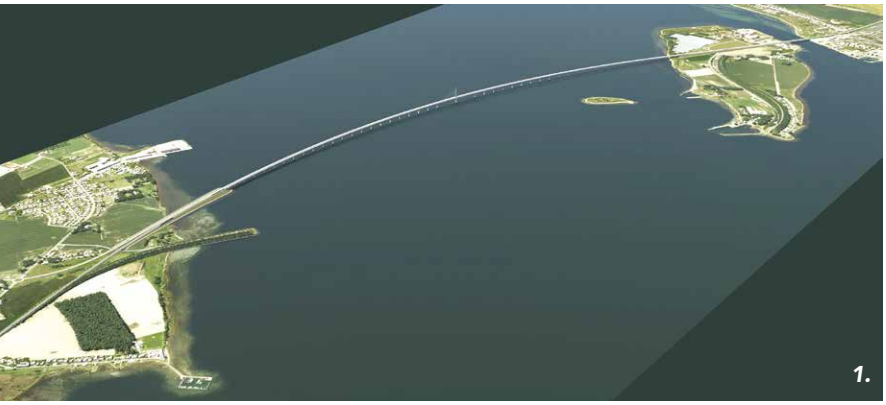
Davide Merli[1]
Alessandro Zegna[2]
Giuseppe Rendina[2]
Luca Anselmi[3]
Marco Raimondi[4]

SOLUZIONI SOSTENIBILI
PER I RILEVATI STRADALI DELLO STORSTRØM BRIDGE

PER LA REALIZZAZIONE DEI RILEVATI DI ACCESSO AL NUOVO STORSTRØM BRIDGE, CHE COLLEGHERÀ LE REGIONI DI FALSTER E SJÆLLAND IN DANIMARCA, IL CONSORZIO SBJV UTILIZZA UN MATERIALE DI RISULTA DI COMBUSTIONE DI RIFIUTI DOMESTICI E INDUSTRIALI (SLAG) ABBINANDO UNA SOLUZIONE TECNICA EFFICACE A UNA SCELTA DI SOSTENIBILITÀ

Il nuovo Storstrøm Bridge è un ponte stradale, ferroviario e ciclopedonale che collegherà le isole di Falster (regione Falster) e di Masnedø (regione Sjælland) in Danimarca, in corso di realizzazione da parte di SBJV, una joint venture di Società di costruzione italiane guidata da Itinera SpA (si veda "Strade & Autostrade" n° 151 Gennaio/Febbraio 2022 a pag. 152).
Con una lunghezza di circa 4 km, sarà il terzo ponte più lungo del Paese dopo lo Storebælt Bridge e l'Øresund Bridge. Costituirà un ulteriore potenziamento della rete stradale e ferroviaria ad alta velocità danese, lungo il tragitto che collegherà la capitale Copenaghen alla Germania quando sarà completato il tunnel sottomarino Fehmarn Belt. Committente dell'opera è il Direttorato per le Strade (Vejdirektoratet) del Ministero dei Trasporti danese.
Il ponte è strallato nelle due campate centrali, di lunghezza complessiva 320 m, e presenta altre 44 campate di lunghezza 80 m. La struttura è a cassone con travi prefabbricate, così come gran parte delle pile (realizzate in conci) e le relative fondazioni.



1.

SUSTAINABLE SOLUTIONS
FOR THE ROAD EMBANKMENTS OF THE STORSTRØM BRIDGE

FOR THE REALIZATION OF THE EMBANKMENTS FOR THE ACCESS TO THE NEW STORSTRØM BRIDGE, THAT WILL CONNECT THE REGIONS FALSTER AND SJÆLLAND IN DENMARK, THE JOINT VENTURE SBJV IS USING A MATERIAL RESULTING FROM THE INCINERATION OF BOTH DOMESTIC AND INDUSTRIAL WASTE (SLAG), COMBINING AN EFFECTIVE TECHNICAL SOLUTION WITH A SUSTAINABLE INITIATIVE

The new Storstrøm bridge is a road, railway, bicycle and pedestrian bridge that will connect the islands of Falster (region Falster) and Masnedø (region Sjælland) in Denmark, and it is currently being built by SBJV, a joint venture of Italian Contractors lead by Itinera SpA (see "Strade & Autostrade" n. 151 January/February 2022, page 152). With a length of approximatively 4 km above water, the new Storstrøm bridge will be the 3rd longest bridge in Denmark after the Storebælt and the Øresund bridge. It will further strengthen the road and high speed railway connection along the route Copenhagen-Germany, when the Fehmarn Belt underwater tunnel will be completed. Client of this bridge

Illustrata sinteticamente la complessità e l'unicità dell'opera d'arte, non meno critici sono gli aspetti di viabilità legati ai collegamenti con le strade e la ferrovia esistenti a Nord e a Sud del ponte. In questo ambito, su proposta del Committente il Consorzio SBJV ha colto l'opportunità di sostituire parte del materiale dei rilevati con slag, ovvero residui di combustione di rifiuti domestici e industriali.
Le Figure 2A e 2B illustrano dove si prevede di utilizzare questo materiale (frecce rosse), per un volume di 100.000 m^3 nel rilevato Sud (Falster) e 150.000 m^3 nel rilevato Nord (Masnedø).
Si tratta di un materiale riciclato e dotato di marchio EPD (Environmental Production Declaration) per via del significativo assorbimento di CO_2 che avviene durante il processo di maturazione successivo alla combustione. L'incenerimento dei rifiuti produce quindi riscaldamento, elettricità e un materiale di costruzione (Figura 3).
Tale scelta è dunque basata su un principio di sostenibilità ed è necessariamente accompagnata da misure specifiche al fine di evitare qualsiasi significativo impatto ambientale.
Le misure adottate per rendere utilizzabile tale materiale di risulta, descritti in maggior dettaglio nei paragrafi seguenti, sono:

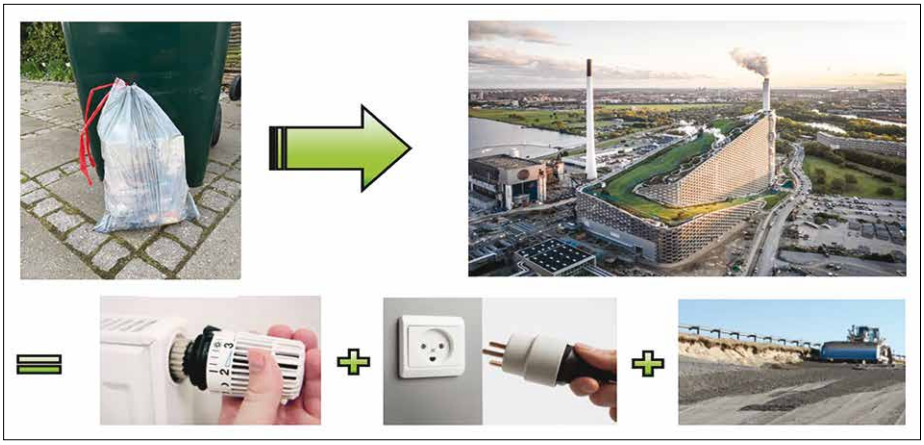
- definizione dei criteri limite per l'utilizzo dello slag;
- criteri definiti per lo stoccaggio dello slag;
- conterminazione del volume di slag;
- raccolta dell'acqua di percolazione in un sistema di drenaggio chiuso.

2A e 2B. *La viabilità di accesso al nuovo Storstrøm Bridge dal lato Sud (2A) e dal lato Nord (2B)*

2A and 2B. *Secondary roads system for the access to the new Storstrøm bridge from South (2A) and North side (2B)*

I CRITERI LIMITE PER L'UTILIZZO DELLO SLAG

Al fine di non essere classificato come rifiuto pericoloso, il materiale di risulta (slag) deve contenere una quantità di metalli contenuta entro i limiti di Figura 4. Tale criterio è valido sia a sud (municipalità di Guldborgsund) che a Nord del ponte (municipalità di Vordingborg).



3. *Il ciclo di trasformazione dei materiali di risulta (domestici e industriali) che producono riscaldamento, elettricità e slag*

3. *Transformation cycle of the domestic and industrial waste to produce heating, electricity and slag*

is the Danish Road Directorate (Vejdirektoratet) of the Danish Ministry of Transport.
The two central spans of the bridge are cable-stayed (overall length of 320 m), while the other 44 spans (length of 80 m each) consist of prefabricated box girder elements, as well as most of the piers (composed by different elements) and pier foundations.
Given the complexity and unicity of this infrastructure, not less critical is the design of the connections with the secondary roads at the North and South side of the bridge. In this respect, following the proposal of the Client, SBJV has taken the opportunity to substitute part of the material in the main embankments with slag, i.e. a residual product of the incineration of domestic and industrial waste. Figures 2A and 2B illustrate where it is planned to use this material (red arrows), for an overall volume of 100'000 m^3 in the South embankment (Falster) and 150'000 m^3 in the North embankment (Masnedø).

I CRITERI PER LO STOCCAGGIO DELLO SLAG

In ognuna delle municipalità coinvolta dall'utilizzo dei materiali, il Consorzio dovrà comunque notificare all'Autorità ambientale competente - entro quattro settimane dall'intenzione di usare i materiali di risulta - tutte le informazioni necessarie relative all'area di ricevimento delle slag, alle dimensioni degli stoccaggi temporanei e alla posizione esatta del materiale nella geometria di progetto dei rilevati, inclusi i tempi di movimentazione, per una preventiva approvazione.
Il materiale di risulta negli stoccaggi deve essere mantenuto separato dal terreno naturale da uno strato di almeno 10 cm di spessore di sabbia o ghiaia. Gli stoccaggi devono essere raggiungibili solo da personale autorizzato.
I rilevati di stoccaggio devono essere circondati da fossi per evitare la dispersione di slag a seguito di eventi meteorici estremi, e in caso di rischio di dispersione per via eolica (a discrezione dell'autorità ambientale competente) la superficie degli stoccaggi dovrà essere ricoperta o mantenuta umida.

ELEMENTO / *ELEMENT*	QUANTITÀ LIMITE IN MG/KG / *LIMIT VALUE IN MG/KG*
Arsenico / *Arsenic*	35.000 / 35'000
Piombo / *Lead*	3.000 / 3'000
Cadmio / *Cadmium*	1.000 / 1'000
Cromo / *Chrome*	1.000 / 1'000
Rame / *Copper*	200.000 / 200'000
Mercurio/ Mercury	2.500 / 2'500
Nickel	1.000 / 1'000
Zinco / *Zinc*	50.000 / 50'000

4. *La quantità massima ammissibile di metalli all'interno dello slag*
4. *Maximum allowed values of metals in the slag*

LA CONTERMINAZIONE DEL VOLUME DI SLAG

Il materiale di risulta (slag) non potrà essere utilizzato al disotto della quota di +3,0 m rispetto al livello di riferimento del progetto (DVR90). Tale quota rappresenta il livello dell'attuale piano di campagna, dunque significativamente al di sopra del livello medio di falda (circa 0 m+DVR90 in virtù della vicinanza dal mare) per prevenire una diretta contaminazione.

The slag used for the embankments is a recycled material with negative EPD-value (Environmental Production Declaration) due to the significant absorption of CO_2 during the maturation process following the incineration. Therefore, the overall cycle produces heating, electricity and a construction material (the slag - Figure 3).
This choice is based on a principle of sustainability and it comes necessarily with specific measures to avoid any environmental impact.
The necessary measures to use the slag are described in more detail in the following paragraphs, and consist of:

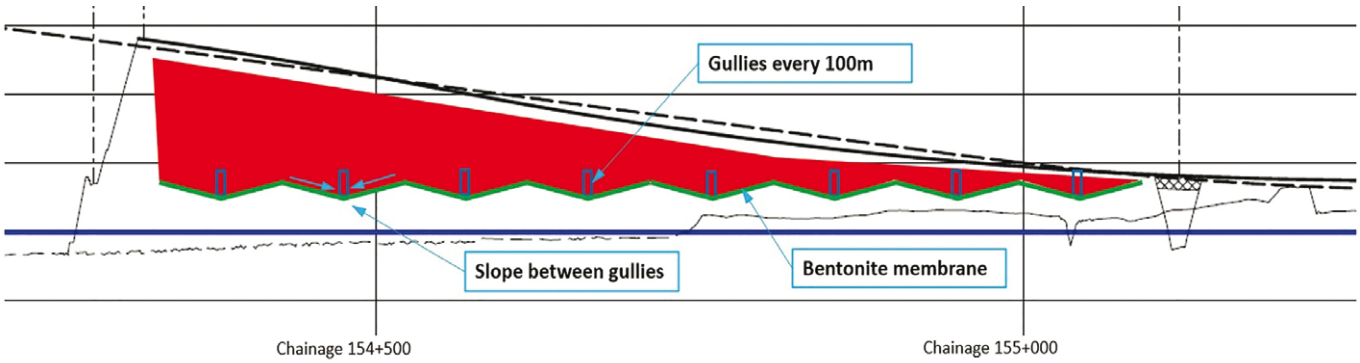
- *definition of the limiting values for the use of slag;*
- *definition of criteria for the stockpiling of the slag;*
- *geometric sealing o the volume of slag;*
- *collection in a closed drainage system of any water that leaches through the slag.*

LIMIT CRITERIA FOR THE USE OF THE SLAG

In order not to be classified as a dangerous waste, the slag must contain a quantity of metals within the limits defined in Figure 4. The same criteria are valid on the South side (Guldsborgsund municipality) and on the North side (Vordingborg municipality) of the bridge.

CRITERIA FOR THE STOCKPILING OF THE SLAG

In both the municipalities involved by the use of slag, SBJV will notify to the local environmental authority, within four weeks from the decision to use slag, all the necessary information about where the receiving stations and temporary stockpiles for slags will be placed, where the slags will be used (X, Y, Z) and the date for start and finish of the use of slags, for a preliminary approval.
Slags in temporary stockpiles shall be separated from the naked earth below by means of a minimum 10cm thick layer of sand or gravel. Unauthorized people shall be prevented from entering the areas, for example by marking or fencing.
Precautions (e.g. earth ditches) shall be taken to prevent surface water from the temporary stockpiles overflowing surrounding areas. The slag shall not give significant dust nuisances, and shall be kept moist or covered, if there is a risk of dust nuisance. It is the local environmental authority who evaluates whether dust nuisance is significant.



5. *La sezione longitudinale schematica del rilevato di accesso lato Sud (lo slag è evidenziato in rosso)*
5. *Longitudinal section of the main road embankment on the South side (slag is highlighted in red)*

Alla base del volume di slag utilizzato nei rilevati principali di accesso al ponte, sotto uno strato di sabbia grossolana (0÷4 mm) dovrà essere posata una membrana impermeabilizzante bentonitica per convogliare l'acqua di percolazione all'interno di sistemi di drenaggio chiusi disposti ad intervalli regolari (vedi paragrafo successivo). Si accetta che la membrana sia discontinua nel rilevato Nord, mentre nel rilevato Sud la membrana è ininterrotta e disposta con pendenze a schiena d'asino per facilitare il drenaggio (Figura 5).
Lo strato di copertura del rilevato dovrà essere costituito di argilla con una permeabilità massima di 10-8 m/s e dovrà essere compattata almeno al 95% del relativo valore Proctor. Almeno cinque misure di permeabilità della copertura dovranno essere effettuate in un campo prova di estensione 1.000 m^2, e la tolleranza di posa dello strato di argilla non dovrà superare +/−3 cm.
Le superfici carrabili al di sopra del volume di slag dovranno avere uno spessore di asfalto di almeno 150 mm, mentre la pista pedonale/ciclabile e la cunetta di separazione fra le carreggiate dovranno avere uno spessore di asfalto di almeno 70 mm.
È ammessa la presenza di tubazioni di drenaggio per il pacchetto stradale all'interno del volume di slag, ma posizionate immediatamente al di sotto dell'interfaccia fra rilevato e slag e comunque circondate da uno strato filtrante.

LA REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI DRENAGGIO CHIUSO

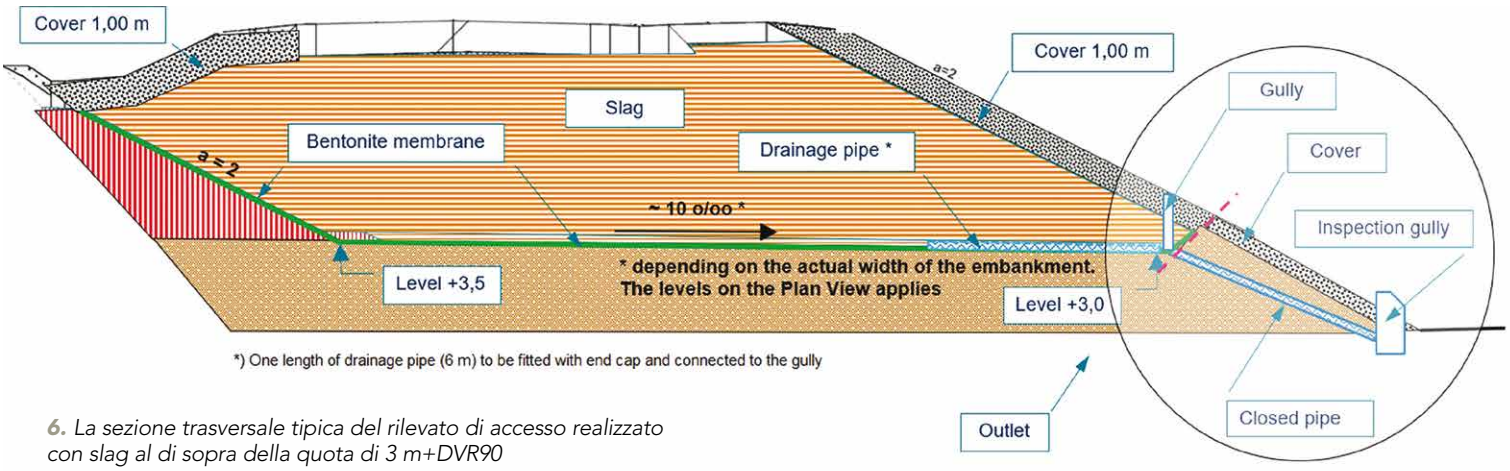
Il Committente (Vejdirektoratet) ha stabilito, con specifica nota diramata nelle fasi iniziali di realizzazione dell'opera, i criteri e i materiali da utilizzare per il drenaggio di eventuale acqua interstiziale che, dopo essere percolata attraverso il volume slag, non può essere smaltita nel sistema di drenaggio principale dell'infrastruttura (che recapita in mare a valle di specifici bacini di infiltrazione) ma deve essere convogliata attraverso un sistema di raccolta e di monitoraggio chiuso.
Va sottolineato che, in condizioni di esercizio, una analisi di rischio effettuata dal Committente insieme al consulente COWI non ha evidenziato una significativa possibilità penetrazione di acqua in virtù della conterminazione e della presenza del sistema di drenaggio superficiale. Tuttavia, dal momento che questo

GEOMETRIC SEALING OF THE VOLUME OF SLAG

The slag shall not be used below level +3 m from the Project reference level (DVR90). Such level represents on average the existing terrain, therefore the slag is used sufficiently above the groundwater table and above the sea level, which are both around elevation 0+DVR90, to avoid any contamination.
At the base of the slag volume in the main embankments, under a layer of coarse sand (0÷4 mm), an impermeable bentonitic membrane shall be placed to convey the leaching water into closed drainage systems that are designed at regular intervals, see next paragraph. It is accepted that the membrane is not continuous in the North embankment, while it is continuous in the South embankment with slopes to facilitate the drainage (Figure 5).
The cover layer of the slag shall be constituted by clay with a maximum permeability of 10-8 m/s and shall be compacted to at least 95% of the Proctor value. At least five measurements of permeability shall be done in a trial field with extension of 1'000 m^2, with a tolerance in the construction of the clay layer of +/−3 cm.
The paved surfaces above the slag volume shall have an asphalt thickness of at least 150 mm, while the pedestrian/bicycle path and the verge between roadways shall have an asphalt thickness of at least 70 mm.
It is allowed to design the subgrade drainage inside the slag volume, but only if it is placed just below the interface between road layers and slag, and in any case surrounded by draining material (gravel).

REALIZATION OF A CLOSED DRAINAGE SYSTEM

The Client (Vejdirektoratet) has expressed in an "Employer's Change Note" the criteria and the materials to be used for the drainage of any possible volume of water that, after leaching through the slag, cannot be disposed through the main drainage system of the infrastructure (discharging in an infiltration basin and eventually in the sea), but shall be collected and monitored inside a closed system.
It should be noted that, for the operational phase, the risk analysis carried out by the Client with its consultant (COWI)



6. *La sezione trasversale tipica del rilevato di accesso realizzato con slag al di sopra della quota di 3 m+DVR90*

6. *Typical cross section of the main embankment built with slag above level 3 m + DVR90*

progetto coinvolge la maggiore quantità di slag finora utilizzata in Danimarca, il Committente ha ritenuto necessario (indipendentemente dai vincoli posti delle municipalità coinvolte) implementare un sistema di raccolta e monitoraggio per verificare se l'ipotesi di isolamento del volume di slag sia confermata in condizioni di esercizio. Soltanto in fase di costruzione, quando si utilizzano grandi quantità di acqua per compattare il materiale, una portata di percolazione è effettivamente attesa.
Con riferimento alla Figura 6, tale sistema di drenaggio è costituito dai seguenti elementi:

- un tubo perforato ø110 mm circondato da un filtro in ghiaia che riceve direttamente l'acqua raccolta dalla membrana bentonitica;
- un pozzetto ø425 mm in materiale plastico corrugato per la raccolta del liquido convogliato dal tubo perforato, che deve avere la base alla quota di +3,0 m DVR90 ed emergere di almeno 0,5 m dal corpo del rilevato;
- un tubo chiuso ø110 mm con forte inclinazione per lo scarico nel pozzetto di ispezione;
- un pozzetto di ispezione ø1.000 mm in calcestruzzo, che costituisce il recapito del liquido contaminato e in cui i sedimenti trasportati possono depositarsi su un'altezza di 0,9 m. Questo pozzetto è situato alla base del rilevato ed il chiusino dovrà trovarsi almeno 1,0 m sopra al piano di campagna.

Sotto il pozzetto corrugato, lo strato di membrana bentonitica dovrà essere raddoppiato e risvoltato fino a raggiungere lo strato di copertura del rilevato. La granulometria della sabbia grossolana (0÷4 mm) che copre la membrana bentonitica, così come quella del filtro che circonda il tubo perforato, è stabilita a priori dal Committente per garantire la necessaria permeabilità.
La membrana bentonitica e il sistema di drenaggio hanno anche lo scopo di monitorare la quantità di acqua di percolazione che sarà raccolta, non nota a priori. Se del liquido sarà osservato nei pozzetti di ispezione durante la costruzione, tale liquido dovrà essere campionato ed esaminato dall'Autorità ambientale competente e riutilizzato per idratare lo stesso volume di slag. Ovviamente, i pozzetti di ispezione non dovranno mai tracimare, e il liquido non dovrà essere smaltito se non da personale specializzato (comunque non a carico del Consorzio SBJV). ■

didn't envisage a significant probability of penetration of water in the slag due to its geometrical sealing and to the presence of a drainage system for all the surfaces. However, since this project involves the largest amount of slag ever used in in Denmark, the opportunity is taken to implement a system of collection and monitoring (independent from the prescriptions of the municipalities) to verify if the assumptions of isolation of the slag during operational phase were correct. Only during construction some leaching is expected due to the use of extensive amounts of water on the slag for the purpose of compaction.
With reference to Figure 6, the closed drainage system consists of the following elements:

- *perforated Ø110 mm pipe surrounded by a gravel filter that receives the water collected by the bentonitic membrane;*
- *a corrugated Ø425 mm raising pipe (gully) for the collection of the liquid from the perforated pipe, that should have its base at +3 m DVR90 and emerge by at least 0,5 m from the embankment outer surface;*
- *a closed Ø110 mm sloping uPVC pipe, to discharge in the inspection gully;*
- *a Ø1.000 mm concrete inspection gully, which is the destination of the possibly contaminated liquid with a 900 mm high sand trap. This gully is at the foot of the embankment and its top shall emerge by at least 1 m from ground level.*

Below the corrugated pipe, two layers of bentonite membrane must be applied and shaped in a way to reach the clay layer. The grain size distribution of the coarse sand (0÷4 mm) covering the bentonitic membrane, as well as the gravel covering the perforated pipe, are established by the Client in order to provide sufficient permeability.
The bentonitic membrane and the drainage system have also the purpose of monitoring the amount of leaching water, not yet known. Is any liquid will be found in the inspection gullies, such liquid should be sampled and examined by the environmental authority and re-used only to hydrate the same slag volume. Inspection gullies shall never overflow, and the liquid shall be disposed only by authorized personnel (in any case, it will not be a duty of SBJV). ■

[1] *Ingegnere Civile, Progettista idraulico di Enser Srl*
[2] *Ingegnere Civile, Progettista stradale di Geodes Srl*
[3] *Ingegnere Civile, Design Coordinator Landworks, Marine, Geotechnical di SBJV I/S (Storstrøm Bridge Joint Venture)*
[4] *Ingegnere Civile, Design Manager di SBJV I/S (Storstrøm Bridge Joint Venture)*

[1] *Civil Engineer, Hydraulic Designer at Enser Srl*
[2] *Civil Engineer, Road Designer at Geodes Srl*
[3] *Civil Engineer, Design Coordinator Landworks, Marine, Geotechnical at SBJV I/S (Storstrøm Bridge Joint Venture)*
[4] *Civil Engineer, Design Manager at SBJV I/S (Storstrøm Bridge Joint Venture)*

DATI TECNICI

Stazione Appaltante e Direzione dei Lavori: Vejdirektoratet (Danish Road Directorate)
Contraente Generale, Direzione di Cantiere ed Esecutori dei Lavori: SBJV (Storstrøm Bridge Joint Venture)
Progetto preliminare ed esecutivo: SBJV (Progettisti: Andermann Engineering e Studio Geotecnico Italiano)

TECHNICAL DATA

Client (Contracting Authority) and Project Management: *Vejdirektoratet (Danish Road Directorate)*
General Contractor, Construction Management and Work Execution: *SBJV (Storstrøm Bridge Joint Venture)*
Preliminary abd Detailed Design: *SBJV (Project Managers: Andermann Engineering and Studio Geotecnico Italiano)*