

Modei matematics par implants di depurazion: primis aplicazions in Friûl

ILARIA CIMAROSTI*, CRISTIANO ROSELLI
DELLA ROVERE* & DANIELE GOI*

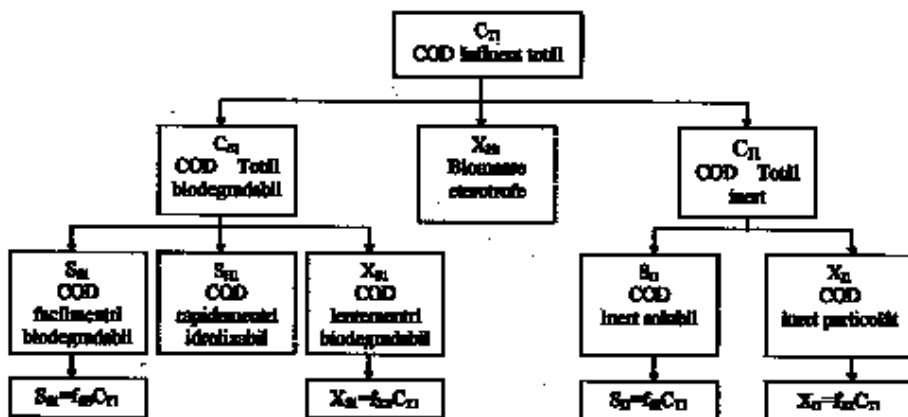
Ristret. Il tratament biologic de aghe di fogne di origjin civil o industriâl, prime di scjariâle intai flums o in altris cuarps idrics, al è il sisteme plui comun par eliminâ o minimizâ l'incuinament. I sistemis plui cognossûts pal tratament des aghis refluis a son i procès a pantan atîf. Il tratament biologic cun pantan atîf al gjave lis sostancis disfatis, organichis e inorganichis e al cagle i solits coloidâi e no sedimentabîi mediant l'azion dai microorganismis che a costituissin il pantan. Il studi dai procès biochimics implicâts tal tratament biologic des aghis al à permetût l'evoluzion di un gnûf mût di progjetâ: la modelistiche. In chest articul si fasarà une introduzion a la teorie matematiche che e sta daûr dal model e daspò si ilustraran un pôcs di câs là che i modei a son stâts aplicâts tal concret. I microorganismis che a costituissin il pantan a son clamâts biomasse mentri i incuinants a son clamâts ançe substrât. A la biomasse si è permetût di cressi doprant i incuinants come risultive di carboni e/o di energjie, gjavant chei incuinants dal reflui par convertîju in gnove biomasse, H₂O e CO₂. A son diferents gjenars di microorganismis classificâts in eterotrofs e autotrofs a seconde che a doprin come acetôr di eletrons l'ossigjen o la sostance carboniche. Lis principâls sostancis incuinantis che si tirin fûr cui trataments biologicis a son i compostej carbonics, l'azôt e il fosfar. Al è une vore di agns che diviers centris universitariis e di ricereje ator pal mont si interessin di chest argoment. In particolâr il Task Group de I.A.W.Q. (International Association on Water Quality) al à metût adun intal 1987 l'Activated Sludge Model N. 1 (model pal pantan atîf) che al è stât un grum aplicât dimostrant la sô validitât e afidabilitât. L'A.S.M. N. 1 al cjape in considerazion la rimozion dal carboni e dal azôt. Daspò a son stâts elaborâts modei simpri plui complès che a considerin ançe la rimozion dal fosfar, l'A.S.M. N. 2 e N. 3. Di cualchi an incà ançe il dipartiment di Chimiche de Universitât di Udin si sta ocupant de aplicazion modelistiche a la progjetazion/gjestion dai implants di depurazion. Par lis nestris esperiencis o vin doprât l'A.S.M. N. 1, esplicât in chest articul.

Peraulis clâf. Pantan atîf, modei matematics, simulazions dinamichis.

* Dipartiment di Siencis e Tecnologiis Chimichis, Universitât di Udin, Italie. E-mail clsgoi@dstc.uniud.it

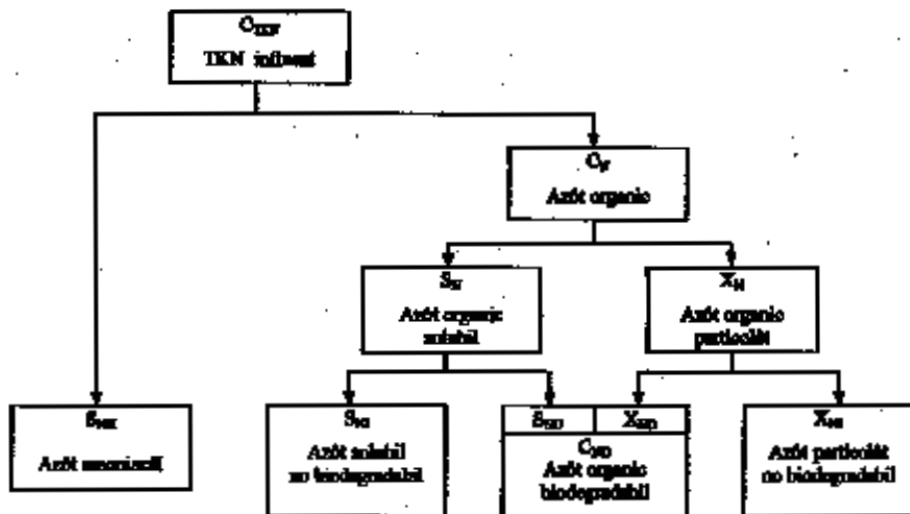
Introduzion

I incuinants. Il parametri doprât par misurâ il nivel di incuinant presint al è il COD (Chemical Oxygen Demand), ven a stâi la Domande Chimiche di Ossigjen. Al rapresente la cuantitât di ossigjen domandade par ossidâ la sostanze organiche de bande di un reagjent chimic une vore ossidant (es. dicromât di potassi) in condizions di elevade aciditât. Al à rivelât di jessi il miôr parametri par vie che al è l'unic che al met in relazion i electrons ecuivalents tal substrât organic, te biomasse e tal ossigjen doprât. Prin di dut lis formis diferentis di carboni organic a son ingrumadis insieme e diferenziadis su la fonde des carateristicis di biodegradazion. Il COD influent totâl al à doi components: COD totâl no biodegradabil, o inert, e COD totâl biodegradabil. Chestis fraziions a puedin jessi ancjemò dividudis intune frazion solubile e une particulade. Il COD facilmentri biodegradabil al è presumibilmentri componût di elements solubii come acits gras volatii, carboidrâts sempliçs, alcâi, aminoacits e v.i. che a puedin jessi diretamentri assorbîts pe sintesi. La frazion di COD lentementri biodegradabil al à la carateristiche di no podê passâ travers de parêt celulâr, par tant al à par fuarce di jessi sotmetût a l'idrolisi extracelulâr prime di vignê assorbît.



I components azotâts no ossidâts a son determinâts sperimentalmentri travers il test *Total Kjeldahl Nitrogen* (TKN) e il test par l'azôt amiacâl che al ripuarte sedi la amoniache libare sedi il contignût di *ion*

amoni. Il TKN nus dà la sume dal azôt organic e dal azôt amoniacâl. Duncje l'azôt organic al è determinât tant che la difference tra il TKN e l'azôt amoniacâl. L'azôt organic biodegradabil si compon di: azôt organic biodegradabil solubil e di azôt organic biodegradabil particulât. L'azôt amoniacâl al è disponibil par incorporazion in gnûfs constituents celulârs o par ossidazion a nitrîts e nitrâts (NO_2^- e NO_3^-) tal procès di nitrificazion. L'azôt organic biodegradabil particulât al ven idrolizât al azôt organic biodegradabil solubil midiant de azion dai microorganisims eterotrofs. La ulteriôr conversion di azôt organic biodegradabil solubil a amoniache e je fate midiant di un procès di amonificazion mediât de ativitât microbiche eterotrofiche similâr.



Intes aghis refluis il fosfar si cjate in trê formis: ortofosfât (PO_4^{3-}), polifosfât (P_2O_7) e fosfar leât organicamentri. Ortofosfâts e polifosfâts sempliçs o fosfâts condensâts a costituissin il fosfar inorganic total.

Materiâi e metodis

I modei. Par spiegâ il criteri dal A.S.M. N. 1 o cjapìn a esempi la biomasse eterotrofe, X_H , il plui impuartant component particulât tal procès

dal pantan atîf e responsabil de biodegradazion dal carboni organic in condizions aerobichis. I procès considerâts a son:

Incessite de biomasse. Se la incessite e je belançade, la incessite de biomasse e l'ûs di substrât (font di carboni e/o di energjie) la risolucion e je te produzion di Y unitâts di biomasse cun Y inferiôr a la unitât come indicât inte espression:

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt} \quad \text{dulà che il coeficient Y al è cognossût come "rindiment".}$$

Par meti in relazion la incessite cun la concentrazion di substrât la curve di saturazion cun espression iperboliche-retangolâr proponude di Monod si à dimostrade di jessi la miôr. Tignint cont ancje de influence di ossigjen disfat, la espression de incessite de biomasse e devente:

$$\frac{dX}{dt} = \mu \left(\frac{S}{K_m + S} \right) X = \mu \left(\frac{S}{K_s + S} \right) \left(\frac{S}{K_m + S} \right) X$$

dulà che: μ_{\max} velocitât di incessite eterotrofe massime [zornadis⁻¹];

K_s concentrazion dal substrât dulà che $\mu = 1/2 \mu_{\max}$ [mg COD/l];

K_{OH} coeficient che al ten cont dal efiet limitant de concentrazion di ossigjen [mg COD/l].

Muart e decjadiment. L'iter dai components particulâts tai sistemis a pantan atîf al ven influençât ancje dai procès che a son in relazion cun la pierdite di biomasse eterotrofe vitâl. Si ipotize che la muart o la pierdite di vitalitât dai microrganisims si davuelzi cence l'utilizi di acetôrs di eletrons:

$$\frac{dX}{dt} = -b' X$$

dulà che: b'_H = velocitât di pierdite di vitalitât de biomasse eterotrofe [d⁻¹]. La plui part de biomasse no vitâl e devente disponibile tant che substrât lentementri biodegradabil, X_s , invezit la part che e reste si le cjate tant che masse endogjine inert, X_p :

Denitrificazion. La denitrificazion al è un procès anossic che al demande la assenze di ossigjen e la presince di une font di carboni adeguade tant

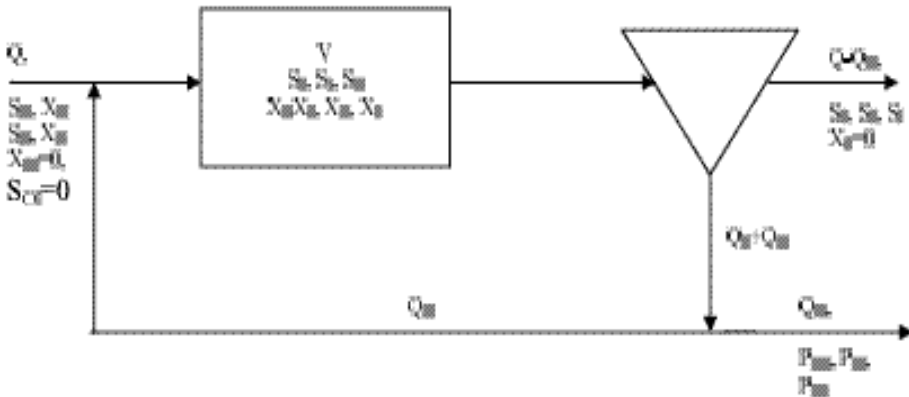
che risultive di eletrons. Il procès al ven realizât dai bateris facultatîfs eterotrofs. Il criteri modelistic al è basât su la ipotes simplifcative di doprâ la stesse espression de velocitât eterotrofe adizionade di un coeficient coretîf empiric $\eta_C < 1$

$$\frac{dX_{\text{tot}}}{dt} = \mu_{\text{tot}} \left(\frac{S_{\text{org}}}{K_{\text{org}} + S_{\text{org}}} \right) \left(\frac{K_{\text{org}}}{K_{\text{org}} + S_{\text{org}}} \right) \left(\frac{S_{\text{org}}}{K_{\text{org}} + S_{\text{org}}} \right) \eta_C X_{\text{tot}}$$

Pal disvilup di un model dinamic si scuen prime definî il volum di control e daspò fâ un balanç di masse par ogni reagjent rispjet a chel volum: cumulament = input - output + generation. Tai modei pe rimozion dal carboni al è necessari meti dentri almancul vot components, al fin di rifletî in mût acurât lis carateristicis des aghis di scaric:

- S_I, S_S, X_I, X_S , a definissin la nature organiche de aghe;
- X_H, S_P, X_P , a rapresentin la biomasse eterotrofe vitâl e i prodots microbics solubii e particulâts;
- S_O , al segnale la concentrazion di ossigjen;
- S_I , e X_I , a son inerts e no son indicâts.

Lis relations tra i components dal procès e i parametris dal model a vegnin rigjavadis su la fonde des ecuazions di continuitât che a definissin i balanç di masse tra lis corints influentis e chês efluentis. Il diagram schematic dal procès visualizât inte Figure al ven doprât par definî un model cinetic par la rimozion dal carboni.



1) Bilanç par S_g :

$$V \frac{dS_g}{dt} = (Q + Q_g)S_g - V\left(\frac{\mu_g}{Y_g} \frac{S_g}{K_g + S_g} X_g - (1 - f_{mg})K_g X_g\right)$$

$$-\frac{\mu_g}{Y_g} \frac{S_g}{K_g + S_g} X_g + (1 - f_{mg})K_g X_g = \frac{1}{\theta_g} S_g = -\frac{1}{\theta_g} S_g$$

2) Bilanç par X_H :

$$V \frac{dX_H}{dt} = (Q + Q_g)X_H + V\left(\mu_H \frac{S_g}{K_g + S_g} X_g - b'_H X_H\right)$$

$$\mu_H \frac{S_g}{K_g + S_g} X_g - b'_H X_H = \frac{1}{\theta_g} X_H = 0$$

3) Bilanç par X_S :

$$V \frac{dX_S}{dt} = (Q + Q_g)X_S - V(K_S X_S - (1 - f_{ms})b'_S X_S)$$

$$(1 - f_{ms})b'_S X_S - K_S X_S = \frac{1}{\theta_S} X_S = \frac{1}{\theta_S} X_S$$

4) Bilanç par X_P :

$$V \frac{dX_P}{dt} = (Q + Q_g)X_P + V(f_{mp} b'_P X_P)$$

$$f_{mp} b'_P X_P = \frac{1}{\theta_P} X_P = 0$$

5) Bilanç par S_p :

$$V \frac{dS_p}{dt} = (Q + Q_g)S_p + V\left(\alpha_p \mu_p \frac{S_p}{K_p + S_p} X_p + f_{mp} K_p X_p\right)$$

$$\alpha_p \mu_p \frac{S_p}{K_p + S_p} X_p + f_{mp} K_p X_p = \frac{1}{\theta_p} S_p = 0$$

Un sistema di cinc ecuazioni che a domandin une soluzion simultanee. Par dâ une raprezentazion clare e no ecuiocabil dal sistema si dopre une raprezentazion matriciâl.

Nitrificazion. A son dôs manieris principâls par vê la nitrificazion tai sistemis a pantan atîf. Un al proviôt la nitrificazion tal stes reatôr biologjic doprât pe rimozion dal carboni *Combined carbon oxidation-nitrification system*, chel altri al proviôt che la nitrificazion e sedi rigjavade mi-diant di un procès a stadis separâts in doi reatôrs diferents, il prin al ven doprât pe rimozion dal carboni organic e il secont pe nitrificazion. Si ripuarte la forme matriciâl da lis espressions di balanç di masse par la nitrificazion.

Tabele 1. Cineticis e stechiometriis dal procès di rimozion dal carboni e de nitrificazion.

Component $i \rightarrow$ \downarrow Procès j	1	2	3	4	5	6	Velocitàt di procès ρ_i
	X_H	S	X_A	S_{NO}	S_{NO}	S_{NO}	
Incessite eterotrofe	1	$-\frac{1}{Y_S}$		$-i_B$		$-\frac{1}{fY_H} - f_x$	$\hat{\mu}_H \frac{S_S}{K_S + S_S} X_H$
Decjadiment eterotrof	-1			i_B		$-f_x$	$k_d X_H$
Incessite autotrofe			1	$-\frac{1}{Y_A} - i_B$	$-\frac{1}{Y_A}$	$-\frac{4.57}{Y_A} - f_x$	$\hat{\mu}_A \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} X_A$
Decjadiment autotrof			-1	i_B		$-f_x$	$B_A X_A$
Parametris	VSS	BOD ₃	VSS	NH ₃ -N	NO ₃ -N	O ₂	

L'A.S.M. N.1 al è costituît di vot procès e tredis components. Par clarece si dopre la raprezentazion matriciâl che e ven daûr, dulà che lis colonis a corispuindin ai diviers components e lis riis ai diviers procès.

Ciertis parametris indicâts inte madrîs a puedin jessi ricavâts in leterature, dut câs i parametris a scugnin jessi valutâts sperimentalmentri mi-diant dal studi di sensitivitàt. Pai parametris evidenziâts te Tabele che e ven daûr si puedin cjapâ i valôrs indicâts tant che fis par vie che al è stât verificât sperimentalmentri che chei valôrs si son mantignûts inalterâts par ducj i sistemis analizâts. Chei altris parametris a scugnin jessi valutâts sperimentalmentri.

Table 2. Structure matriciàl dal A.S.M. N.1.

Component $i \rightarrow$ ↓ Procès j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Velocità di proces ρ_j [ML ³ T ⁻¹]
	S_1	S_S	X_1	X_S	X_{BH}	X_{BA}	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1 Incremente aerobiche dai eterotrofs		$\frac{f_p}{S_1}$			1			$\frac{f_p S_1}{S_1}$		$-f_p$			$-\frac{f_p}{S_1}$	$\frac{f_p}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)$
2 Incremente anossiche dai eterotrofs		$\frac{f_p}{S_1}$			1				$\frac{f_p S_1}{S_1}$	$-f_p$			$-\frac{f_p}{S_1}$	$\frac{f_p}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \times$ $\frac{f_p}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)$
3 Incremente aerobiche dai autotrofs						1		$\frac{f_p S_1}{S_1}$	$\frac{f_p}{S_1}$	$-f_p - \frac{f_p}{S_1}$		$-f_p - \frac{f_p}{S_1}$	$-\frac{f_p}{S_1}$	$\frac{f_p}{S_1} \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)$
4 Decjadiment dai eterotrofs				$-f_p - \frac{f_p}{S_1}$	-1		f_p					$-f_p - \frac{f_p}{S_1}$		$f_p - \frac{f_p}{S_1}$
5 Decjadiment dai autotrofs				$-f_p - \frac{f_p}{S_1}$		-1	f_p							$f_p - \frac{f_p}{S_1}$
6 Amonificazione dal azòt solubil organic									1	-1			$\frac{f_p}{S_1}$	$f_p - \frac{f_p}{S_1}$
7 Idrolisi dai organics		1												$\frac{f_p S_1}{S_1 + S_2} \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)$
8 Idrolisi dal azòt organic											1	-1		$f_p \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right)$
Velocitàs di conversion osservadis [ML ³ T ⁻¹]	$\rho_i = \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \rho_j$													

Simbul	Unitâts	Valôr
Coeficients stechiometrics		
Y_H	mg COD prodot/ mg COD gjavât	0.60
f_P	mg COD prodot tal decjadiment/ mg COD di biomasse	0.08
i_{XB}	mg N/ mg COD te biomasse ativade	0.086
i_{XP}	mg N/ mg COD te biomasse no ativade	0.06
Y_A	mg COD di biomasse formade/ mg N ossidât	0.24
Coeficients cinetics		
$\hat{\mu}_H$	d^{-1}	6.00
K_S	Mg/L come COD	20
K_{OH}	Mg/L come O_2	0.10
K_{NO}	Mg/L come N	0.20
b_H	d^{-1}	0.408
η_G	adimensionâl	0.8
η_H	adimensionâl	0.4
k_a	L/(mg COD di biomasse ·h)	0.0067
k_h	mg COD/(mg COD di biomasse ·h)	0.092
K_X	mg COD/mg COD di biomasse	0.15
$\hat{\mu}_A$	d^{-1}	0.768
K_{OA}	Mg/L come O_2	1.0
K_{NH}	Mg/L come N	0.75
b_A	d^{-1}	0.096

La normative. Lis gnovis prescrizions legjislativis, in particulâr il D.Lgs. 152/99 e lis disposizions coretivis e integrativis dal D.Lgs. 258/00, in materie de tutele des aghis dal incuinament a stabilissin gnûfs vincui su la cualitât de aghe efluent dai implants di depurazion. Di interès particulâr al è il riferiment al rindiment dai implants evidenziât de Directive 91/271/CEE che e proviôt il mantigniment dal rindiment di sore di valôrs specificâts. Te nestre regjon, in analogjie a di chel che al sucêt in gran part dal territori nazionâl, al è presint un numar un grum alt di implants di depurazion pes aghis refluis cun medie e piçule potenzialitât che a siervissin lis variis comunitâts sparncjadis sul territori, in zonte di ciertis realtâts artigianâls o industriâls che a son dotadis di implants di depurazion par lôr cont. La plui part di chescj implants a son dotâts di tecnologijs tradizionâls realizadis tai agns '70-'80. Tai ultins agns il grup di Ingegnerie Ambientâl de Universitât di Udin al à lavorât ae aplicazion dai modei matematics intes realtâts presintis sul territori regjonâl, in graciis de colaborazion cun societâts di gjestion di implants di depurazion locâl.

Risultâts

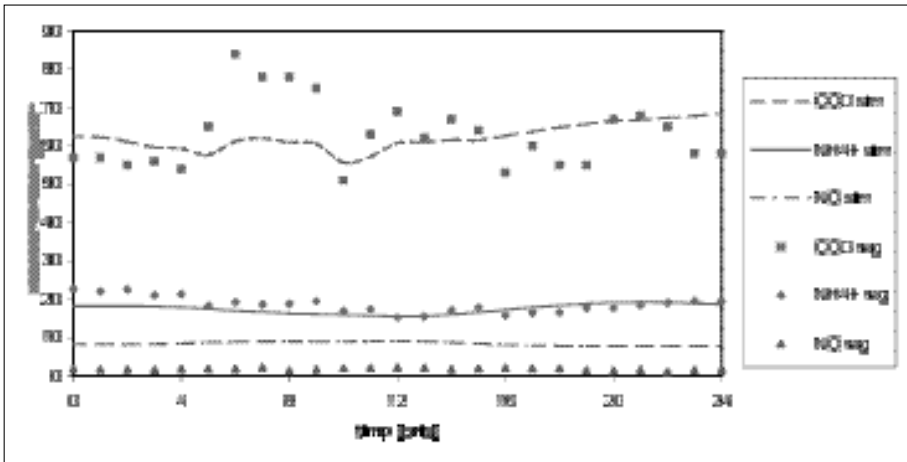
Il prin implant. Te prime experience al è stât considerât un implant medi-grant. Chest implant al siervîs plui o mancûl 100.000 abitants ecueivalentes e al presente diviersis liniis di tratament. Abitant Ecueivalent e je la unitât convenzionâl di misure par il caric incuinant. O vin siezût di considerâ dome une linie di tratament biologjic.

O vevin a disposizion dôs seriis di dâts: une serie zornalîre di dâts di concentrazions di incuinants rilevâts in jentrade (COD, Solits Suspendûts e azôt come TKN) e di valôrs di puartade in jentrade e une serie di dâts in jessude. Al è stât doprât un software potent che al implemente il model A.S.M. N. 1 fasint in mût di realizâ simulazions dinamicis. Al è stât fat sù il lay-out lant daûr des indicazioni dal progjet originari dal implant. Daspò a son stâts doprâts come dâts di input e output i dâts reâi che e jere stade fate la calibrizion dal model. Come che o vin mostrât prime, i parametris che a constituissin il model a son tancj. In prime arossimazion a son stâts doprâts i parametris presints in leterature e daspò a son stadis fatis une vore di analisis di sensitivitât par viodi cuii parametris che a influençavin di plui la rispueste dal sisteme rapresentât. Si ripuarte il câs di analisi di sensitivitât par il parametri amoniache.

Tal grafic si puedin viodi i ponts che a pandin i valôrs rilevâts e lis curvis che a segnalin i andaments simulâts. Come che si viôt, dal confront tra i dâts reâi e l'andament dai parametris simulâts o sin rivâts a un otim level di arossimazion.

Il secont implant. Il pas seguint al è stât fat considerant un altri implant presint in region cuntune potenzialitât di 62.500 abitants ecueivalentes. Come tal prin câs o vin doprât il stes software pe implementazion dal A.S.M. N.1. Lant daûr des indicazioni dal progjet dal implant o vin ricostruît il lay-out dal implant. La societât di gjestion nus à metût a disposizion i dâts di concentrazion in jentrade e in jessude dal implant par dute une schirie di incuinants e i corispuindints dâts di puartade. O vin ricostruît il compart di tratament biologjic.

Chest implant al veve il probleme di no rispindi a lis domandis de normative su la eficiencie de rimozion dai incuinants. Nô o volevin dimostrâ che chest level di rimozion al è une consequence dal bas level di caric in jentrade, dovût al fat che lis infiltrazions presintis te rêt fognarie



a provochin une diluizion eccessive dal reflui. In chest câs il nestri studi al è stât plui aprofondît dal moment che o vin determinât i parametris principâi midiant des tecnichis respirometrichis. La respirometrie e je une metodologjie che e determine i valôrs dai parametris cinetics midiant de analisi des curvis di ossigjen disfat registradis intun implantut a scjale di laboratori.

In particolâr e je stade fate la determinazion di:

- il coeficient di respirazion endogjine, k_d , [zornadis⁻¹];
- il coeficient di incressite specifiche eterotrofe, Y_{HP} , [mg MLVSS/mg COD];
- la velocitât di incressite eterotrofe massime, μ_{max} , [zornadis⁻¹];
- la concentrazion dal substrât dulà che $\mu = 1/2 \mu_{max} : K_S$, [, [mg COD/l].

In plui une analisi di sensitivitât e je stade fate sui sedimentadôrs secondariis.

Come parametris di riferiment pe valutazion dal level di apossimazion o vin sielzût il rindiment di rimozion dai solits totâi, dal carboni e dal TKN. Ae fin o sin rivâts a vê une ottime apossimazion de realtât, cun tun erôr un grum plui bas dal dîs par cent pai prins doi parametris e un pôc superiôr pal TKN.

Partint dal supuest che i rindiments reâi a son decisementri plui bas di chei imponûts de normative o vin cirût di individuâ, midiant da lis analisis di sensitivitât, cuâi rimiedis che a saressin stâts bogns par incressi la eficiencia dal implant.

A son stâts ipotizâts pussibii intervents a nivel implantistic come lis variazions de quartade di ricircul dai sedimentadôrs secondariis e la incressite dai volums pe ossidazion ancje midiant dal inseriment di une tierce vascje e dal inseriment di un eventuâl reatôr anossic. Il prin intervent al à permetût des incressitis netis dal 5-10 par cent inte rimozion de SST e dal COD, il secont nol à compuartât nissun benefici sensibil. Bielzà tal imprim o vevin podût intravignî che l'implant al jere caraterizât di carics organics influents decisementri bas. Cul supuart de ricostruzion modelistiche al è stât dimostrât che un influent di tâl gjenar al rint in cualchi mût mancul eficacie la ativitât metaboliche de biomasse, proviodintle di scjarse alimentazion.

Da lis provis respirometrichis preliminaris e da lis analisis di sensitivitât si è podût intravignî cemût che i bateris autotrofs no vedin carateristichis otimâls, di consequence la ipotesî di un eventuâl reatôr anossic par la denitrificazion al puartarès la implicazion di une furniture in zone di substrât carboniôs, stant a lis carateristichis dal licuit in jentrade, compuartant, cun di plui, pôcs beneficis.

O podìn concludi che une biomasse di cualitât scjarse e influence negativementri il procès a discapit dal rindiment dal implant. Infin o vin podût concludi che l'implant esaminât, in presince di cheste sorte di influent nol à la pussibilitât di rivâ ai limits di rindiment domandâts de normative, pûr risprietant chei relatîfs a lis concentrazions dai incuinants dal efluent.

Discussion. I gnûfs vincui stabilîts da lis gnovis prescrizions legjislativis a proviodin il mantegniment dal rindiment di sore dai valôrs specificâts. Su chest al va osservât che par progetâ un implant che al vedi dai rindiments prefissâts resonabii, i sistemis tradizionâi a puedin vê des pecjis une vore grandis sì che e nas la necessitât di frontâ la progetazion cun chescj gnûfs struments.

Ringraziaments. I autôrs a pandin un agrât a Victor Tosoratti dal Dipartiment di Sciençis e Tecnologiis Chimichis de Universitât di Udin e ai inzegnîrs Gianpaolo Di Giorgio e Pierpaolo Braidotti che a àn dât un jutori fundamentâl par chest lavôr.