

REALIZZAZIONE DI UN DIAFRAMMA IMPERMEABILE LUNGO L'ARGINE SINISTRO DELLA FOSSA GRANDE (A.45)

La presente relazione descrive in dettaglio le modalità operative e le prove eseguite in sito e in laboratorio, dal laboratorio *Tecnoverifiche Srl*, per il controllo in corso d'opera, finalizzato alla realizzazione di un setto impermeabile costituito da una miscela semi-fluida di terreno, acqua e cemento. L'opera ha lo scopo di impermeabilizzare l'argine sinistro della Fossa Grande (A.45), situata nel comune di Ora (BZ). Di seguito sono descritte passo dopo passo le diverse fasi che hanno portato alla realizzazione di questo intervento.

ESECUZIONE DI SONDAGGI GEOGNOSTICI

Nel mese di settembre 2024 sono state condotte indagini geognostiche preliminari che hanno incluso sondaggi a carotaggio continuo, con il prelievo di campioni geotecnici lungo l'argine oggetto di stabilizzazione. Sono stati effettuati 4 sondaggi, ciascuno spinto fino a una profondità di 9,0 metri dal piano campagna



Fig. 1: estratto ortofotografico delle aree d'intervento raffiguranti la localizzazione dei punti d'indagine

Inoltre durante la fase di perforazione, sono state eseguite:

- prove di permeabilità Lefranc a carico variabile con il fine di valutare la permeabilità in sito del terreno a diverse profondità;
- prove di penetrazione standard di tipo SPT con lo scopo di valutare i parametri di resistenza del terreno.
- Prelievi di campioni indisturbati, uno per ogni sondaggio, con il fine di determinare in laboratorio le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni, mantenendo la struttura, il contenuto d'acqua e la consistenza propria dei terreni stessi nella loro naturale sede.

ESECUZIONE DI PROVE IN LABORATORIO SU CAMPIONI INDISTURBATI

In laboratorio sono state eseguite, sui campioni indisturbati prelevati in sito, tutte quelle prove necessarie per determinare le proprietà fisiche e meccaniche del terreno costituente l'argine e per la caratterizzazione del piano di posa del futuro diaframma. Nella tabella sottostante, vengono elencati i campioni prelevati con le rispettive quote e prove geotecniche svolte.

ID SONDAGGIO	QUOTA DI PRELIEVO	PROVE ESEGUITE
S1	5,0-5,5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometria completa • Limiti di Atterberg • Determinazione della densità apparente • Prova di Taglio CD • Prova di permeabilità in cella triassiale • Determinazione massa volumica dei grani solidi • Prova edometrica ad incrementi di carico
S2	4,5-5,0 m	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometria completa • Limiti di Atterberg • Determinazione della densità apparente • Prova di Taglio CD • Prova di permeabilità in cella triassiale
S3	5,0-5,5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometria completa • Limiti di Atterberg • Determinazione della densità apparente • Prova di Taglio CD • Prova di permeabilità in cella triassiale • Determinazione massa volumica dei grani solidi • Prova edometrica ad incrementi di carico
S4	4,5-5,0 m	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometria completa • Limiti di Atterberg • Determinazione della densità apparente • Prova di Taglio CD • Prova di permeabilità in cella triassiale

Tab. 1: Elenco dei campioni indisturbati prelevati e delle prove geotecniche eseguite

Avendo come scopo principale l'impermeabilizzazione dell'argine, è stata posta particolare attenzione ai risultati delle prove di permeabilità.

PREQUALIFICA E MIX DESIGN

I sondaggi geognostici eseguiti durante la prima fase hanno avuto anche lo scopo di prelevare una quantità di materiale sufficiente per eseguire tutte le prove di prequalifica e i mix design. In particolare, è stato sottoposto a prova il terreno compreso tra i 2 e i 5 metri di profondità, che rappresenta anche lo spessore del futuro diaframma. Dopo aver eseguito tutte le indagini di prequalifica, basandosi sulle prove di permeabilità eseguite in sito e in laboratorio, sono stati definite le diverse miscele da eseguire con differenti contenuti di acqua e cemento come segue:

- 10% cemento + 4,5 litri di acqua + 20 kg di terreno;
- 13% cemento + 2% bentonite + 5 litri di acqua + 20 kg di terreno;
- 15% cemento + 5 litri di acqua + 20 kg di terreno.

Le miscele sono state eseguite come segue:

1. Preparazione delle quantità stabilite di terreno, acqua, cemento ed eventualmente bentonite;



Fig. 2: Preparazione delle quantità stabilite di terreno, acqua, cemento ed eventuale bentonite

2. Aggiunta del materiale in betoniera e prima miscelazione;



Fig. 3: Aggiunta del materiale in betoniera

3. Aggiunta dell'acqua e miscelazione;



Fig.4: Aggiunta dell'acqua e miscelazione

4. La miscela risultante è stata trasferita in tubi, vibrati durante la fase di riempimento per diminuire la presenza di vuoti.



Fig. 5: Trasferimento della miscela risultante in tubi

I campioni ottenuti sono stati lasciati maturare in ambiente umido per 7 giorni e 28 giorni. Alla fine dei periodi di maturazione, sono stati ricavati dei provini da sottoporre a prove di compressione, per valutare la resistenza alla rottura, permeabilità e taglio diretto, per verificare la coesione e l'angolo d'attrito del materiale. In base agli esiti delle prove eseguite, è stata scelta la miscela contenente il 15% in peso di cemento.

VERIFICHE ESEGUITE IN CORSO D'OPERA

Per realizzare l'opera, in sito è stato utilizzato un escavatore con lama miscelatrice che è un macchinario specializzato utilizzato in diversi contesti di ingegneria civile, in particolare per il miglioramento o il consolidamento del terreno. Sul braccio dell'escavatore è montata la suddetta lama che è progettata per mescolare il terreno con leganti, in questo caso cemento, diluiti in acqua. Sostanzialmente, la lama penetra nel terreno e mescola il materiale in sito con la miscela costituita da acqua e cemento creando il diaframma in progetto. L'escavatore è dotato con un sistema GPS che permette all'operatore di sapere ad ogni momento la profondità della fresa e il volume di sospensione ad ogni metro lineare. Alla fine del cantiere viene dato una relazione in base di una grafica con tutti parametri rilevati, come profondità, volume sospensione, posizione georeferenziata del diaframma e pressione dell'idraulica della fresa.

Durante questa fase, è stato prelevato in sito il materiale appena miscelato ed è stato ubicato all'interno di tubi, portato in laboratorio e fatto maturare in ambiente umido per 28 giorni. Essendo la lunghezza dell'argine da stabilizzare di poco oltre i 400 metri lineari, sono stati effettuati in totale quattro campionamenti, uno ogni 100 metri. Una volta raggiunta la maturazione, sono stati ricavati i provini da sottoporre a prove di permeabilità, taglio diretto e compressione per verificare che la miscela corrispondesse a quella studiata in laboratorio durante la fase di prequalifica e mix design.



Figura 6: impianto di cantiere



Figura 7: escavatore con lama miscelatrice in cantiere

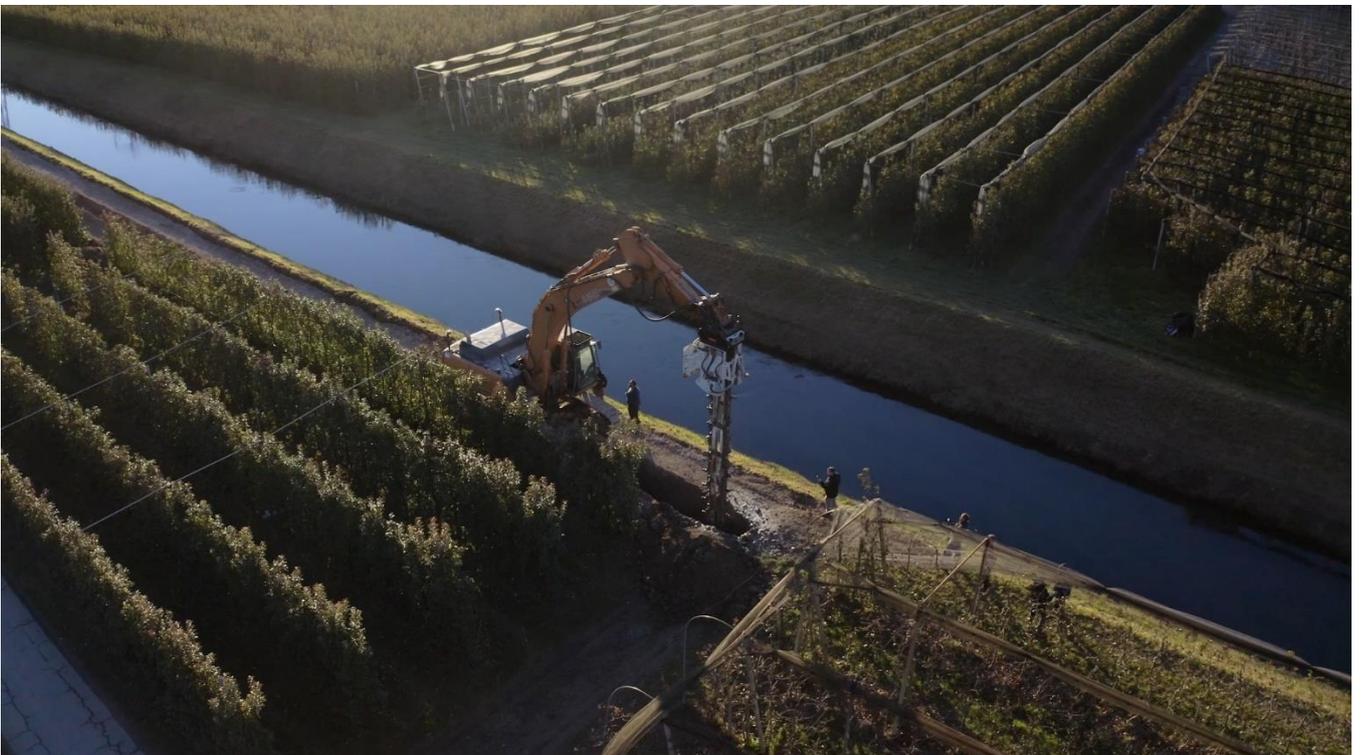


Figura 8: escavatore con lama miscelatrice in cantiere entrando nel terreno



Figura 9: escavatore con lama miscelatrice in cantiere in posizione di lavoro con eventuale protezione

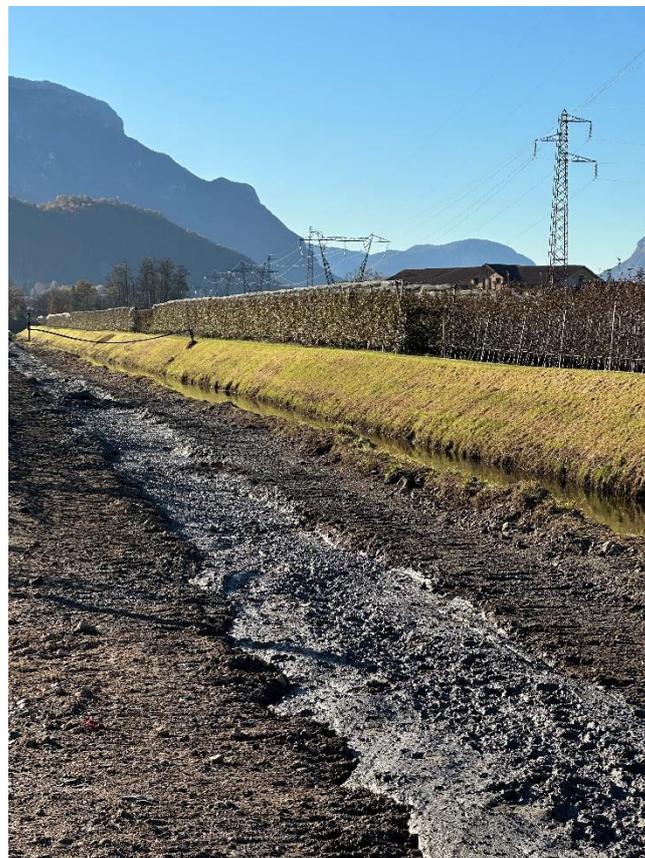


Figura 10: diaframma finito dopo miscelazione

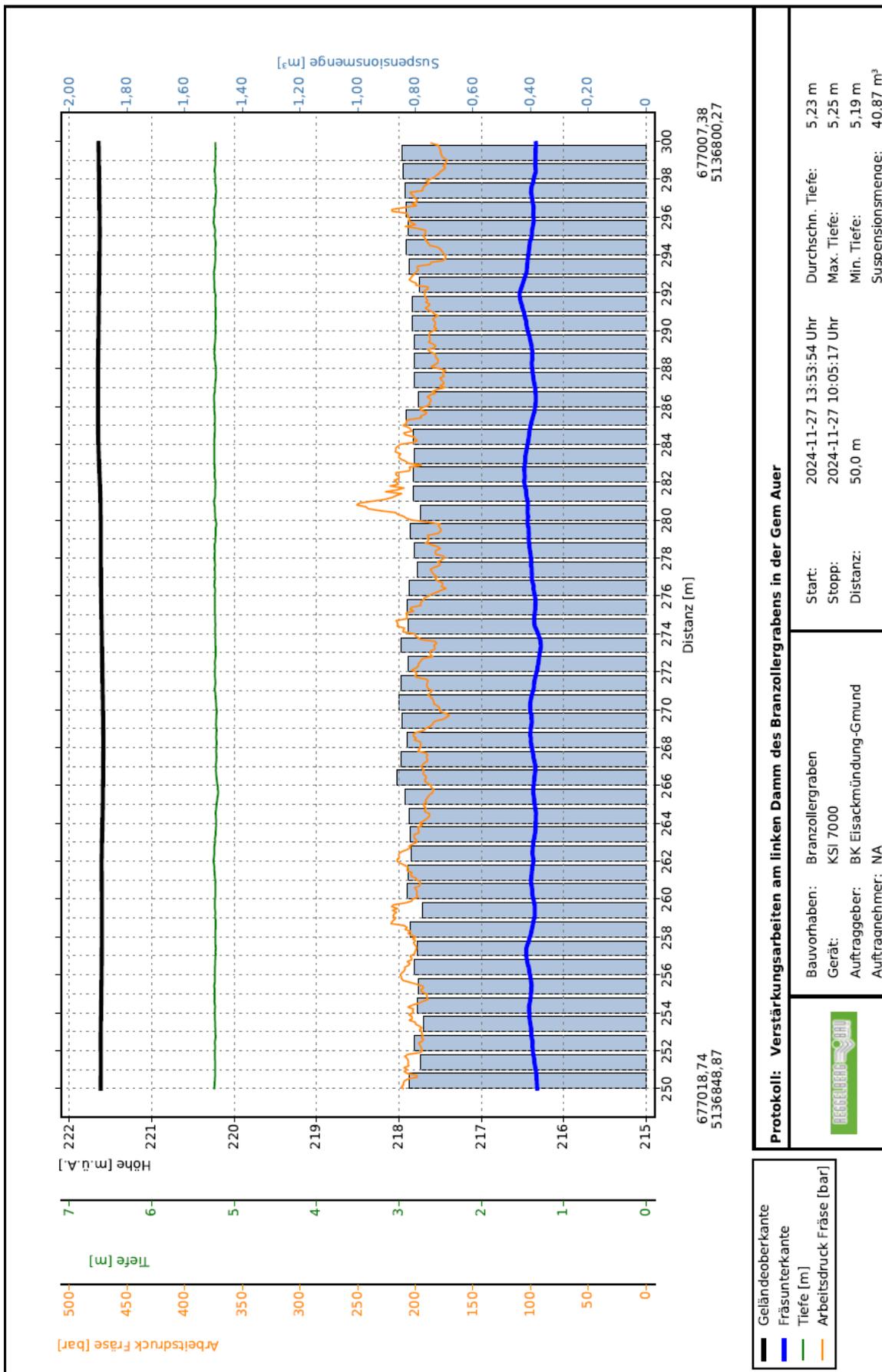


Figura 11: report della fresa

VERIFICHE ESEGUITE A CORREDO DELL'OPERA

Dopo 28 giorni dal termine dell'esecuzione dei lavori, tramite una carotatrice a colonna verticale, sono stati prelevati in sito quattro campioni, uno ogni cento metri lineari, da sottoporre in laboratorio a prove di compressione e permeabilità. Sono inoltre stati eseguiti dei carotaggi orizzontali per verificare lo spessore complessivo del diaframma che si attesta sui 50 centimetri.



Fig. 12: carotatrice a colonna durante la fase di perforazione



Fig. 13: dettaglio della carota estratta durante i carotaggi orizzontali



Fig. 14: carotatrice a colonna durante la fase di perforazione

All'interno dei quattro fori eseguiti con la carotatrice a colonna, sono state eseguite altrettante prove di permeabilità di tipo Boutwell con lo scopo di verificare la corrispondenza dei risultati ottenuti in laboratorio con quelli ricavati in sito.



Fig. 15: Prova di permeabilità di tipo Boutwell

Di seguito, viene riportata una tabella riassuntiva contenente un confronto relativo alla permeabilità e alla resistenza a rottura ottenuta sui provini realizzati per le diverse fasi del progetto.

	Terreno naturale	15% cemento in laboratorio	Prelievo in sito durante la fase esecutiva (prove eseguite dopo 28 gg)	Prelievo in sito dopo 28gg dalla posa
Permeabilità (m/s)	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-9}$	$5,05 \cdot 10^{-10}$	$6,06 \cdot 10^{-10}$
Resistenza a compressione (MPa)	0,20	0,59	1,08	1,14

Tab.2: Confronto riassuntivo dei principali parametri ricavati con prove di laboratorio durante le differenti fasi dell'opera

VERIFICA DIAFRAMMA TRAMITE SONDAGGI GEOGNOSTICI INTEGRATIVI

Nel mese di dicembre 2024 sono state condotte delle nuove indagini geognostiche che hanno incluso sondaggi a carotaggio continuo sia lungo l'argine oggetto di stabilizzazione che nell'intorno dell'area in oggetto. I primi si sono spinti ad una profondità di 6,0 m ed hanno avuto lo scopo di verificare l'effettiva profondità del diaframma realizzato, mentre i secondi sono stati attrezzati con una tubazione piezometrica per il monitoraggio della falda e distribuiti in maniera da coprire omogeneamente l'intorno dell'area in oggetto.

Lo spessore del setto così rilevato si attesta sui 5,0 m di profondità dal piano campagna.



Fig. 16: esempio di cassetta catalogatrice estratta durante le operazioni di sondaggio nel diaframma