



**POLITECNICO  
MILANO 1863**

**Corso FAST Ambiente Academy, 9-10 giugno 2020**  
**«Progettazione di opere per l'Invarianza Idraulica e Idrologica»**

## **Invasi di laminazione a scala di intervento locale**

Umberto Sanfilippo  
Politecnico di Milano  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA)  
Sezione Scienza e Ingegneria dell'Acqua (SIA)

## INTERCETTARE LA PIOGGIA

Inv.  
Idraulica

Inv.  
Idrologica

1. Tetti verdi (Green Roofs)
2. Raccolta delle acque piovane (Rainwater Harvesting)

## RIDURRE IL DEFLUSSO METEORICO

Inv.  
Idraulica

Inv.  
Idrologica

1. Pavimentazioni permeabili
2. Cunette filtranti, bacini d'infiltrazione, raingardens

## RIDURRE LE PORTATE METEORICHE

Inv.  
Idraulica

1. Vasche di laminazione sotterranee
2. Invasi distribuiti superficiali (parcheggi, laghetti urbani, ecc.)
3. Water squares

## RIDURRE L'IMPATTO SULL'AMBIENTE

Inv.  
Idraulica

Inv.  
Idrologica

1. Aree di bioritenzione (bio-retention areas)
2. Aree umide (wetlands)

- 1) Richiami sul fenomeno della laminazione.
- 2) Manufatti per la laminazione a scala locale.



---

Mercoledì 10 giugno 2020

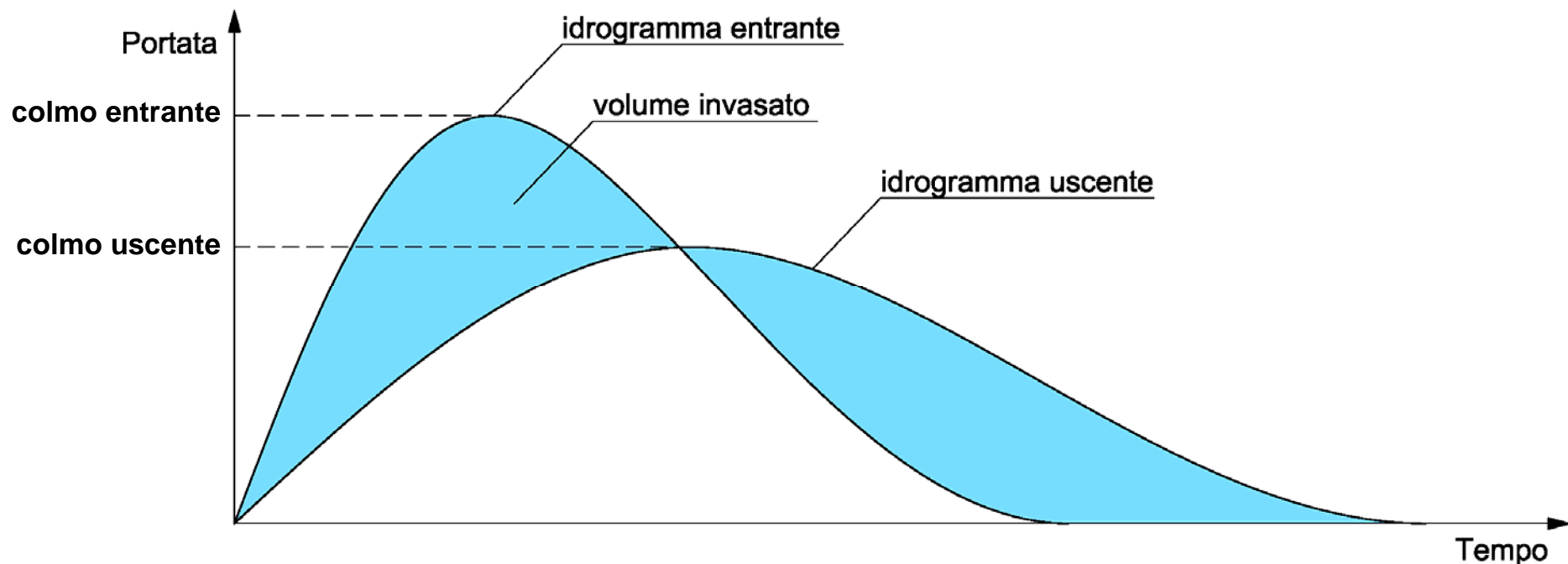
15:30 Esercitazione sul progetto di involucri di laminazione  
a scala di intervento locale

Dott.ssa Anita Raimondi – Politecnico di Milano

## DEFINIZIONE

La **laminazione** è il processo di **riduzione** e **ritardo** della **portata al colmo di una onda di piena**, mediante **accumulo temporaneo** del suo volume idrico in un **invaso**.

Il **volume dell'onda di piena entrante** nell'invaso e il **volume dell'onda laminata uscente** dall'invaso sono **uguali** fra loro, in sistemi chiusi.



## SISTEMA DI EQUAZIONI

Il fenomeno della laminazione è governato, a qualsiasi scala spaziale e temporale, dal seguente sistema di **sistema di 3 equazioni**:

<b>Equazione di continuità</b>	}	$Q_e(t) - Q_u(t) = \frac{dW(t)}{dt}$	
<b>Legge di efflusso</b>			$Q_u = Q_u[H(t)]$
<b>Legame geometrico</b> tra volume $W$ e livello $H$			$W = W[H(t)]$

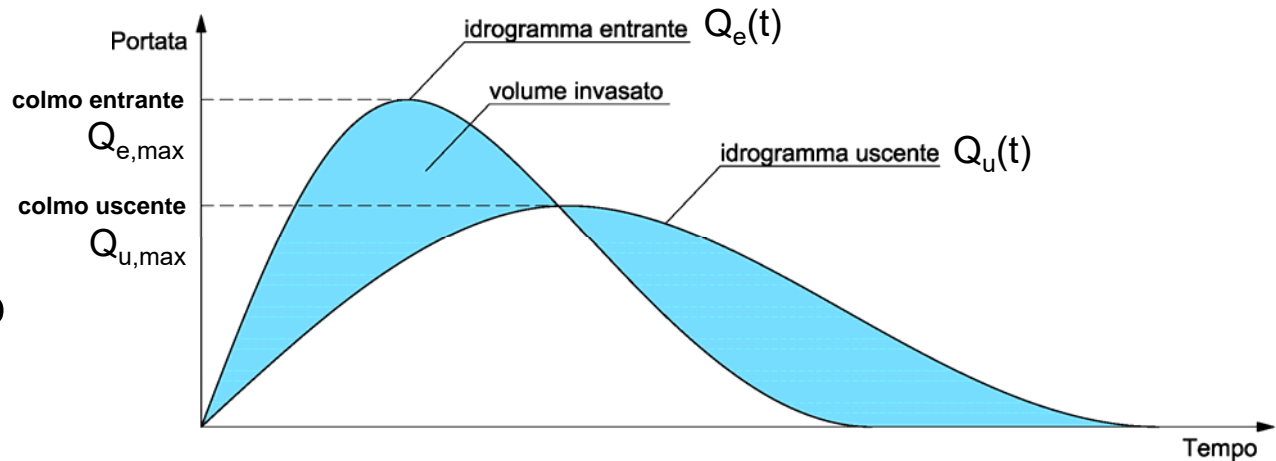
essendo:

$Q_e(t)$ : portata entrante

$Q_u(t)$ : portata uscente

$W(t)$ : volume invasato

$H(t)$ : tirante idrico



## RAPPORTO DI LAMINAZIONE

Si definisce, in generale, **rapporto di laminazione** la quantità:  $\eta = \frac{Q_{u,max}}{Q_{e,max}}$

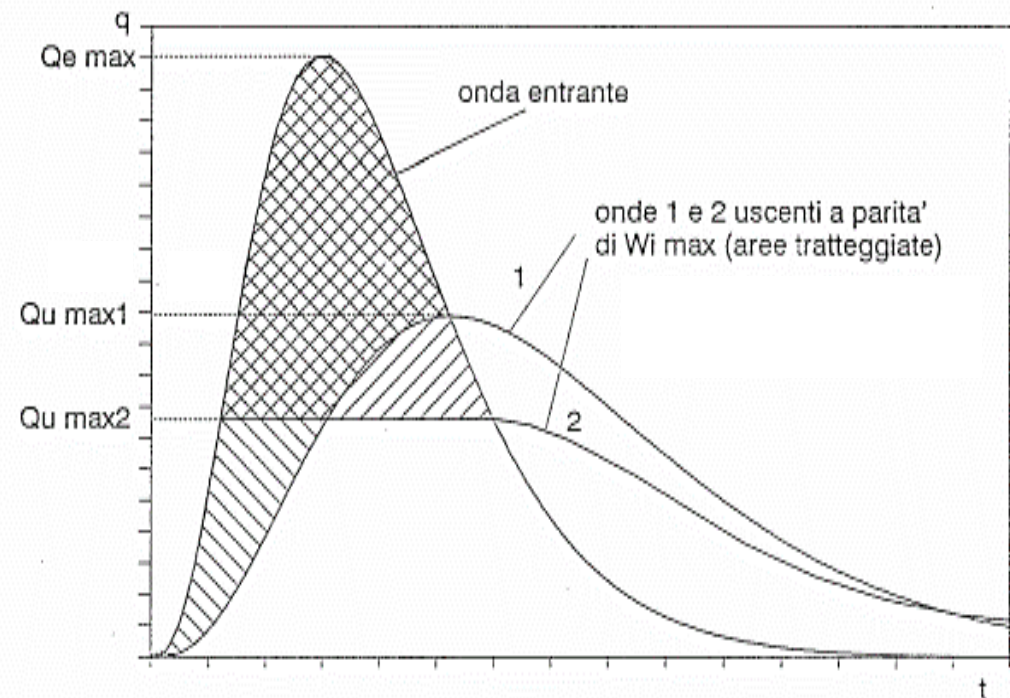
## LAMINAZIONE OTTIMALE

La **laminazione ottimale** è un particolare caso di laminazione, ottenibile tramite efflusso con bocche a geometria variabile oppure con pompe.

Tale processo è caratterizzato da una portata uscente  $Q_u(t)$  mantenuta volutamente pari al valore massimo  $Q_{u,max}$  quando  $Q_e(t) > Q_{u,max}(t)$ .

Ciò consente, dualmente:

1. massimo volume d'invaso a parità di portata uscente;
2. minima portata a parità di volume d'invaso.



## METODI DI CALCOLO PER IL PREDIMENSIONAMENTO

I più comuni **metodi di calcolo per il predimensionamento degli invasi** sono i seguenti:

- **metodo delle sole piogge**;
- **metodo dell'invaso**;
- **metodo cinematico o della corrivazione**.

Le loro **ipotesi di base** sono, in buona sostanza, le seguenti:

- **pioggia uniforme nel tempo** (ovvero ietogramma rettangolare);
- **pioggia uniforme nello spazio**;
- **metodo percentuale** per il calcolo delle perdite idrologiche;
- **schematizzazione di tipo globale concettuale** della risposta idrologica del bacino
- **laminazione ottimale** dell'invaso.

## METODO DELLE SOLE PIOGGE

Il **metodo delle sole piogge** si basa sull'ipotesi che la **precipitazione netta** avvenga tutta direttamente **sopra l'invaso**, trascurando quindi - a favore di sicurezza - il contributo alla laminazione esercitato dal bacino.

L'applicazione del metodo può avvenire per via grafica o per via analitica.

$a, n$  : parametri della curva di possibilità pluviometrica di riferimento;

$\theta$  : durata della pioggia costante;

$h(\theta) = \theta \cdot i(\theta) = a \cdot \theta^n$  : altezza  $h$  e intensità  $i$  della pioggia costante;

$\varphi$  : coefficiente di afflusso (costante);

$S$  : superficie del bacino;

$Q_u$  : portata massima uscente nel processo di laminazione ottimale;

$W_e(\theta)$  : volume cumulato entrato al termine della pioggia costante;

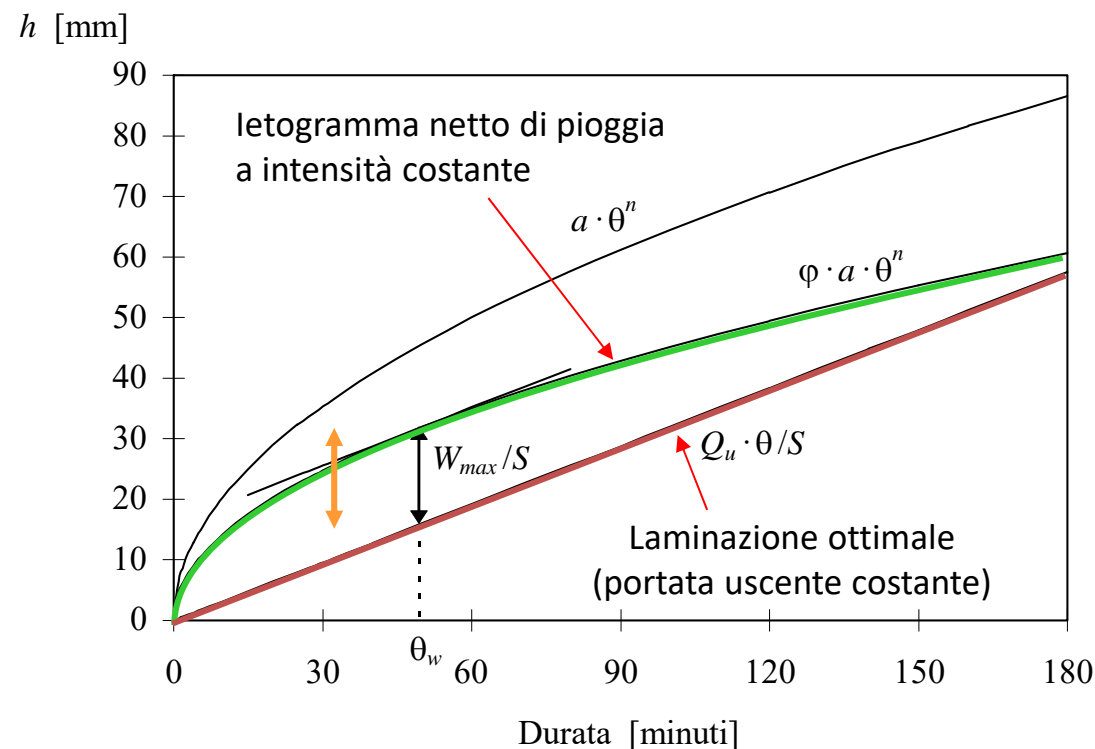
$W_u(\theta)$  : volume cumulato uscito al termine della pioggia costante;

$W(\theta)$  : volume presente nell'invaso al termine della pioggia costante;

$\theta_w$  : durata «critica» della pioggia costante.

## METODO DELLE SOLE PIOGGE

L'applicazione per **via grafica** consiste nell'individuare il volume  $W_{max}$  necessario per l'invaso come la massima distanza verticale tra la curva del volume cumulado entrato  $W_e$  (cioè della curva del volume cumulado di afflusso netto sul bacino) e quella del volume cumulado uscito  $W_u$  :



## METODO DELLE SOLE PIOGGE

L'applicazione per **via analitica** consiste, analogamente, nell'individuare il volume  $W_{max}$  necessario per l'invaso trovando dapprima il valore della durata di pioggia  $\theta$  che massimizza la differenza tra l'espressione del volume cumulato entrato  $W_e$  e quella del volume cumulato uscito  $W_u$  :

$$\left. \begin{aligned} W_e &= S \cdot \varphi \cdot h(\theta) = S \cdot \varphi \cdot a \cdot \theta^n \\ W_u &= Q_u \cdot \theta \end{aligned} \right\} \Rightarrow W = W_e - W_u = S \cdot \varphi \cdot a \cdot \theta^n - Q_u \cdot \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dW(\theta)}{d\theta} = 0 \Rightarrow \theta_w = \left( \frac{Q_u}{S \cdot \varphi \cdot a \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

$$W_{max} = S \cdot \varphi \cdot a \cdot \left( \frac{Q_u}{S \cdot \varphi \cdot a \cdot n} \right)^{\frac{n}{n-1}} - Q_u \cdot \left( \frac{Q_u}{S \cdot \varphi \cdot a \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

## METODO DELL'INVASO

Il **metodo dell'invaso** (Paoletti e Rege Gianas, 1979) si basa sull'ipotesi che il bacino a monte dell'invaso di laminazione si comporti a sua volta come un invaso lineare, per il quale sussista cioè un legame lineare, secondo un coefficiente  $k$ , tra portata uscente  $Q$  e volume presente  $W$ :

$$Q = k \cdot W$$

Il metodo viene applicato di solito per **via grafica** tramite abachi.

Si definisce dapprima l'inverso del rapporto di laminazione:  $m = \frac{1}{\eta} = \frac{Q_c}{Q_u}$   
essendo:

$\eta$  : rapporto di laminazione;

$Q_c$  : portata al colmo uscente dal bacino (in base al modello dell'invaso lineare) ed entrante nell'invaso;

$Q_u$  : portata massima uscente dall'invaso in laminazione ottimale.

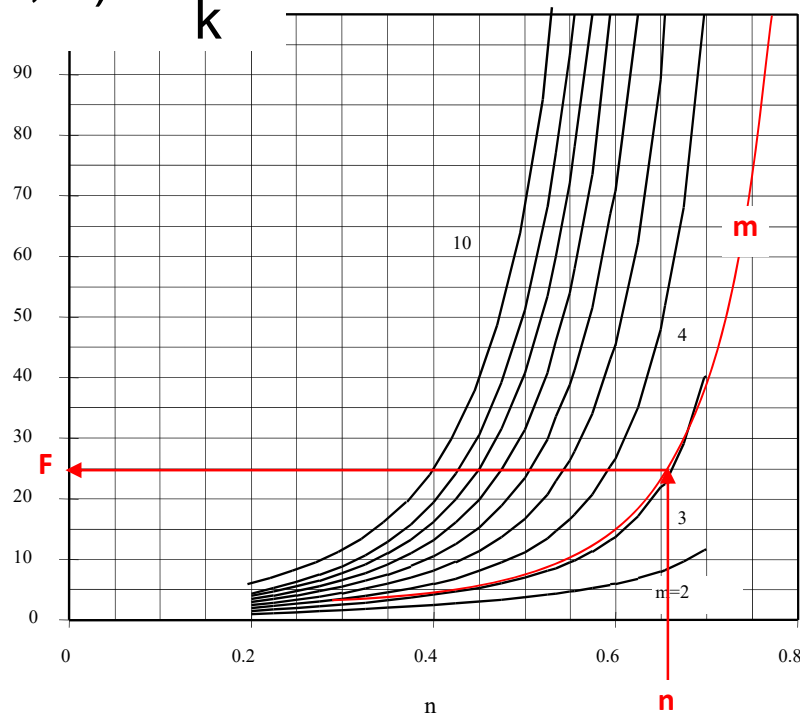
In particolare  $Q_c$  è stimato, in base al modello dell'invaso lineare, come:

$$Q_c = 0,7 \cdot S \cdot \varphi \cdot a \cdot k^{n-1}$$

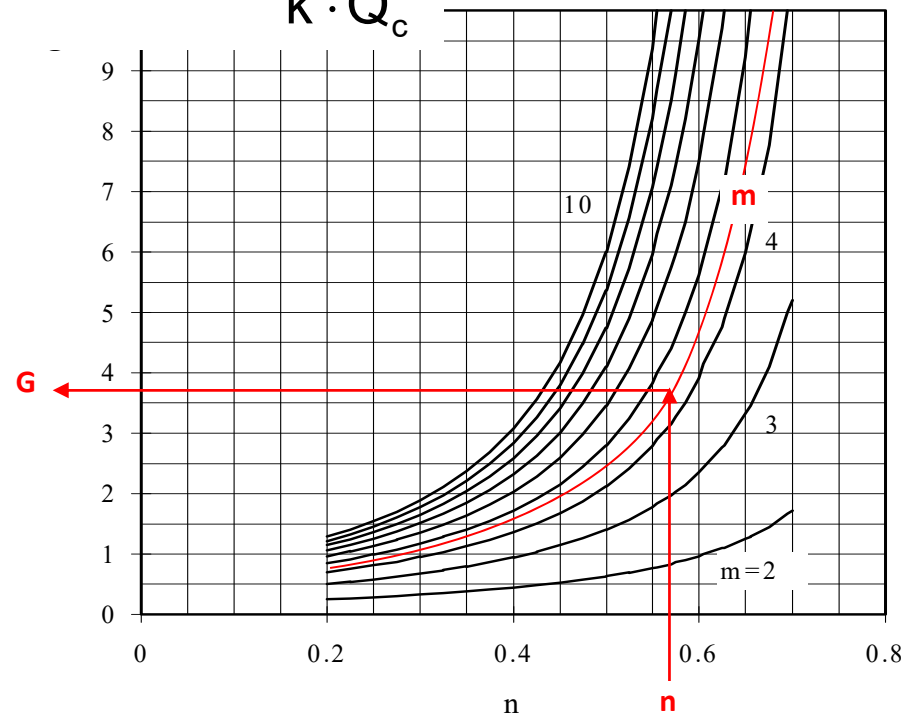
## METODO DELL'INVASO

Gli abachi che consentono di applicare il metodo forniscono, in base al valore di  $m$  e del parametro  $n$  della curva di possibilità pluviometrica, due coefficienti adimensionali denominati  $F$  e  $G$  da cui ottenere poi  $\theta_w$  e  $W_{max}$ :

$$f(n,m) = \frac{\theta_w}{k}$$



$$G(n,m) = \frac{W_{max}}{k \cdot Q_c}$$



## METODO CINEMATICO O DELLA CORRIVAZIONE

Il **metodo cinematico** o **della corrivazione** (Alfonsi e Orsi, 1979) si basa sull'ipotesi che il bacino a monte dell'invaso di laminazione si comporti secondo il modello omonimo, con tempo di corrivazione  $T_0$ .

In particolare  $Q_c$  viene stimato, in base al modello cinematico, come:

$$Q_c = S \cdot \varphi \cdot a \cdot T_0^{n-1}$$

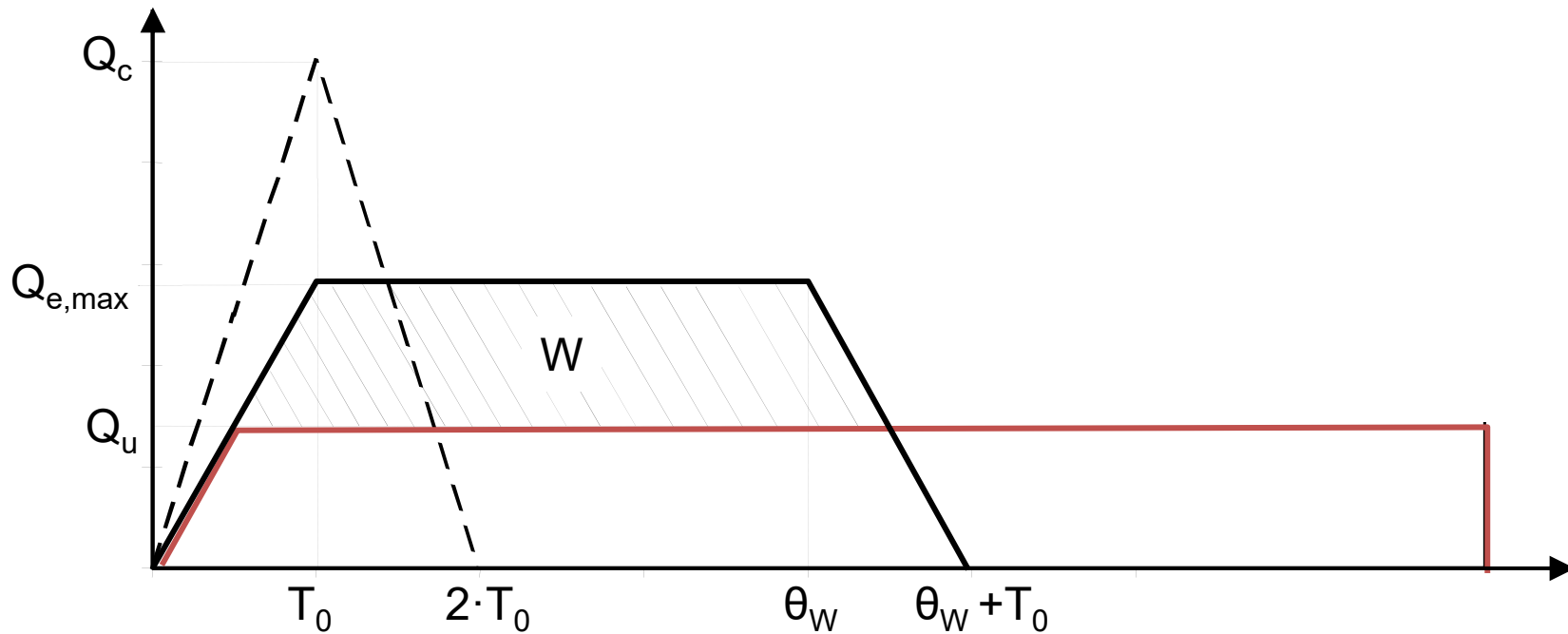
L'applicazione del metodo può avvenire per via grafica o per via analitica.

L'applicazione per **via analitica** consiste nell'individuare, analogamente al metodo dell'invaso, il volume  $W_{\max}$  necessario per l'invaso trovando dapprima il valore della durata di pioggia  $\theta$  che massimizza la differenza tra l'espressione del volume cumulato entrato  $W_e$  e quella del volume cumulato uscito  $W_u$  alla fine della pioggia costante.

## METODO CINEMATICO O DELLA CORRIVAZIONE

$$\textcircled{W} = \varphi \cdot A \cdot a \cdot \theta^n + T_0 \cdot Q_u^2 \cdot \frac{\theta^{1-n}}{\varphi \cdot A \cdot a} - Q_u \cdot \theta - Q_u \cdot T_0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dW(\theta)}{d\theta} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n \cdot \varphi \cdot A \cdot a \cdot \textcircled{\theta_w^{n-1}} + (1-n) \cdot T_0 \cdot Q_u^2 \cdot \frac{\textcircled{\theta_w^{-n}}}{\varphi \cdot A \cdot a} - Q_u = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_w \quad \Rightarrow \quad W_{\max}$$



## METODO CINEMATICO O DELLA CORRIVAZIONE

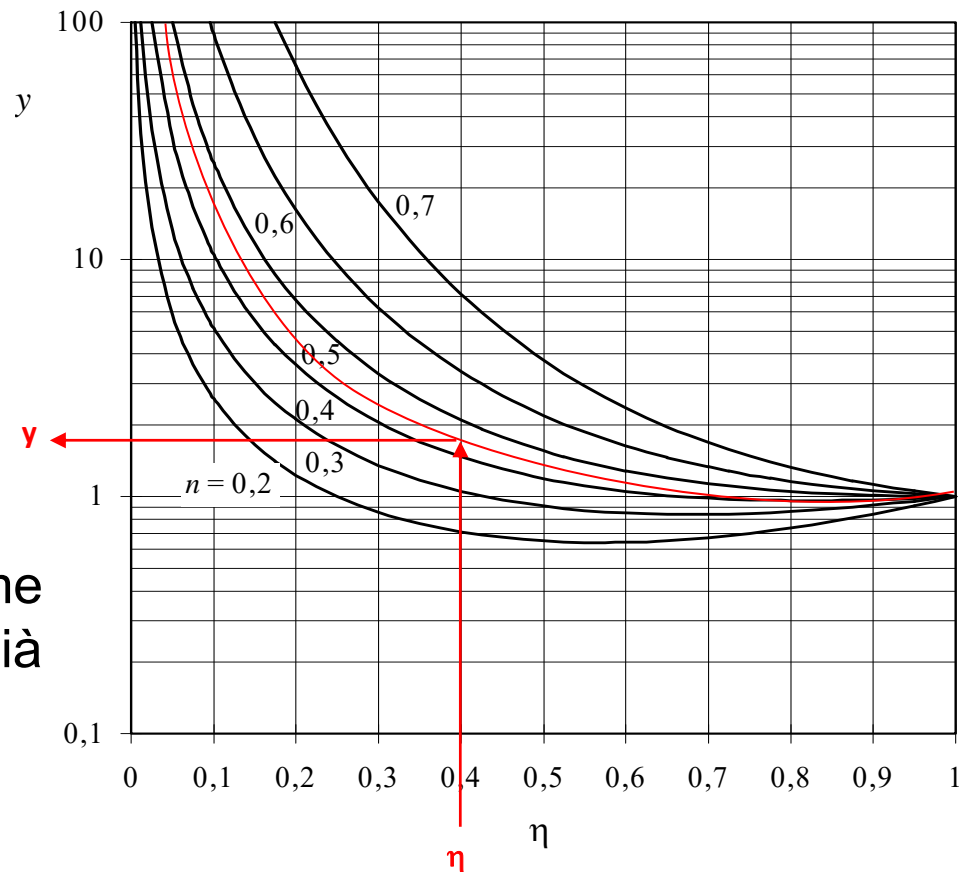
L'applicazione per **via grafica** consiste nell'individuare la durata di pioggia critica  $\theta_w$  che massimizza il volume da invasare  $W(\theta)$  per mezzo di un abaco, in funzione:

- del rapporto di laminazione  $\eta$ ,
- del parametro  $n$  della curva di possibilità pluviometrica.

$$\left. \begin{array}{l} \eta = \frac{Q_u}{Q_c} \\ n \end{array} \right\} \Rightarrow y = \frac{\theta_w}{T_0}$$

Una volta individuato  $\theta_w$ , il volume d'invaso viene calcolato dalla già vista espressione analitica come:

$$W(\theta) = W_e(\theta) - W_u(\theta)$$



## LIMITI APPLICATIVI DEI MODELLI DI PREDIMENSIONAMENTO

Laminazione ottimale	➔	Regolatori di flusso a portata variabile
Pioggia costante	➔	Ietogrammi variabili sintetici o storici
Evento singolo	➔	Possibilità di preriempimento
Vasca semplice	➔	Vasche multicamera



## SIMULAZIONI DETTAGLIATE BASATE SU EVENTI REALI

(Mambretti, 1991) →

T (anni)	Incremento % del volume d'invaso rispetto alla simulazione con evento singolo e pioggia costante				
	5	10	20	50	100
Q <sub>u</sub> (l/s/ha)					
0.5	17.2	16.8	26.6	28.3	43.1
1.0	14.1	14.9	22.4	10.2	10.2
2.0	11.3	15.1	4.8	19.1	20.6
5.0	18.9	15.0	11.0	20.6	24.6
10.0	33.9	28.2	5.7	6.8	14.4

(Marelli, 1994) →  $\Delta W \cong 50\% (T = 5 \text{ anni}) \div 100\% (T = 2 \text{ anni})$

## POSSIBILE PRE-RIEMPIMENTO DEGLI INVASI

### Esempio:

Piogge di Milano 1971-1991:

- 1296 eventi con  $h > 3$  mm;
- Intervallo medio  $\mu_d$  tra gli eventi: 5.37 giorni;
- Simulando le piogge reali con il metodo cinematico, si ottiene un volume di circa  $720 \text{ m}^3/\text{ha}_{\text{imp}}$  per una vasca volano con  $T = 20$  anni e portata in uscita costante pari a  $20 \text{ l/s ha}_{\text{imp}}$  ;
- Il tempo di completo svuotamento è quindi circa pari a 10 ore;
- Numero eventi con  $d < 10$  ore: 356.

In 356 casi su 21 anni la vasca non è completamente vuota all'inizio dell'evento.

Il valore massimo del pre-riempimento è risultato pari a circa il 40% .

## TIPOLOGIE DI INVASI NEI SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO

Le **vasche di pioggia** sono opere di **accumulo temporaneo** per il **controllo degli scarichi** dal sistema di drenaggio urbano verso i ricettori. Esse vengono realizzate:

- principalmente nei sistemi unitari (misti);
- ma sono inseribili anche nella rete bianca di sistemi separati.

## VASCHE DI PRIMA PIOGGIA

- Trattengono gli inquinanti veicolati dalla prima parte degli eventi meteorici;
- Sono generalmente impermeabilizzate e coperte.

## VASCHE VOLANO

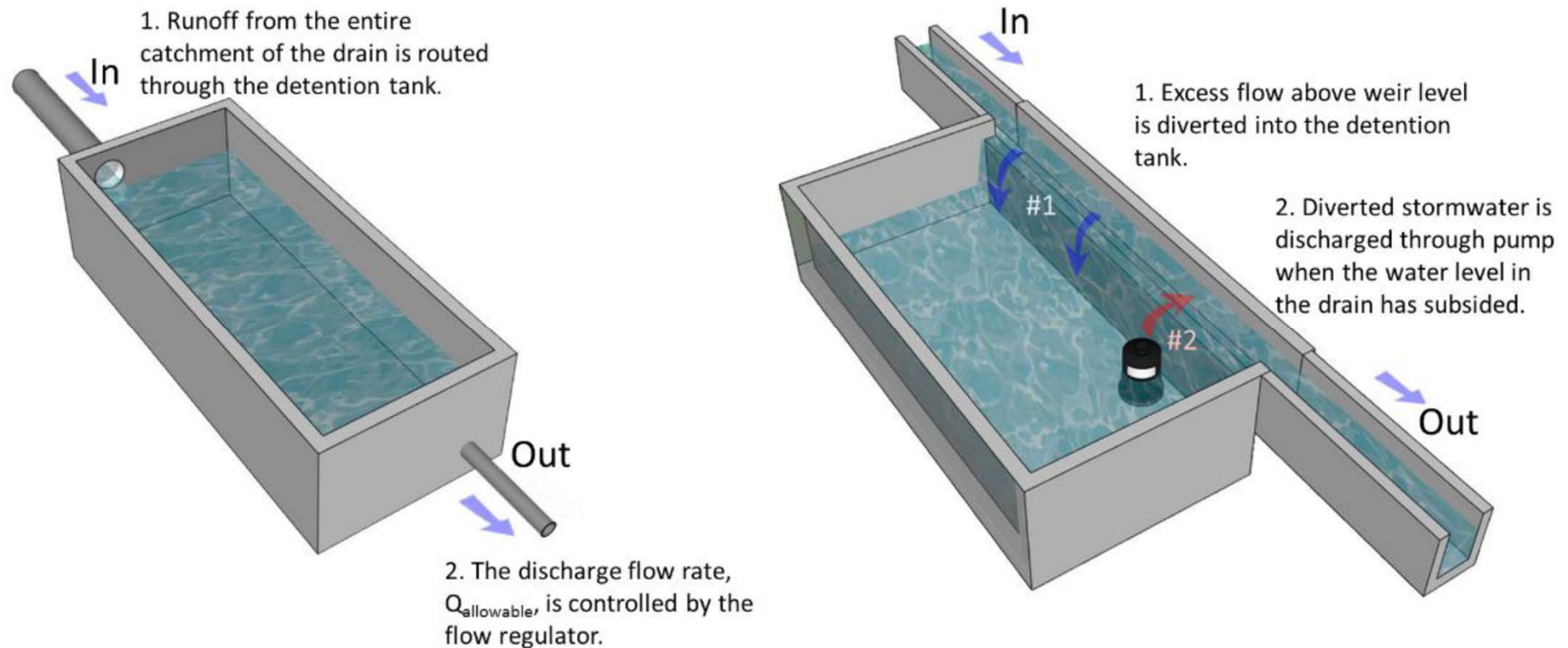
- Hanno funzione soprattutto di laminazione;
- Sono suddivise in più camere o comparti.

I due tipi di vasche sono spesso **ACCOPPIATI**.

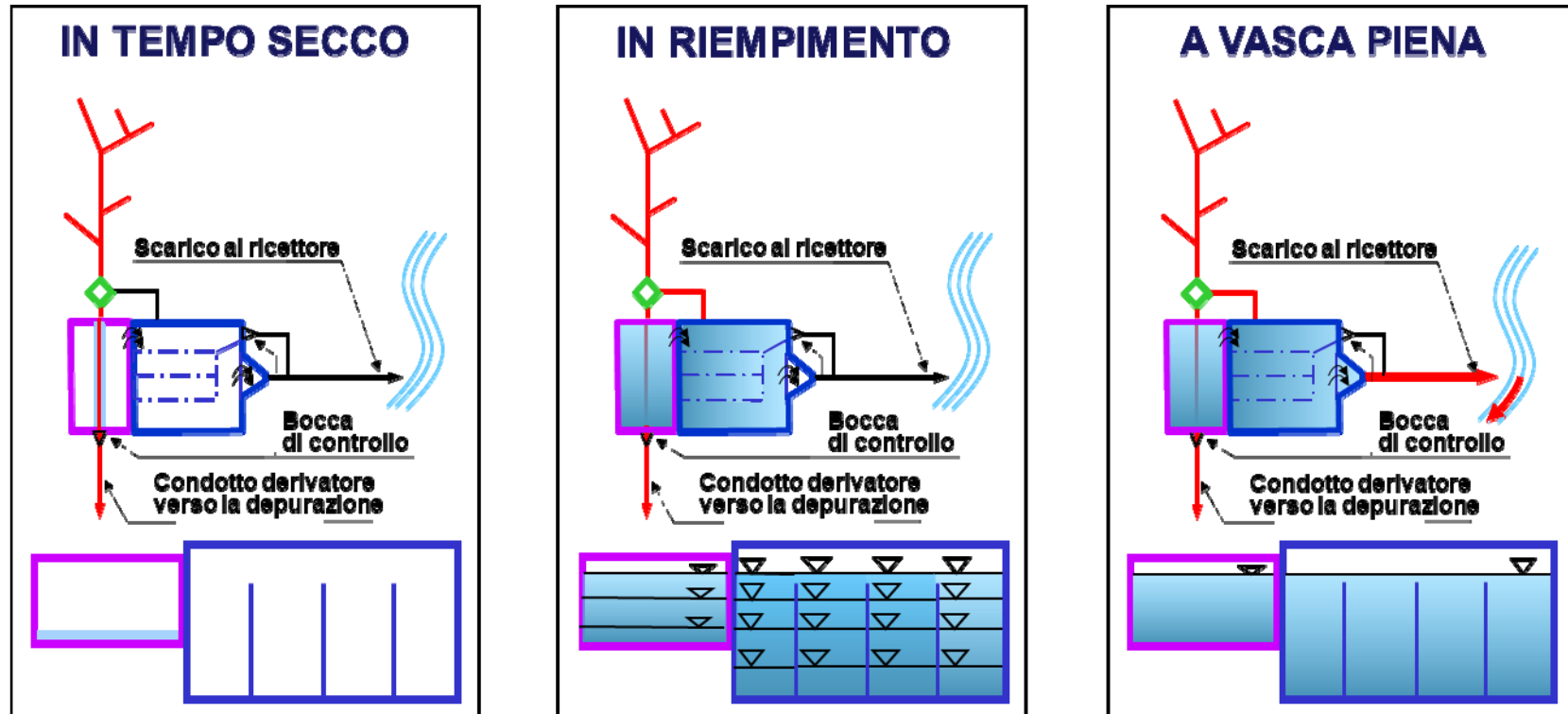
## INVASI IN LINEA (ON LINE) E INVASI FUORI LINEA (OFF LINE)

Negli **invasi in linea (on line)** tutto il flusso attraversa l'invaso stesso.

Invece negli **invasi fuori linea (off line)** solo i volumi scaricati sopra a una soglia vengono indirizzati all'invaso stesso.

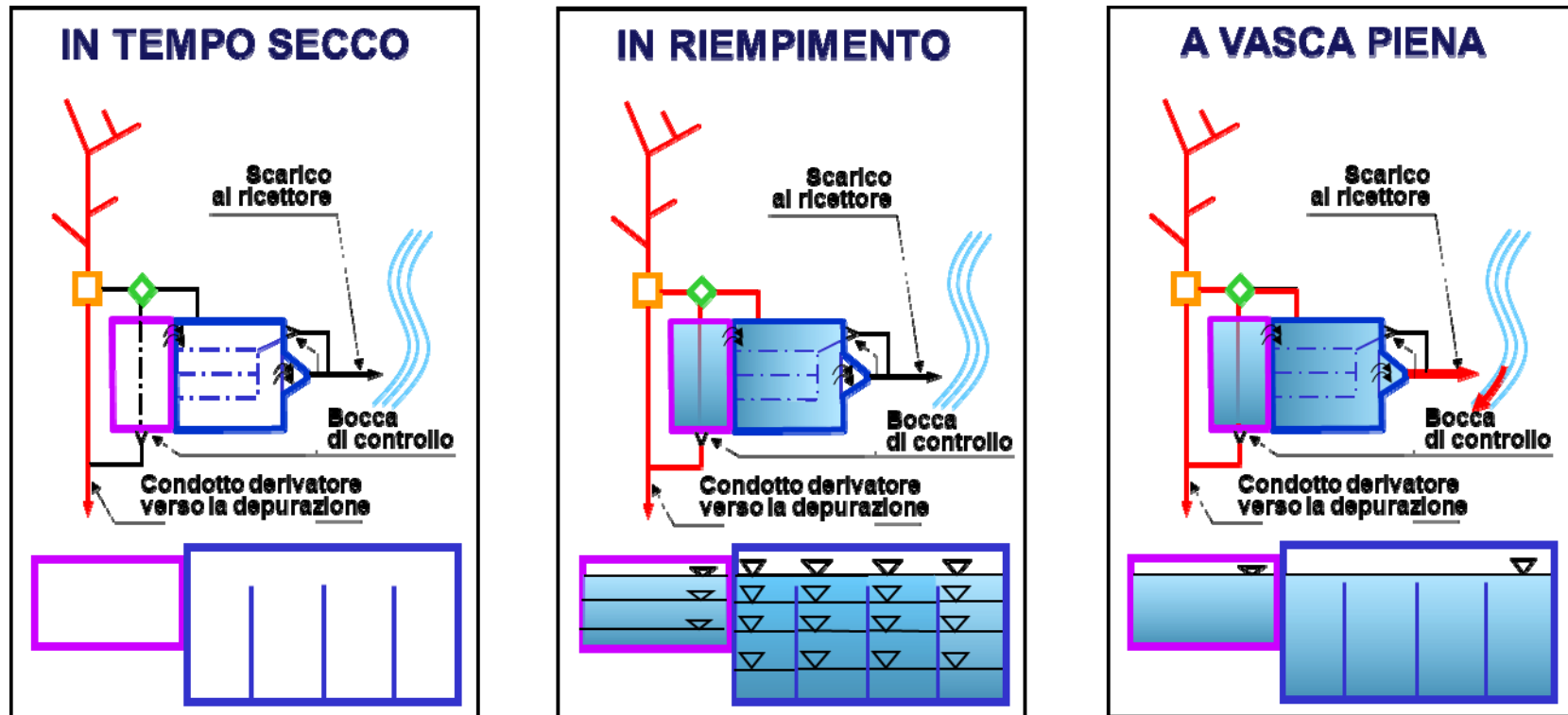


## INVASI IN LINEA (ON LINE)



- Vantaggi:**
- Funzione di laminazione (oltre a trappola per inquinanti);
  - Vasca divisa in settori, impegnati per tempi di ritorno crescenti.
- Svantaggi:**
- La corrente attraversa la vasca di prima pioggia;
  - In caso di bocca fissa → portate in uscita molto variabili;
  - Vasca di prima pioggia difficile da rendere autopulente.

## INVASI FUORI LINEA (OFF LINE)



### Vantaggi:

- Funzione di laminazione (oltre a trappola per inquinanti);
- Portata verso valle meno variabile rispetto allo schema in linea;
- Invaso solo per  $Q > Q_t \rightarrow$  vasca vuota in tempo secco;
- Vasca divisa in settori, impegnati per tempi di ritorno crescenti.

### Svantaggi:

- Collegamenti idraulici molto più complessi;
- Svuotamento spesso con impianto di sollevamento.

## REGOLATORI DI PORTATA A LUCE FISSA

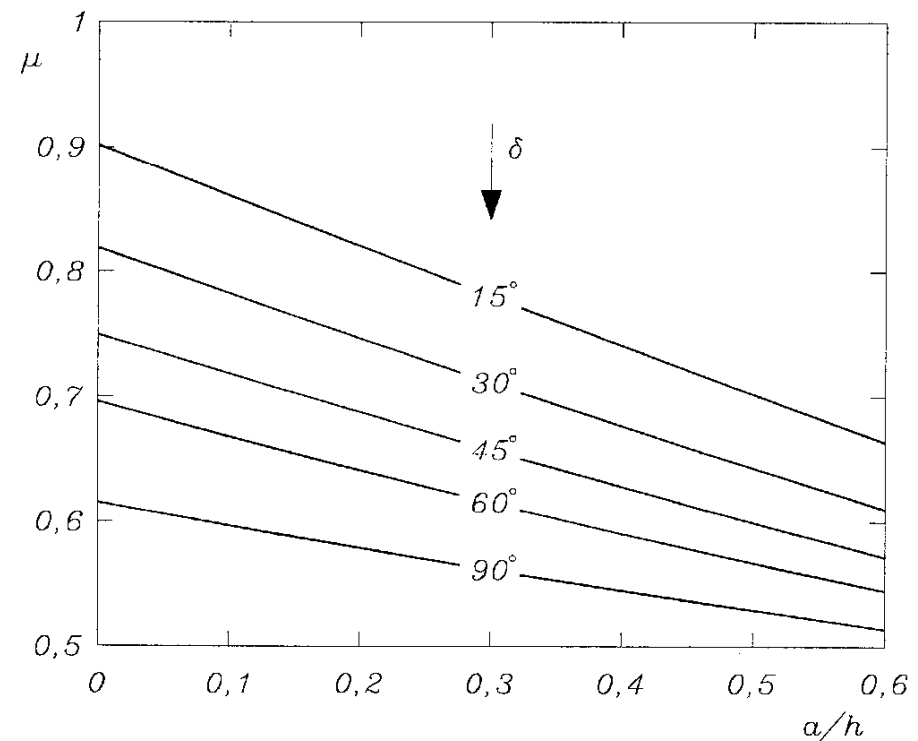
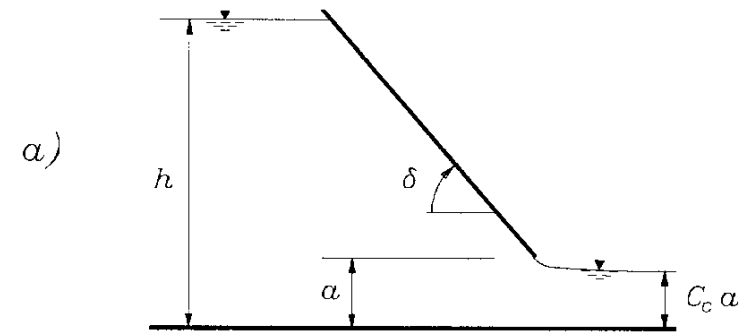
Sono essenzialmente **luci a battente**.

### Legge di efflusso:

$$Q = \mu A \sqrt{2gh}$$

Con parete verticale ( $\delta=90^\circ$ )  
e per  $a/h \rightarrow 0$ ,  $\mu=0.61$

Per  $a/h$  grande  $\mu$  si riduce a  
causa della presenza d'aria  
risucchiata che rende  
l'efflusso irregolare.

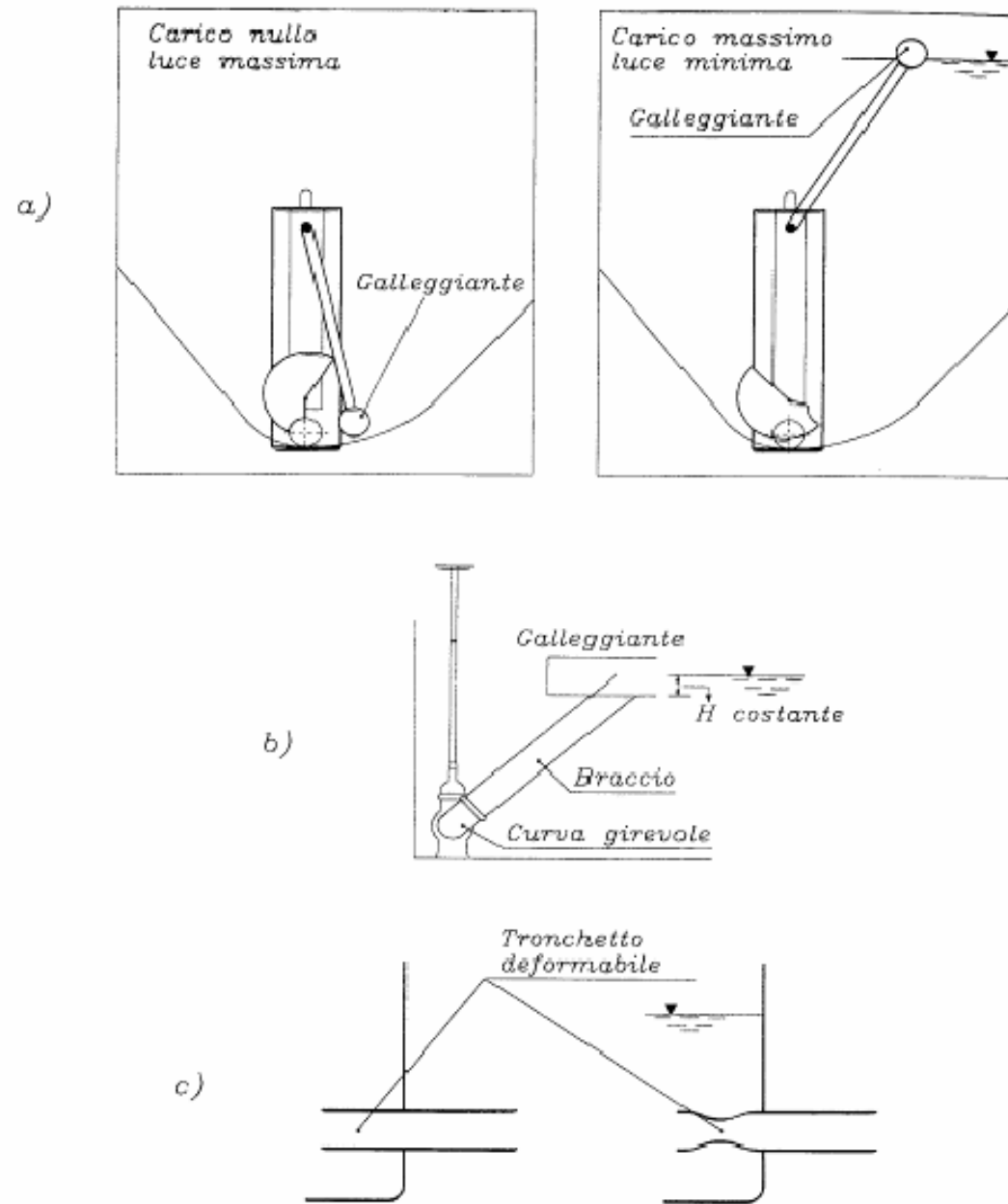


## REGOLATORI DI PORTATA A LUCE VARIABILE

Lo scopo dei **regolatori di portata a luce variabile** è quello di mantenere la **portata in uscita il più possibile costante** al variare del carico idraulico.

Generalmente sono bocche a battente con **paratoie regolabili**, con **imbocco mobile** o **deformabile**.

La **luce minima**, in condizioni di carico massimo, non deve essere inferiore a 20x20 cm per evitare possibili occlusioni.



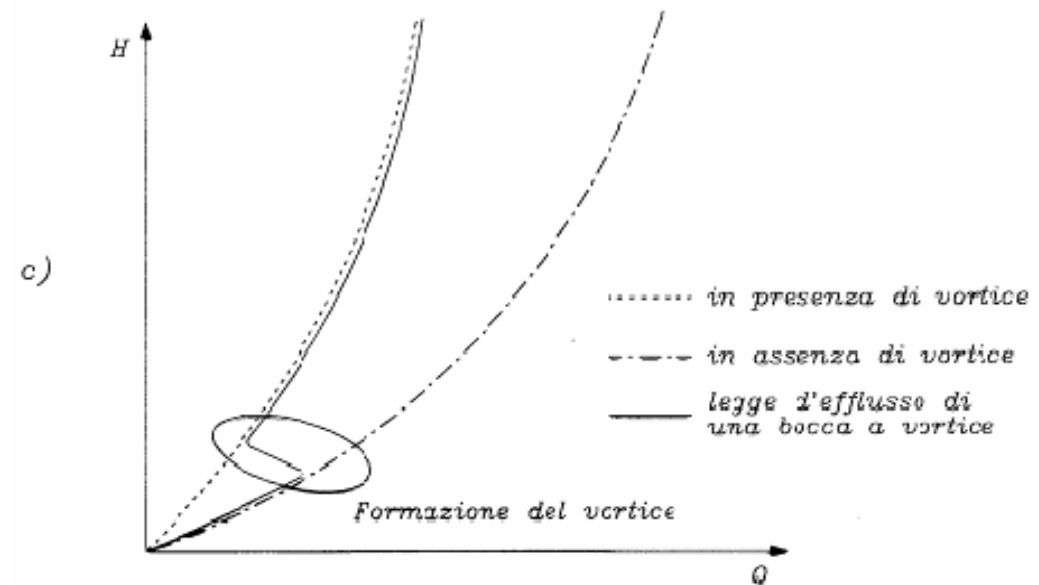
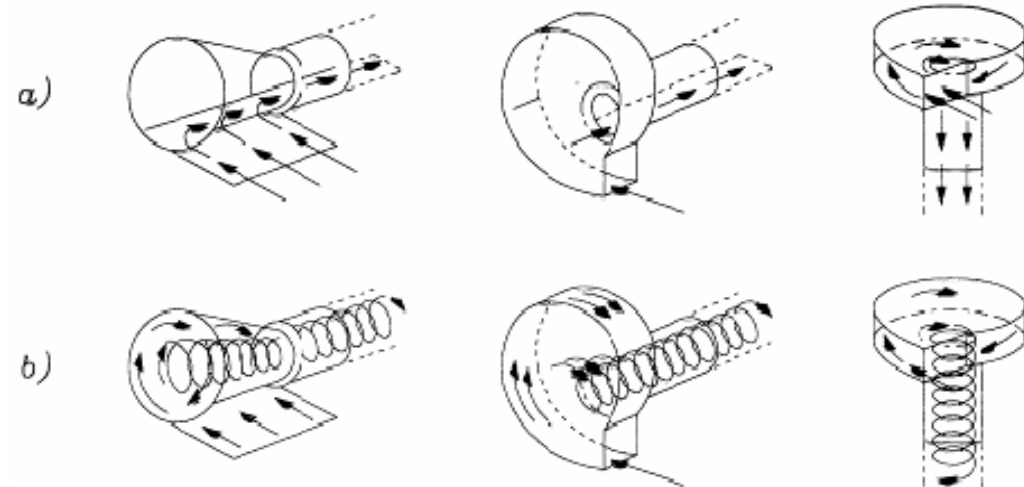
## REGOLATORI DI PORTATA A VORTICE

I **regolatori di portata a vortice** sono chiamati anche **hydrobrakes** o **vortex amplifiers**.

Il moto vorticoso riduce sensibilmente il coefficiente d'efflusso ( $\mu = 0.2 \div 0.3$ ).

Sono caratterizzati da:

- **Luci più ampie** (quindi meno intasabili);
- **Autopulizia** dovuta al vortice;
- **Portata uscente non costante**.



## SCARICHI DI SUPERFICIE

Sono generalmente **luci a stramazzo**.

**Legge di efflusso:**

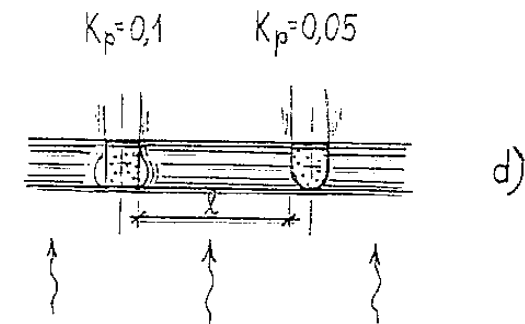
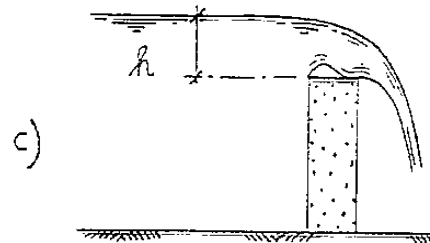
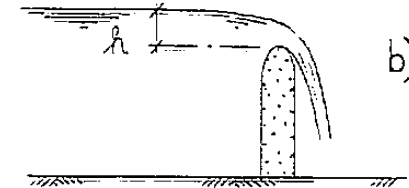
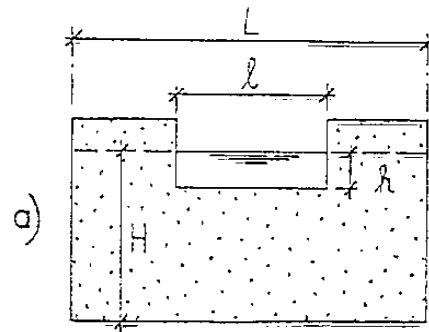
$$Q = \mu l h \sqrt{2gh}$$

Caso b)  $\mu = 0.45 \div 0.48$

Caso d)  $l_{\text{eff}} = l - 2 \cdot K_p \cdot h$

Caso a) 
$$\mu = \left( 0.405 - 0.03 \frac{L-l}{L} + \frac{0.0027}{h} \right) \cdot \left[ 1 + 0.55 \cdot \left( \frac{lh}{LH} \right)^2 \right]$$

Caso c) 
$$\mu = 0.8 \cdot \left( 0.405 - 0.03 \frac{L-l}{L} + \frac{0.0027}{h} \right) \cdot \left[ 1 + 0.55 \cdot \left( \frac{lh}{LH} \right)^2 \right]$$



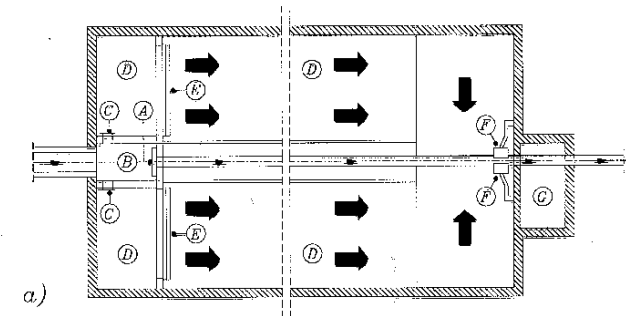
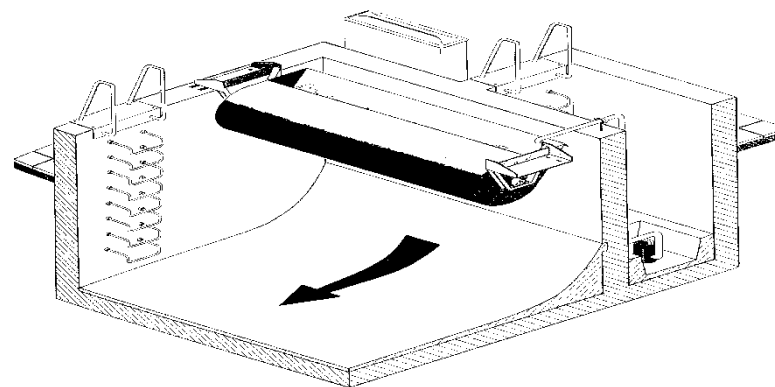
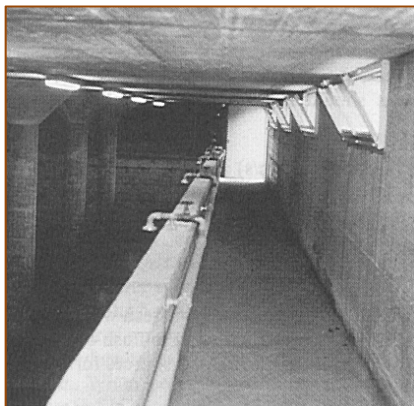
## DISPOSITIVI DI LAVAGGIO

La funzione dei **dispositivi di lavaggio** è essenzialmente quella di eliminare il materiale sedimentato sul fondo vasca a fine evento.

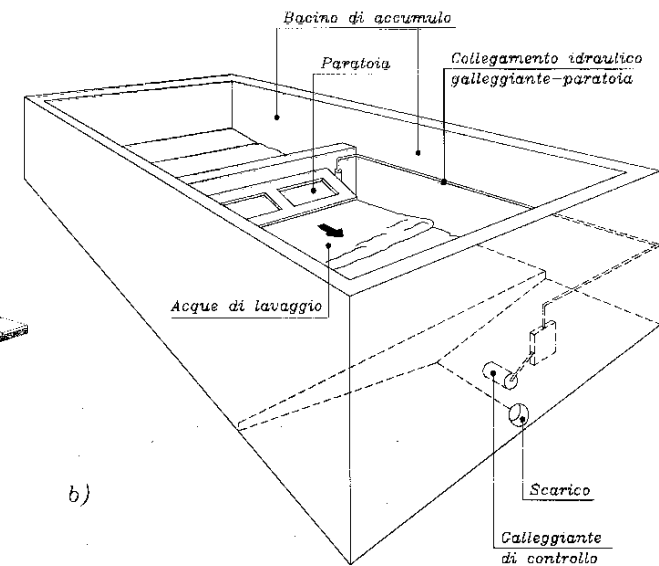
Possono essere a controllo manuale e/o essere dotati di sistemi automatizzati.

La dimensione e la geometria dell'**accumulo** dipendono dal sistema di lavaggio prescelto.

Possono utilizzare sia acqua della fognatura in arrivo da monte sia acqua pulita.

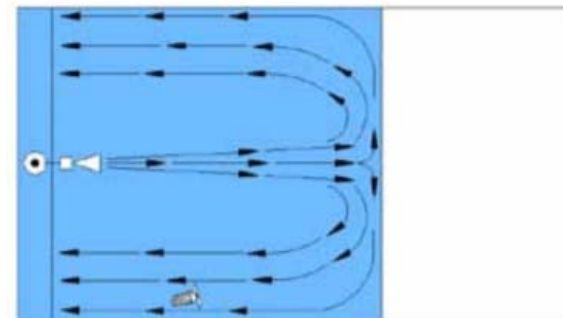
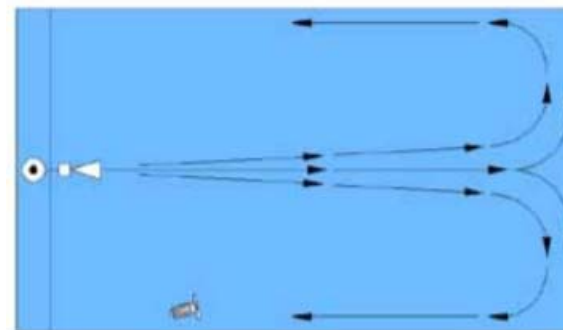
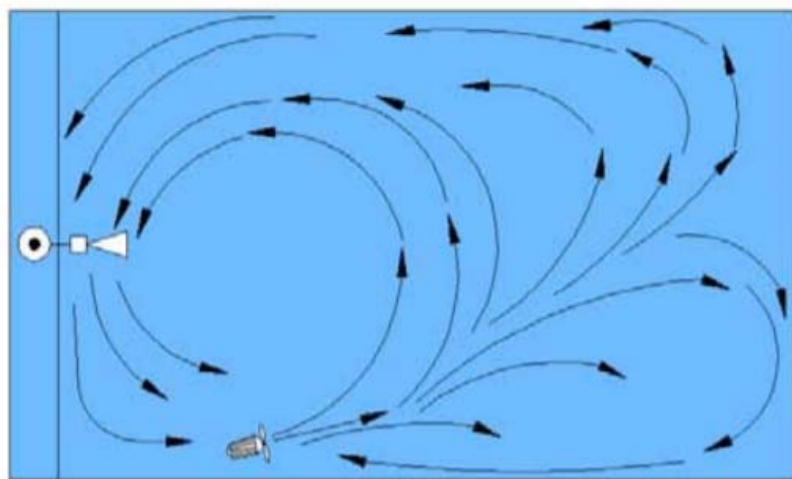
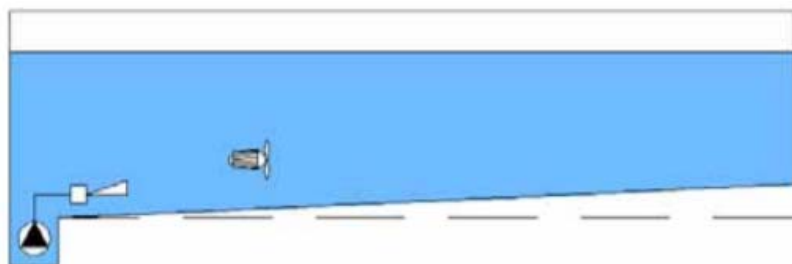


- (A) Ingresso canale di deflusso portate normali
- (B) Precamera di riempimento bacino/i di accumulo
- (C) Ingresso/i acqua riempimento bacino/i
- (D) Bacino di accumulo
- (E) Paratoia
- (F) Galleggiante di controllo
- (G) Pozzetto di collegamento con la rete di valle eventualmente mediante sollevamento



## DISPOSITIVI DI LAVAGGIO

Una tipologia alternativa lavaggio delle vasche d'invaso è quella dei **dispositivi di flussaggio**.



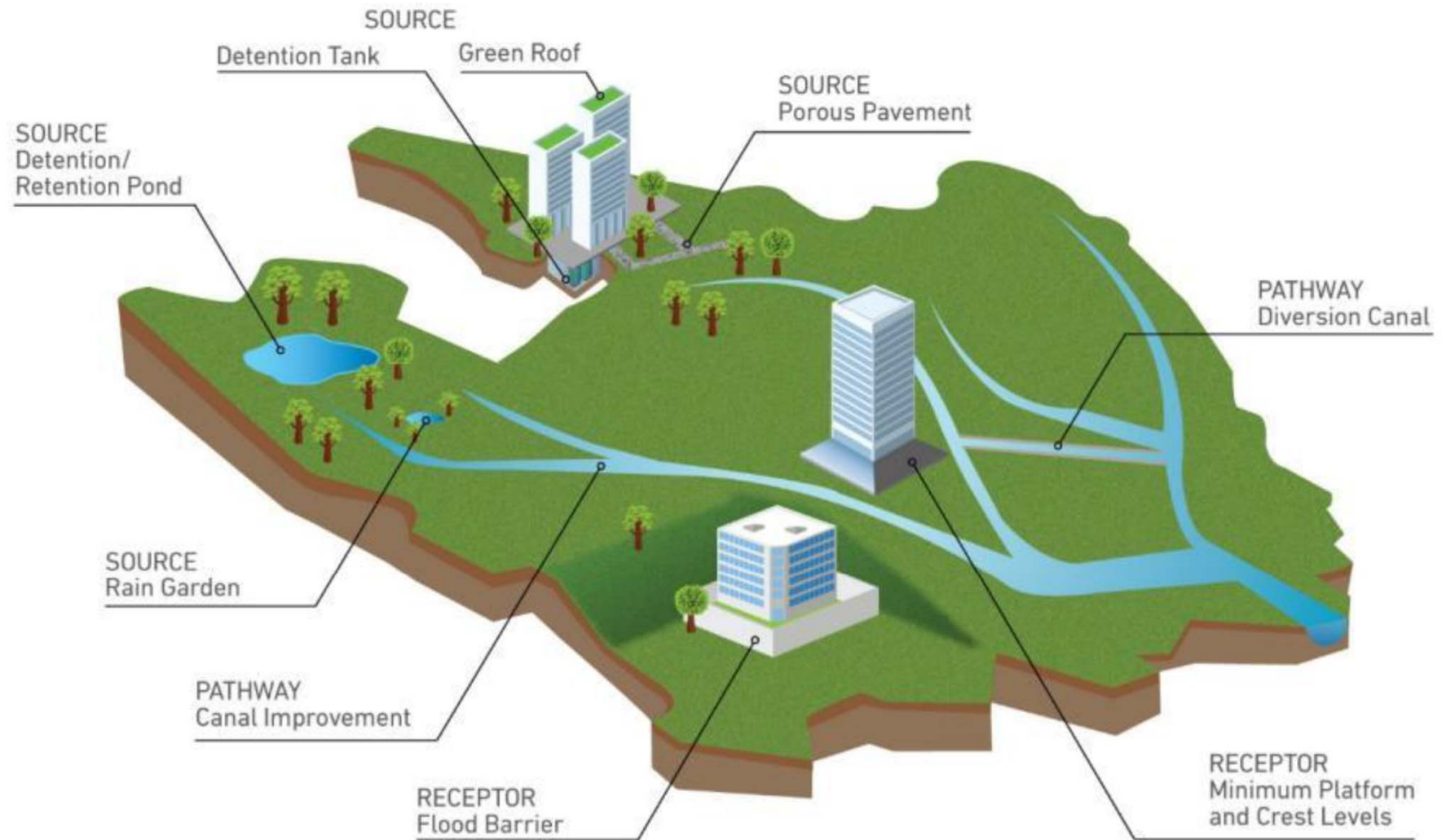
## INVASI DI DETENZIONE E INVASI DI RITENZIONE

Un **invaso di detenzione**, o **vasca**, ha lo scarico sul fondo del manufatto stesso e quindi **non ha una presenza d'acqua permanente** una volta svuotato l'invaso dopo il termine dell'evento meteorico.

Un **invaso di ritenzione**, come ad esempio i **laghetti urbani**, ha invece lo scarico principale a quota sensibilmente più alta del fondo, proprio per mantenere una **presenza d'acqua permanente**, anche in tempo secco.



## INVASI DI DETENZIONE E INVASI DI RITENZIONE



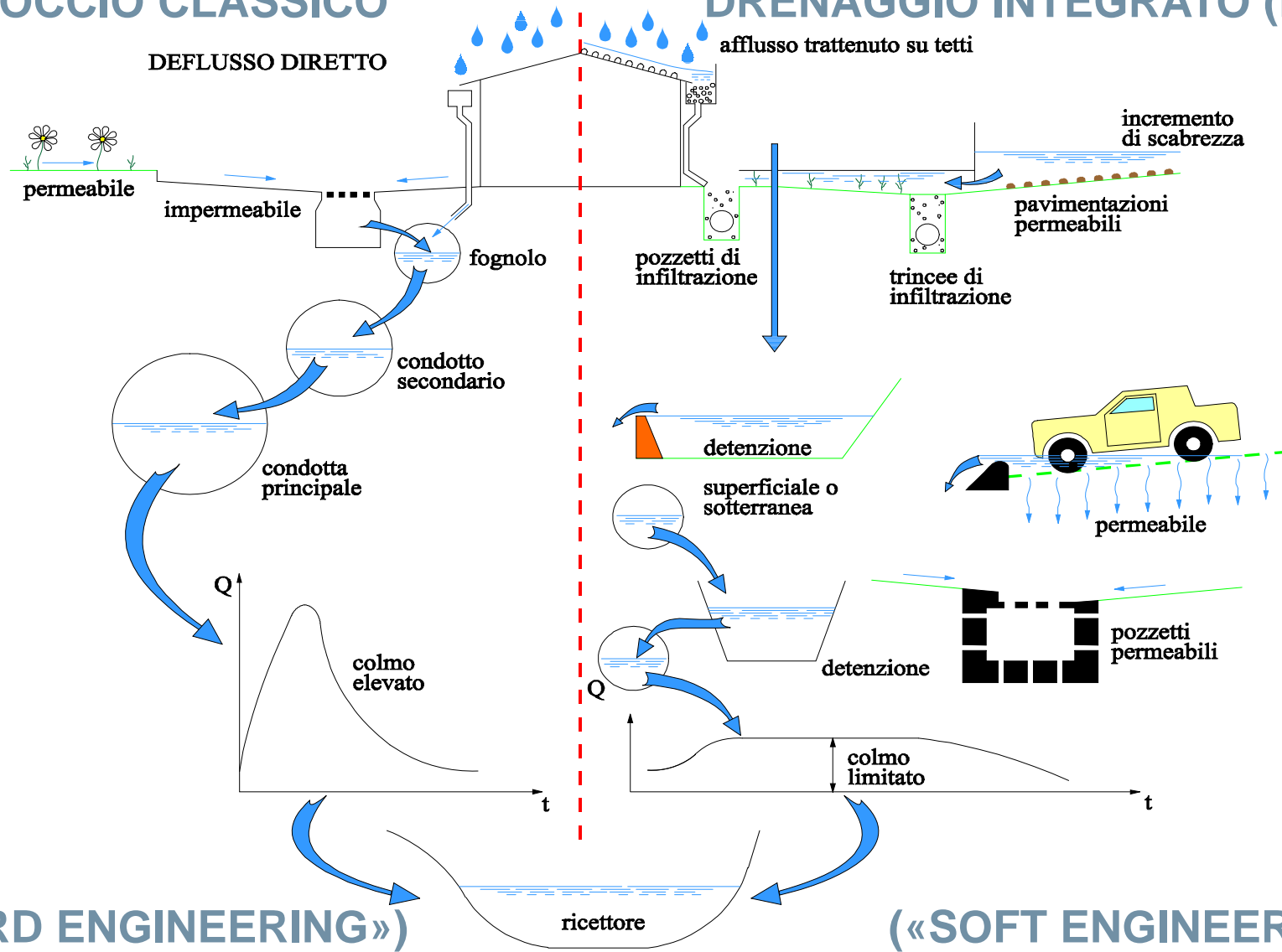
## STRATEGIE DI DRENAGGIO TRADIZIONALI E ALTERNATIVE

Numerose esperienze in vari Paesi del Mondo hanno dimostrato che le **strategie tradizionali di drenaggio urbano**, basate principalmente sul concetto di **convogliamento e trattamento a valle dei deflussi** (pur con eventualmente anche vasche di prima pioggia e volano, in linea e fuori linea), sono ormai **sempre meno efficaci**, oltre che **economicamente difficili** da sostenere, con riferimento agli obiettivi di gestire e ridurre sia il rischio idraulico che quello ambientale, soprattutto nelle grandi aree urbane dove si hanno ulteriori problemi legati alla localizzazione e all'inserimento di nuovi interventi nel contesto esistente.

La **strategia alternativa** più valida e sostenibile appare sempre più quella di puntare sul **riequilibrio del bilancio idrologico**, basandosi sulla **gestione locale dei deflussi superficiali di origine meteorica**, mediante sistemi di intercettazione, infiltrazione e laminazione diffusi (noti anche come **Best Management Practices, BMPs**, ma denominati anche **SUDS, ovvero Sustainable Urban Drainage Systems**, oppure **LID, cioè Low Impact Development**, con significato in pratica equivalente).

## APPROCCIO CLASSICO

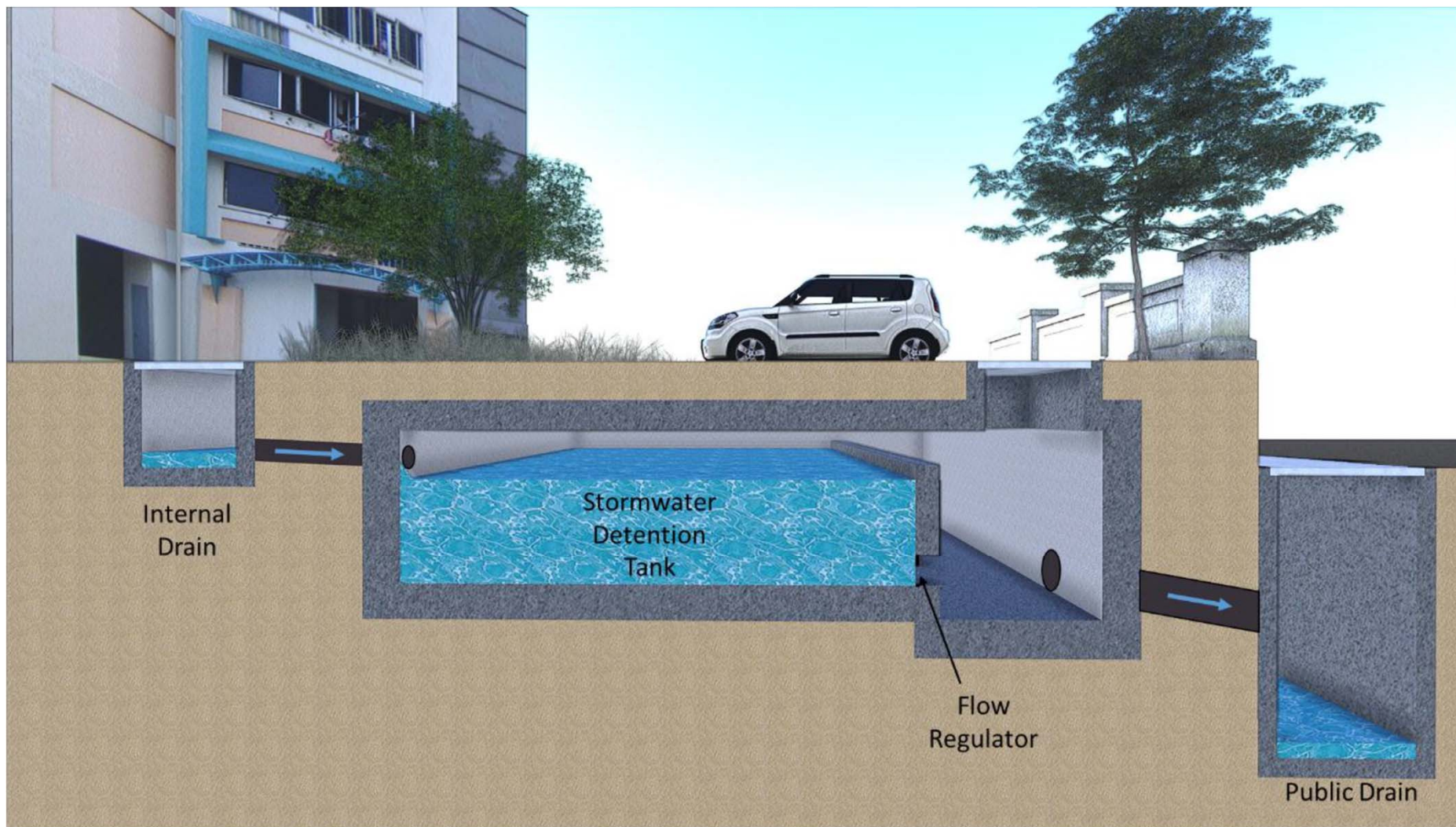
## DRENAGGIO INTEGRATO (BMPs)



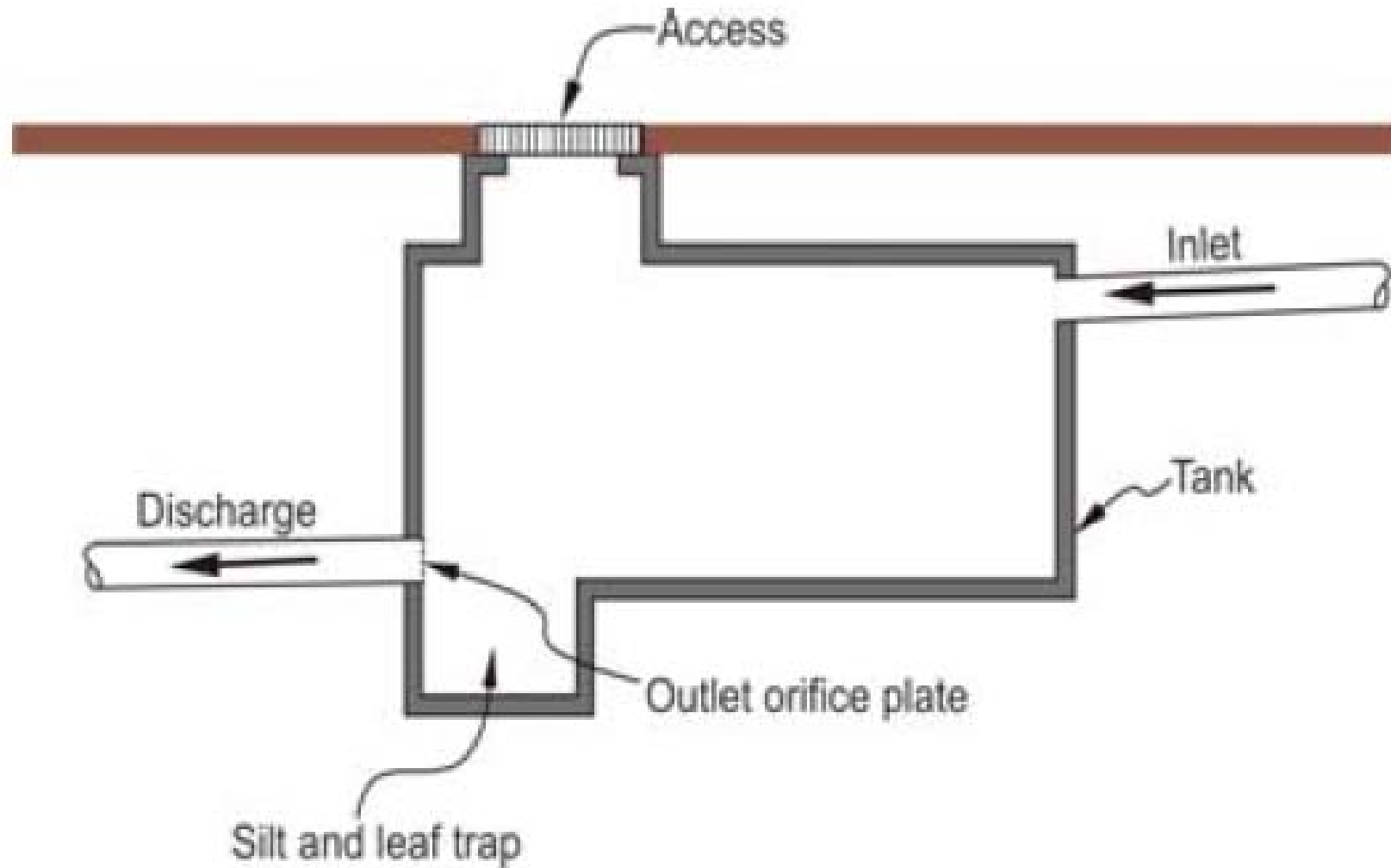
(«HARD ENGINEERING»)

(«SOFT ENGINEERING»)

## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI DETENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE



## INVASI DI RITENZIONE A SCALA LOCALE

Invaso a cielo aperto con laghetto permanente



Regione Lombardia (2019) «Testo coordinato del regolamento regionale 23 novembre 2017, n. 7», Bollettino Ufficiale, Serie Ordinaria, 19 dicembre 2019.

Becciu G., Paoletti A. (2010) «Fondamenti di Costruzioni Idrauliche», UTET, Torino.

Artina S., Calenda G., Calomino F., Cao C., La Loggia G., Ciaponi C., Modica C., Paoletti A., Papiri S., Rasulo G., Veltri P. (a cura di) (1997) «Sistemi di Fognatura - Manuale di Progettazione», CSDU - Hoepli, Milano.

Ciaponi C., Papiri S., Sanfilippo U., Todeschini S. (a cura di) (2014) «Acque di Prima Pioggia nei Sistemi di Fognatura - Manuale di Progettazione», CSDU - Hoepli, Milano.

Public Utilities Board (PUB), Singapore's National Water Agency (2019) «On-site Stormwater Detention Tank Systems - Technical Guide», Singapore.

Sharma A.K., Gardner T., Begbie D. (editors) (2019), «Approaches to Water Sensitive Urban Design», Elsevier.

Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. (2015) «The SUDS Manual», CIRIA, London, UK.

NZWERF (2004) «On-site stormwater management guideline», New Zealand Water Environment Research Foundation. Wellington, New Zealand.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

[umberto.sanfilippo@polimi.it](mailto:umberto.sanfilippo@polimi.it)