



CONSORZIO DI BONIFICA DELL'ORISTANESE

Via Cagliari n. 170 – Oristano

**RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO DELL'ACQUIFERO
DELLA PIANA DI ARBOREA DA NITRATI DI ORIGINE
AGRO-ZOOTECNICA MEDIANTE TECNOLOGIE
DIFFUSE DI BIORISANAMENTO IN SITU**

C.A.T. P0722

C.U.P.: G52E22000400002

C.I.G.:

PROGETTO ESECUTIVO

Progettista
Ing. Gian Luca Zuddas

Consulente scientifico
Prof. Antonio Coppola

Collaboratori
Ing. Eleonora Trudu
Ing. Fabrizio Musiu
Geom. Matteo Casciu

Responsabile unico del progetto
Dott. Serafino Angelo Meloni

Committente
Consorzio di Bonifica dell'Oristane
Il Presidente
Dott. Carlo Corrias

Titolo

Allegato

RELAZIONE IDRAULICA

B

Rev.	Data	Nome file	Redattore	Verificatore
00	10/02/2023	1503P0722relidraulicGZ	Ing. G. Zuddas	Ing. G. Bravin
01	19/07/2023	1503P0722relidraulicRev01GZ	Ing. G. Zuddas	Ing. G. Bravin

INDICE

1. PREMESSA	1
2. STUDIO DEL CONTESTO	3
3. DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO	7
4. INTERVENTI IN PROGETTO	9
4.1 <i>Rete di dreno e collettori</i>	10
4.2 <i>Bioreattori</i>	14
4.3 <i>Pozzetti</i>	20
4.4 <i>Calcoli</i>	21
4.5 <i>Strumentazione di misura</i>	22

1. PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto esecutivo “Riduzione dell'inquinamento dell'acquifero della piana di Arborea da nitrati di origine agro-zootecnica mediante tecnologie diffuse di biorisanamento in situ”.

L'inquinamento chimico dei suoli e delle risorse idriche sotterranee è la conseguenza di molte attività umane, tra le quali l'agricoltura è senza dubbio una delle più importanti. L'uso di fertilizzanti e agrofarmaci di sintesi rende il settore agricolo una delle principali fonti d'inquinamento diffuso per i suoli e le risorse idriche. Di particolare rilievo è l'inquinamento degli acquiferi da nitrati, specie nelle aree ad attività agricola intensiva.

La concentrazione di nitrati, in molte aree intensamente coltivate, eccede il limite massimo consentito per le acque potabili di 50mg/L NO_3 (11,6 mg/L di N- NO_3). Le pratiche agricole sono responsabili per il 50-80% dell'apporto complessivo di azoto verso i corpi idrici (EEA, 2002). Il problema nasce prevalentemente da una gestione non accurata dei fertilizzanti che porta a una bassa efficienza di uso dei nutrienti da parte delle colture e/o da una irrigazione inefficiente.

Diversi studi hanno evidenziato come i fertilizzanti vengano spesso somministrati in un'unica soluzione, superando così, in alcuni periodi dell'anno, la capacità di assorbimento delle piante. La capacità di assorbimento dell'azoto da parte delle piante coltivate varia con lo stadio fenologico e non sempre coincide con la disponibilità di nutrienti nel suolo. Inoltre, è stato rilevato che i fertilizzanti vengono forniti in quantità eccessive rispetto ai reali fabbisogni delle colture, soprattutto in aree ad intensa attività zootecnica, dove gli apporti di azoto con letame e liquami sono di facile reperimento.

L'Unione Europea ha emanato il primo strumento legislativo per contrastare l'inquinamento da nitrati nel 1991 con la Direttiva 91/676CEE, comunemente definita Direttiva Nitrati, applicata in Sardegna solo a partire dal 2005. L'Italia ha recepito la Direttiva Nitrati con il D.Lgs 152/1999 e successivamente con il D.Lgs 152 del 2006. Viene così fatto obbligo alle Regioni di individuare le Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN) di origine agricola, di formulare un “Codice di Buona Pratica Agricola” e di redigere il Piano di Azione Obbligatorio.

Tra le aree riconosciute come ZVN vi è la piana di Arborea e Terralba.

Il progetto nasce, quindi, dalla volontà di affrontare un problema reale, ma fino ad oggi trascurato, rappresentato dalle alte concentrazioni di nitrati presenti nella falda acquifera sottostante, le quali potrebbero pregiudicare il futuro dell'economia locale qualora entrasse in vigore un qualche strumento normativo che limiti l'attività agro-zootecnica in favore del ripristino delle condizioni normali della falda.

Gli interventi previsti sono da intendersi come caso studio ovvero come intervento pilota, essendo limitati solo a quattro siti messi a disposizione da alcune attività del posto. Qualora, come è auspicabile, i risultati siano soddisfacenti, si procederà in un secondo momento alla diffusione dei bioreattori qui proposti in tutto il territorio ricadente in ZVN.

2. STUDIO DEL CONTESTO

La piana di Arborea è un territorio pianeggiante nato in seguito agli interventi di bonifica che nel secolo scorso hanno interessato le aree palustri comprese tra il fiume Tirso e il rio Mogoro. In tale contesto si realizzarono dei canali di guardia posti su diverse linee di quota col compito di intercettare le acque provenienti dai versanti occidentali del Monte Arci. Detti canali prendono il nome di Canale delle Piene Millenarie, Canale delle Acque Alte, Canale delle Acque Medie e Canale delle Acque Basse, rispettivamente spostandosi da monte verso valle.

La piana di Arborea, compresa tra il Canale delle Acque Basse e il Golfo di Oristano, è priva di un reticolo idrografico naturale ma è dotata di un fitto reticolo di drenaggio per l'allontanamento delle acque meteoriche dai campi. Il territorio si sviluppa con una notevole omogeneità, con lotti di dimensioni uguali che si ripetono come in una matrice, costeggiati da canali di dreno più o meno grandi a seconda del bacino contribuente di monte.

L'area ha una fortissima vocazione agro-zootecnica grazie alle condizioni ideali orografiche e climatiche che hanno permesso un rapido e notevole sviluppo dell'economia locale.

I lotti individuati per gli interventi in progetto sono ricompresi tra il centro abitato di Arborea e la zona umida data dal complesso di stagni e laghi che si affacciano sul Golfo di Oristano.



Figura 1 – In evidenza i lotti interessati dall'intervento

Cartograficamente l'area ricade interamente nel foglio 538030 della Carta Tecnica Regionale 1:10'000 e 538031 e 538032 della C.T.R. della Sardegna alla scala 1:5'000.

In determinate aree, l'utilizzo sui campi di liquami di origine zootecnica e di fertilizzanti azotati su particolari tipologie di terreni, possono generare, specie su falde acquifere molto superficiali, residui di nitrati molto elevati, con conseguente aumento del degrado dei corpi idrici. Particolare rilevanza hanno tali informazioni quando sono poste in relazione e riguardano zone vulnerabili da nitrati, all'interno delle quali i limiti di spandimento sono ancora maggiormente stringenti.

L'Unione Europea ha emanato il primo strumento legislativo per contrastare l'inquinamento da nitrati nel 1991 con la Direttiva 91/676CEE, comunemente definita Direttiva Nitrati, applicata in Sardegna solo a partire dal 2005. Preso atto che i nitrati di origine agricola sono la causa principale dell'inquinamento proveniente da fonti diffuse, gli obiettivi posti in essere dalla Direttiva sono:

- proteggere la qualità delle acque sotterranee e superficiali dall'apporto diretto o indiretto di nitrati provenienti da fonti agricole;
- ridurre l'inquinamento idrico risultante dallo spandimento di deiezioni animali e dall'uso eccessivo di concimi nei terreni agricoli;
- prevenire qualsiasi ulteriore inquinamento di questo tipo.

L'entrata in vigore della Direttiva Nitrati, pertanto, ha obbligato gli Stati Membri ad eseguire monitoraggi delle concentrazioni dei nitrati nelle acque dolci, a designare le aree vulnerabili, a stabilirne i programmi di azione, a fissare i codici di buona pratica agricola, a predisporre programmi per la formazione e l'informazione degli agricoltori. L'Italia ha recepito la Direttiva Nitrati con il D.Lgs 152/1999 e successivamente con il D.Lgs 152 del 2006. Viene così fatto obbligo alle Regioni di individuare le Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN) di origine agricola, di formulare un "Codice di Buona Pratica Agricola" e di redigere il Piano di Azione Obbligatorio.

Le prescrizioni della Direttiva Nitrati sono state recepite in Sardegna con il DGR n.1/12 del 18.01.2005, sulla base del quale è stata individuata la Zona Vulnerabile da Nitrati di Arborea e con i DGR n.4/13 del 31.01.2006 e DGR n.14/17 del 04.04.2006 con cui la Regione ha adottato il relativo Programma d'Azione.

Successivamente con DGR n. 21/34 del 05.06.2013 la Regione ha adottato il Disciplinare Regionale che regola per l'intero territorio regionale le attività di utilizzazione agronomica delle deiezioni zootecniche e delle acque reflue per le fasi di produzione, raccolta, stoccaggio, fermentazione e maturazione, trasporto e diffusione (Disciplina Regionale Effluenti).

In Sardegna sono presenti poche Zone Vulnerabili da Nitrati, per la quasi totalità concentrate nelle aree agricole dei comuni di Arborea, Terralba e Marrubiu.



Figura 2 – In rosso la ZVN designata con D.G.R. n 1/12 del 18.01.2005, in viola le ZVN aggiornate

3. DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO

L'area su cui devono essere realizzate le opere è caratterizzata dalla classica conformazione dei territori soggetti a bonifica e riordino fondiario.

L'intero agro di Arborea, infatti, è suddiviso in lotti rettangolari di circa 400 m x 100 m, separati tra loro sul lato lungo da filari frangivento di eucaliptus. Lungo i lati corti, dove è comunque presente una fascia frangivento più o meno larga, corrono parallelamente strade di servizio e/o canali di raccolta delle acque provenienti dai drenaggi superficiali dei terreni agricoli.

Come detto anche nei paragrafi precedenti, Arborea è un comune con una fortissima vocazione agro-zootecnica, nella quale si ha una ripetizione costante di colture al fine di sfruttare al massimo potenziale la qualità del suolo, nonché importanti allevamenti di bovini.

Nella piana di Arborea, Zona Vulnerabile da Nitrati (ZVN) individuata dalla Regione Sardegna, l'utilizzo sui campi di deiezioni animali, oltre che di fertilizzanti azotati di sintesi, ha generato concentrazioni di nitrato molto elevate, specie nelle acque di falde molto superficiali. Ancora recentemente, sebbene l'area si trovi in ZVN e quindi i limiti di spandimento dei reflui zootecnici siano particolarmente stringenti, molti dei pozzi per il monitoraggio dei nitrati fanno registrare valori anche molto al di sopra del limite di 50 mg/L (Ghiglieri et al., 2016). Questa criticità è riscontrabile nel Piano di monitoraggio e controllo (PMC) per la ZVN di Arborea; nel rapporto di ottobre 2017 (attività 2016 e risultati 2013-2016), si sottolinea un trend di crescita delle quantità di nitrati in falda superficiale. Inoltre, i valori indicano come i carichi di azoto registrati siano vicini alle quantità presenti negli anni in cui il programma d'azione ZVN non era ancora in azione.

È comunque da rilevare il fatto che nella Piana di Arborea si trovino alcuni pozzi caratterizzati da concentrazioni di nitrati estremamente elevate localizzati in aree in cui, a parità di pratiche di gestione agro-zootecnica, si rilevano invece concentrazioni ben al di sotto dei limiti dei 50mg/L (vedi figura 3).

In queste aree inquinate molto circoscritte sono da indagare le cause effettive dell'inquinamento, che potrebbero essere ascrivibili a condizioni idro-pedologiche particolarmente favorevoli al trasporto di nitrati in falda, a condizioni ecologiche che ostacolano la denitrificazione naturale o, più semplicemente, alla presenza nelle vicinanze di siti di deposito di reflui zootecnici non adeguatamente impermeabilizzati.

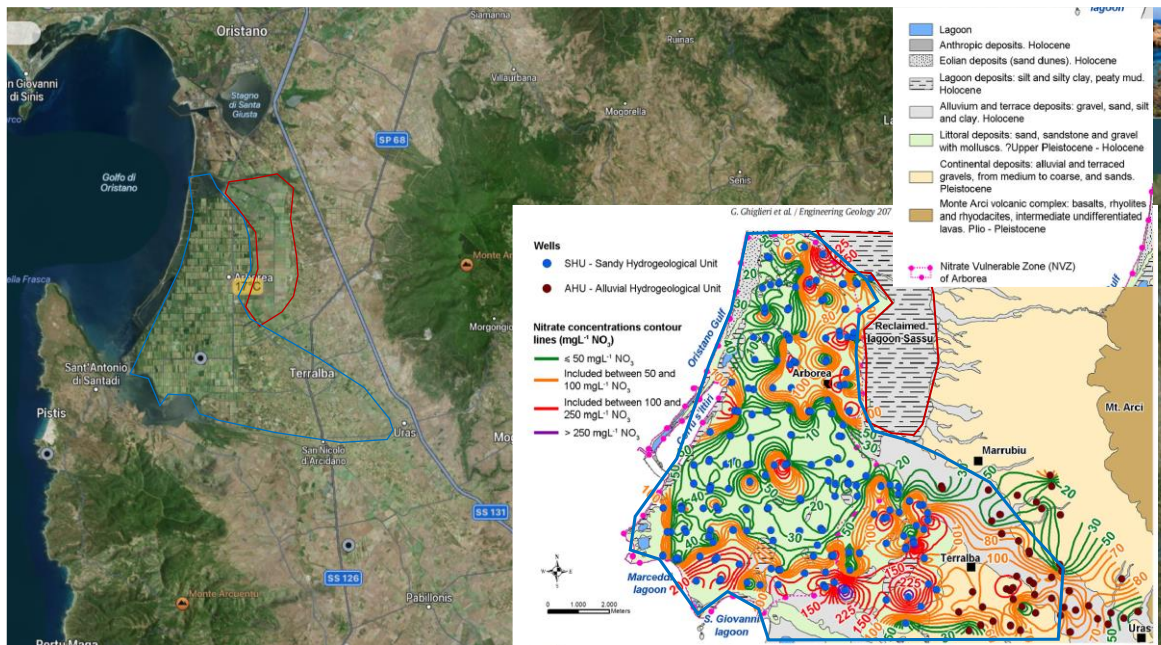


Figura 3 - Concentrazioni di nitrato nell'area della Piana di Arborea (delimitata in blu nell'immagine aerea) e nell'area dell'ex stagno Sassu (delimitata in rosso nell'immagine aerea)

D'altra parte, la ZVN pone non pochi problemi alle aziende agro-zootecniche che operano nella Piana di Arborea, soprattutto perché i limiti di spandimento delle deiezioni rendono gli attuali carichi di bestiame non sostenibili sull'area in oggetto. Questo ha, nel migliore dei casi, indotto lo spandimento di reflui in eccesso in terreni presi in affitto al di fuori della ZVN, cosa che ha solo spostato il problema all'esterno della ZVN, allargando la scala territoriale del problema.

4. INTERVENTI IN PROGETTO

La Piana di Arborea si caratterizza per profili di suolo in prevalenza sabbioso con ritenzioni idriche basse ed elevata conducibilità idraulica. L'unità elementare di questa parte dell'area della bonifica di Arborea è un campo di circa 4 ettari (400m x 100m) spesso delimitato da dreni a superficie libera disposti longitudinalmente in corrispondenza di filari di eucalipto.

In questi suoli prevalgono flussi di percolazione di acqua e di soluti verso la falda superficiale piuttosto che deflussi superficiali verso il reticolo di drenaggio. In caso di irrigazione non efficiente nel periodo irriguo, volumi significativi di acque irrigue possono essere persi per percolazione profonda, con un conseguente trasporto di nutrienti verso la falda. In questi suoli, in caso di ridotta soggiacenza della falda, sono attesi anche importanti flussi di drenaggio di acqua e di nitrati dalla falda verso il reticolo di drenaggio sia durante il periodo invernale, quando gli apporti da precipitazione superano l'evapotraspirazione e la capacità di ritenzione idrica dei suoli, sia durante la stagione irrigua in risposta a interventi irrigui in eccesso rispetto ai fabbisogni.

Sulla scorta di quanto sopra, il presente progetto prevede l'uso di tecnologie distribuite sul territorio per il biorisanamento dell'acquifero di Arborea, con benefici per l'ambiente ma allo stesso tempo salvaguardando la competitività delle aziende agro-zootecniche. Le tecnologie proposte prevedono una riduzione progressiva (nel medio periodo) delle concentrazioni di nitrato in falda attraverso l'intercettazione parziale dei flussi di percolazione di acqua e dei nitrati disciolti attraverso un sistema di drenaggio, in parte già esistente e costituito da canali aperti e in parte da realizzare con dreni tubolari interrati.

L'abbattimento dei nitrati viene ottenuto facendo confluire parte dei volumi drenati in un bioreattore dove avviene un processo (naturale) di denitrificazione completa (da nitrato ad azoto molecolare). Rispetto ad un qualsiasi altro tipo di trattamento che preveda il trattamento delle acque già inquinate (strippaggio, per esempio), l'intercettazione dei flussi di nitrato per drenaggio e il successivo passaggio attraverso bioreattore, consente di risolvere il problema a monte, quando cioè l'inquinante non si è ancora propagato in falda, riducendo notevolmente i volumi da trattare. L'intervento verrà realizzato in quattro differenti siti messi a disposizione da aziende del luogo (si veda figura 3) e prevederà i seguenti interventi:

1. Realizzazione della rete di drenaggio e dei collettori;

2. Realizzazione del bioreattore e dei relativi pozzetti;
3. Strumentazione di misura e impianto elettrico.

4.1 Rete di dreno e collettori

Al fine di raccogliere le acque della falda superficiale e allontanare le acque percolate ricche di nitrati si andrà a posare una rete di drenaggio orizzontale sottostante i canali di dreno già presenti lungo i lotti. I dreni saranno costituiti da tubi forati in polietilene ovvero in pvc, rivestiti in fibra di cocco o con altri materiali che permettano il filtraggio dell'acqua dal materiale solido che potrebbe essere trascinato all'interno dei tubi medesimi.

I tubi-dreno saranno posati parallelamente al lato lungo dei singoli lotti, con interasse di circa 20 m (in alternanza rispetto alle ali distributrici) e ad una profondità compresa tra i 100-120 cm al fine di non intralciare con le lavorazioni dei mezzi agricoli, con l'apparto radicale delle colture e in particolare con la rete irrigua.

La profondità scelta è tale da garantire un funzionamento molto frequente dei drenaggi soprattutto in caso di bassa soggiacenza della falda. L'intenzione, infatti, è quella di bonificare volumi idrici quanto più importanti possibili grazie ad un funzionamento a gravità dei dreni pressochè costante e continuo.

Considerando un diametro nominale di 80 mm e una pendenza del corrugato pari all' 1‰, ricordando la legge di Chezy secondo cui

$$v = \chi \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

dove χ rappresenta il parametro di scabrezza determinabile tramite la relazione di Gauckler-Strickler secondo cui $\chi = k_s \cdot R^{1/6}$, in cui k_s è il coefficiente di scabrezza di Strickler posto pari a $90 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, R è il raggio idraulico e i la pendenza del pelo libero che nell'ipotesi di moto uniforme coincide con quella del fondo della condotta.

Nota la velocità v , è quindi possibile calcolare la portata Q come

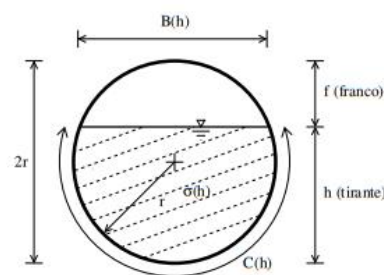
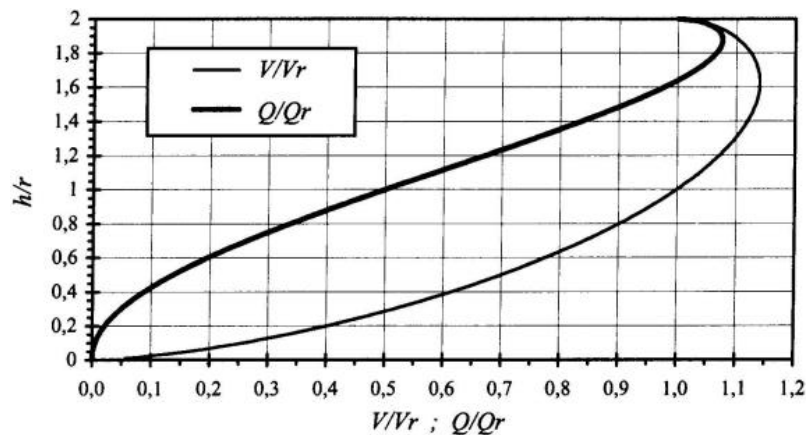
$$Q = A \cdot v$$

avendo indicato con A l'area bagnata.

Unendo le due relazioni si ottiene, infine, la seguente espressione

$$Q = A \cdot k_s \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i}$$

Nel caso di specie, si considerano tubazioni circolari per le quali esistono delle relazioni biunivoche note che legano tra loro l'area bagnata, la velocità e la portata in funzione del tirante e del raggio della condotta.



SEZIONE CIRCOLARE		
h/r	V/V_r	Q/Q_r
0,10	0,257	0,005
0,20	0,401	0,021
0,40	0,615	0,088
0,60	0,776	0,196
0,80	0,902	0,337
1,00	1,000	0,500
1,20	1,072	0,672
1,30	1,099	0,756
1,40	1,119	0,837
1,50	1,133	0,912
1,60	1,140	0,978
1,70	1,137	1,031
1,80	1,124	1,066
1,90	1,095	1,075
2,00	1,000	1,000

r = raggio della sezione circolare

SEZIONE CIRCOLARE			
h/r	A/r^2	R/r	B/r
0,05	0,021	0,033	0,624
0,10	0,059	0,065	0,872
0,15	0,107	0,097	1,054
0,20	0,164	0,127	1,200
0,25	0,227	0,157	1,323
0,30	0,296	0,186	1,428
0,40	0,447	0,241	1,600
0,50	0,614	0,293	1,732
0,60	0,793	0,342	1,833
0,70	0,980	0,387	1,908
0,80	1,174	0,429	1,960
0,90	1,371	0,466	1,990
1,00	1,571	0,500	2,000
1,10	1,771	0,530	1,990
1,20	1,968	0,555	1,960
1,30	2,162	0,576	1,908
1,40	2,349	0,593	1,833
1,50	2,527	0,603	1,732
1,60	2,694	0,608	1,600
1,70	2,846	0,607	1,428
1,75	2,915	0,603	1,323
1,80	2,978	0,596	1,200
1,85	3,035	0,587	1,054
1,90	3,083	0,573	0,872
1,95	3,121	0,553	0,624
2,00	3,142	0,500	0,000

r = raggio della sezione circolare

Sulla base dei diametri dei tubi in polietilene presenti in commercio, si possono determinare la portate di progetto dei tubi.

	DN mm	D int mm	r mm	A m ²	Q max l/s	Q (H=2r) l/s	Q (h=r) l/s
Flessibili	80	68	34.0	0,0018	0,24	0,22	0,08
	90	73	36.5	0.0021	0.29	0.26	0.13
	110	92	46.0	0.0033	0.53	0.48	0.24
	125	105	52.5	0.0043	0.75	0.69	0.34
	160	137	68.5	0.0074	1.53	1.40	0.70
	200	171	85.5	0.0115	2.77	2.53	1.26
Barre	200	188,2	94,1	0,0139	3,97	3,63	3,63
	250	237,6	118,8	0,0222	7,21	6,58	6,58
	315	299,6	149,8	0,0352	13,35	12,19	12,19
	400	380,4	190,2	0,0568	25,25	23,05	23,05

Tabella 1 – Calcolo portate

I drenaggi dei terreni saranno realizzati con tubazioni in PVC corrugato DN80 mediante macchine posadreni "a talpa". Questa è in grado di mettere in opera tubi in materiale plastico flessibile a profondità variabili tra i 50 cm e i 200 cm e a garantire il funzionamento per gravità grazie al controllo automatico e continuo della pendenza.

In realtà, il dimensionamento del sistema di drenaggio (profondità dei dreni, interasse, dimensioni, etc) dovrebbe essere eseguito mediante l'equazione di Hooghoudt, attraverso cui si calcola la portata attesa dal sistema di drenaggio in condizioni di funzionamento di picco per una precipitazione assunta tra i 5 e i 12 mm/d. Sulla base dello schema di cui alla figura 4, Hooghoudt propone la seguente relazione:

$$Q \cdot L^2 = 8 \cdot K_b \cdot d \cdot (D_d - D_w) + 4 \cdot K_a \cdot (D_d - D_w)^2$$

in cui:

- Q è la portata di drenaggio (m/d);
- K_a è la conducibilità idraulica del terreno sopra il livello del drenaggio (m/d);
- K_b è la conducibilità idraulica del terreno sotto il livello del drenaggio (m/d);
- D_i è la profondità dello strato impermeabile sottostante (m);
- D_d è la profondità dei dreni (m);
- D_w è la profondità della linea di saturazione tra i dreni per L/2 (m);

- L è l'interasse dei dreni (m);
- r è il raggio dei dreni (m);
- d è la profondità equivalente, funzione di L , $D=Di-Dd$, e di r , che serve per tener conto delle perdite di carico aggiuntive indotte dalla curvatura delle linee di flusso

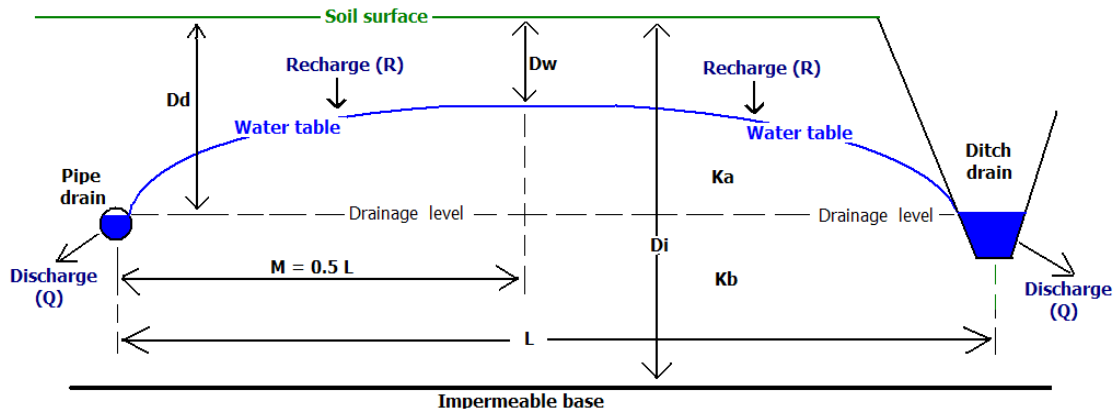


Figura 4 - Schema alla base dell'equazione di Hooghoudt

Fissato un diametro, si tratta di capire se il dreno è in grado di far passare la portata di picco. Poiché il diametro entra anche nel calcolo della profondità equivalente, la soluzione va cercata per via iterativa.

Nota la portata di picco, si determina una portata di progetto (quella che si assume debba passare attraverso il bioreattore) che è dell'ordine del 20-30% di quella di picco.

Le informazioni necessarie per un calcolo rigoroso non sono al momento disponibili, per cui si rimanda alla successiva fase progettuale per l'esecuzione delle indagini geologiche e, quindi, per il calcolo degli esatti valori di progetto delle portate.

L'interasse che si ottiene con Hooghoudt, in un terreno sabbioso come quello di Arborea, porterebbe ad interassi molto ampi, anche di 30-40 m. Poiché l'obiettivo è quello di allontanare il più velocemente possibile l'acqua ed i soluti che provengono dai flussi di percolazione per minimizzare la dispersione del soluto in falda è bene utilizzare un interasse di circa metà quello teorico.

A valle dei tubi-dreno verrà posata una condotta in PVC (corrugato quanto possibile la posa tramite posadreni ovvero liscio se è necessario la posa manuale) atta a collettare le acque dei lotti costituenti le aree da bonificare e convogliarle verso il bioreattore. Per evitare diametri superiori ai 200 mm, per i quali si dovrebbe utilizzare tubazioni in barre per la cui posa sarebbe necessario scavo e reinterro, si è scelto di posizionare il bioreattore circa a metà dell'azienda agricola.

Questo comporta che se un ramo dei collettori avrà una pendenza conforme a quella del piano campagna, l'altro ramo dovrà essere in contropendenza per poter funzionare a gravità.

Da quanto sopra, ricordando i valori di cui alla tabella 1, emerge che nei bioreattori n.3 e n.4 (Petucco e Rossi) verrà convogliata la portata derivante da due collettori DN200, tramite un pezzo speciale a tee con uscita con DN250, mentre in quelli delle aziende n.1 e n.2 (Panetto e Magnani) un collettore DN200.

Si riporta di seguito la tabella riepilogativa:

Nome	Proprietà	N° dreni	Qtot (l/s)	DN
Bioreattore 1	Panetto	14	2,69	200
Bioreattore 2	Magnani	20	3,84	200
Bioreattore 3	Rossi	24	4,61	250
Bioreattore 4	Petucco	24	4,61	2250

Tabella 2 – Definizione del collettore

4.2 Bioreattori

I collettori si svilupperanno parallelamente al lato corto dei lotti fino ad arrivare al punto più depresso in cui troverà luogo il bioreattore.

I bioreattori sono sistemi di trattamento passivo che possono essere utilizzati per rimuovere nitrati sia da acque di deflusso superficiale che da falde superficiali. Sono stati utilizzati con successo negli USA, in Canada, Australia, Nuova Zelanda, Regno Unito, Danimarca.

Questi sistemi di trattamento si caratterizzano per costi di realizzazione relativamente bassi garantendo elevati livelli di abbattimento dei nitrati contenuti nelle acque trattate. Possono essere realizzati ai margini delle aree coltivate e possono essere ricoperti in superficie con terreno, senza quindi intralciare le lavorazioni e le operazioni colturali.

Sono particolarmente interessanti perché possono essere realizzati in maniera diffusa sul territorio (alla scala aziendale), consentendo già alla scala del singolo campo di intercettare i flussi di nitrati che muovono verso la falda o verso il reticolo superficiale, riducendo quindi la propagazione dell'inquinamento della falda e delle acque superficiali. Inoltre, dovendo essere dotati di opportuni sistemi di monitoraggio in entrata ed in uscita, questi bioreattori consentono al singolo agricoltore di verificare già nella propria azienda l'efficacia delle tecniche di irrigazione e di fertilizzazione

adottate, sulla base dei carichi di nitrati che arrivano nel tempo al bioreattore, e di adottare eventualmente correttivi nella gestione dell'acqua e dei nutrienti.

I bioreattori costituiscono una delle più promettenti, e più diffuse, tecnologie di biorisanamento in situ delle acque di falda e del reticolo superficiale. Essi si basano sulla stimolazione dei naturali processi biologici degradativi e hanno dimostrato in molte applicazioni ottimi rendimenti di rimozione dei contaminanti. Tali tipologie di intervento consistono nella realizzazione di trincee, realizzate sul bordo dei campi o lungo le strade di accesso ai campi, riempite di un materiale naturale molto reattivo nei confronti del tipo di inquinamento da trattare.

Nel caso dei nitrati, i batteri denitrificanti eterotrofi richiedono materiali organici ad elevato rapporto C:N per poter operare. La biomassa costituita da colonie di batteri a metabolismo eterotrofo, naturalmente presente nel terreno e nella parte corticale del materiale di riempimento, nelle opportune condizioni di processo (ORP ≤ 300 mV; pH=5.5-8.0; T 15-35°C; $O_2 \leq 4.5$ mg/L) utilizza i nitrati per ossidare il substrato carbonioso, che funge sia da fonte di energia per le attività metaboliche della biomassa, sia da donatore di elettroni. La catena di reazioni, in cui intervengono enzimi catalizzatori specifici, nelle condizioni ideali di processo, converte i nitrati in azoto molecolare (figura 5).

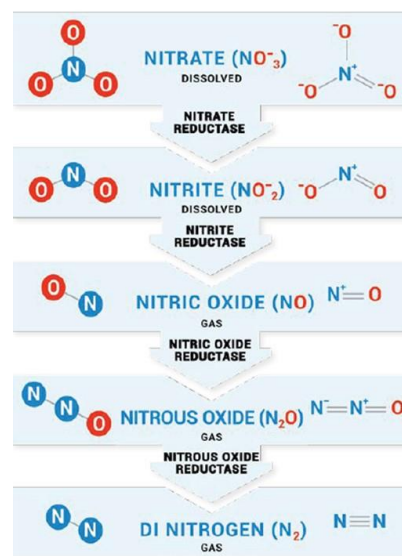


Figura 5 - Sequenza di reazioni di riduzione del nitrato a azoto molecolare e i sistemi enzimatici coinvolti

Fra i materiali utilizzabili per il riempimento dei bioreattori, negli ultimi anni si è poi sviluppato un diffuso interesse verso il riuso in applicazioni ambientali di materiali di scarto a matrice legnosa

(cippato, trinciato o pellettato di Eucaliptus, Pino, Quercia, per esempio), possibilmente a basso contenuto di tannino (che svolgerebbe azione antisettica) in alternativa al loro conferimento in discarica. Con riferimento al processo di nitrificazione, diversi studi hanno infatti mostrato l'efficacia di tali materiali nel sostenere il metabolismo rilasciando carbonio organico solubile (McLaughlan et al., 2009). In particolare, studi condotti su segatura di legno ed altri materiali hanno evidenziato un'efficacia di denitrificazione che, unitamente ai costi relativamente modesti legati sia al reperimento dei materiali reattivi che alla posa in opera del sistema di trattamento stesso, pongono tali interventi di biorisanamento *in situ* tra i più promettenti (Gilbert et al., 2008; Robertson et al., 2008; Moorman et al., 2010).

Altri materiali potenzialmente utilizzabili (compost, foglie, amido, cotone, cellulosa) sono da testare in quanto, essendo materiali caratterizzati da valori mediamente pari a 15-40% di lignina, 35-55% di cellulosa, e 5-25% di emicellulosa, potrebbero mostrare cinetiche di rimozione dei nitrati sensibilmente più elevate di quelle garantite da materiali legnosi, oltre che consentire una maggiore stabilità e durata nel tempo del mezzo filtrante.

Nel presente progetto si è scelto di utilizzare il cippato sebbene la tipologia di legno dovrà essere ulteriormente indagata mediante prove empiriche al fine di capirne esattamente le caratteristiche, la permeabilità e la deperibilità.

I bioreattori possono essere realizzati *in-line*, sfruttando le sezioni di scavo dei canali a pelo libero già esistenti, oppure *off-line*, realizzando un apposito scavo, opportunamente dimensionato, in aree ai margini del campo ed adiacenti al canale di recapito finale delle acque di drenaggio. Nel caso dei bioreattori *in-line*, è atteso che la struttura induca una risalita del livello nel canale di gronda a monte del bioreattore, determinando possibili rigurgiti dal canale verso le scoline e quindi ai campi. La soluzione in linea deve essere pertanto prevista solo in condizioni particolari, quando il carico idraulico disponibile nel canale sia sufficiente per il normale deflusso senza che si verifichino fenomeni di rigurgito verso il campo.

Stante la situazione esistente e l'andamento delle quote, si è scelta una soluzione del tipo *off-line*, ovvero con il bioreattore posto a ridosso del canale della bonifica su cui scaricare le acque trattate. La figura 6 fornisce una rappresentazione schematica in pianta della rete di dreno e del bioreattore n.1



Figura 6 - Rete di drenaggio e bioreattore n.1

Poiché lo scopo del progetto è quello di definire un metodo che possa essere esteso a tutta la piana di Arborea, si è scelto di uniformare tutti e quattro i bioreattori e realizzarli simili.

Il bioreattore ha una larghezza media di 4 m, una lunghezza di 25 m e una profondità di 1.2 m di profondità (da verificare sulla base della soggiacenza della falda). Le pareti ed il fondo dello scavo devono essere rivestiti con telo impermeabile in polietilene HDPE da 2 mm così da impedire la percolazione delle acque nel sottosuolo e da uno strato di tessuto non tessuto.

Quindi, si procede con la posa del substrato carbonioso prescelto (il cippato) all'interno del vano creato fino al raggiungimento di un'altezza di 0.90 m, sopra il quale si dovrà posare uno strato di geotessile come elemento di separazione rispetto allo spessore di ricoprimento in terra sovrastante di 30 cm.

Vista la posizione in cui si dovranno realizzare i bioreattori, in prossimità delle fasce frangivento di competenza del Consorzio di Bonifica dell'Oristanese, fin dove possibile si è scelto di utilizzare per il riempimento in cippato dei bioreattori il legno proveniente dagli eucaliptus tagliati.

Il dimensionamento del bioreattore dipende fondamentalmente da due parametri principali, ossia la portata da smaltire e il tempo di ritenzione. Mentre il primo è un valore di design che deriva da altri fattori, sul secondo è necessario fare attente valutazioni perché da esso dipende l'efficacia della denitrificazione. Tempi di ritenzione bassi possono non essere sufficienti per ridurre l'ossigeno disciolto ad un livello tale da garantire la denitrificazione, mentre tempi troppo lunghi possono portare alla riduzione del solfato e alla metilazione del mercurio.

Sulla scorta di quanto appena detto, si è scelto di dimensionare il bioreattore e le opere connesse affinché il tempo di ritenzione sia compreso in un intervallo tra le 4 e le 6 ore.

Il bioreattore è dotato, inoltre, di due pozzetti: uno in ingresso per il collegamento con il collettore dei dreni e uno in uscita verso il recettore finale. Il cippato, quindi, funziona come un mezzo poroso e l'acqua si muove all'interno per filtrazione fino al pozzetto di uscita, in cui è presente lo scarico. Affinché il bioreattore sia efficace il gradiente idraulico deve essere tale che la velocità rimanga contenuta in un campo in cui può considerarsi ancora applicabile la legge di Darcy, secondo cui

$$v = -k \cdot \frac{dh}{dx}$$

avendo indicato con v la velocità del flusso, con k il coefficiente di conducibilità idraulica alla saturazione e con dh/dx la variazione del carico idraulico lungo la coordinata x .

Dalla relazione precedente, quindi, si può definire la portata per unità di larghezza $q(x)$

$$q(x) = v(x) \cdot h(x) = -k \cdot \frac{dh(x)}{dx} \cdot h(x) = -\frac{k}{2} \cdot \frac{dh(x)^2}{dx}$$

Integrando la relazione precedente con x che varia a 0 allo sviluppo complessivo L , si ottiene quanto segue:

$$\int_0^L q(x) \cdot dx = \int_0^L -\frac{k}{2} \frac{dh(x)^2}{dx} \cdot dx$$

Ora, indicando con h_M e h_V i tiranti di monte e di valle, si può sostituire la variabile e gli estremi di integrazione

$$\int_{h_M}^{h_V} -\frac{k}{2} dh(x)^2 = \frac{k}{2} \cdot (h_M^2 - h_V^2)$$

In conclusione, quindi, si arriva alla seguente equazione

$$q \cdot L = \frac{k}{2} (h_M^2 - h_V^2)$$

Ovvero, indicando con $\bar{h}$ l'altezza media tra monte e valle

$$q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot \bar{h}$$

L'altro parametro fondamentale è, come detto, rappresentato dal tempo di ritenzione T. Dato che la velocità media del fluido è definita come il rapporto tra lo spazio percorso nel tempo, si può scrivere la seguente equazione

$$\bar{v} = \frac{L}{T}$$

La velocità effettiva del fluido, però, è pari al rapporto tra quella darciana vista in precedenza e la porosità del mezzo η .

$$\int_0^L -\frac{k}{\eta} \cdot \frac{dh(x)}{dx} \cdot dx = \int_0^L \frac{dx}{dt} \cdot dx$$

$$\int_{h_M}^{h_V} -\frac{k}{\eta} \cdot dh(x) = \int_0^L \frac{dx^2}{dt}$$

$$\frac{k}{\eta} \cdot (h_M - h_V) = \frac{L^2}{T}$$

$$\frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta h}{L} = \frac{L}{T}$$

Combinando le due equazioni si arriva infine a correlare tra loro il tempo di ritenzione, le altezze di monte e di valle, e la portata

$$q = \eta \cdot \frac{L}{T} \cdot \frac{h_M + h_V}{2}$$

Ipotizzando quindi di fissare le dimensioni del bioreattore, la portata in ingresso e il tempo di ritenzione, si possono determinare il carico di monte e di valle.

Si riporta di seguito uno schema esemplificativo del funzionamento del bioreattore.

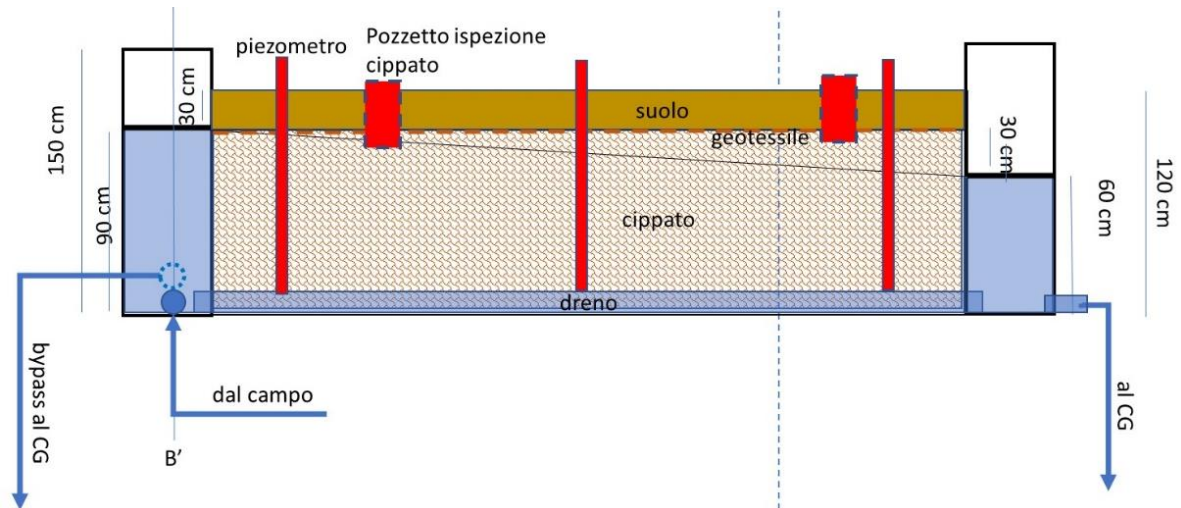


Figura 7 - Sezione esemplificativa del bioreattore

4.3 Pozzetti

Come accennato in precedenza, l'immissione e l'uscita dal bioreattore è regolata tramite due pozzetti, i quali hanno il compito fondamentale di regolare il gradiente idraulico in modo che la velocità del fluido non sia eccessiva e che il tempo di ritenzione rimanga più o meno sempre lo stesso.

Uno dei problemi principali che si sono riscontrati nella progettazione consiste nel fatto che, in corrispondenza del tirante sul pozzetto di monte sufficiente per il corretto funzionamento ($h_M=90\text{cm}$), l'intero sviluppo del collettore risultava rigurgitato con conseguenti evidenti problemi. Per questo motivo si è scelto di realizzare un pozzetto di monte diviso in tre camere: il collettore immette le acque in una prima camera, dotata di una pompa sommersa che solleva le acque e le convoglia nella seconda camera; da qui dipartono le ramificazioni che immettono le acque nel bioreattore; la prima camera è dotata di uno stramazzo che funziona come scarico di troppo pieno e che porta le acque verso la terza camera, da cui si innesta una tubazione di collegamento con il recettore finale al fine di generare una linea di bypass qualora le portate in ingresso nel pozzetto eccedessero la portata di progetto del bioreattore (corrispondente a quella della pompa).

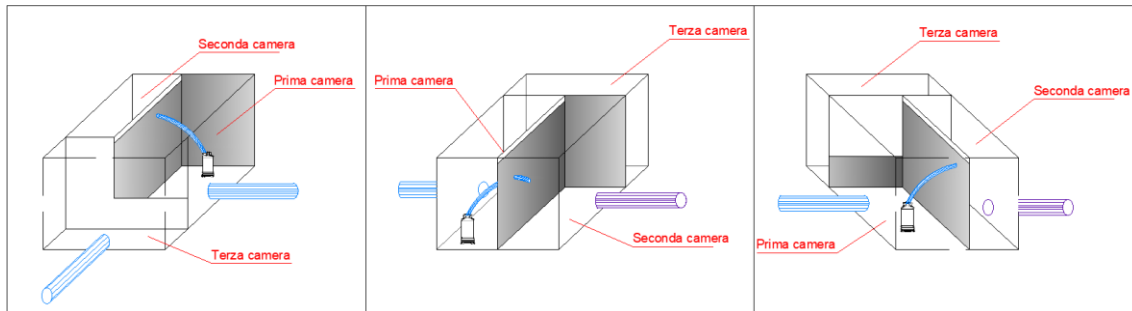


Figura 8 - Diverse prospettive del pozzetto di monte

Nella porzione terminale del bioreattore verranno inseriti dei tubi al fondo che permetteranno di raccogliere le acque filtrate e convogliarla nel pozzetto in uscita. Questo è dotato di due camere: nella prima vengono convogliate le acque provenienti dal bioreattore; queste entrano nella seconda camera attraverso uno stramazzo da cui poi diparte lo scarico verso il corpo recettore finale.

Lo stramazzo è un elemento fondamentale per il bioreattore in quanto definisce in maniera univoca il carico di valle h_v visto nella relazione al capitolo precedente, cosicché sia possibile calcolare il gradiente idraulico.

Inoltre, lo stramazzo dovrà essere costituito da elementi modulabili in quanto nel tempo il materiale presente nel bioreattore subirà un lento processo di decadimento, sia qualitativo che prestazionale, con conseguente modifica anche del coefficiente di permeabilità e di tutto ciò che ad esso è correlato, tra cui proprio il gradiente. Grazie alla sua modulabilità si potrà far fronte a queste variazioni del comportamento del mezzo poroso, nonché a tutti quegli errori di quei parametri che durante la progettazione si assumono come noti e precisi sebbene si potranno conoscere solo a seguito della realizzazione del tutto.

Infine, appare utile precisare che gli scarichi saranno dotati di valvola a clapet automatica in maniera che le acque derivanti dal deflusso superficiale non rientrino all'interno del bioreattore. D'altra parte, i tempi di formazione delle piene e quelli di percolazione e di reazione sono differenti di almeno un ordine di grandezza, per cui le interferenze dovrebbero essere minime.

4.4 Calcoli

La portata in ingresso può essere considerata fissa e costante, grazie alla presenza di una pompa sommersa a monte del bioreattore, e pari a 2.69 l/s. Si è assunto come riferimento tale valore in quanto è appena inferiore al minimo tra quelli calcolati in precedenza ed inoltre garantisce un funzionamento continuo, o comunque meno intermittente, della pompa anche in condizioni di

deflusso non di picco. In realtà, variandone i numeri di giri, la pompa è in grado di garantire anche portate maggiori.

Il carico a valle sul bioreattore h_v può essere assunto pari a 60 cm.

Il tempo di ritenzione T viene fissato in 5 ore.

La porosità del mezzo η può essere assunta pari a 0,7 in via ipotetica.

Dalla relazione di cui sopra si ottiene quindi

$$q = \eta \cdot \frac{L}{T} \cdot \frac{h_M + h_v}{2}$$

Tenendo conto che la sezione del bioreattore è trapezia con base minore di 3,40m, base maggiore di 4,60 m e altezza di 0,90 m, la portata per unità di larghezza q è a sua volta funzione dell'altezza del tirante idraulico,

$$h_M = \frac{2qT}{L} - h_v = 0,87 \text{ m}$$

4.5 Strumentazione di misura

Nel corso del riempimento del bioreattore si provvede ad installare alcuni piezometri per il controllo periodico dei principali parametri chimico-microbiologici all'interno del bioreattore mediante campionamento e/o utilizzando sonde multiparametriche. I piezometri servono anche ad effettuare verifiche periodiche della conducibilità alla saturazione del materiale di riempimento, che tende naturalmente a ridursi per l'ostruzione dei pori.



Figura 9 - Esempio di bioreattore con piezometri

Il bioreattore è anche dotato di pozzetti di ispezione per la verifica delle condizioni del cippato. Un bioreattore ha una durata media di 10-15 anni. Poi occorre sostituire il materiale di riempimento. Per facilitare il ricambio periodico del substrato carbonioso, il cippato può anche essere posato sottoforma di un gabbione che alla fine del suo ciclo di funzionamento può facilmente essere rimpiazzato con l'ausilio della benna di un escavatore.

Ancora, dovranno essere predisposti misuratori di livello nel pozzetto in ingresso, così da poter monitorare l'andamento del gradiente idraulico nel tempo. Infatti, ci si aspetta un deterioramento del cippato e un coefficiente k più basso, da cui ne deriverebbe un aumento del gradiente idraulico. Se il tirante a valle è fissato dallo stramazzo, inevitabilmente si dovrà sollevare il tirante di monte. Tale variazione potrà essere osservata mediante il misuratore di livello e, quindi, si potrà modificare la soglia di valle (che, come detto al paragrafo precedente, è modulabile) presente nel pozzetto in uscita in maniera da riportare la velocità in mezzeria uguale a quella di progetto.