

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CIVILE E INDUSTRIALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Ordine degli Ingegneri
della Provincia
di Roma



Convegno:

Ricerca e Innovazione per lo sviluppo di opere di ingegneria in sotterraneo

Roma, 29 febbraio 2024 - Aula del Chiostro - San Pietro in Vincoli - Via Eudossiana 18, Roma



Ing. F. Maltese

Ing. A. Magliocchetti

TECNE - Società del Gruppo Autostrade per l'Italia



*Scavi Sotterranei in contesti complessi: Strategie per la definizione
dei KPI e del Circuito Slurry nelle TBMs Hydroshield*

Nuovi Progetti chiave ASPI – TBM tipo Hydroshield – $D_{max}=16m$



Caratteristiche generali sfruttate per esigenze progettuali

- **Elevate contropressioni al fronte, fino 16bar (asse tunnel)** anche in terreni a grana grossa/faglie
- **Risposta prestazionale (pressioni) repentina** alla possibile variazione delle condizioni geomeccaniche (bolla di aria compressa $\pm 0.1bar$)
- **Interventi iperbarici** in saturazione ($p > 5bar$) in sicurezza, massimizzando i tempi di lavoro in camera e minimizzando quelli di decompressione.
- **Compartimentazione delle aree critiche** per mitigare il rischio legato alla presenza di gas e di amianto e consentire la gestione dello smarino con amianto (trattamento fanghi)
- **Flessibilità modalità avanzamento:** event. modalità semiaperta (splash mode) per scenari di ammassi competenti con scarse venute d'acqua, con possibile repentino ritorno in pressione a camera piena

Ulteriori innovazioni specifiche studiate per esigenze progettuali: aumento sicurezza/ minimizzazione tempi

- **Sovra-scavi radiali eccezionali (fino a 12cm)** – utilizzo di cutters periferici, sostituibili in condizioni normobariche per sovra-scavi standard
- **Testa di scavo con carpenteria completamente accessibile** e cutters sostituibili in condizioni di pressione atmosferica (normobarica)
- **Camera di scavo parzializzata per ospitare la precamera di decontaminazione** al fine di garantire elevate prestazioni di sicurezza nei confronti dell'amianto, adatta alla pressione massima di progetto (fino a 16bar)
- **Scudo di lunghezza minimizzata e ad elevata conicità.** Robustezza maggiorata dello scudo di coda per evitare effetti di ovalizzazione.
- **Sistema di avanzamento e spinta che garantisce una spinta eccezionale elevata (>500 MN)**



Nuovi Progetti chiave ASPI - Tunnel Subportuale di Genova

Tracciato del Tunnel pari a circa 3.4 km – Dal nodo di San Benigno (ponente), fino a V.le Brigate Partigiane nel quartiere Foce (levante) passando al di sotto del bacino portuale con una copertura di terreno sciolto di circa 15m ed un'altezza marina di 17m. Il Tunnel sarà costituito da **due canne principali** realizzate in **scavo meccanizzato**, mediante fresa TBM scudata a contropressione al fronte, **tipo Hydroshield**. I terreni scavati saranno principalmente costituiti dai **Calcari del Monte Antola** e da **terreni sciolti (sabbie limose e limi argillosi)**. Ulteriore nota che i **bypass sottomarini** saranno scavati con la tecnica del congelamento del terreno.

Alcuni dati:

- $D_{\text{SCAVO}} = 16\text{m}$
- Pressioni di scavo 5 – 6 bar
- Spinta massima $\approx 200\text{ MN}$
- Coppia massima $\approx 30\text{-}40\text{ MNm}$
- Avanzamento max 40mm/min
- Diametro interno 14.3 m^2 (160m^2)
- Careggiata a 2 corsie + emergenza



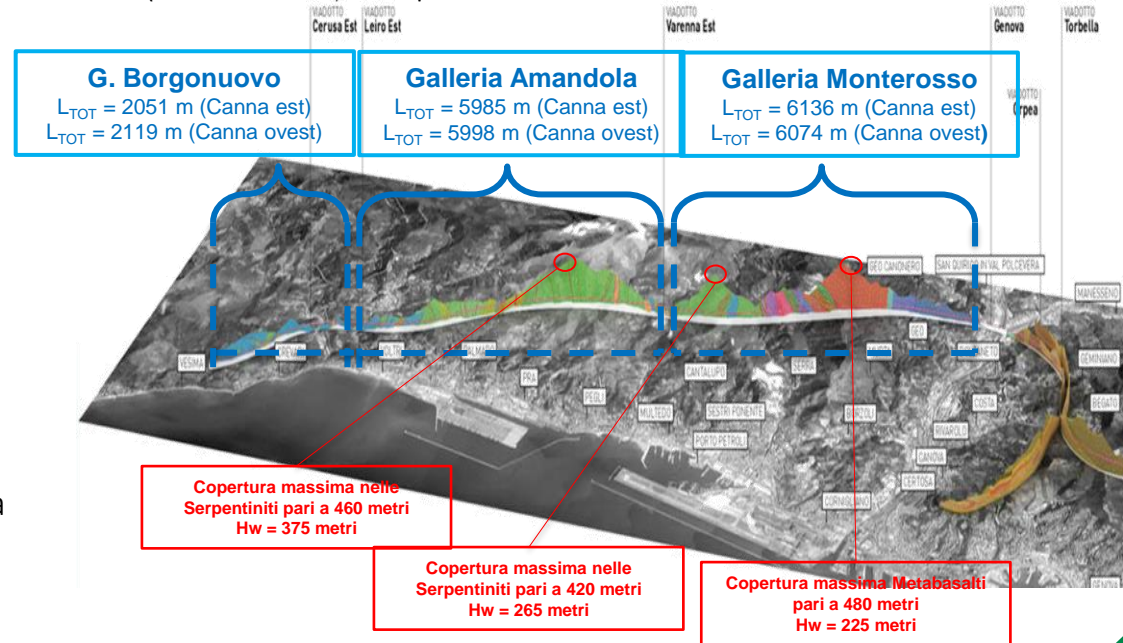
Nuovi Progetti chiave ASPI Gronda di Genova

Tratti in scavo meccanizzato

3 gallerie a doppia canna di sviluppo pari a circa 14 km circa per canna – Le gallerie saranno scavate in formazioni quali metabasalti, serpentiniti, argilloscisti e calcescisti. Saranno costituite da due fornici realizzati in **scavo meccanizzato**, mediante fresa TBM scudata a contropressione al fronte, **tipo Hydroshield** in svariate tipologie di ammassi spingenti con elevati battenti idraulici (fino a 375m) e coperture molto elevate.

Alcuni dati:

- $D_{SCAVO} = 14.7\text{m}$
- Pressioni di scavo 16 bar
- Spinta massima $\approx 550\text{ MN}$
- Coppia massima $\approx 55\text{ MNm}$
- Avanzamento max 40mm/min
- Diametro interno $12.6/12.8\text{ mq}$ ($124\text{-}128\text{mq}$)
- Careggiata a 2 corsie + emergenza

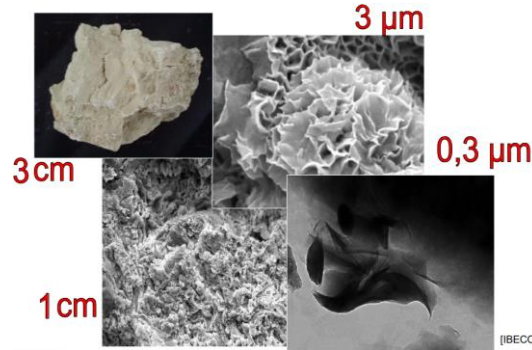


KPI – Fango bentonitico / slurry

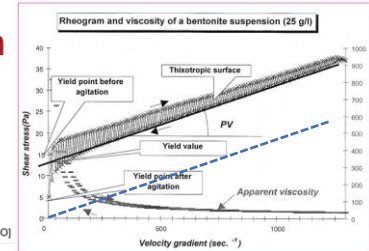
Il fango bentonitico detto slurry è una miscela di acqua e bentonite (Fort Benton Wyoming) dalle caratteristiche tixotropiche (fluido non newtoniano)

Proprietà reologiche principali:

- Yield Point/Robustezza - τ fronte / trasporto materiale → Capacità di supporto al fronte / trasporto materiale
- Viscosità apparente - AV fronte / trasporto materiale → Capacità di supporto al fronte / trasporto materiale
- Viscosità plastica – PV materiale → Trasporto del materiale

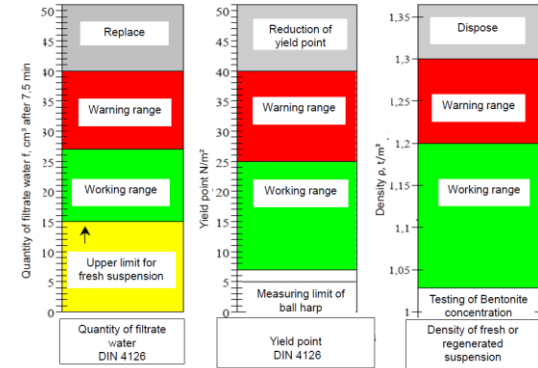


Newton $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$
 Bingham $\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$
 Herschel - Bulkly $\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}^n$



Proprietà fisiche principali:

- Quantity of filtrate water → Stabilità della sospensione
- Densità - γ → Gradiente di pressione e trasporto
- pH → Impacchettamento particelle di argilla



Parameters	Unit	SOLS TYPES			
		Type 1 K$1 \cdot 10^{-10}$ m/s permeable (alluvium ETC.)	Type 2 10<math>< K < 10^{-10}</math> m/s semi-permeable (sandy soils, etc.)	Type 3 K<math>< 1 \cdot 10^{-10}</math> m/s impermeable neutral (chalk, etc.)	Type 4 K<math>< 1 \cdot 10^{-10}</math> m/s impermeable reactive (clay, etc.)
AV	cp	15-40	10-20		8-20
PV	cp	5-20	5-10		5-10
YP	Pa	8-5	5-10		<math>< 15</math>
O/10 gel strengths	lbs/100ft	10-30	3-20		Not applicable
Filtrate	ml	20-50	15-30		Not applicable
Cake (API test)	mm	2-6	1-5		1-5
Marsh viscosity	s/946 ml	40-120	35-50		30-50
Density		1.02-1.15	1.02-1.20		1.02 1.60 1.02-1.30
pH		7-10	7-10		7-10
Sand	%	1-5	1-5		1-5

standardized test methods *Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids API RP 13 B-1, 1 June 90

Riferimenti internazionali:

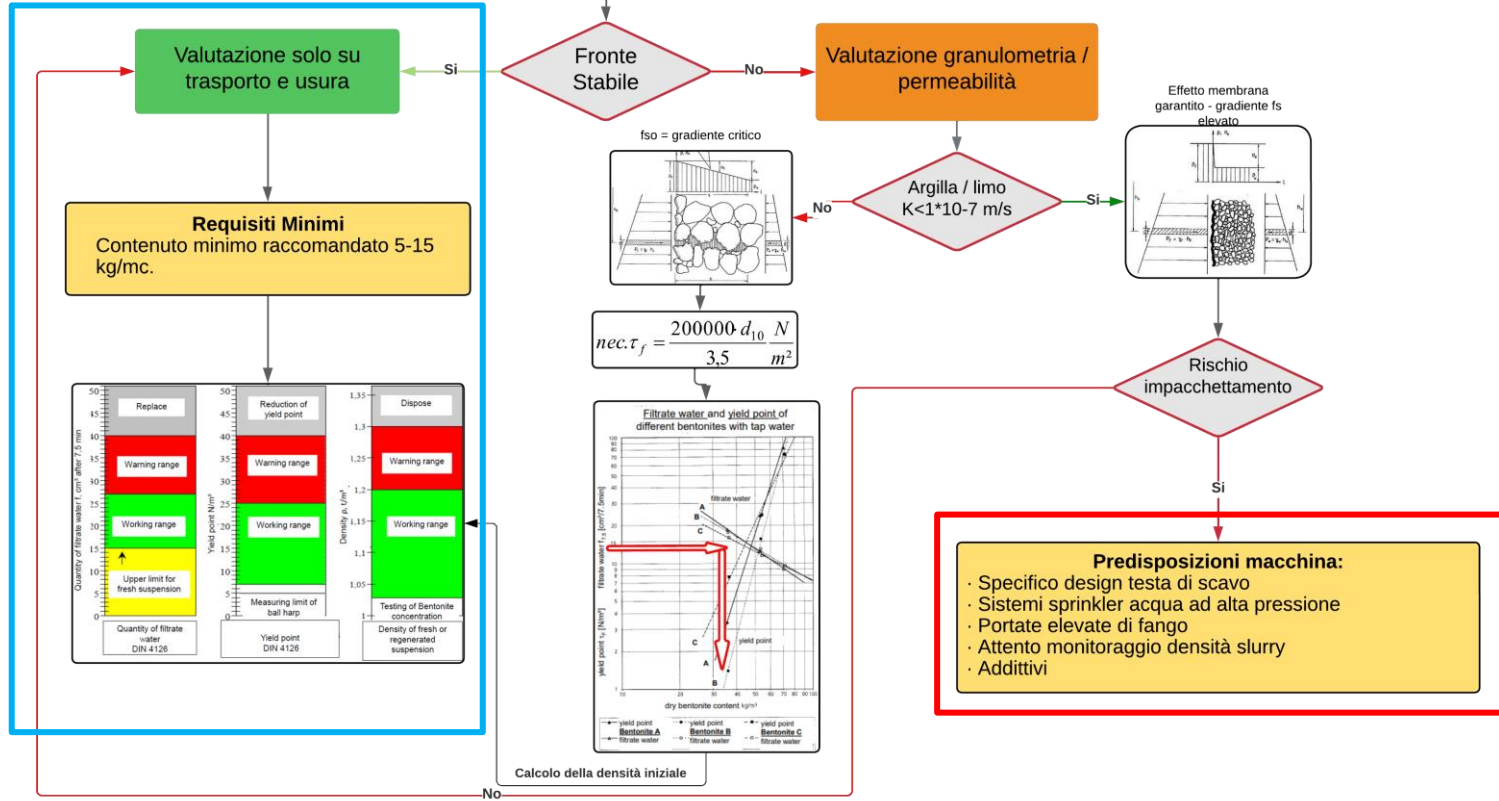
- AFTES GT4RA1
- EN ISO 13500
- EFNARC Spec. specialist product for TBM
- DIN 4126

Ing. F. Maltese, Ing. A. Magliocchetti - Scavi Sotterranei in contesti complessi: Strategie per la definizione dei KPI e del Circuito Slurry nelle TBMs Hydroschild



Predimensionamento – KPI Slurry

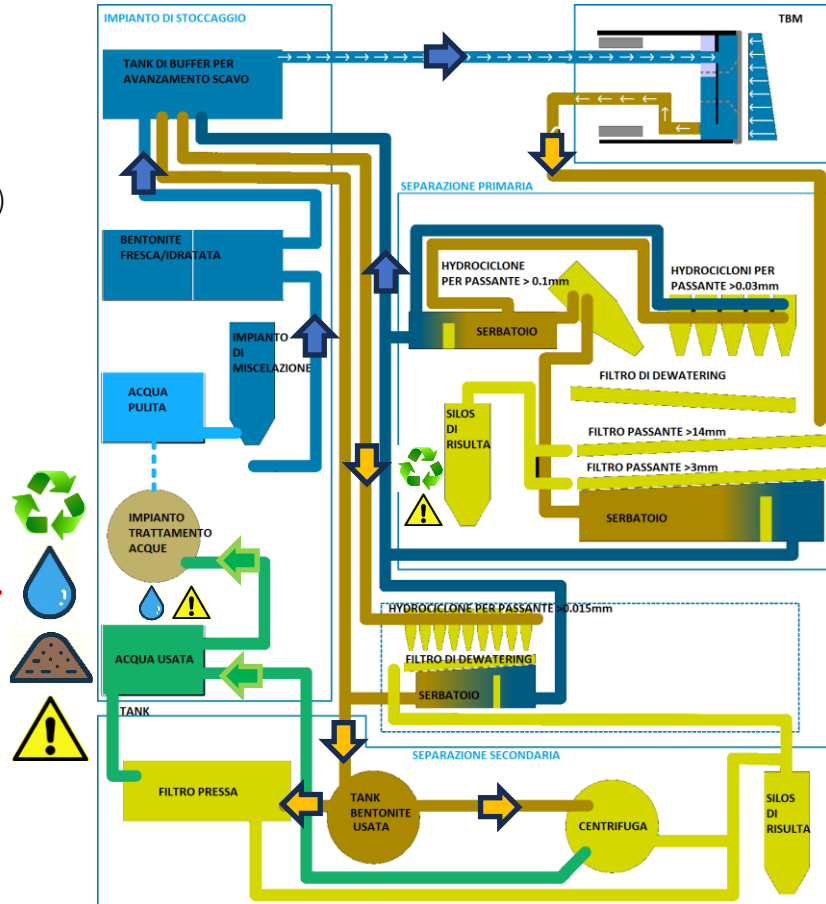
Valutazioni preliminari sulle condizioni dello scavo



Circuito slurry – Alimentazione, smarino e trattamento del fango

Il circuito slurry è formato dai seguenti sistemi principali:

- Serbatoi acqua pulita;
- Impianto di **miscelazione** (fase 1 e 2 Sospensione e dispersione)
- Serbatoi/tank per **idratazione fango** (fase 3 – swelling time)
- Linea di mandata o **feed line** – tubazioni e pompe;
- Linea di ritorno/smarino o **slurry line** – tubazioni e pompe;
- Impianto di **separazione primaria** formato a sua volta da:
 - Vagli
 - Diversi livelli di hydrocicloni
- Serbatoi **slurry esausto**;
- Impianto di **separazione secondaria** formato a sua volta da:
 - Filtropressa o Centrifuga o entrambi
- Serbatoi **acqua di risulta**;
- Impianto di trattamento acqua



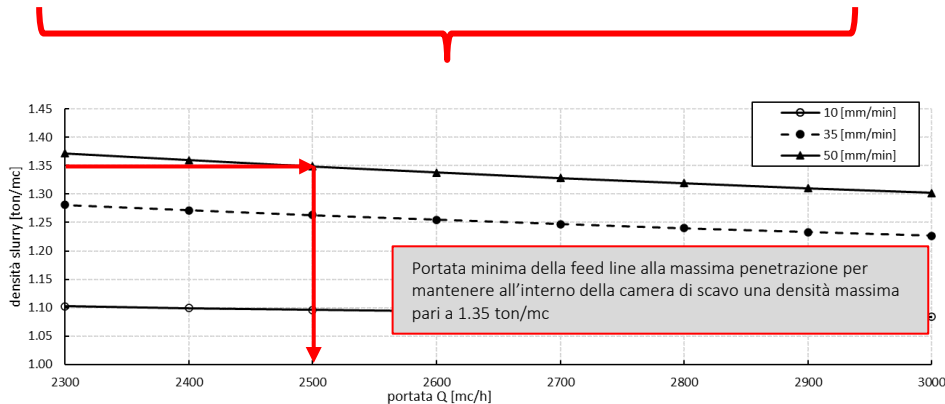
Dimensionamento linee di alimentazione e pompe

Dati di Input per il dimensionamento e la verifica dell'impianto:

- Densità operativa feed line e critica slurry line (1.02 - 1.35 ton/mc)
- Diametro condotta phi 600 per la feed line
- Diametro condotta phi 500 per la slurry line
- Massima velocità di avanzamento massima per esempio 40 mm/min (2.4m/h)
- Diametro di scavo D

Dati di Output :

- Velocità critica feed line > 2.3 m/s
- Velocità critica slurry line > 3.4 m/s
- Portata feed line = 2500 mc/h → $v = 2.45$ m/s
- Portata slurry line = 2800 mc/h → $v = 3.96$ m/s

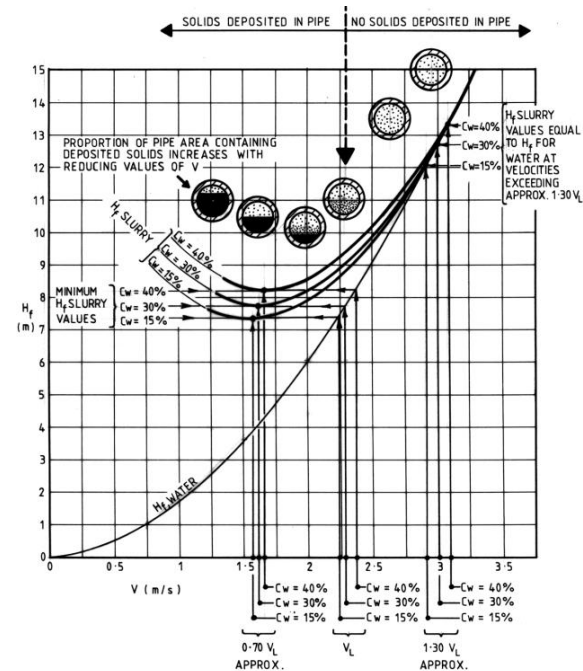


Portata minima della feed line alla massima penetrazione per mantenere all'interno della camera di scavo una densità massima pari a 1.35 ton/mc

NB:

La velocità critica è la minima alla quale deve operare l'impianto per evitare fenomeni di sedimentazione della frazione solida all'interno dell'impianto.

L'impianto è dimensionato in modo da garantire il raggiungimento di valori di produzione di picco ipotizzabili sulla base della produzione di picco giornaliera di scavi in contesti simili.



Dimensionamento linee di alimentazione e pompe

Definita la portata di ciascuna condotta in relazione al diametro e alla velocità del flusso è stata definita la perdita di carico di ciascuna linea al fine di dimensionare il numero minimo di pompe e la loro potenza

La perdita di carico è somma di 3 contributi:

$$\Delta H_{tot, \frac{feed}{slurry}} = \Delta H_{tubo, \frac{feed}{slurry}} + \Delta H_{fronte} + \Delta H_{geod}$$

dove:

$\Delta H_{tubo, \frac{feed}{slurry}}$ è la perdita per attrito all'interno del tubo;

ΔH_{fronte} è la perdita dovuto alla contropressione al fronte se presente;

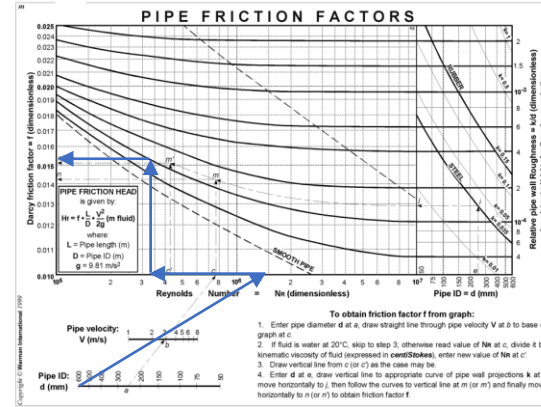
ΔH_{geod} è la perdita di carico geodetica funzione del tracciato e del cantiere

Il calcolo viene eseguito con metodi analitici (ing. idraulica) e/o abachi (Warmar – muck engineering) e porta a definite la perdita totale in metri di slurry. **A titolo di esempio** per 15 km di tracciato si è calcolato:

$$\Delta H_{tot, feed} = 402m \text{ di slurry}$$

$$\Delta H_{tot, slurry} = 606m \text{ di slurry}$$

Definita questa il **fornitore delle pompe** in base ai suoi grafici di prevalenza potrà definire il numero di pompe necessarie. Una stima usando un modello standard di pompa (tipo Warman 16/14) ha fornito un numero di pompe pari a 5 per la feed line (1000 kW) e 8 per la slurry line (1200 kW).

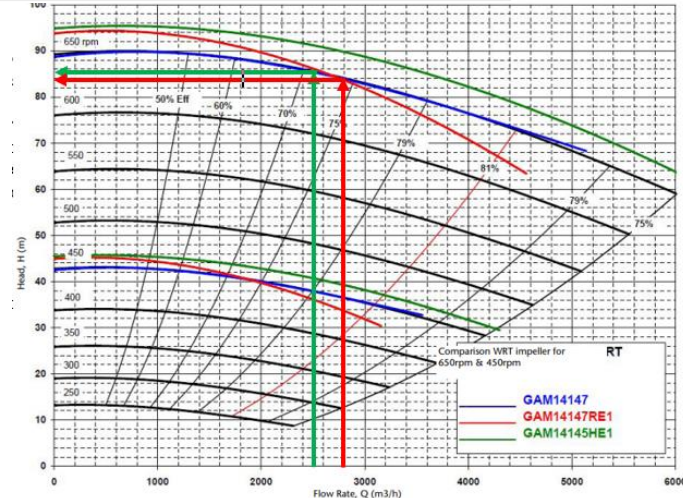


$$\Delta H_{tubo, feed} = \frac{\lambda_{feed} \cdot L_{pipe} \cdot v_{feed}^2}{d_{feed} \cdot 2g}$$

$$\lambda_{feed} = 0.309 / \left[\log \frac{Re}{7} \right]^2$$

$$Re = v_{feed} \cdot d_{feed} / \nu_{feed}$$

$$Potenza = \rho_{fangio} \cdot g \cdot \Delta H_{pompe} \cdot Q_{fangio} \cdot \frac{1}{\eta_p}$$



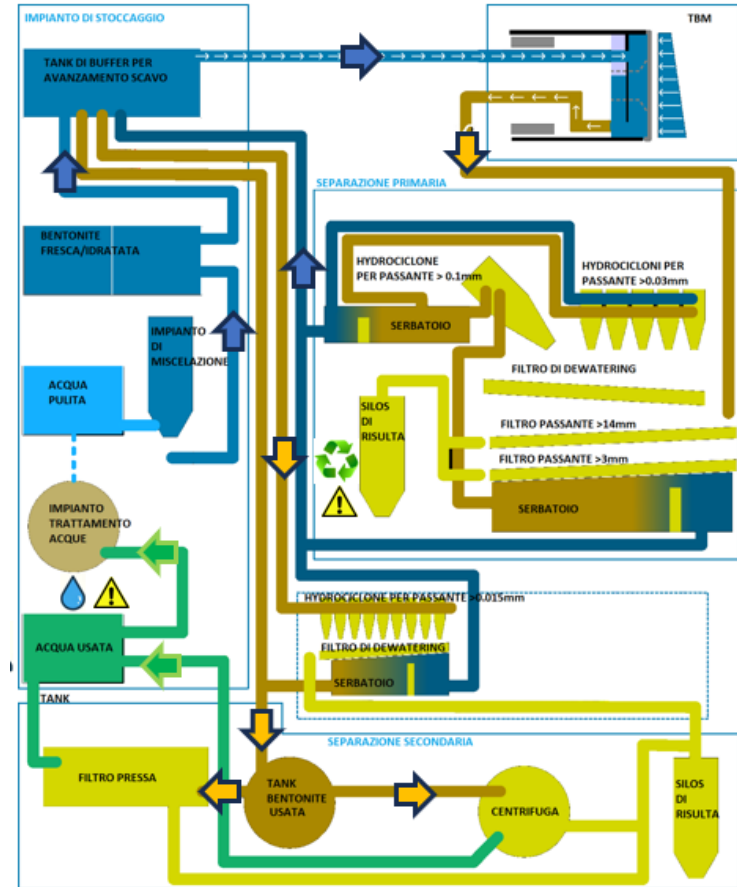
STP – Dimensionamento impianto di trattamento del fango

Dati di Input per il dimensionamento dell'Impianto:

- Densità operativa feed line e critica slurry line (1.02 - 1.35 ton/mc)
- **V_{max}** per ciascuna formazione per dimensionamento impianto di separazione primaria (30-40 mm/min)
- **V_{media}** per ciascuna formazione per dimensionamento impianto di separazione secondaria (10-14 mm/min)
- Ipotesi e/o curve **granulometriche** materiale in sito (per terreni) o in uscita dal circuito per rocce.
- Q circuito pari a circa **2600 mc/h**

Dati di Output :

- **Numero di moduli richiesti** per ciascun sistema (vaghi, hydrocicloni, etc).
A titolo di esempio si possono avere **3-4 unità da 1000 mc/h** per il **primario** e **1-2 unità da 50 / 80 mc/h** per il **secondario**.
- Volumi di materiale in uscita dai diversi impianti - **700 k mc**
- Volumi di acqua fresca e da trattare - **600 / 610 k mc**
- Volumi di bentonite consumata - **60/70 ton**
- Volumi di additivi (flocculanti consumati) – **1 / 2 kg per ton di materiale nell'impianto secondario**
- Volume di **materiale riciclato** e o da **conferire in discarica** – funzione del contenuto di inquinanti e degli usi (può essere rilevante)



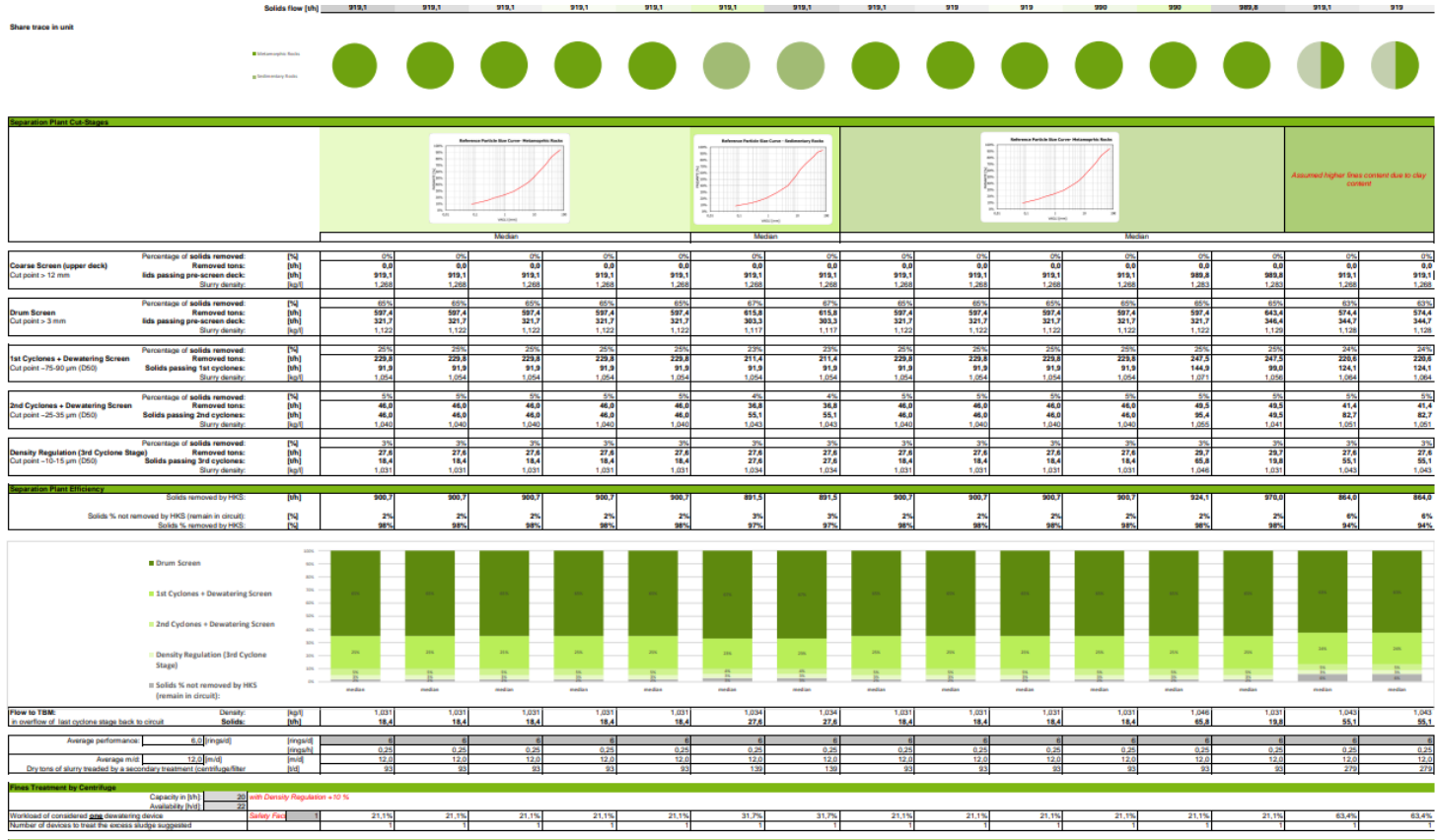
Circuito slurry – Alimentazione, smarino e trattamento del fango



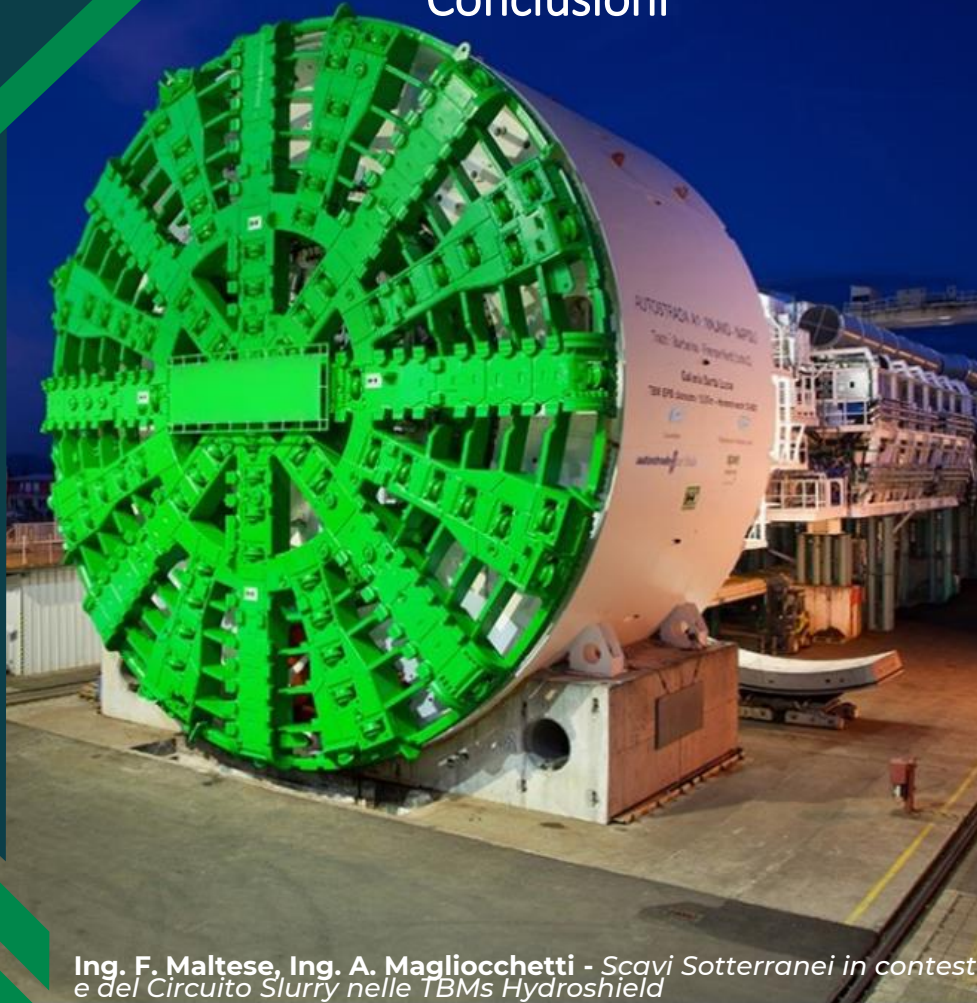
Da vagli a filtropressa



STP – Dimensionamento impianto di trattamento del fango



Conclusioni



Ing. F. Maltese, Ing. A. Magliocchetti - Scavi Sotterranei in contesti complessi: Strategie per la definizione dei KPI e del Circuito Slurry nelle TBMs Hydroshield

➤ Macchine TBM tipo Hydroshield:

- Scelta basata su un'analisi comparativa approfondita.
- Particolarmente adatte per lavorare in contesti con fronte misto, con amianto e/o rischio gas grazie al loro sistema chiuso certificabile ATEX.

➤ KPI e circuito slurry:

- Cruciale nella fase di progetto per l'impatto operativo.
- Valutazione delle dimensioni, moduli e requisiti di alimentazione e manutenzione/monitoraggio.
- Influenza degli ingombri in area di cantiere.
- Impatto ambientale, come il livello di rumore.

➤ Performance di scavo – Slurry - Cantiere:

- Importanza del *mass balance*, specialmente in contesti urbani o con limitazioni di spazio per lo smaltimento e stoccaggio dei materiali.
- La *performance* deve tenere conto dell'impianto di trattamento slurry, della capacità di stoccare materiale e della capacità di alimentare lo scavo.

