sredstva za obarjanje fosforja (IEI d. o. o., 2004).

Naknadni usedalnik

V naknadna usedalnika krožne oblike se useda biološko blato, očiščena odpadna voda pa se preko prelivnih žlebov izteka v iztočni jašek naknadnih usedalnikov. Na dnu usedlo biološko blato se s pomočjo elektromotornih sesalnih strgal odvaja v centralno kineto za blato, od tam naprej pa gravitacijsko v črpališče povratnega in odvečnega blata. Cevovod presežnega blata vodi v zgoščevalec in zalogovnik blata. Pretok blata v posameznih dvižnih sesalnih ceveh je možno nastaviti. Iz obeh naknadnih usedalnikov izteka voda v zbirni jašek in od tu v peščeni filter oziroma v objekt dezinfekcije in merilnika pretoka (IEI d. o. o., 2004).

Sprejem in doziranje sredstva za obarjanje fosforja

Za simultano obarjanje fosforja se v iztok iz ozračenega peskolova in lovilca maščob po potrebi dozira sredstvo za obarjanje fosforja (predvidoma FeCl₃), ki se dobavlja z avtomobilsko cisterno (IEI d. o. o., 2004).

Peščeni filter

Peščeni filter je predviden za dodatno fizikalno, kemijsko in biološko čiščenje iztoka iz biološke stopnje. Zaradi izločanja koloidnih delcev poteka tudi flokulacija. Peščeni filter je večslojni z zgornjim natokom vode. Zgornja plast peska je višine 1 m in zrnatosti od 1,6 do 2,5 mm, spodnja plast pa višine 0,5 m in zrnatosti od 0,07 do 1,25 mm. Podloga filtra je pesek višine 0,2 m in zrnatosti od 3,15 do 5,6 mm. V armiranobetonskem dnu filtra so vgrajeni cevni nastavki za odvod vode oziroma dovod stisnjenega zraka. Voda izmenično doteka v štiri peščene filtre s povratnim izpiranjem in se pretaka z vrha proti dnu peščenega filtra. Filtri se čistijo v 24 do 48 urah obratovanja (IEI d. o. o., 2004).

Dezinfekcija dotoka in merilnik iztoka

Iz peščenega filtra oziroma naknadnih usedalnikov izteka očiščena voda v napravo za dezinfekcijo iztoka. Naprava za dezinfekcijo in merilnik pretoka sta vgrajena v skupno armiranobetonsko kineto. Iztočni del kinete obenem služi kot kontrolni jašek za odvzem vzorcev na vzorčevalnik iztoka iz CČN in kot dezinfekcija iztoka (IEI d. o. o., 2004).

5.2.1 Prezračevalni bazen

Prezračevalni bazen obsega dva enaka bazena. Z zaprtjem zapornic na iztoku iz peskolova se lahko iz obratovanja izloči posamezen prezračevalni bazen. Bazena sta zasnovana kot cevna reaktorja pravokotne oblike in sta armiranobetonske izvedbe. Odvisno od obratovalnih pogojev sta možni pretrgana ali simultana nitrifikacija in denitrifikacija. Štiri potopna banana mešala omogočajo krožno gibanje vode v vsakem bazenu. Horizontalna hitrost gibanja vode je nad 0,3 m/s. Stisnjen zrak proizvajajo tri volumetrična puhala, od katerih eno nastopa kot rezerva. Vsa tri puhala imajo frekvenčni regulator in se pri delovanju izmenjujejo. Stisnjen zrak se po skupnem cevovodu, na katerem je vgrajen merilnik tlaka, dovaja v oba prezračevalna bazena. Na odcepih cevovoda za zrak v oba prezračevalna bazena je vgrajen po en elektromotorni zasun za regulacijo dotoka zraka oziroma odpiranje in zapiranje dotoka zraka v oba prezračevalna bazena. Stopnja odprtosti obeh elektromotornih zasunov je prikazana na SCADI. V primeru okvare enega od obeh merilnikov vsebnosti kisika prevzame delujoči merilnik krmiljenje obeh prezračevalnih linij.

Na globini 4,75 m so za prezračevanje na posebnih segmentnih nosilne konstrukcije vgrajeni samozaporni membranski diski Roeflex, ki proizvajajo majhne mehurčke. Reže omogočajo, da zrak vstopa med membrano in ploščo. Membrane nad režami po navadi niso perforirane, kar onemogoča povratni tok suspenzije aktivnega blata v disk, kadar je pretok zraka ustavljen. Hitrost zraka v cevovodih je maksimalno 12 m/s, vrednost faktorja alfa pa je 0,65. Vnos zraka pri normalnih pogojih znaša $2.500 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$, specifičen vnos kisika pri standardnih pogojih pa minimalno $0,015 \text{ kg} \cdot \text{O}_2 / \text{m}^3_{\text{N}} \text{m}$. Globina vode v prezračevalnem bazenu je 5,00 m, skupna prostornina bazena pa je 5.930 m^3 (IEI d. o. o., 2004).

Obremenitev z BPK_5 na vtoku v prezračevalni bazen je po projektni dokumentaciji znašala $2.646 \text{ kg } \text{BPK}_5/\text{dan}$. Količina kisika, ki jo potrebujemo za biološko čiščenje, znaša $2,1 \text{ kg } \text{O}_2/\text{kg } \text{BPK}_5$. Specifični vnos kisika prezračevala je minimalno $0,015 \text{ kg } \text{O}_2/\text{m}^3_{\text{N}}\text{m}^1$. Globina potopitve difuzorjev je 4,75 m, faktor alfa pa 0,65. Iz podanih podatkov iz tabele 26 je bila izračunana potrebna količina vnosa zraka v prezračevalna bazena za dve puhali.

- izračun potrebne količine vnosa kisika:

$$2646 \frac{\text{kgBPK}_5}{\text{dan}} \cdot 2,1 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgBPK}_5} = 5556,6 \frac{\text{kgO}_2}{\text{dan}}$$

- potrebna količina vnosa zraka:

$$\frac{5556,6 \frac{\text{kgO}_2}{\text{dan}}}{0,015 \frac{\text{kgO}_2}{\text{m}^3_{\text{N}}\text{m}} \cdot 0,65 \cdot 4,75\text{m}} = 119980 \frac{\text{m}^3_{\text{N}}}{\text{dan}} = 5000 \frac{\text{m}^3_{\text{N}}}{\text{h}}$$

Potrebna količina vnosa zraka za eno puhalo znaša $2.500 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$. Pri predpostavki, da dnevna obremenitev z amonijem znaša $355 \text{ kg}/\text{dan}$, je količina kisika, ki je potrebna za celotno nitrifikacijo $1.633 \text{ kg } \text{O}_2/\text{dan}$. S pomočjo orodja za izračun prezračevanja podjetja EDI sem izračunala SOTE in AOR kot okvirno vrednost, saj za ČN Murska Sobota nisem dobila podatka o koeficientu prenosa kisika (K_{La}). Nasičena koncentracija kisika v prezračevalnem

bazenu pri standardnih pogojih znaša 10,8 mg/l. Razmerje med zimskim AOR/SOR=0,559, med poletnim pa 0,562, kar nakazuje, da so zaradi višjih poletnih temperatur in posledično manjše topnosti kisika potrebe po kisiku v poletnih mesecih pri dejanskih pogojih nekoliko višje kot pozimi. Potrebe po kisiku pri standardnih pogojih (SOR) so znašale 535,8 kg O₂/h. Izračuni in podatki so podani v spodnji tabeli.

Tabela 26: Izračuni in karakteristike pred vgradnjo dodatnih prezračeval (IEI d. o. o., 2004).

Sušni dotok Q _t	150 l/s (540 m ³ /h)
Deževni dotok Q _m	300 l/s (1.080 m ³ /h)
BPK ₅ na vtoku v prezračevalni bazen	2.646 kg BPK ₅ /dan
KPK na vtoku v prezračevalni bazen	5.292 kg/dan
Suspendirane snovi na vtoku v prezr. bazen	335 kg/d
Fosfor na vtoku v prezračevalni bazen	44 kg/d
Izbrana starost blata (10 °C)	24,4 dni
Temp. odp. vode v prezr. bazenu pozimi	10 °C
Temp. odp. vode v prezr. bazenu poleti	24 °C
Računano razmerje V _{dn} /V _{cel}	0,30
Potrebna prostornina prezrač. bazena	8.160 m ³
Prostornina nitrifikacije	9.100 m ³
Prostornina denitrifikacije	3.500 m ³
Globina vode v bazenu	5 m
Globina potopitve difuzorjev	4,75 m
Dolžina bazena	59,30 m
Širina bazena	20,00 m
OV - C (10 °C)	1,22 kg O ₂ /kg
OV - N (10 °C)	0,35 kg O ₂ /kg
O - B (10 °C) biološko čiščenje	2,10 kg O ₂ /kg
Alfa faktor	0,65
Ogljikova potreba po O ₂ pri obrat. pogojih	3.223,08 kg O ₂ /d

Se nadaljuje...

...nadaljevanje

O ₂ za celotno nitrifikacijo	3.338,12 kg O ₂ /d
AOR - celotne potrebe po O ₂	273,61 kg O ₂ /h
Čas obratovanja	24h/d
SOTE, prenos kisika v čisti vodi*	32,01 %
Nasičena konc. O ₂ v čisti vodi pri s. p.*	10,8 mg/l
Specifični vnos kisika v vodo (10 °C)	0,015 kg O ₂ /m _N ³ m ¹
Potrebna količina zraka Q _L	5.000 m ³ _N /h
Število puhal	2+1
Pretok puhal	2 x 2.500 m ³ _N /h
Pretok zraka skozi prezračevalo	8,7 m ³ _N /mh
Število prezračeval	2 x 144 kosov
Dolžina prezračevala	2 m
Prekritje dna s prezračevali	6,1 %
Potrebno prezračevanje prostora puhal	7.300 m ³ _N /h

Izračunana količina dovedenega zraka v preteklosti ni zadovoljila potrebam čiščenja, zato so v prezračevalna bazena v vsaki oksični coni dodali še dodatno linijo prezračeval in zmogljivost povečali. Po povečanju potreb po prezračevanju je v enem prezračevalnem bazenu zmontiranih 680 difuzorjev, kar na eno oksično cono znese 340 difuzorjev. Skupno število vseh difuzorjev je 1.360. V tabeli 27 so podani novi izračuni za vnos kisika. Po prejetih podatkih dotokov na čistilno napravo znaša največji dotok med mesecem oktobrom in februarjem, in sicer 12.866 m³/d. Maksimalna obremenitev z BPK₅ je včasih dosegla tudi vrednost 5.840 kg/d, v povprečju pa se je gibala med 2.000 in 3.000 kg/d. Za izračun prezračevanja sem uporabila obremenitev 4.000 kg/d. Rezultati izračunov so podani v tabeli 27.

Potrebna količina zraka za prezračevanje za določen primer po izračunih znaša 5.128,49 m³_N/h. Pri velikih obremenitvah, ko je koncentracija BPK₅ dosegla vrednost do 5.840 kg/d, se je potrebna količina dovedenega zraka povečala tudi do okoli 7.000 m³_N/h.

Iz podatkov iz tabele 28 je razvidno, da so se povprečne mesečne vrednosti BPK₅ gibale med 190 in 460 mg/l. Maksimalne vrednosti BPK₅ so segale tudi do 550 mg/l.

Tabela 27: Izračuni in karakteristike po vgradnji dodatnih prezračeval (IEI d. o. o., 2004).

Dotok na ČN	12.866 m ³ /h
BPK ₅ na vtoku v prezračevalni bazen	4.000 kg BPK ₅ /dan
Temp. odp. vode v prezr. bazenu pozimi	10 °C
Temp. odp. vode v prezr. bazenu poleti	22 °C
Globina vode v bazenu	5 m
Globina potopitve difuzorjev	4,75 m
OV - C (10 °C)	1,22 kg O ₂ /kg
Alfa faktor	0,65
Ogljikova potreba po O ₂ pri obrat. pogojih	4.880,02 kg O ₂ /d
O ₂ za celotno nitrifikacijo	1.655,97 kg O ₂ /d
AOR - celotne potrebe po O ₂	272,38 kg O ₂ /h
Čas obratovanja	24 h/d
SOTE, prenos kisika v čisti vodi	32,07 %
Nasičena konc. O ₂ v čisti vodi pri s. p.	10,76 mg/l
SOR	752,1 kg O ₂ /hr
Potrebna količina zraka Q _L	5.128,49 m ³ _N /h
Beta faktor	0,98
AOR/SOR pozimi	0,55902
AOR/SOR poleti	0,55988

Tabela 28: Izmerjene vrednosti BPK₅ na vtoku in iztoku iz čistilne naprave Murska Sobota (Petrol d. d.).

	BPK ₅ (mg/l) - vtok					BPK ₅ (mg/l) - iztok				
	okt. 2008	nov. 2008	dec. 2008	jan. 2009	feb. 2009	okt. 2008	nov. 2008	dec. 2008	jan. 2009	feb. 2009
Povpr.	460	410	317	304	190	2	2	2	7	4
Min.	420	340	228	206	80	2	2	2	6	2
Max.	500	550	368	378	310	3	3	3	8	6

V obeh prezračevalnih bazenih je nameščen merilnik vsebnosti kisika v vodi, ki je sestavljen iz merilnega pretvornika, merilne sonde, držala sonde, obešala sonde, stojala pretvornika in strehice pretvornika. Obseg merjenja vsebnosti kisika merilne sonde je od 0,1 do 20 mg kisika/l. Funkcija merilne sonde je meritev vsebnosti kisika, regulacija vnosa kisika ter prikaz vsebnosti kisika na CRN in lokalno (IEI d. o. o., 2004).

Sistem regulacije koncentracije kisika v prezračevalnih bazenih je dvonivojski. Merilnik vsebnosti kisika krmili, glede na vsebnost kisika v prezračevalnem bazenu, odprtost obeh elektromotornih zasunov. Sistem je tako nastavljen, da sta zasuna pri poziciji »zaprto« še vedno odprta okoli 20-odstotno (IEI d. o. o., 2004).

Tabela 29: Povprečne vrednosti temperature in pH odpadne vode na ČN Murska Sobota (Petrol d. d.).

	Temperatura (°C)			pH		
	povpr.	min.	max.	povpr.	min.	max.
september	20,8	19,4	22,4	7,1	6,8	7,3
oktober	18,7	17,1	20,1	7,4	7,3	7,7
november	16,3	13,7	17,8	7,3	7	7,4
december	13,4	10,3	15,4	8,1	7,8	8,3
januar	10,4	5,8	12,4	8,1	7,6	8,5
februar	9,7	7,5	11	8,4	8,1	8,9



Slika 43: Membranski diski v prezračevalnem bazenu na CČN Murska Sobota (Petrol d. d.).



Slika 44: Vgradnja potopnih banana mešal na CČN Murska Sobota (Petrol d. d.).



Slika 44: Prezračevalna bazena na CČN Murska Sobota (Petrol d. d.).

Delovanje puhal (hitrost vrtenja elektromotorjev puhal) pa krmili merilnik tlaka zraka Cerebar S PMC v cevovodu za zrak. V primeru prekoračitve največjega dovoljenega tlaka zraka v sistemu (zamašitev prezračevalnih elementov) se puhala samodejno izklopijo, alarm pa javi

na SCADI. »V primeru, da pade dejanska koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za več kot 70 % pod nastavljeno vrednost, se sproži alarm na SCADI. Nastavljeno vrednost tlaka zraka v sistemu je potrebno povečati tako, da se doseže zahtevana vsebnost kisika v prezračevalnih bazenih. Potem se zopet obratuje s prvotno nastavljenim tlakom zraka v sistemu. V primeru prekoračitve največje nastavljene vrednosti NH₄-N na iztoku iz prezračevalnih bazenov je potrebno povečati nastavljeno vsebnost kisika v prezračevalnih bazenih. Na iztoku iz bazenov je vgrajen prelivni rob.« (IEI d. o. o., 2004).

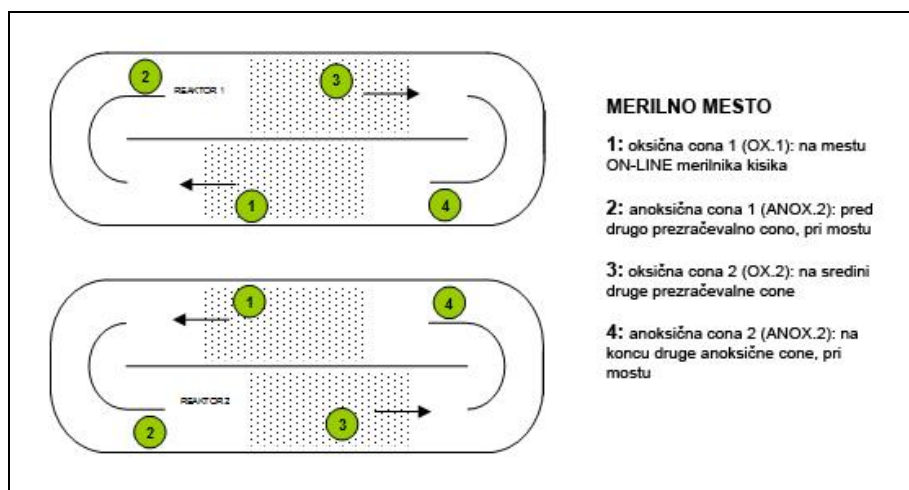
Tabela 30: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih na različnih merilnih mestih za različne mesece, povzeto po Petrol d. d.

mesec		O ₂ - meritev s prenosnim merilnikom				O ₂ - meritev s prenosnim merilnikom			
		bazen 1				bazen 2			
		merilno mesto				merilno mesto			
		1 - OX.1	2 - ANOX.2	3 - OX.2	4 - ANOX.2	1 - OX.1	2 - ANOX.2	3 - OX.2	4 - ANOX.2
		mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l	mg O ₂ /l
okt. 2008	povprečje:	0,9	0,2	0,8	0,2	1,3	0,2	0,9	0,1
	min:	0,8	0,1	0,6	0,1	1,0	0,1	0,6	0,1
	max:	1,0	0,3	0,9	0,3	1,5	0,3	1,1	0,1
nov. 2008	povprečje:	1,0	0,2	0,8	0,1	1,1	0,3	0,9	0,1
	min:	0,9	0,2	0,7	0,1	1,0	0,2	0,8	0,1
	max:	1,0	0,2	0,8	0,1	1,1	0,3	0,9	0,1
dec. 2008	povprečje:	1,0	0,5	0,8	0,2	1,0	0,5	0,7	0,1
	min:	0,9	0,4	0,7	0,1	0,9	0,4	0,7	0,1
	max:	1,0	0,5	0,8	0,2	1,0	0,5	0,7	0,1
jan. 2009	povprečje:	1,0	0,4	0,8	0,2	0,9	0,4	0,8	0,1
	min:	0,9	0,4	0,7	0,2	0,9	0,3	0,7	0,1
	max:	1,0	0,4	0,8	0,2	0,9	0,4	0,8	0,1
feb. 2009	povprečje:	1,0	0,4	0,9	0,3	1,1	0,3	0,9	0,3
	min:	1,0	0,3	0,9	0,3	1	0,3	0,8	0,2
	max:	1,0	0,4	0,9	0,3	1,1	0,3	0,9	0,3

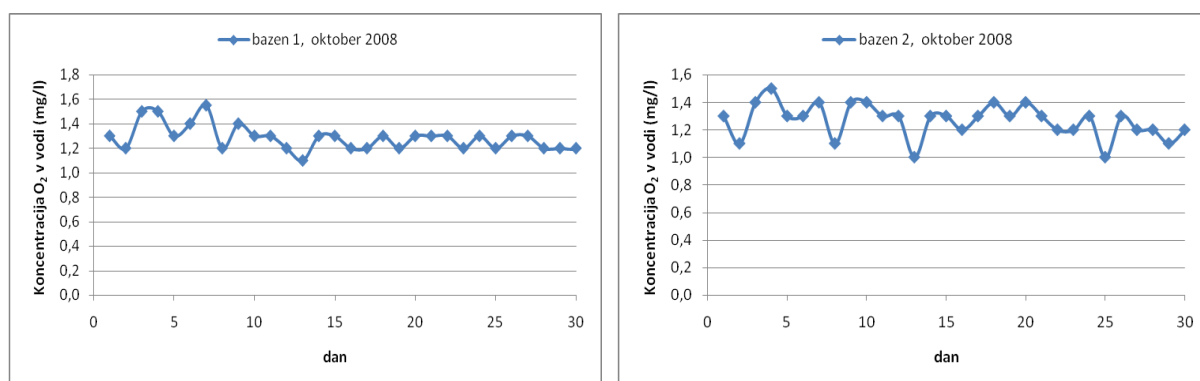
Na sliki 47 na naslednji strani so prikazana merilna mesta vsebnosti kisika v vodi v prezračevalnih bazenih na CČN Murska Sobota. Merilna mesta so razdeljena na štiri cone. Prva oksična cona (OX.1) se nahaja na mestu on-line merilnika, sledi ji anoksična cona 1 (ANOX.1) pred drugo prezračevalno cono pri mostu, naslednja je oksična cona 2 (OX.2), ki se nahaja na sredini druge prezračevalne cone, zadnja je anoksična cona 2 (ANOX.2), ki je na koncu druge anoksične cone pri mostu. Izmerjeni podatki so podani v tabeli 30 in zajemajo minimalne, maksimalne in povprečne koncentracije kisika v vodi v prezračevalnem bazenu 1 in 2.



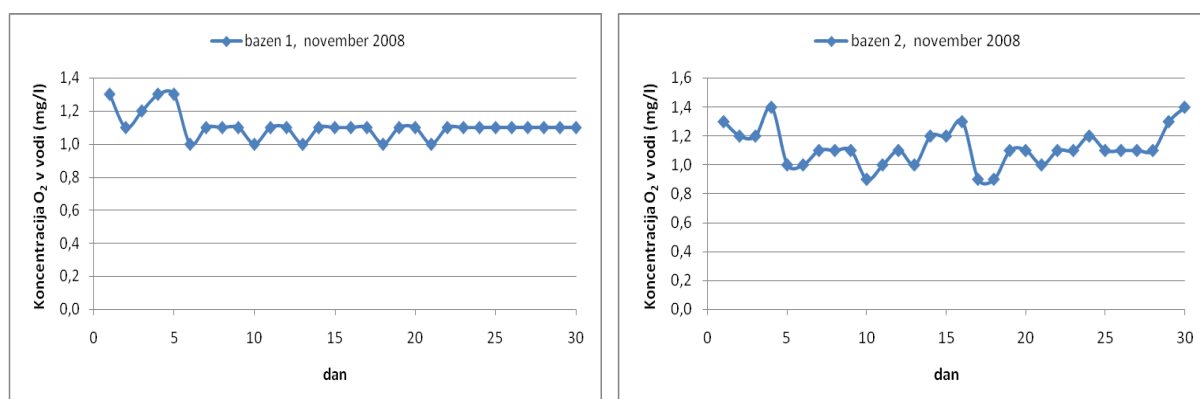
Slika 46: Pogled na prazen prezračevalni bazen na CČN Murska Sobota (Petrol d. d.).



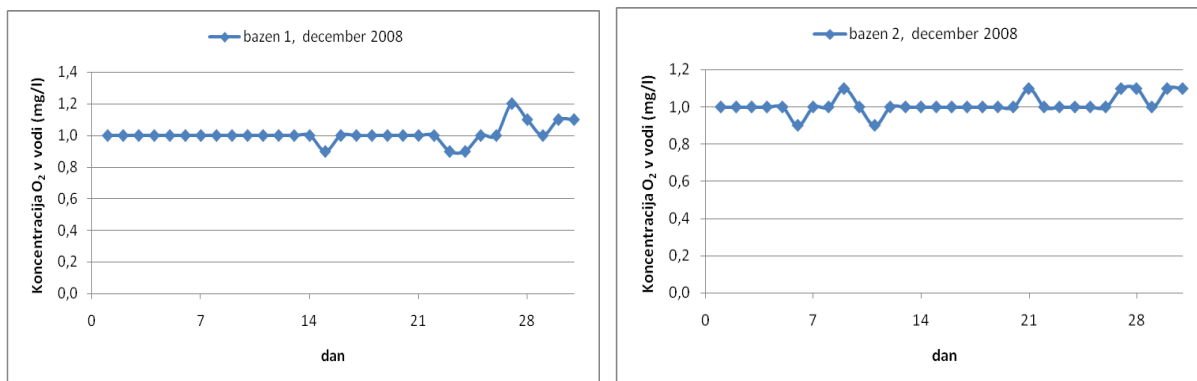
Slika 47: Shema bazena 1 in bazena 2 (Petrol d. d.).



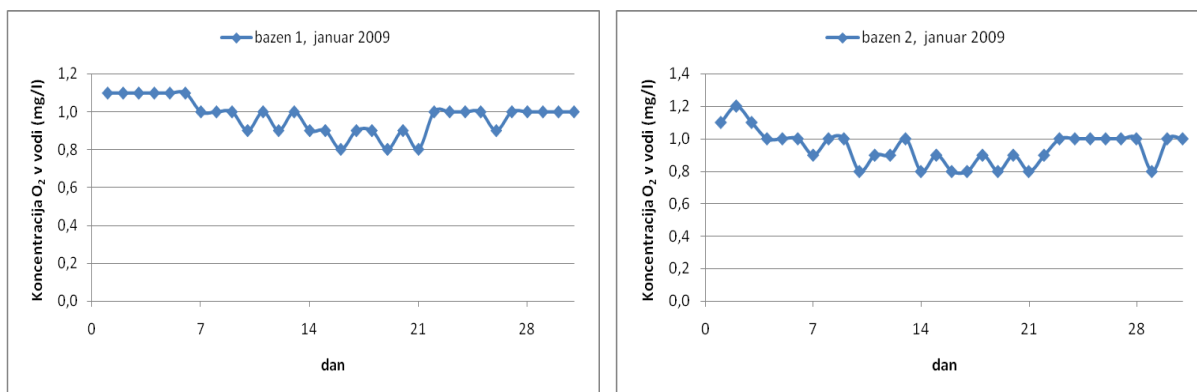
Grafikon 13: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec oktober 2008 po podatkih SCADA.



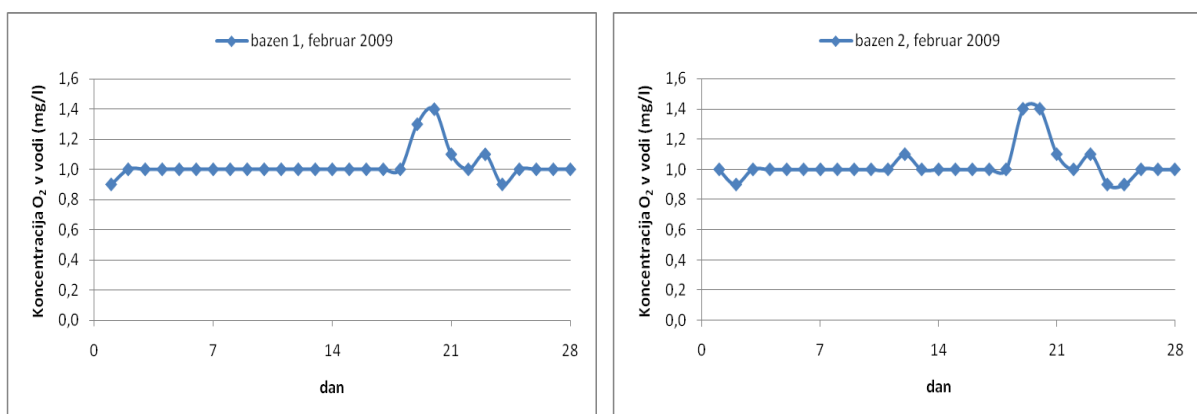
Grafikon 14: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec november 2008 po podatkih SCADA.



Grafikon 15: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec december 2008 po podatkih SCADA.



Grafikon 16: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec januar 2009 po podatkih SCADA.



Grafikon 17: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih za mesec februar 2009 po podatkih SCADA.

Tabela 31: Koncentracija kisika v prezračevalnih bazenih po podatkih SCADA.

	raztopljeni kisik (mg/l)		mesec		raztopljeni kisik (mg/l)		mesec
	bazen 1	bazen 2			bazen 1	bazen 2	
povprečje:	1,4	1,3	sep. 2008	povprečje:	1	1	dec. 2008
min:	1	0,8		min:	0,9	0,9	
max:	1,6	1,5		max:	1,2	1,1	
povprečje:	1,3	1,3	okt. 2008	povprečje:	1	0,9	jan. 2009
min:	1,1	1		min:	0,8	0,8	
max:	1,6	1,5		max:	1,1	1,2	
povprečje:	1,1	1,1	nov. 2008	povprečje:	1	1	feb. 2009
min:	1	0,9		min:	0,9	0,9	
max:	1,3	1,4		max:	1,4	1,4	

Iz projektne dokumentacije za ČN Murska Sobota ni mogoče razbrati deleža porabe energije prezračevanja. Na ČN na prezračevalnih bazenih prav tako niso vgrajeni merilci porabe električne energije. Iz različnih virov je znano, da se delež prezračevanja na komunalnih čistilnih napravah giblje med 50 in 60 %, zato sem pri določitvi porabe električne energije uporabila ta podatek. Za leto 2008 je povprečna poraba električne energije na ČN Murska Sobota znašala 139.000 kWh/mesec, kar znese 1.668.000 kWh/leto.

Tabela 32: Predvidena poraba električne energije in stroškov prezračevanja glede na povprečno porabo energije na mesec.

Povpr. poraba (kWh/leto)	Povpr. celotna poraba (kWh/mesec*)	Odstotek kWh za prezračevanje (%)	Stroški prezračevanja (kWh /mesec)	Stroški prezračevanja (kWh/mesec PE)	Prezračevanje (kWh/leto PE)
1.668.000	139.000	35	48.650	1,158	13,900
		40	55.600	1,324	15,886
		45	62.550	1,489	17,871
		50	69.500	1,655	19,857
		55	76.450	1,820	21,843

*vir Petrol d. d.

5.3 Primerjava rezultatov

ČN Ljutomer in ČN Murska Sobota sodita med čistilne naprave, katerih kapaciteta se giblje med 2.000 in 10.000 PE. Obe za prezračevanje uporabljata stisnjen zrak. Na ČN Ljutomer poteka prezračevanje z membranskimi perforiranimi cevmi, na ČN Murska Sobota pa se uporabljajo diski iz perforirane membrane za ustvarjanje majhnih mehurčkov. Aerobna biološka postopka odstranjevanja organsko razgradljivih snovi se med seboj razlikujeta. V Ljutomeru uporabljajo modificiran postopek šaržnega biološkega reaktorja, kjer se med posameznimi cikli prezračevanje prekine. Oksidacijski jarek na ČN Murska Sobota pa je nepretrgoma prezračevan, vsebuje pa anoksične cone, kjer poteka denitrifikacija. V tabeli 33 je prikazana primerjava med izračuni za prezračevanje na obeh napravah.

ČN sta različnih velikosti, zato se razlikujeta tudi mesečna dotoka na čistilno napravo in s tem tudi obremenitev z BPK_5 (kg/d). Globina v obeh prezračevalnih bazenih znaša 5 m, potopitev prezračeval pa se razlikuje, kar nekoliko vpliva na nasičeno koncentracijo kisika v vodi. Tako pri ČN Ljutomer znaša globinski korekcijski faktor za nasičenje s kisikom $\delta = 1,15895$ in nasičena koncentracija kisika pri standardnih pogojih $C_{\infty,20}^* = 10,54 \text{ mg/l}$, medtem ko sta na ČN Murska Sobota $\delta = 1,18325$ in $C_{\infty,20}^* = 10,76 \text{ mg/l}$. Tlačni korekcijski faktor za nasičenje s kisikom je odvisen od nadmorske višine ČN. ČN Ljutomer leži malo nižje od ČN Murska Sobota. Ker zračni tlak z višino pada, znaša zračni pritisk na nadmorski višini 172,8 m 1012,71 hPa, na višini 189 m pa 990,80 hPa. Izračunani korekcijski faktor za Ljutomer je 0,999, za ČN Murska Sobota pa 0,978. Vrednosti temperaturnih korekcijskih faktorjev so si skoraj enake in nakazujejo, da je z večanjem temperature nasičena koncentracija kisika upada. Koncentracija kisika v prezračevalnem bazenu na ČN Ljutomer, kjer potekata tudi nitrifikacija in denitrifikacija, v povprečju znaša 3,1 mg/l. Za razliko je na ČN Murska Sobota koncentracija kisika v oksičnem delu bazena 1,1 mg/l, potekata pa tudi nitrifikacija in denitrifikacija. Razlika je zelo velika. Po izračunih za prezračevanje je količina kisika, ki je potrebna za odstranjevanje ogljikovega onesnaženja, na ČN Ljutomer 1.316 kg O_2 /d, na ČN Murska Sobota pa 4.880,02 kg O_2 /d.

Tabela 33: Primerjava rezultatov za prezračevanje na ČN Ljutomer in ČN Murska Sobota.

Parameter	ČN Ljutomer	ČN Murska Sobota
Količina očiščene odpadne vode	2.099 m ³ /d (februar)	12.866 m ³ /h
BPK ₅	514 mg/l; 1.078,8 kg/d	4.000 kg/dan
Amonij	26,1 mg/l	28,0 mg/l
Nadmorska višina	172,8 m. n. m	189 m. n. m.
Korekcijski faktor tlaka za nasičenost s O ₂	$\Omega = 0.999$	$\Omega = 0.978$
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu pozimi	11 °C	12 °C
Povpr. temp. odp. vode v pr. bazenu poleti	21 °C	22 °C
Temperaturni korekcijski faktor τ (zima)	1,2136	1,2423
Temperaturni korekcijski faktor τ (poletje)	0,9802	0,9614
Globna vode v prezračevalnem bazenu	5 m	5 m
Globina vpihavanja zraka	4,12 m	4,75 m
Prostornina prezračevalnega bazena	2 x 3.190 m ³	2 x 5.930 m ³
Dejanska konc. O ₂ v odpadni vodi	3,1 mg/l	1,1 mg/l
Količina kisika za ogljikovo oksidacijo pri obratovalnih pogojih*	1.316 kg O ₂ /d	4.880,02 kg O ₂ /d
Kisik za celotno nitrifikacijo*	251,97 kg O ₂ /d	1.655,97 kg O ₂ /d
Celotne potrebe po kisiku (AOR)*	65,32 kg O ₂ /h	272,38 kg O ₂ /h
Alfa faktor	0,65	0,65
Beta faktor	0,98	0,98
AOR/SOR pozimi*	0,45224	0.55902
AOR/SOR poleti*	0,42455	0.55988
SOR*	153,8 kg O ₂ /h	752,1 kg O ₂ /h
Nasičena konc. O ₂ pri st. pogojih	10,54	10,76 mg/l
Trajanje prezračevanja	12 h/d	24 h/d
SOTE, prenos kisika v čisti vodi*	21,28 %	32,07 %
Potrebna količina zraka*	2.438,29 m ³ _N /h = 1.219,15 m ³ _N /h bazen	5.128.49 m ³ _N /h = 2.564 m ³ _N /h bazen

Potrebna količina zraka pri dejanskih pogojih v oba prezračevalna bazena v Ljutomeru znaša 2.438,29 m³_N/h, v Murski Soboti pa 5.128,49 m³_N/h. Prostornina prezračevalnih bazenov na ČN Ljutomer je manjša kot na ČN Murska Sobota. Razmerje prezračevanja na prostornino bazena na ČN Ljutomer znaša 0,764 in je manjše kot na ČN Murska Sobota, kjer znaša 0,864. Iz tega lahko sklepam, da je za določen volumen odpadne vode na ČN Ljutomer vpihanega več zraka kot na ČN Murska Sobota. Ta podatek ne preseneča, saj je koncentracija kisika na ČN Ljutomer vzdrževana pri visokih vrednostih, ki se gibljejo tudi nad 4 mg/l. Pomemben faktor, ki vpliva na prezračevanje in s tem na koncentracijo kisika, je globina potopitve difuzorjev. Ti so na ČN na manjši globini kot na ČN Murska Sobota, kar zmanjša prenos kisika in za isto koncentracijo kisika potrebujemo več dovedenega zraka.

Stroški prezračevanja na ČN Ljutomer po izračunih znašajo 64 % vseh stroškov energije na ČN. Povprečni mesečni strošek po izračunih za leto 2008 je bil 1,339 kWh/mesec PE. Za ČN Murska Sobota ni bilo mogoče izračunati odstotka stroškov prezračevanja. Da bi prezračevanje na ČN Murska Sobota bilo stroškovno podobno ČN Ljutomer, bi njihov delež moral biti okrog 40 %, saj bi takrat stroški prezračevanja znašali 1,324 kWh/mesec PE.

Celotni letni stroški na ČN Ljutomer za leto 2008 so znašali 577.497 kWh, letni stroški prezračevanja pa 369.598 kWh. Celotni letni stroški na ČN Murska Sobota za leto 2008 so znašali 1.668.000 kWh, letni stroški prezračevanja, pri 40 % za prezračevanje, pa 667.200 kWh. Z večanjem stroškov za prezračevanje, ki bi preseglo 40 % celotne porabljene energije, bi stroški prezračevanja na ČN Murska Sobota bili večji od stroškov prezračevanja na ČN Ljutomer. Na obe ČN bi bilo smotrno namestiti merilnike porabe električne energije za prezračevanje, saj je le iz dejanskega stanja različnih parametrov v času obratovanja možno zmanjšati stroške porabe energije.

ČN Ljutomer je glede na svojo velikost za zdaj še neobremenjena na predvidene vrednosti. Tako je učinkovitost čiščenja zelo velika, vendar je bilo število meritev različnih parametrov na iztoku, ki jih je po zakonu treba opraviti, le 12 v enem letu, saj po Uredbi o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo (Ur. l. RS št. 47/05, člen 14, 45/07, člen 8) in Uredbi o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz komunalnih čistilnih naprav (Ur. l. RS št. 45/07) na ČN Ljutomer ni bila presežena noben meritev za manj kot 100 % ali več kot 100 %.

Na ČN Murska Sobota v svojem laboratoriju opravijo več meritev. V povprečju meritve BPK_5 delajo vsakih 5 dni, meritve KPK pa še bolj pogosto. Iz spodnje tabele je razvidno, da je učinek čiščenja BPK in KPK na obeh čistilnih napravah zelo velik in se giblje nad 96 %. Nekoliko nižji učinek čiščenja celotnega fosforja je na ČN Murska Sobota. Največja razlika je pri čiščenju celotnega dušika, kjer je na ČN Ljutomer učinkovitost čiščenja 96,61-odstotna, na ČN pa 63,2-odstotna. Torej se večje razlike pojavljajo pri celotnem čiščenju dušika. Vendar je potrebno upoštevati, da je trenutni dotok na ČN Ljutomer veliko manjši od načrtovanega, kar lahko ugodno vpliva odstranjevanje dušikovih spojin.

Tabela 34: Učinek čiščenja BPK, KPK in celotnega fosforja na ČN Ljutomer in ČN Murska Sobota (KSP Ljutomer, Petrol d. d.).

	Učinek čiščenja (%)			
	BPK_5	KPK	Celotni fosfor	Celotni dušik
ČN Ljutomer	97,71	99,12	92,73	96,61
ČN Murska Sobota	96,15	98,71	83,05	63,2

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem obravnavala prezračevalne procese na KČN. Procesi prenosa kisika so zelo kompleksni in odvisni od številnih vplivov, kot so kinetika reakcij, hitrost prenosa kisika, narava odpadne vode, likalni okolijski pogoji (temperatura, pH, nadmorska višina), prisotnost toksičnih ali prepovedanih substanc na vtoku, intenziteta mešanja in oblika prezračevalnega bazena, globina potopitve difuzorjev, stroški ter fleksibilnost glede potreb čiščenja v prihodnosti. Največji vpliv na ekonomsko delovanje čistilne naprave in porabo energije ima prezračevanje. Stroški prezračevanja obsegajo med 45 in 75 odstotkov vseh stroškov na ČN. Problemi, ki se pojavljajo pri ČN z aktivnim blatom, so predvsem zagotavljanje zadostne količine potrebnega kisika za biokemijsko razgradnjo organskih snovi. Na ČN Murska Sobota se je ta problem pojavil, saj so morali povečati vnos zraka v oksidacijski jarek, kar je pomenilo nove investicijske stroške za posodobitev ČN, ki bi jih pa lahko porabili za obširnejši monitoring različnih parametrov, predvsem na prezračevalnih objektih. Obe čistilni napravi sta računalniško vodeni in imata vgrajeno merilno regulacijsko opremo, s pomočjo katere lahko občutno zmanjšajo stroške obratovanja. Vendar je za kakovostno čiščenje potrebno dobro poznati vse biološke procese, ki pri tem potekajo, zato vodenje ČN ni preprosto delo. Velikokrat se izkaže, da so prav na področju vodenja čistilne naprave pomanjkljivosti, ki sicer ne vplivajo na učinkovitost čiščenja, ampak zaradi nepopolnega poznavanja delovanja procesov ustvarjajo veliko večje stroške čiščenja, kot je potrebno. Biološki procesi so odvisni od prisotnosti ali odsotnosti določene količine raztopljenega kisika v reaktorjih. Sistemi za nadzor prezračevanja na ČN morajo zato delovati pravilno in zanesljivo. Njihovo delovanje je odvisno od dinamičnih karakteristik kot so: vrsta procesa, prezračevalna oprema, meritvena oprema, vrsta nadzora in kontrolni parametri. Vse te lastnosti je potrebno vključiti v načrtovanje, merjenje in nadzorne sisteme. Izobraževanje zaposlenih na ČN igra pri tem ključno vlogo, saj je le na takšen način omogočeno optimalno čiščenje odpadne vode. Iz vidika vodij čistilnih naprav je pomembno, da zmanjšajo stroške čiščenja in zagotovijo stabilno in zanesljivo delovanje ČN ter minimizirajo napore, ki so potrebni za vzdrževanje novih nameščenih sistemov. Investicije v različne meritve in monitoring učinkovitosti prenosa kisika ter delovanja sistema prezračevanja lahko predstavljajo neki večji investicijski strošek, vendar so dolgoročno zelo priporočljive, saj z njihovo pomočjo lahko vidimo dejansko stanje in z različnimi ukrepi izboljšamo delovanje

procesov in zmanjšamo stroške prezračevanja, kar se nam dolgoročno obrestuje. Pozornost je potrebno dati tudi vzdrževanju prezračevalne opreme. Večje stroške prezračevanja ustvarjajo tudi zamašeni in neočiščeni difuzorji, saj skozi pore ustvarijo manj mehurčkov, ki pa so po velikosti podobni že velikim, katerih učinek prenosa kisika je veliko manjši. Zato je priporočeno, da čiščenje difuzorjev poteka vsaj vsakih 24 mesecev.

VIRI IN LITERATURA

ASCE 1998. *Design of municipal wastewater treatment plants: WEF Manual Practice 8: ASCE Manual and report on Engineering Practice No. 76: Volume 2*. Water Environment Federation, ASCE. Alexandria, Reston: 2500 str.

ATV-DVWK-A. 131E 2000. *Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants*: 57 str.

ATV-M 209. 1996. *Measurement of the Oxygen Transfer in Activated Sludge Aeration Tanks with Clean Water and in Mixed Liquor*: 56 str.

Degremont, O. 2002. *Water Treatment Handbook (cd-rom)*. Pariz. Lavoisier.

Droste Ronald L. 1997. *Theory and practice of water and wastewater treatment*. ZDA, John Wiley & Sons, Inc.: 816 str.

Gray. 2004. *Biology of wastewater treatment*. London, Imperial College press: 1421 str.

IEI d. o. o., 2004. PID, CČN Murska Sobota. Maribor.

IEI d. o. o., 2005. PID, CČN Ljutomer. Maribor.

Jördening, Winter. 2005. *Environmental Biotechnology. Concepts and applications*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag G,bH & Co. KGaA: 488 str.

Komunala javno podjetje d. o. o., Murska Sobota. www.komunalams.si, (27. 3. 2008).

KSP Ljutomer d. o. o., Ljutomer. www.ksp-ljutomer.si, (23. 3. 2008).

Lin, Shundar, 2001. *Water and wastewater calculations manual*. New York, McGraw-Hill: 854 str.

Mueller, Boyle, Pöpel, 2002. *AERATION: Principles and Practise*. Boca Raton, Florida, CRC Press: 353 str.

Panjan Jože, 2000. *Čiščenje odpadnih voda (Študijsko gradivo)*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 169 str.

Panjan Jože, 2004. *Količinske in kakovostne lastnosti voda (Študijsko gradivo)*. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Univerza v Ljubljani. Ljubljana.

Panjan Jože, 2005. *Osnove zdravstveno hidrotehnične infrastrukture: vodovod in čiščenje pitnih voda, odvod in čiščenje onesnaženih voda in komunalni odpadki..* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 289 str.

Petrol d. d., Ljubljana.

Qasim, Syed, R. 1998. *Wastewater treatment plants: Planning, design and operation*. New York, CRC Press: 1126 str.

Rosso, D., Stenstrom, M. K., 2006. *Surfactant effects on α - factors in aeration systems*. Water research 40: 1397-1404.

Rosso, Libra, Wiehe, Stenstrom, 2008. *Membrane properties change in fine-pore aeration diffusers: Full-scale variations of transfer efficiency and headloss*. Water research 42: 2640-2648.

Roš Milenko, 2001. *Biološko čiščenje odpadne vode*. Ljubljana, GV Založba d. o. o.: 243 str.

Roš, Milenko, 1993, *Respirometry of Activated Sludge*. Lancaster, ZDA. Technomic Publishing Co., Inc.

Sykes, Walker. 2003. Section II: Environmental engineering. V: Chen, V. F., Liew. The Civil Engineering handbook. New York, CRC Press: 2904 str.

Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003. *Wastewater engineering, Treatment and Reuse*. New York, McGraw-Hill: 1819 str.

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadnih vod iz komunalnih čistilnih naprav. Ur. L. RS št. 35/98.

Vesilind, A. 2003. *Wastewater treatment plant design*. London, IWA: 512 str.

Wiesmann, In Su Choi, Dombrowski. 2007. *Fundamentals of Biological Wastewater Treatment*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: 391 str.

ABJ, <http://www.abjwastewater.com>

EDI, Environmental Dynamics Inc., www.wastewater.com

www.biogest-international.de

www.ittadvancedwatertreatment.com

www.klasystems.com/index.shtml

www.mtsjets.com

www.sanitaire.com

PRILOGA A: Koncentracija raztopljenega kisika v vodi c' za različne temperature in koncentracije kloridov; $c = 20,9\%$ O_2 v zraku; $p_{zrak} = 760bar$ (Chow et al., 1972 v Wiesmann et al., 2007).

Temperatura (°C)	Koncentracija kloridov (mg/L)				
	0	5.000	10.000	15.000	20.000
0	14,62	13,79	12,97	12,14	11,32
1	14,23	13,41	12,61	11,82	11,03
2	13,84	13,05	12,28	11,52	10,76
3	13,48	12,72	11,98	11,24	10,5
4	13,13	12,41	11,69	10,97	10,25
5	12,8	12,09	11,39	10,7	10,01
6	12,48	11,79	11,12	10,45	9,78
7	12,17	11,51	10,85	10,21	9,57
8	11,87	11,24	10,61	9,98	9,36
9	11,59	10,97	10,36	9,76	9,17
10	11,33	10,73	10,13	9,55	8,98
11	11,08	10,49	9,92	9,35	8,8
12	10,83	10,28	9,72	9,17	8,62
13	10,6	10,05	9,52	8,98	8,46
14	10,37	9,85	9,32	8,8	8,3
15	10,15	9,65	9,14	8,63	8,14
16	9,95	9,46	8,96	8,47	7,99
17	9,74	9,26	8,78	8,3	7,84
18	9,54	9,07	8,62	8,15	7,7
19	9,35	8,89	8,45	8	7,56
20	9,17	8,73	8,3	7,86	7,42
21	8,99	8,57	8,14	7,71	7,28
22	8,83	8,42	7,99	7,57	7,14
23	8,68	8,27	7,85	7,43	7
24	8,53	8,12	7,71	7,3	6,87
25	8,38	7,96	7,56	7,15	6,74
26	8,22	7,81	7,42	7,02	6,61
27	8,07	7,67	7,28	6,88	6,49
28	7,92	7,53	7,14	6,75	6,37
29	7,77	7,39	7	6,62	6,25
30	7,63	7,25	6,86	6,49	6,13

- ii Kolbl S., Prezračevalni sistemi na KČN in njihova primerjava na CČN Ljutomer in Murska Sobota.
Dipl. nal. - UNI - Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.
-

PRILOGA B: Povprečne koncentracije raztopljenega kisika v prezračevalnem bazenu v času meritev BPK in KPK glede na trajanje cikla na ČN Ljutomer.

trajanje cikla (min)	koncentracija O ₂ (mg/l)
0	0,40
10	1,36
20	2,31
30	2,61
40	2,40
50	2,40
60	2,51
70	2,50
80	2,40
90	2,52
100	2,68
110	3,19
120	3,10
130	2,05
140	0,43
150	0,06
160	0,08
170	0,18
180	0,20
190	0,36
200	0,29
210	0,33
220	0,39
230	0,28
240	0,25

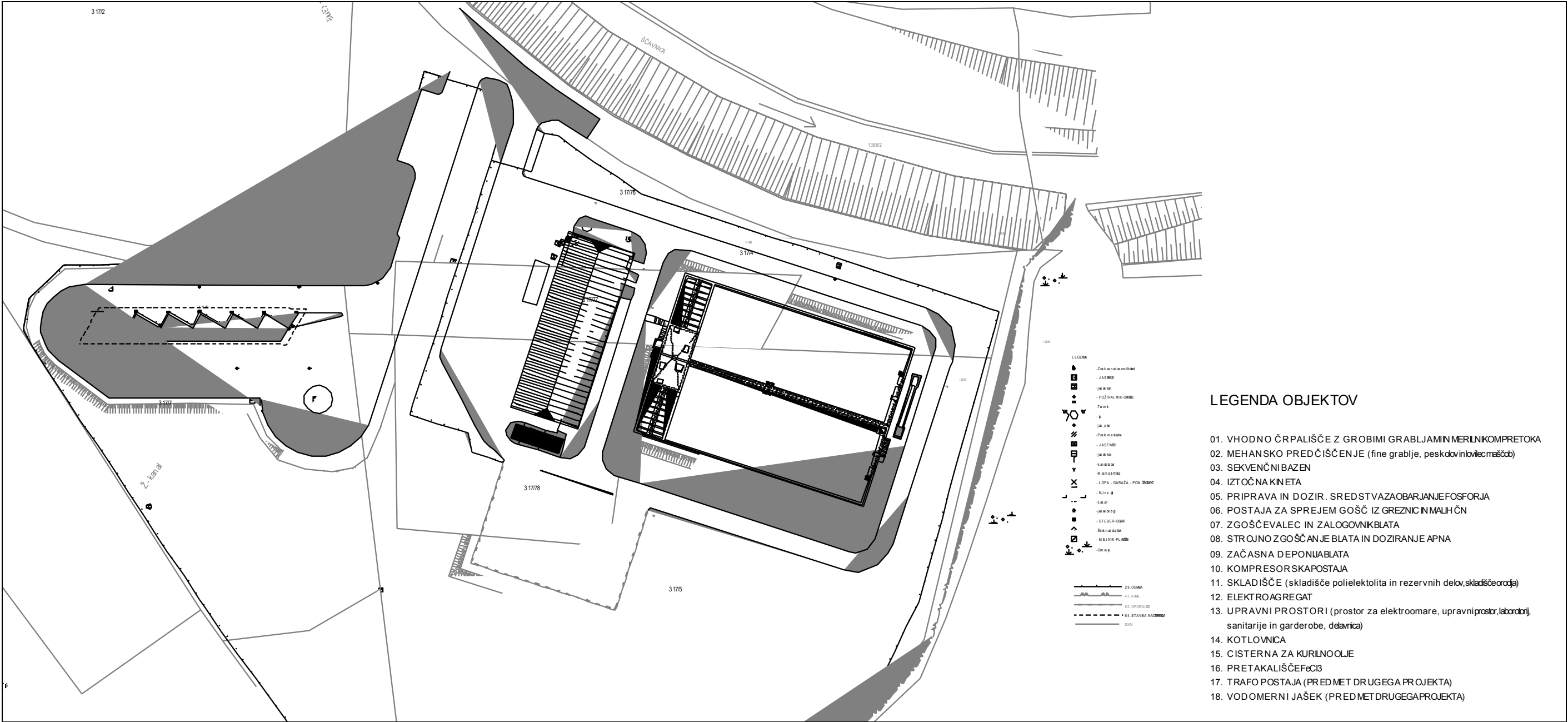
PRILOGA C Izmerjene obremenitve na vtoku in iztoku iz ČN Murska Sobota ter učinek čiščenja za konec leta 2008 in začetek leta 2009 (Petrol d. d.).

		VTOK - obremenitve						IZTOK - obremenitve				IZTOK - učinek čiščenja			
		KPK	BPK ₅	celotni dušik	celotni fosfor	PE _(KPK120)	PE _(BPK60)	KPK	BPK ₅	celotni dušik	celotni fosfor	KPK	BPK ₅	celotni dušik	celotni fosfor
		kg O ₂ /d	kg O ₂ /d	kg N/d	kg P/d			kg O ₂ /d	kg O ₂ /d	kg N/d	kg P/d	%	%	%	%
Sep.	povprečje:	3.917	2.548	326	72	32.644		162		58	11	94,8 %	98,7 %		85,1 %
	min:	1.153	1.163	185	69	9.612		80		57	9	86,5 %	95,1 %		82,5 %
	max:	9.681	5.840	486	75	80.673		383		58	12	98,2 %	99,7 %		87,8 %
Okt.	povprečje:	4.392	2.607	273	75	36.602	43.450	106	12	85	13	97,5 %	99,5 %	69,8 %	82,5 %
	min:	3.175	2.068	227	71	26.460	34.461	80	9	55	10	95,3 %	99,5 %	60,9 %	76,6 %
	max:	6.860	3.233	314	83	57.170	53.883	175	18	104	17	98,2 %	99,6 %	81,5 %	87,5 %
Nov.	povprečje:	6.176	2.361	352	105	51.467	39.349	101	13	92	11	98,0 %	99,4 %	75,4 %	87,9 %
	min:	2.998	1.660	239	52	24.985	27.670	64	9	54	7	96,9 %	99,2 %	68,3 %	80,5 %
	max:	19.636	3.449	440	173	163.629	57.475	199	17	116	16	99,2 %	99,7 %	79,8 %	94,2 %
Dec.	povprečje:	4.765	1.817	299	62	39.709	30.280	131	13	109	14	97,2 %	99,3 %	66,7 %	83,2 %
	min:	2.770	1.163	241	46	23.082	19.384	70	10	57	3	95,5 %	99,1 %	48,3 %	73,0 %
	max:	11.821	2.373	475	101	98.507	39.554	297	16	197	60	98,3 %	99,5 %	78,1 %	91,4 %
Jan.	povprečje:	4.741	2.216	336	69	39.509	36.939	164	50	145	9	95,9 %	97,8 %	55,3 %	85,7 %
	min:	2.466	1.639	185	35	20.549	27.317	76	29	55	6	87,6 %	97,3 %	46,3 %	81,2 %
	max:	10.165	3.286	486	104	84.706	54.774	369	89	193	14	98,8 %	98,6 %	70,1 %	93,8 %
Feb.	povprečje:	4.088	2.913	302	57	34.068	48.550	240	61	152	13	93,5 %	97,6 %	48,8 %	73,9 %
	min:	2.251	1.594	234	29	18.762	26.572	147	24	97	9	87,2 %	95,1 %	39,7 %	55,1 %
	max:	10.794	5.840	484	141	89.948	97.326	478	110	222	18	97,5 %	98,9 %	70,6 %	87,0 %

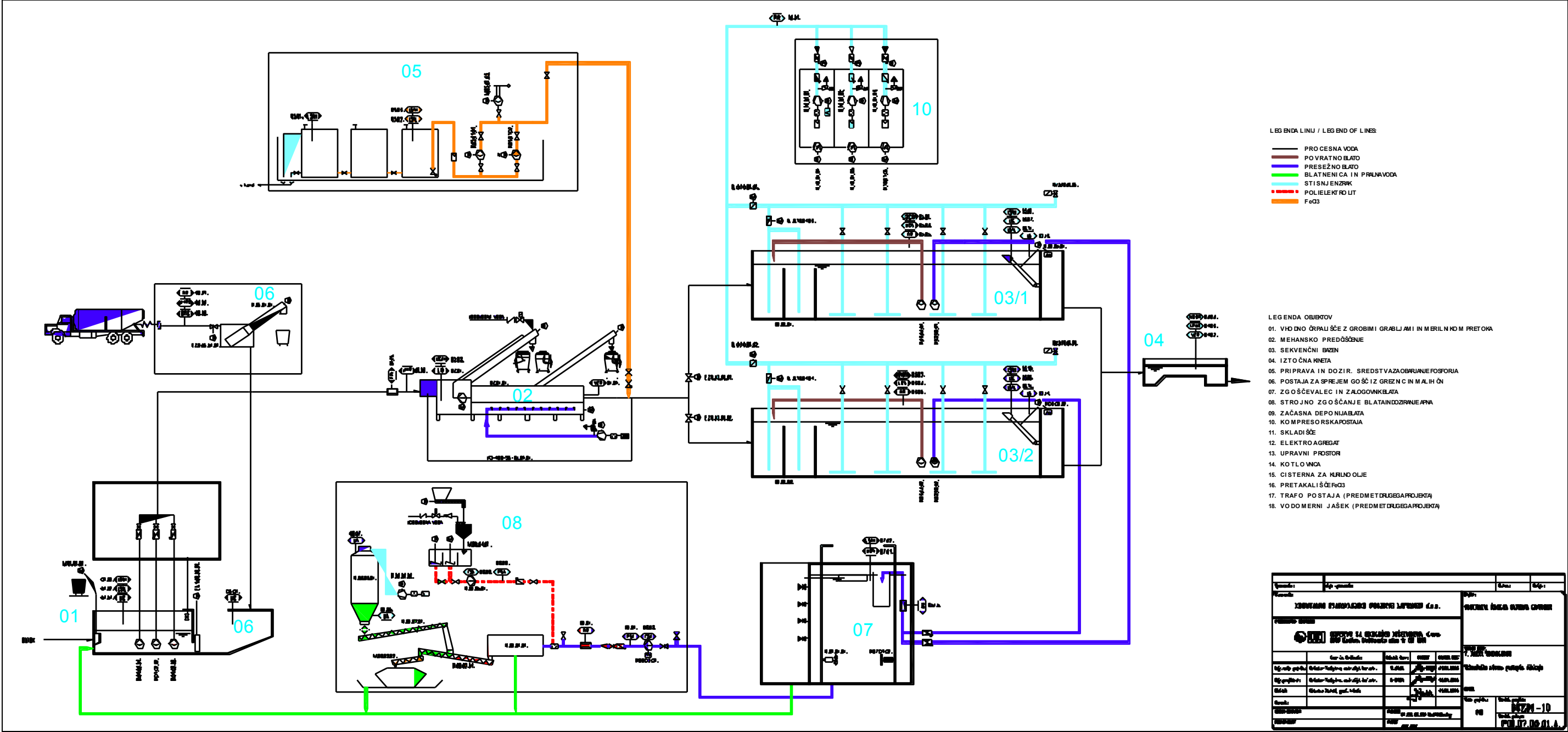
PRILOGA D Podatki o meritvah na vtoku in iztoku iz ČN Ljutomer za leto 2008 (KPS Ljutomer).

Naziv parametra		Mejna vred.	Št. vzorčenja												Povpr. vrednost	Min. vrednost	Maks. vrednost	Vsota
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
	dotok	/	5	28	70	108	176	203	241	277	327	402-08	434-08	471-08	/	/	/	/
	iztok	/	6	30	71	109	177	204	242	278	328	403-08	435-08	472-08	/	/	/	/
Datum vzorč. Q v času vzor. (m ³)	dotok	/	8. 1. 2008	6. 2. 2008	25. 3. 2008	14. 4. 2008	15. 5. 2008	2. 6. 2008	30. 6. 2008	4. 8. 2008	1. 9. 2008	15. 10. 2008	10. 11. 2008	1. 12. 2008	/	/	/	/
	iztok	/													/	/	/	/
	dotok	/	2.634	1.823	3.362	1.465	1.669	4.669	1.880	2.481	2.487	1.894	1.455	3.736	2.462,9	/	/	/
	iztok	/	2.555	2.387	3.358	1.465	1.669	4.669	1.880	2.481	2.487	1.894	1.455	3.736	2.503,0	/	/	/
Temperat.	dotok	/	10,6	10,4	10,1	11,4	13,9	16,2	18,1	18,7	17,9	17,5	16,6	11,6	14,4	10,1	18,7	/
	iztok		9,2	10,0	9,4	14,3	18,7	21,7	22,6	23,3	20,7	18,2	15,3	12,1	16,3	9,2	23,3	/
pH	dotok	/	8,17	7,40	7,82	7,42	7,21	7,16	6,98	7,31	7,55	6,98	7,29	8,42	7,5	7,0	8,4	/
	iztok		7,31	7,30	7,17	7,40	7,47	7,53	7,40	7,51	7,49	7,54	7,38	7,55	7,4	7,2	7,6	/
Amonijev dušik (mg/l)	dotok	/	33,1	32,5	20,8	30,6	33,1	27,5	24,6	20,8	18,4	30,5	25,5	15,5	26,08	15,50	33,10	312,90
	iztok	10	LOQ	1,3	LOQ	LOD	LOQ	LOD	1,2	LOD	LOQ	LOQ	LOD	LOD	0,38	1,23	1,29	2,52
KPK (mg/l)	dotok	/	798	983	618	758	1.161	1.104	991	1.121	533	1.151	802	855	906	533	1.161	10.875
	iztok	110	LOQ	32	LOD	LOQ	LOQ	LOQ	LOD	LOQ	LOD	LOQ	LOD	LOQ	14	32	32	32
(%)	učinek		97	96	98	97	98	98	99	98	98	98	99	97	97,71	95,7	99,1	
BPK ₅ (mg/l)	dotok	/	486	502	311	496	611	678	488	474	390	799	479	452	514	311	799	6.166
	iztok	20	LOQ	8,2	LOD	LOQ	LOD	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	LOQ	2	8	8	8
(%)	učinek		99	98	100	99	100	99	99	99	99	99	99	99	99,12	97,9	99,9	
Celotni fosfor (mg/l)	dotok	/	9,84	8,27	7,12	9,63	14,75	11,90	11,45	10,80	10,30	14,20	9,92	11,20	10,78	7,12	14,75	129,4
	iztok		0,34	0,82	0,15	0,20	0,75	0,61	1,18	0,71	2,07	1,40	1,91	0,19	0,86	0,15	2,07	10,3
(%)	učinek		97	87	98	98	95	95	90	93	80	90	81	98	92,73	79,9	98,3	
Celotni dušik (mg/l)	dotok	/	53,6	49,9	38,1	53,8	62,8	53,5	48,3	46,1	38,0	58,2	46,6	38,0	48,9	38,0	62,8	586,9
	iztok	25	1,91	2,56	1,51	2,06	1,78	1,28	2,35	1,37	1,64	1,32	1,61	0,83	1,7	0,8	2,6	20,2
(%)	učinek		97	93	96	96	97	98	95	97	96	98	97	98	96,61	93,3	97,8	

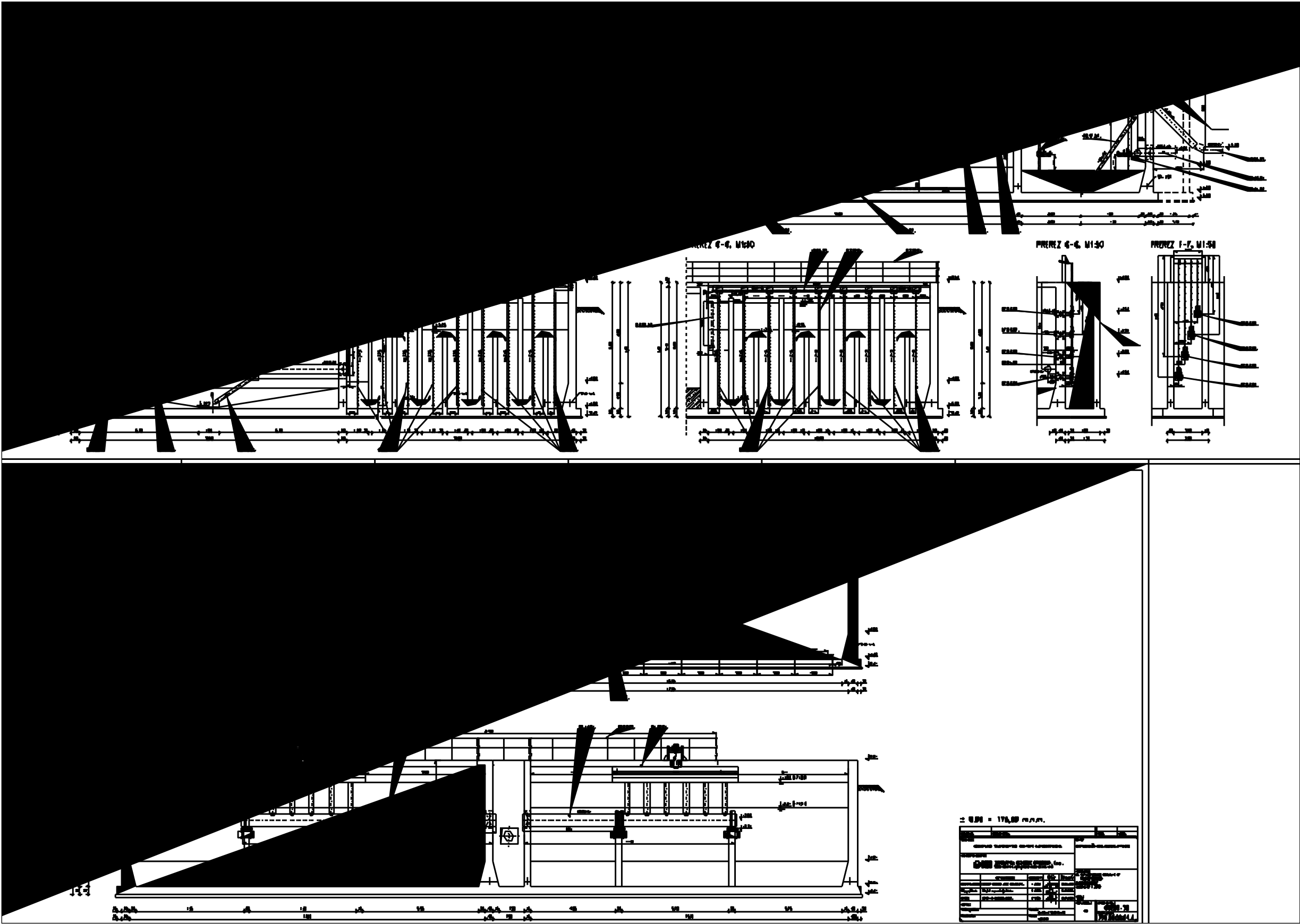
PRILOGA E Načrt zunanje ureditve ČN Ljutomer (IEI d.o.o., 2005).



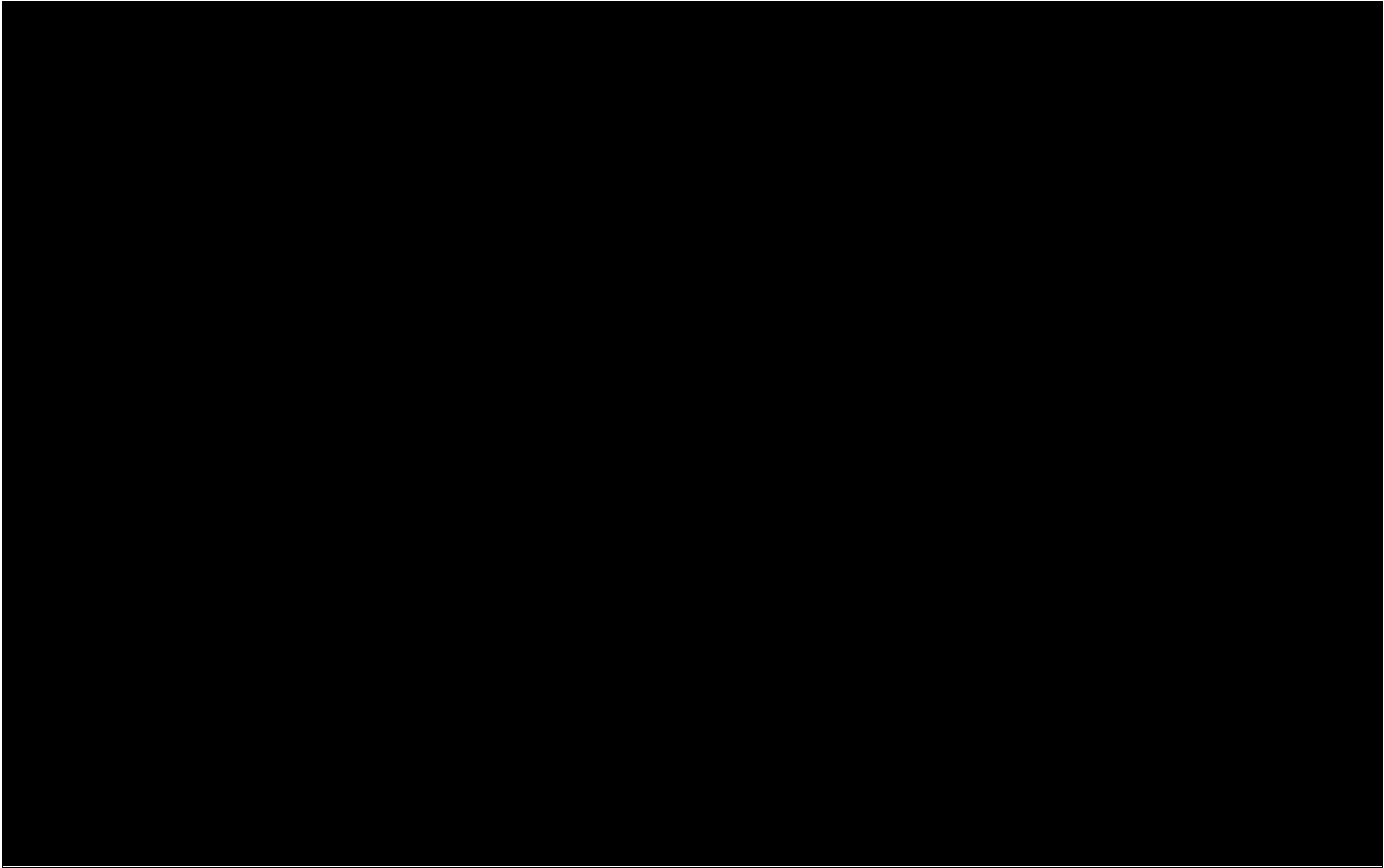
PRILOGA F Tehnološka shema postopka čiščenja na ČN Ljutomer (IEI d.o.o., 2005).



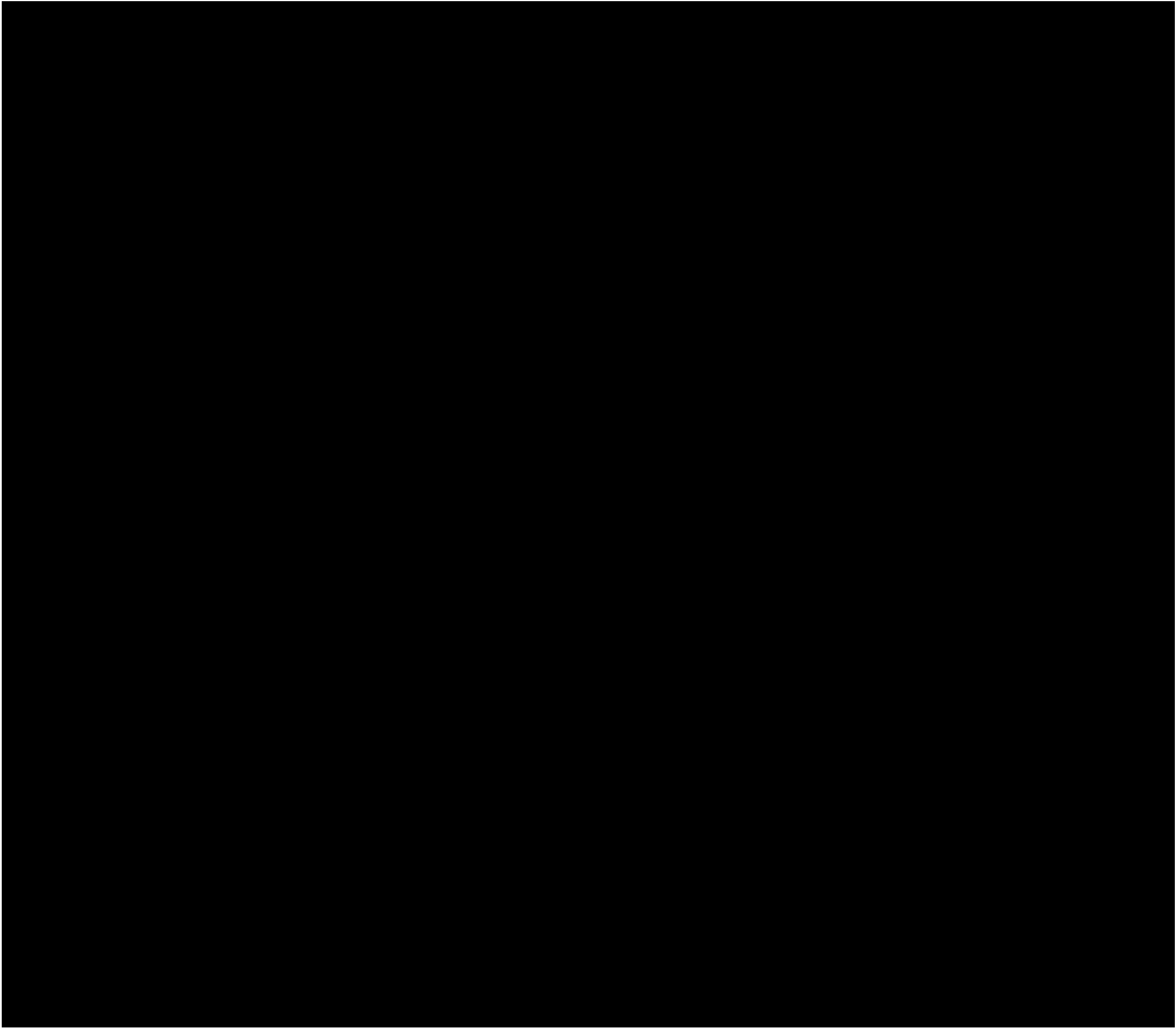
PRILOGA G Načrt sekvenčnega bazena, različni prerezi (IEI d.o.o., 2005).



PRILOGA H Tlorisni pogled na sekvečni bazen na ČN Ljutomer (IEI d.o.o., 2005).



PRILOGA I Prezračevalni bazen na ČN Murska Sobota (IEI d.o.o., 2004).



PRILOGA J Linija vode na ČN Murska Sobota (IEI d.o.o., 2004).

