

# LA GESTIONE DEL CONDIZIONAMENTO DEL TERRENO NELLO SCAVO MECCANIZZATO DI UNA GALLERIA CON TBM-EPB: RISULTATI DI UNA ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Diego Sebastiani

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – Sapienza Università di Roma*

[diego.sebastiani@uniroma1.it](mailto:diego.sebastiani@uniroma1.it)

Anita Di Giulio

*Istituto di geologia ambientale e geoingegneria – Consiglio Nazionale delle Ricerche*

[addigiulio@gmail.com](mailto:addigiulio@gmail.com)

Salvatore Miliziano

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – Sapienza Università di Roma*

[salvatore.miliziano@uniroma1.it](mailto:salvatore.miliziano@uniroma1.it)

## Sommario

Nello scavo meccanizzato di gallerie realizzato mediante l'utilizzo di TBM-EPB il corretto condizionamento del terreno assume un ruolo spesso decisivo garantendo buone e costanti performance di scavo, la corretta applicazione della pressione al fronte necessaria a contenere i cedimenti in superficie e la riduzione della usura degli utensili di scavo o di adesione del terreno a grana fine (clogging). La scelta degli agenti condizionanti è quasi sempre effettuata sulla base di esperienze pregresse mentre il corretto dosaggio viene stabilito durante il primo tratto di scavo definito di "apprendimento"; in tale tratto, partendo da dati di letteratura, da classificazioni generali e raramente da risultati di sperimentazioni in laboratorio, si modificano le modalità di iniezione degli agenti condizionanti in base alle performance di scavo registrate in tempo reale.

In questa nota sono presentati i risultati di una attività sperimentale svolta su campioni di terreno a grana fine per verificare gli effetti della iniezione di differenti prodotti chimici nel terreno allo scopo di ridurre il rischio di adesione di porzioni di terreno agli utensili e alle altre parti metalliche della testa della TBM (effetto *clogging*).

L'uso sistematico di tali prove da parte di quanti coinvolti nella gestione delle TBM prima dell'inizio delle attività di scavo, potrebbe permettere di operare una scelta più accurata dei prodotti chimici da utilizzare e di ridurre sensibilmente la fase di apprendimento limitando tempi, costi e rischi. Le stesse prove di laboratorio sono utilmente eseguite insieme ai fornitori dei prodotti chimici al fine di sviluppare nuove formule più efficaci e maggiormente rispondenti alle specifiche necessità del cantiere.

## 1. Introduzione

Le TBM sono attualmente il modo più sicuro ed efficiente di eseguire lo scavo di una galleria, in particolar modo se inserita in contesti difficili per condizioni geotecniche o idrauliche, o per la delicata interazione della galleria con manufatti. Oggi, specialmente in ambiente urbano, l'uso delle TBM e della tecnologia *Earth Pressure Balance* (EPB) costituiscono scelte quasi obbligate per garantire i livelli di sicurezza e le performance di scavo richiesti.

La tecnologia EPB prevede la miscelazione del terreno scavato al fronte con alcuni additivi chimici sotto forma di schiuma, in grado di modificare la consistenza del terreno al fine di renderla utilizzabile per trasferire al fronte una pressione; tale pressione è necessaria a garantire la stabilità del fronte stesso e la limitazione dei cedimenti generati in superficie dalle operazioni di scavo. Effetti secondari ma comunque rilevanti nel caso di terreni a grana grossa sono la riduzione dell'usura e conseguentemente del consumo degli utensili di scavo della TBM mentre nei terreni a grana fine l'effetto richiesto è la riduzione della adesività del terreno e del conseguente rischio che porzioni di terreno a grana fine

rimangano attaccate agli utensili e alla testa di scavo della TBM aumentando sforzi, consumi e temperature fino, in casi più gravi, al blocco completo della testa come riportato in diversi studi condotti da Bezuijen *et al.* (2010) e da Thewes e Budach (2010).

Appare chiaro che l'andamento dello scavo di una galleria è strettamente connesso alla corretta gestione del condizionamento inteso come insieme di scelta dei prodotti adeguati e dei loro dosaggi e abilità di modificare le scelte iniziali in base alle variazioni delle condizioni di scavo.

Se l'abilità di modificare i parametri del condizionamento durante lo scavo rimane ancora una pratica estremamente legata all'esperienza degli operatori, da tempo si eseguono sperimentazioni per la scelta degli agenti condizionanti e del loro dosaggio (Bezuijen *et al.* (1999), Thewes *et al.* (1999), Milligan (2000), Mair *et al.* (2003), Langmaack e Feng (2005) ).

Nella presente nota sono mostrati i risultati di una sperimentazione eseguita per verificare l'efficacia di differenti prodotti chimici nel modificare le caratteristiche di differenti campioni di terreno a grana fine durante le operazioni di scavo meccanizzato di una galleria.

## 2. Il Condizionamento

Il laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica della Università di Roma *Sapienza* è stato attrezzato da diversi anni con una serie di apparecchiature per lo studio del condizionamento per lo scavo meccanizzato con tecnologia TBM-EPB. Tra le apparecchiature necessarie a tali studi ed utilizzate nell'ambito della sperimentazione qui descritta vi sono l'impianto di generazione della schiuma, avente le stesse caratteristiche dell'impianto installato sulle più moderne TBM, e le apparecchiature necessarie ad eseguire prove di miscelazione, *vane test*, *fall-cone test* e prove di pull-out su terreni a grana fine.

Poiché le caratteristiche della schiuma hanno una importanza decisiva nell'efficacia del condizionamento, è estremamente importante che la generazione della schiuma avvenga con sistemi analoghi a quelli utilizzati in cantiere.

## 3 - Descrizione e classificazione dei terreni e dei prodotti chimici impiegati

In Figura 1 sono riportate le caratteristiche dei campioni di terreno utilizzati per il presente studio. S1 è un limo argilloso con il 40% di argilla, S2 è un limo con 25% di argilla e il 30% di sabbia mentre S3 è una argilla limosa. S3 è classificato come una argilla ad alta plasticità mentre S1 e S2 sono campioni di terreno a bassa plasticità.

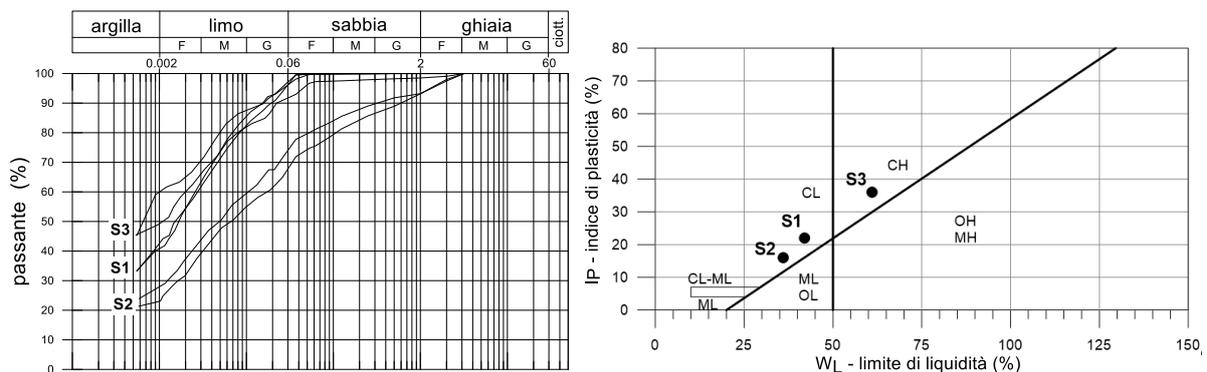


Figura 1 – Curva granulometrica e Indice di plasticità dei campioni utilizzati nella sperimentazione.

Per la sperimentazione descritta in questa nota sono stati utilizzati 3 differenti agenti condizionanti (FA1, FA2 e FA3) forniti da altrettanti produttori selezionati tra i più importanti a livello europeo e un polimero P1 utilizzato come ritentore d'acqua in aggiunta al prodotto FA3. Tutti i prodotti sono attualmente impiegati in diversi progetti di scavo meccanizzato di gallerie con TBM-EPB.

## 4 - Prove di laboratorio

### 4.1. Prova di miscelazione

Il miscelatore di tipo Hobart è spesso utilizzato per condizionare il terreno a grana fine con la schiuma. Tale strumento permette di condizionare efficacemente modesti volumi di terreno ottenendo comunque campioni omogenei. In genere è usato per trarre solamente valutazioni qualitative attraverso l'osservazione diretta del terreno condizionato, tuttavia Zumsteg *et al.* (2013) hanno invece proposto l'uso della prova di miscelazione per esprimere quantitativamente la tendenza del terreno condizionato ad aderire all'utensile metallico di miscelazione (Fig.2a) misurando il quantitativo di terreno rimasto sull'utensile ed esprimendolo mediante il parametro  $\lambda$ , definito rapporto di aderenza, definito come

$$\lambda = \frac{G_{MT}}{G_{TOT}} \cdot 100$$

dove  $G_{MT}$  è il peso del terreno rimasto incollato all'utensile e  $G_{TOT}$  è il peso complessivo di terreno introdotto nel mixer. Eseguendo la prova diverse volte sul terreno non condizionato a diversi valori del contenuto d'acqua e sul terreno condizionato è possibile apprezzare la riduzione del parametro  $\lambda$  dovuta al condizionamento.

### 4.2. Fall cone test

Il *fall cone test* fornisce una misura speditiva e accurata della resistenza al taglio non drenata per terreno a grana fine. Si tratta di un'apparecchiatura (Fig.2b) che consente di far cadere una serie di utensili di forma conica, di dimensioni e forme standard, all'interno di un campione di terreno appositamente disposto all'interno di un recipiente. Le relazioni tra l'affondamento dei diversi coni, la resistenza al taglio non drenata ed alcune proprietà indice del terreno sono state determinate mediante specifiche sperimentazioni tra gli altri da Hansbo (1957).

### 4.3. Prova scissometrica

La prova scissometrica, o *vane test*, è una prova comunemente eseguita sia in sito che in laboratorio; la prova consiste nel misurare la resistenza alla rotazione di un utensile provvisto di 4 palette disposte perpendicolarmente tra loro inserito all'interno del terreno. Anche questo test è stato oggetto di approfonditi studi; la sua apparecchiatura (Fig.2c) e le modalità di esecuzione di tale test è sono descritti nel documento dell'ASTM D4648.



Figura 2 – Apparecchiature utilizzate per la prova di miscelazione (a), fall cone (b) e scissometrica (c).

## 5 – Risultati prove di laboratorio

Le prove di laboratorio eseguite su campioni appena miscelati ai prodotti chimici hanno in generale evidenziato la dipendenza dell'effetto del condizionamento dalle caratteristiche del campione di terreno, dalle caratteristiche del prodotto utilizzato e dal loro dosaggio.

Valutazioni preliminari hanno mostrato che, per i dosaggi abitualmente utilizzati, non si riscontrano apprezzabili variazioni sia nel limite liquido che nel limite plastico in tutti e tre i campioni di terreno studiati. Viceversa l'aggiunta di polimero P1 produce un aumento del limite liquido pari a circa il 30% lasciando invariato il limite plastico.

In figura 3 sono mostrati, per i terreni S1 e S2, i risultati delle prove di *fall cone* e delle prove scissometriche eseguite sui campioni di terreno naturali e successivamente su quelli condizionati con differenti prodotti e differenti dosaggi. I valori di  $c_u$  ottenuti dalle due differenti prove risultano in buon accordo e in generale quelli relativi a campioni di terreno non condizionati sono perfettamente inseriti all'interno del campo di risultati proposto da Mitchell (1976). Per quanto riguarda S1 gli effetti sono poco marcati e tutti i valori di  $c_u$  rimangono all'interno del campo mostrando che il trattamento chimico in questo caso non produce effetti significativi.

Nel caso del campione S2, viceversa, il condizionamento del terreno fornisce in generale una apprezzabile riduzione di  $c_u$ , particolarmente marcata per FA2, spesso al di fuori del campo di variabilità relativo ai terreni naturali; l'aggiunta del polimero P1 porta a valori di  $c_u$  oltre il limite superiore del range relativo ai terreni naturali per campioni di terreno con elevato  $I_L$ .

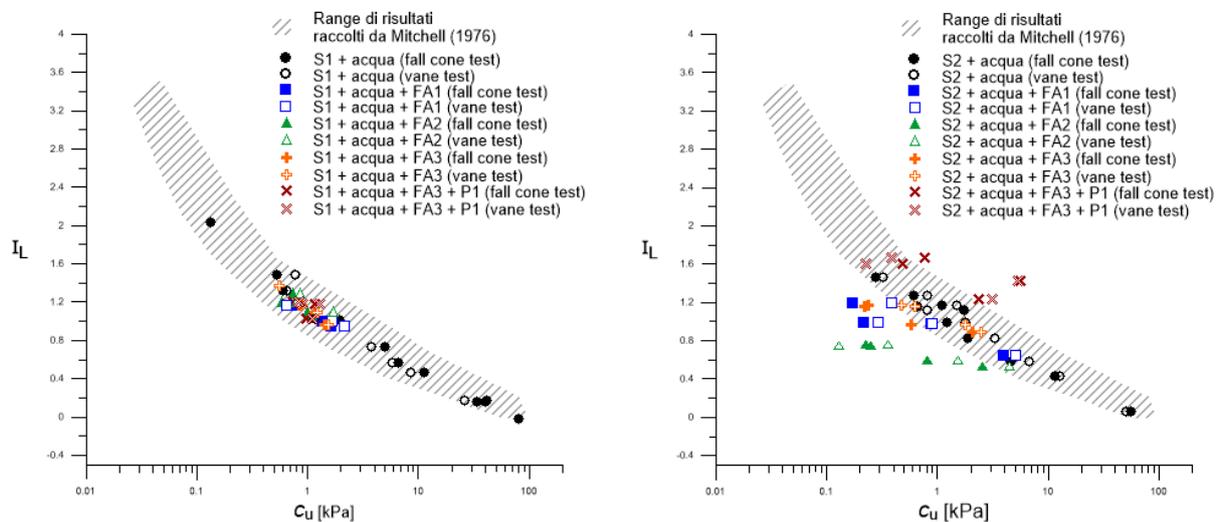


Figure 3. Risultati del *vane test* e del *fall cone test* per i campioni di terreno S1 e S2.

In figura 4 sono riportati i risultati delle prove di miscelazione eseguite su campioni di terreno naturale e condizionato e i relativi campi di rischio *clogging* come proposto da Thewes (1999).

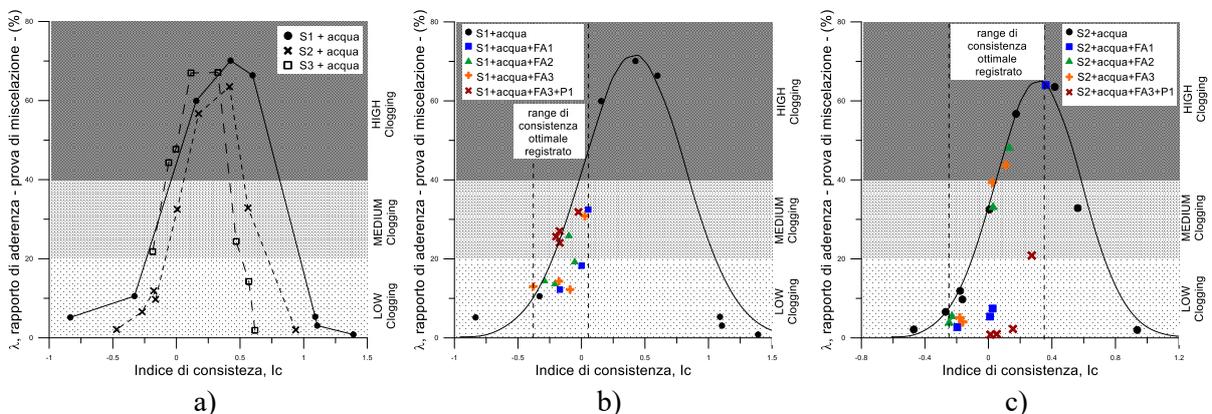


Figura 4. Relazioni tra l'Indice di consistenza  $I_c$  e il rapporto di aderenza  $\lambda$  per i campioni di terreno testati.

Dai grafici si nota come per S1 la riduzione di  $\lambda$  attribuibile agli agenti condizionanti sia decisamente meno marcata rispetto al caso di S2. Allo stesso modo l'effetto del polimero P1, mentre in S2 produce

una significativa riduzione di  $\lambda$ , in S1 risulta essere sostanzialmente inefficace suggerendo il fatto che, a causa delle caratteristiche del terreno, per tale campione di terreno sia estremamente più difficile ottenere una riduzione della aderenza.

Per il terreno S1 tutti gli agenti condizionanti si sono dimostrati moderatamente efficaci ad eccezione della combinazione FA3+P1; per S2 si è dimostrato particolarmente efficace l'uso di FA2 e della combinazione di FA3+P1 mentre FA1 e FA3 non hanno prodotto significative modifiche rispetto a quanto osservato nel campione di terreno non condizionato.

Per verificare l'eventuale variazione delle caratteristiche meccaniche dei campioni di terreno a distanza di settimane dal condizionamento sono state eseguite prove triassiali, di taglio ed edometriche su campioni di terreno condizionato, lasciati asciugare all'aria a temperatura costante e ricostituiti mediante Proctor test.

Il confronto tra i risultati ottenuti su campioni di terreno condizionati e campioni privi di alcun additivo chimico hanno mostrato che:

- a distanza di 1-2 settimane dal condizionamento non si osservano effetti significativi sulla resistenza del terreno attribuibili alla presenza di additivo chimico;
- non sono visibili variazioni significative della compressibilità del terreno condizionato con FA3; l'aggiunta del polimero P1 comporta un aumento di entrambi i parametri  $C_c$  e  $C_s$  coerente con l'aumento del limite liquido registrato nello stesso campione di terreno con l'aggiunta di P1.

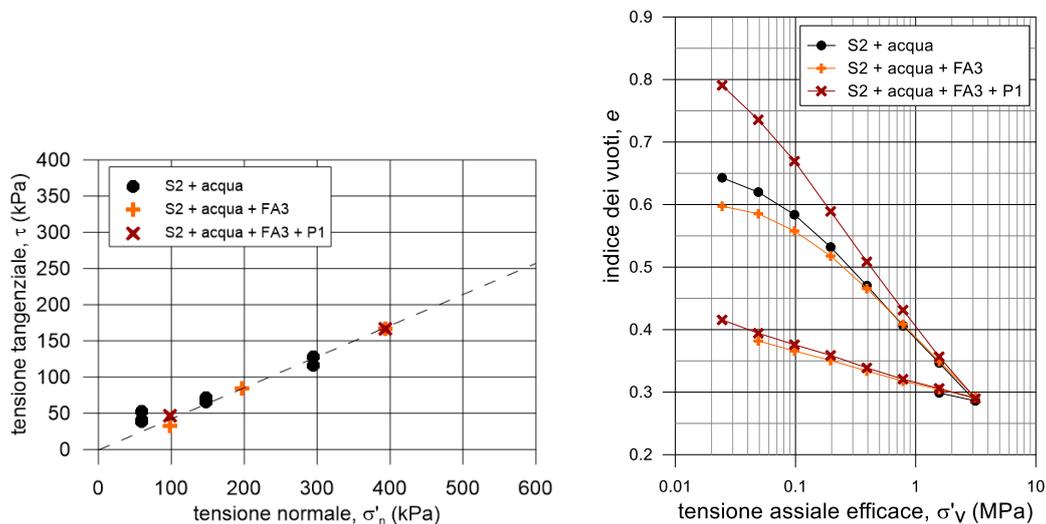


Figura 5. Risultati di prove di taglio diretto e di prove edometriche.

## 6 – Conclusioni e futuri sviluppi

Il condizionamento del terreno, se eseguito correttamente, garantisce una serie di effetti benefici per la buona esecuzione dello scavo. Nei terreni a grana fine i principali effetti sono il raggiungimento della consistenza necessaria ad applicare al fronte una corretta pressione e la riduzione della naturale tendenza del terreno ad aderire agli utensili di scavo e alle parti meccaniche della carpenteria riducendo conseguentemente il rischio del fenomeno definito clogging.

Per verificare l'efficacia di differenti prodotti commerciali utilizzati nello scavo di gallerie sono state eseguite prove di laboratorio su differenti campioni di terreno non condizionati e ripetuti sugli stessi campioni condizionati; tali prove sono in grado di evidenziare gli effetti dell'iniezione dei prodotti chimici nel terreno in termini di variazione di consistenza e della tendenza ad aderire a superfici metalliche.

È stato verificato anche l'effetto del condizionamento a distanza di diversi giorni sulle caratteristiche meccaniche del terreno per mezzo di prove triassiali, di taglio ed edometriche su campioni di terreno

condizionato, lasciati asciugare e successivamente ricostituiti.

È il corso l'esecuzione di prove di laboratorio di *pull-out*, proposto da Feinendegen et al. (2010) e di prove di taglio al contatto tra acciaio e terreno sugli stessi campioni di terreno allo scopo di indagare meglio l'effetto degli agenti chimici e poter eseguire ulteriori confronti con i dati già acquisiti.

Sarà necessario approfondire lo studio dell'interazione chimico/fisica tra terreno e agenti condizionanti concentrandosi su alcuni parametri che potrebbero giocare un ruolo chiave rispetto alla adesività dei terreni a grana fine quali la composizione mineralogica e la specifica composizione dei prodotti utilizzati.

Sarà infine importante studiare l'effetto della dimensione delle porzioni di terreno rimosse dal fronte dagli utensili di scavo modificando le modalità di preparazione del campione di terreno.

## **Bibliografia**

- Airò Farulla, C., Rosone, M. (2011) Resistenza a taglio di un'argilla compattata non satura. In *Incontro Annuale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica (IARG)*, Torino 2011
- Bezuijen, A., Schaminee, P. E. L., & Kleinjan, J. A. (1999). Additive testing for earth pressure balance shields. In *Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Proceedings)* (No. Volume 3).
- Feinendegen, M., Ziegler, M., Spagnoli, G., Fernández-Steeger, T., Stanjek, H. (2010). A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, 429-432.
- Hansbo, S. 1957. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Royal Swedish Geotechnical Institute.
- Hollmann, F. S., & Thewes, M. (2013). Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 96-106.
- Langmaack, L., & Feng, Q. (2005). Soil conditioning for EPB machines: balance of functional and ecological properties. In *ITA-AITES world tunnel congress (WTC)*, Istanbul, Turkey (pp. 729-735).
- Leroueil, S., Hight, D. W. (2013) Compacted soils: From physics to hydraulic and mechanical behavior. *Advances in Unsaturated Soils – Caicedo et al. (eds)*, London: Taylor & Francis Group.
- Mair, R., Merritt, A., Borghi, X., Yamazaki, H., & Minami, T. (2003). Soil conditioning for clay soils. *T & T international*, 35(4), 29-33.
- Milligan, G. (2000). Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipe jacking and microtunnelling: A state-of-the-art review. Geotechnical Consulting Group, London, UK.
- Mitchell, J.K. (1976). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York, NY, 422 pp.
- Spagnoli, G., Feinendegen, M., & Rubinos, D. (2013). Modification of clay adhesion to improve tunnelling excavation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 166(1), 21-31.
- Thewes, M (1999) Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden (Adhesion of Clays During Tunnelling with Slurry Shields). Dissertation, vol. 21, *Berichte aus Bodenmechanik und Grundbau der Bergischen University Wuppertal, Department of Civil Engineering*.
- Thewes, M., Budach, C. (2010). Soil conditioning with foam during EPB tunnelling/. *Konditionierung von Lockergesteinen bei Erddruckschilden. Geomechanics and Tunnelling*, 3(3), 256-267.
- Thewes, M., & Budach, C. (2011). Soil Conditioning for EPB Shields: New Results from Research on Foams and Soil-Foam-Mixtures. In *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress in Helsinki*.
- Thewes, M., Burger, W. (2004). Clogging risks for TBM drives in clay. *Tunnels & Tunnelling International*, 36(6), 28-31.
- Zumsteg, R., Plötze, M., & Puzrin, A. (2013). Reduction of the clogging potential of clays: new chemical applications and novel quantification approaches. *Géotechnique*, 63(4), 276.
- Zumsteg, R., Plötze, M., & Puzrin, A. (2013). Effects of dispersing foams and polymers on the mechanical behaviour of clay pastes. *Géotechnique*, 63(11), 920.