

Paper n° 17

MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI ALLAGAMENTI TRAMITE RELINING SENZA SCAVO IN UN ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO A LILLESTRØM, NORVEGIA

I. Seco Rizo¹, K. Lien², D. Bang², F. Eccel³¹Systra SpA Torino,²Systra SpA Olso - Noruega,³Systra SpA Trento

1. INTRODUZIONE E CONTESTO

Nell'agosto 2023, la tempesta "Hans" ha portato intense precipitazioni nella zona di Lillestrøm, in Norvegia, provocando gravi inondazioni alla stazione ferroviaria di Leirsund lungo la linea Gardermobanen. L'evento ha messo in evidenza le gravi vulnerabilità del sistema di drenaggio esistente, in particolare nel canale di attraversamento ferroviario al km 26,550 (Figura 1). Questa struttura in cemento DN 1200mm era notevolmente ostruita da sedimenti, detriti legnosi e la velocità del flusso era influenzata da dighe costruite dai castori a monte e a valle dell'attraversamento, che aumentavano ulteriormente i problemi di sedimentazione all'ingresso e all'interno della tubazione. La sua limitata capacità idraulica, aggravata da una manutenzione insufficiente del torrente, dall'invecchiamento della superficie interna dell'attraversamento sotterraneo in cemento e dal parziale blocco, limitava fortemente il deflusso dell'acqua piovana generata dalla tempesta. Data la copertura poco profonda della tubazione di attraversamento e la vicinanza ai binari ferroviari in esercizio, un intervento per la sostituzione tradizionale a cielo aperto è stata ritenuta irrealizzabile a causa dei potenziali disagi e degli elevati rischi associati.

Per risolvere il problema, è stato analizzato un approccio di risanamento senza scavo. È stato scelto il *relining* (rivestimento interno) per la sua capacità di ripristinare la capacità di flusso con un disturbo minimo dell'intorno. Tale metodo prevede l'inserimento di un rivestimento flessibile saturo di resina epossidica nel tubo esistente, che viene poi polimerizzato per formare una nuova superficie interna senza giunti. Il nuovo rivestimento riduce così significativamente la rugosità della superficie, migliorando l'efficienza idraulica e prolungando la durata strutturale del canale di attraversamento. Il *relining* fa parte di una più ampia strategia di mitigazione delle inondazioni, che comprende il controllo dell'erosione all'ingresso, il rinforzo degli elementi strutturali e l'integrazione di misure complementari di deviazione del flusso.

Questo tipo di intervento rispetta gli standard infrastrutturali norvegesi aggiornati, che prescrivono che gli attraversamenti ferroviari e i ponti siano dimensionati per un periodo di ritorno di 200 anni, includendo l'incremento della capacità necessario in base alle proiezioni locali sull'aumento delle precipitazioni dovuto ai cambiamenti climatici, secondo BaneNOR (2014) e le linee guida del NVE (2016). Tale configurazione considera sia l'incremento atteso di intensità e frequenza degli eventi di precipitazione estrema nei prossimi anni, sia le incertezze nelle relative proiezioni.

Il progetto di Lillestrøm non solo ha mirato alla riduzione immediata del rischio, ma ha anche dimostrato un modello sostenibile e compatibile dal punto di vista operativo per affrontare il problema dell'invecchiamento delle infrastrutture in aree soggette a inondazioni e geotecnicamente sensibili.

1.1. DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

L'allagamento della stazione di Leirsund (Lillestrøm) ha messo in luce una grave carenza nell'infrastruttura locale di gestione delle acque piovane. Il canale di attraversamento ferroviario (diametro DN1200 al km 26,550) non è stato in grado di convogliare il deflusso generato dalle piogge intense a causa della sua limitata capacità idraulica e del degrado strutturale della sua superficie interna. Gli ostacoli causati dai sedimenti e dai detriti, aggravati dall'attività dei castori nel torrente, hanno ulteriormente rallentato il flusso nella tubazione di attraversamento. L'elevata rugosità della superficie interna e la geometria non ottimale dell'ingresso hanno contribuito alle sue scarse prestazioni idrauliche durante l'evento straordinario registrato nel 2023. Inoltre, la sua scarsa profondità di interrimento e la sua posizione sotto un corridoio ferroviario critico hanno reso inadatti i metodi di scavo tradizionali, sia dal punto di vista ingegneristico che operativo. L'urgente necessità di migliorare le prestazioni idrauliche senza interrompere il servizio o causare danni ecologici ha definito l'ambito dell'intervento richiesto.

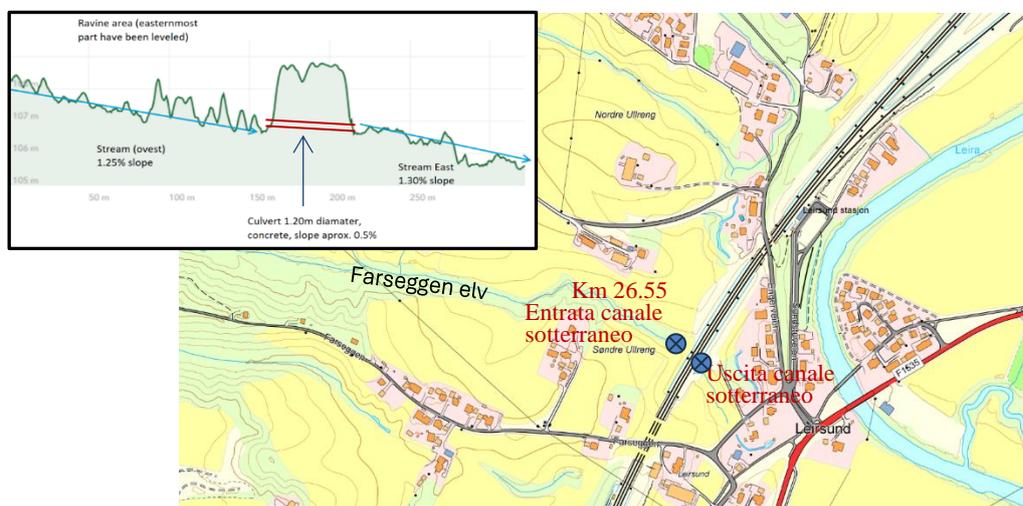


Figura 1. Panoramica della posizione dello studio

1.2. OBIETTIVI DELLA RICERCA

Lo studio qui presentato mira a valutare ed implementare un metodo di ripristino senza scavo che aumentasse la capacità idraulica e l'integrità strutturale del canale sotterraneo esistente. Nello specifico, gli obiettivi erano i seguenti: valutare i vincoli idraulici specifici del sito; identificare una soluzione a basso impatto adeguata per il ripristino della tubazione; verificare la fattibilità e l'efficacia del rivestimento interno senza scavo nel migliorare la capacità di flusso e prolungare la durata dell'infrastruttura; integrare misure complementari di mitigazione delle inondazioni per gestire eventi meteorologici con periodi di ritorno fino a 200 anni, compresi gli adeguamenti per i futuri scenari di cambiamento climatico. La ricerca ha anche cercato di dimostrare come la tecnologia senza scavo possa contribuire alla gestione sostenibile delle infrastrutture in condizioni operative difficili.

2. REVISIONE DELLA LETTERATURA

L'efficacia della mitigazione delle inondazioni nei corridoi di trasporto dipende in larga misura dalle prestazioni dei sistemi di canali di drenaggio, molti dei quali sono obsoleti e sono stati originariamente progettati per portate inferiori in accordo alle normative vigenti al momento della loro costruzione. In Norvegia, le norme aggiornate in materia di infrastrutture richiedono ora che le strutture idrauliche siano in grado di far fronte a periodi di ritorno fino a 200 anni, oltre a un fattore aggiuntivo legato al cambiamento climatico, aumentando in modo significativo i requisiti di portata di progetto (Statens vegvesen, 2018).

I canali di attraversamento tradizionali in calcestruzzo sono spesso soggetti a sedimentazione, deterioramento della superficie, problemi nei giunti e inefficienze geometriche, tutti fattori che contribuiscono alla riduzione delle loro prestazioni idrauliche nel tempo. Secondo Schall et al. (2012), il miglioramento della geometria dell'ingresso dei canali sotterranei e della levigatezza della superficie sono tra i modi più efficaci per aumentare la capacità di scarico. L'equazione di Gauckler-Manning [1] e la equazione della portata [2] dimostrano come la riduzione della rugosità superficiale all'interno della tubazione comporti un aumento misurabile della portata. In questo contesto, le strategie di ripristino che riducono i valori n di Manning sono particolarmente indispensabili.

$$v = \left(\frac{1}{n}\right) R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad [1]$$

$$Q = A \cdot v \quad [2]$$

dove

v = velocità media trasversale [m/s]; n = coefficiente di rugosità di Manning [$s/m^{1/3}$]; R_h = raggio idraulico [m]; S = pendenza o gradiente del tubo [m/m]; A = sezione trasversale o area di flusso [m²]; Q = portata [m³/s]

Per il problema analizzato, le tecnologie *trenchless* (senza scavo) risultano promettenti come alternative sostenibili alla sostituzione integrale. Tra queste, il *relining* (rivestimento interno) si distingue per la sua capacità di ripristinare la funzione idraulica evitando scavi e riducendo al minimo l'impatto ambientale. Gli studi hanno dimostrato come il *relining*

possa ridurre il coefficiente di Manning da $0,017 \text{ s.m}^{-1/3}$ per il calcestruzzo deteriorato a circa $0,012 \text{ s.m}^{-1/3}$, con un miglioramento della capacità compreso tra il 30% e il 50% a seconda della pendenza e della forma della tubazione (Garcia et al., 2002).

In aree sensibili dal punto di vista ambientale o con vincoli operativi, come i corridoi ferroviari, gli approcci senza scavo offrono l'ulteriore vantaggio di ridurre i tempi di costruzione e i disagi sociali. Il *pipe-bursting*, un altro metodo senza scavo, può essere efficace per aumentare il diametro dei tubi o la sostituzione con un diametro superiore, ma, come analizzato nel caso studiato, potrebbe non essere adatto a causa delle installazioni poco profonde sotto la ferrovia e delle incertezze sulla resistenza della struttura di riempimento del terreno. Il *relining*, al contrario, fornisce un rinforzo non-strutturale ed un miglioramento idraulico con un basso rischio di disturbo del terreno (PipeLife, 2022).

Le pratiche di valutazione del rischio, comprese quelle stabilite dalla norma NS 5814:2008 (SN, 2008), supportano una progettazione adattiva delle infrastrutture che tenga conto delle soglie di sicurezza e dell'impatto degli interventi. In questo quadro, le strategie di *relining* contribuiscono non solo ad aumentare la capacità, ma anche alla resilienza sistemica e al risparmio sui costi del ciclo di vita.

In sintesi, nel caso studiato, la letteratura sostiene l'uso della tecnica di rivestimento interno come metodo tecnicamente fattibile ed economicamente sostenibile al fine di migliorare le prestazioni dei tombini di drenaggio in presenza di vincoli simili a quelli di Lillestrøm. Esso è in linea con gli obiettivi di sostenibilità e fornisce un modello replicabile per l'adattamento delle infrastrutture alle mutevoli condizioni climatiche.

3. METODOLOGIA

In Norvegia per la progettazione di tombini di drenaggio e ponti (che attraversano corsi d'acqua), occorre utilizzare un periodo di ritorno di 200 anni rispettivamente per le precipitazioni e le inondazioni. Alla portata di progetto occorre aggiungere un adeguamento climatico ulteriore per tenere conto del fatto che nei prossimi anni si prevede un aumento sia dell'intensità che della frequenza degli eventi di precipitazioni intense a causa dei cambiamenti climatici e la considerazione delle incertezze nella valutazione delle condizioni future. L'adeguamento climatico deve basarsi sulle raccomandazioni attuali del Centro norvegese di servizi climatici (Norwegian Environment Agency, s.d.).

Per definire le portate di progetto e gli idrogrammi necessari per il dimensionamento dell'intervento nel sito di Lillestrøm, sono state effettuate stime idrologiche per quattro scenari di progetto critici: periodi di ritorno (T_r) di 50, 100 e 200 anni e un evento di 200 anni con un adeguamento del cambiamento climatico del 30%. Il periodo di ritorno da utilizzare per le verifiche è conforme alla normativa locale per le ferrovie TRV 520 (BaneNOR, 2014). Inoltre, in conformità con i requisiti del Manuale N200 (SVV, 2018) e della Relazione 681 (SVV, 2018b), il flusso di progetto tiene conto sia dei cambiamenti climatici che dell'incertezza nel calcolo. Il fattore climatico F_k è determinato dal Manuale N200 (SVV, 2018) e dal Rapporto 81-2016 (SVV, 2016), quindi $F_k=1,3$ e sarà utilizzato solo per $T_r=200$, mentre il fattore di sicurezza F_u tiene conto dell'incertezza nei metodi di calcolo e nei dati essendo determinato in base alla classe di sicurezza della strada/infrastruttura per le inondazioni ($F_u=1,2$).

I dati sull'intensità delle precipitazioni provenienti dalle stazioni meteorologiche regionali sono stati analizzati e utilizzati insieme alle caratteristiche del bacino idrografico, tra cui la pendenza, la forma e la superficie, per stimare il tempo di concentrazione utilizzando i due metodi suggeriti nel Manuale V240 (SVV, 2020) per bacini principalmente di tipo naturale: Berg et al (1992) [3] e Midttømme et al., 2011:

$$T_c = 0.6 \cdot L_f \cdot \Delta h^{0.5} + 3000 \cdot A_{se} \quad [3]$$

Dove T_c è il tempo di corrivazione [min], L_f è la lunghezza dell'asta (deflusso) [m], Δh è il dislivello topografico [m] e A_{se} è il percentuale effettivo di acque interne (laghi) nell'area di bacino [-] speso come una frazione e non come percentuale ($0 < A_{se} < 1$).

Sulla base di queste determinazioni sono stati costruiti gli idrogrammi utilizzando i volumi e le durate stimati, che sono stati applicati alla modellazione idraulica con lo strumento HY-8 (FHWA Culvert Analysis Software) (FHWA, 2012) per simulare le prestazioni del canale di attraversamento in diversi scenari di deflusso. La Tabella 1 riassume i risultati ottenuti per la portata di picco.

Dopo aver analizzato le caratteristiche del sistema e la climatologia *in situ*, si è proposto come materiale per il *relining* una malta cementizia bicomponente composta da cementi ad alta resistenza, aggregati a grana fine selezionati, additivi speciali e polimeri sintetici in dispersione acquosa (tipo MAPEFINISH), con elevata adesione alle superfici in calcestruzzo. Il prodotto scelto è conforme ai principi definiti nella norma EN 1504-9 ("Prodotti e sistemi per la protezione e il ripristino di strutture in calcestruzzo: definizioni, requisiti, controllo della qualità e valutazione delle non conformità. Principi generali per l'uso di prodotti e sistemi"). Il tipo di materiale proposto è stato testato sperimentalmente per determinarne il coefficiente di rugosità necessario alla valutazione della portata e della capacità della tubazione. Come

risultato, il valore di conduttanza idraulica di Gaukler-Strickler (Ks) ottenuto dai test è risultato pari a $83 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (con un coefficiente di Manning (n) = $0,012 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$).

Tabella 1. Portata di progetto calcolata per diversi periodi di ritorno (Q) ed effetto climatico

Scenario del periodo di ritorno	Portata di picco Q (m ³ /s)
10 anni	0.25
50 anni	1.54
100 anni	2.65
200 anni	4.18
200 anni + Fattore climatico (30%)	5.43

Le prestazioni della tubazione prima e dopo il *relining* sono state valutate utilizzando l'equazione di Manning e le simulazioni effettuato con HY-8. Il condotto originale, con rugosità $n = 0,017 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$, aveva una capacità di scarico limitata a $2,11 \text{ m}^3/\text{s}$. Dopo il rivestimento cementizio ed epossidico è possibile raggiungere $n = 0,012 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$, per il quale la capacità del condotto aumenta a $3,13 \text{ m}^3/\text{s}$, circa il 48% in più. In Tabella 2 si riporta in dettaglio la variazione di capacità:

Tabella 2. Capacità di scarico del canale di attraversamento prima e dopo il rivestimento

Condizione	Coefficiente di Manning (n)	Capacità idraulica massima (m ³ /s)
Prima del rivestimento	0.017	2.11
Dopo il rivestimento	0.012	3.13

3.1. Implementazione del rivestimento interno (*relining*)

La sequenza di *relining* descritta è schematizzata in Figura 2 ed inizia con la pulizia meccanica e il getto d'acqua ad alta pressione per rimuovere sedimenti e detriti. La successiva ispezione con telecamera a circuito chiuso permette la verifica della continuità strutturale e la conferma dell'idoneità al rivestimento. In seguito, si procede con la applicazione di uno strato cementizio tipo MAPEFINISH per levigare la superficie interna e migliorare l'adesione. Successivamente, si inserisce un rivestimento impregnato di resina epossidica, espanso per adattarsi alla geometria del condotto e polimerizzato con luce ultravioletta. Questo metodo garantisce il contatto completo con il tubo ospitante e riduce al minimo le sollecitazioni strutturali evitando scavi e garantendo il funzionamento della ferrovia durante il procedimento.

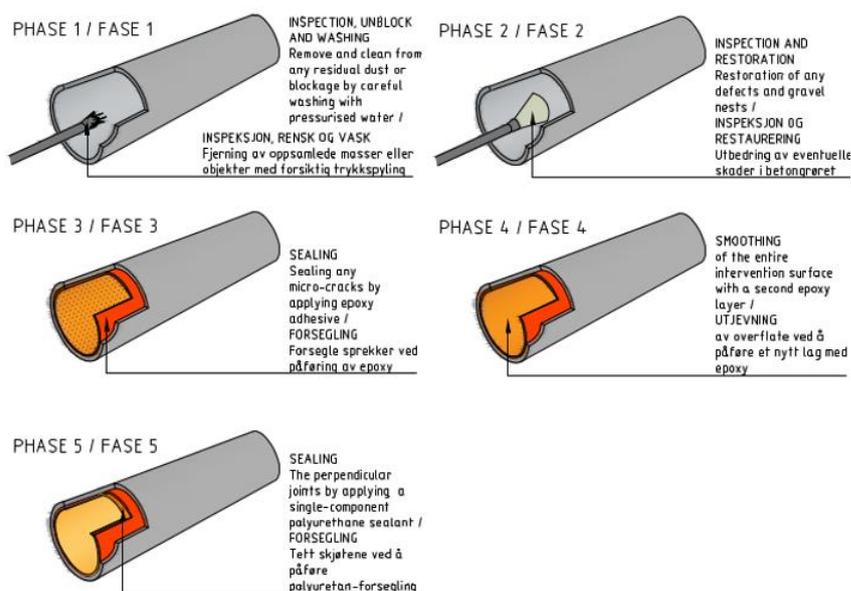


Figura 2. Schematizzazione della sequenza di implementazione di rivestimento interno nella tubazione in studio di attraversamento sotto la ferrovia

3.2. Deviazione del corso d'acqua e opere complementari

La deviazione temporanea è fondamentale per mantenere il flusso idrico e ridurre al minimo le interruzioni durante il rifacimento, garantendo il rispetto delle tempistiche progettuali e la tutela dell'ambiente. Inoltre, per preservare fauna e condizioni ambientali è fondamentale mantenere il deflusso a valle.

A causa delle difficoltà di accesso e della necessità di ripristinare il flusso a valle dei canali sotterranei ferroviari, durante il processo di implementazione il corso d'acqua sarà temporaneamente deviato attraverso il canale sotterraneo settentrionale (diametro 2200 mm) durante la stagione delle piogge scarse. Questo approccio supporta le attività ingegneristiche e mitiga l'impatto ecologico mantenendo la continuità degli habitat acquatici durante la costruzione.

Un tubo a pressione collegherà l'ingresso del canale sotterraneo al km 26,550 al corso d'acqua e canale di attraversamento settentrionale, per una lunghezza di circa 160 metri. Una barriera di contenimento, costituita da sacchi di sabbia o materiali simili posizionati nel corso d'acqua, creerà una diga temporanea con un'area allagata limitata, consentendo il pompaggio necessario per la deviazione del corso d'acqua.

La figura mostra i lavori di deviazione temporanea concordati con BaneNOR e le parti interessate, illustrando l'allineamento per la deviazione del corso d'acqua al fine di ridurre al minimo il disturbo ambientale e garantire l'efficienza delle operazioni di rifacimento del rivestimento.

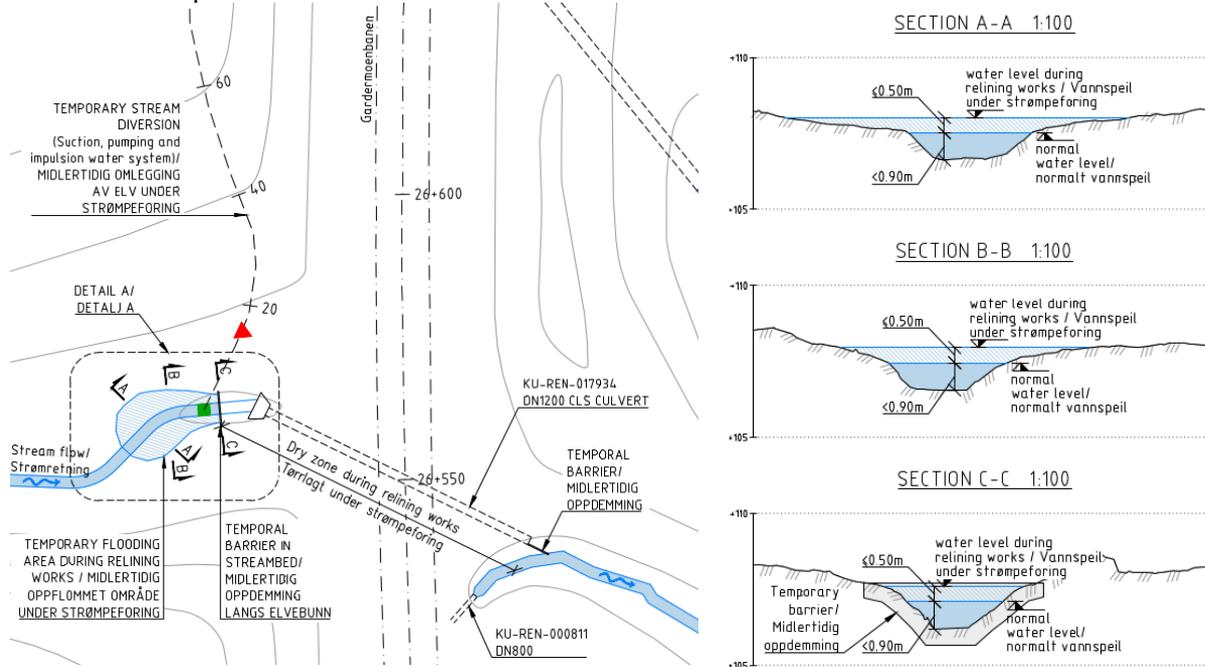


Figura 3. Schematizzazione della deviazione temporanea del flusso nel torrente per la implementazione della tecnica di relining nel canale di attraversamento ferroviario

4. RISULTATI

4.1. Analisi idrologica e idraulica

Per valutare la distribuzione temporale della portata durante eventi di pioggia estrema con diversi periodi di ritorno (50, 100, 200 anni e uno scenario di 200 anni con effetti dei cambiamenti climatici), è stata condotta una valutazione idrologica completa utilizzando i dati sulle precipitazioni, l'uso del suolo e le caratteristiche del suolo del bacino idrografico affluente con sbocco nel canale di attraversamento di interesse. La delimitazione topografica e del bacino idrografico è stata effettuata utilizzando il software SCALGO Live, così come per la modellizzazione idrologica (idrodinamica) di base, le mappe delle piene improvvise e la prima valutazione del volume di deflusso da diversi tipi di copertura del suolo (Scalgo, n.d.). I dati sulle precipitazioni sono stati ricavati dalle stazioni di Oslo-Vestli e Gardermoen Sør, utilizzando le curve IDF del portale dell'Agenzia norvegese per l'ambiente e i dataset dell'Atlante NVE (Norwegian Environment Agency, n.d.).

I numeri di curva (CN) sono stati stimati sulla base delle caratteristiche specifiche del suolo e della copertura del suolo per l'intero bacino idrografico tributario, mentre il tempo di concentrazione è stato calcolato utilizzando due metodologie raccomandate nel Manuale V240, come descritto in precedenza. Il deflusso di picco e gli idrogrammi sono stati calcolati utilizzando il metodo SCS (Soil Conservation Service). Come richiesto dal Manuale N200 (SVV, 2018), sia i cambiamenti

climatici che l'incertezza sono stati considerati nei calcoli del flusso di progetto attraverso l'applicazione di fattori di sicurezza ($F_u = 1,2$) e climatici ($F_k = 1,3$).

Gli idrogrammi generati per ciascuno scenario di periodo di ritorno (Figura 4) indicano che la condotta in calcestruzzo originale, con una portata massima stimata di $2,11 \text{ m}^3/\text{s}$ in condizioni ottimali, sarebbe stata sufficiente a convogliare un evento con periodo di ritorno pari a 50 anni, ma non adeguata a eventi con periodo di ritorno di 100 anni o superiori. Tuttavia, durante l'evento Hans, nonostante il periodo di ritorno stimato inferiore a 50 anni, l'elevato trasporto solido proveniente dal tratto a monte, unito a una manutenzione insufficiente, dovuta alle difficoltà di accesso, ha creato condizioni critiche sulla reale capacità di deflusso del sistema. L'accumulo di sedimenti ha infatti innestato un meccanismo di riduzione progressiva della sezione idraulica utile e della velocità dell'acqua, favorendo ulteriormente la sedimentazione. Alla luce di questi fenomeni, la necessità di intervento non solo riguarda l'adeguamento idraulico dell'attraversamento, ma anche la adozione di soluzioni per una più efficace gestione dei sedimenti a monte.

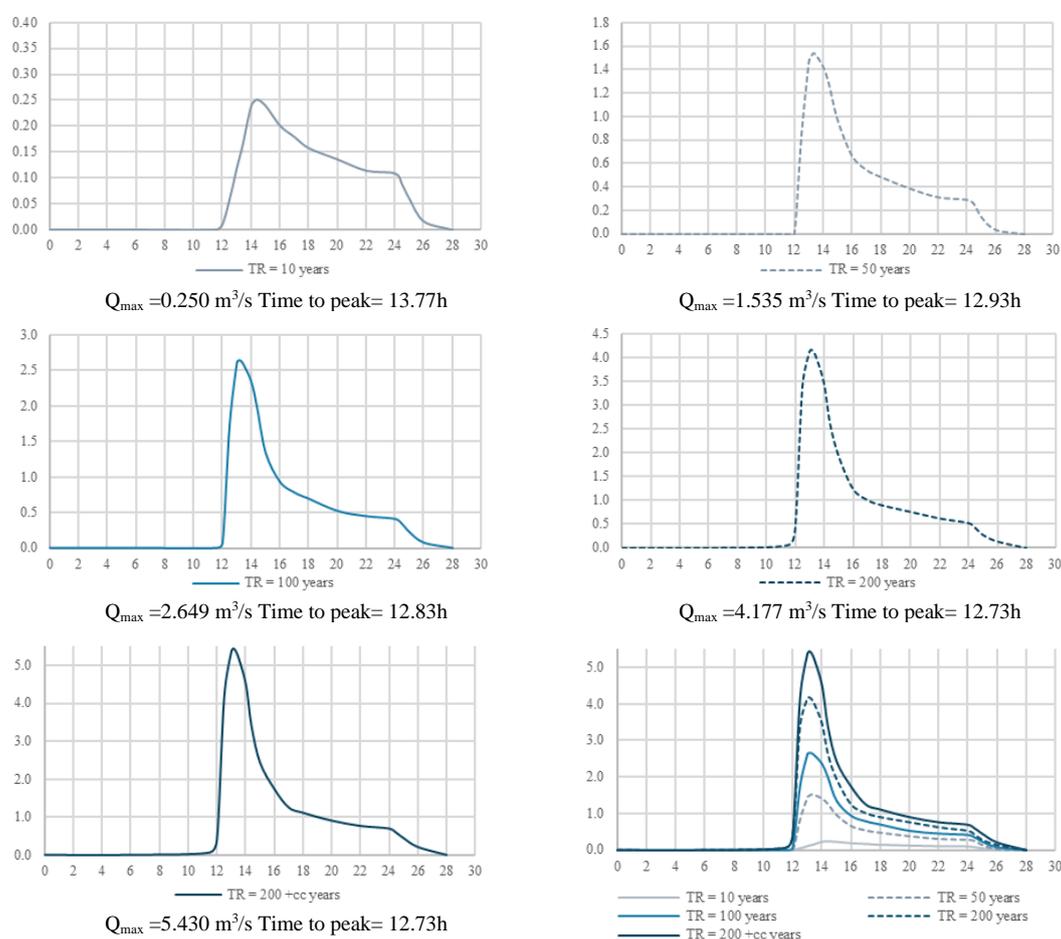


Figura 4. Idrogrammi generati per ogni scenario di periodo di ritorno

L'analisi idraulica, eseguita utilizzando il modello HY-8, evidenzia significativi miglioramenti nell'efficienza di trasporto dopo l'intervento di rivestimento interno della tubazione di attraversamento sotterraneo grazie alla superficie interna più liscia e in conseguenza della riduzione del coefficiente di Manning (n) utilizzato per il calcolo. Le simulazioni di flusso hanno mostrato che le velocità post-intervento sono aumentate e che i livelli delle acque a monte sono costantemente ridotti per tutti i periodi di ritorno. La Tabella 3 riassume i parametri idraulici modellati prima e dopo il rivestimento per vari periodi di ritorno.

Per visualizzare e convalidare le prestazioni idrauliche nei diversi scenari, sono stati utilizzati grafici generati tramite HY-8 (Figura 5) al fine di confrontare i livelli dell'acqua a monte del controllo di ingresso e le portate. Questi grafici hanno dimostrato che, mentre il canale di attraversamento rivestito era in grado di gestire adeguatamente eventi con periodicità di 50 e 100 anni, raggiungeva la capacità massima con eventi di periodicità di 200 anni e risultava insufficiente per lo

scenario climatico con periodicità superiore a 200 anni senza supporto di sfioro. Questi risultati hanno supportato l'inclusione di misure complementari di deviazione del flusso.

Tabella 3. Riepilogo dei parametri idraulici modellati prima e dopo il processo di relining, con dettagli sulle variazioni osservate nei diversi periodi di ritorno

Periodo di ritorno	Velocità (m/s) - Prima	Velocità (m/s) - Dopo	Elevazione del livello d'acqua (m) - Prima	Elevazione del livello d'acqua (m) - Dopo
50 anni	2.33	2.63	107.33	107.24
100 anni	2.92	2.96	107.80	107.73
200 anni	3.76	3.81	109.14	109.10

Il miglioramento delle prestazioni è stato illustrato anche nella Figura 5, che mette a confronto la capacità dei tubi di drenaggio prima e dopo il rivestimento utilizzando simulazioni HY-8, qui per semplificazione solo si riportano le simulazioni per 50 e 100 anni di periodo di ritorno. Sebbene i miglioramenti siano evidenti per eventi con periodicità di 50 e 100 anni, il flusso con periodicità di 200 anni con cambiamenti climatici continua a superare i limiti del sistema, indicando la necessità di misure supplementari, come la ritenzione a monte.

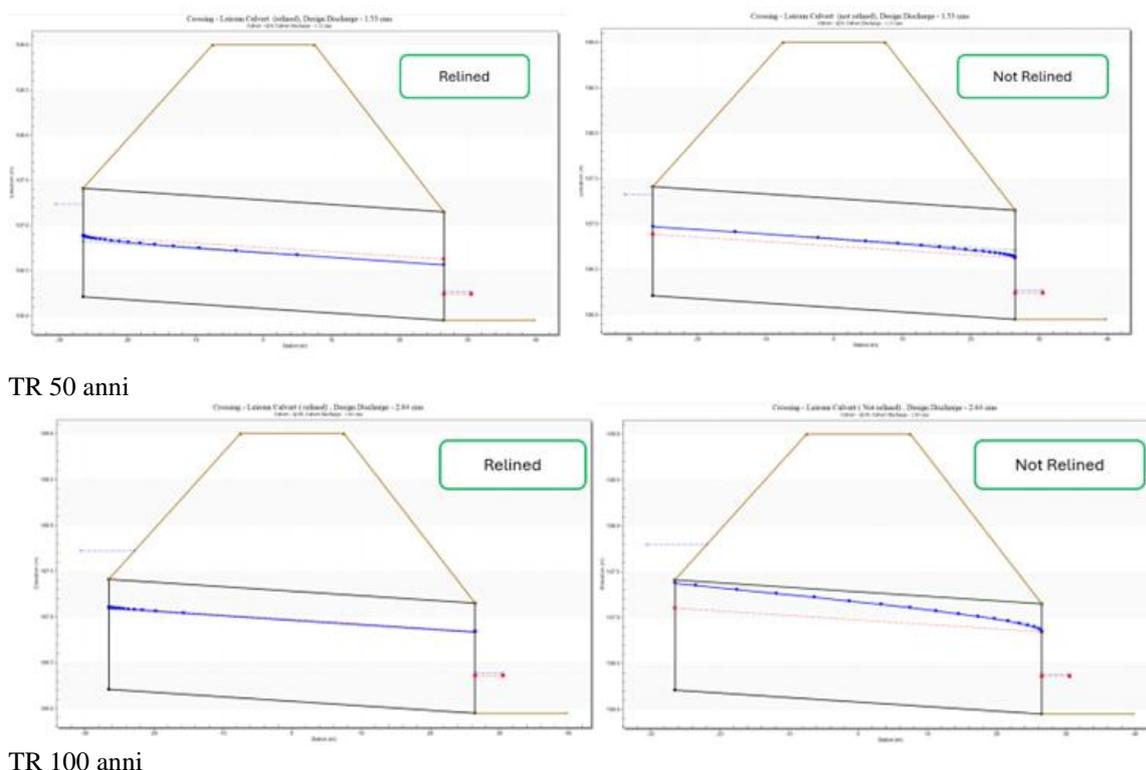


Figura 5. Curve di riempimento della tubazione di attraversamento durante portata di punta corrispondente agli scenari TR 50 e 100 anni di eventi di pioggia estremi. Situazione pre e post rivestimento

4.2. Capacità del canale di attraversamento con rivestimento

Un'analisi comparativa, che utilizza un coefficiente di Manning pari a 0,012 per la tubazione rivestita rispetto allo 0,017 per quello originale, ha rivelato un aumento sostanziale della capacità di trasporto. Il canale di attraversamento, nella sua versione rivestita, è stato in grado di convogliare volumi d'acqua notevolmente maggiori, mantenendo livelli e velocità dell'acqua a monte accettabili e favorevoli al trasporto dei sedimenti.

I risultati hanno dimostrato che il rivestimento con un miglioramento della struttura di ingresso consente inoltre al sistema di sopportare un periodo di ritorno di 100 anni senza tracimare, offrendo un aumento della capacità del 48% rispetto alla

struttura esistente. Tuttavia, per scenari più estremi, in particolare un periodo di ritorno di 200 anni con cambiamenti climatici (Q200 + CC), la tubazione raggiunge i suoi limiti di capacità anche in condizioni idrauliche ottimizzate. È stato ulteriormente analizzato uno scenario di controllo utilizzando una frazione del 75% di Q200 + CC, mantenendo un rapporto $Hw/D \leq 1,25$, considerato il limite massimo per prestazioni idrauliche accettabili in condizioni di flusso limitato con trasporto di sedimento durante l'evento straordinario. In condizioni di elevato carico di sedimenti e detriti, continua ovviamente a rappresentare una sfida nel convogliamento delle acque nell'attraversamento, sottolineando la vulnerabilità del sistema senza infrastrutture di supporto aggiuntive.

4.3. Impatto previsto sulla mitigazione delle inondazioni

Per gestire il deflusso in eccesso che supera la capacità del canale di attraversamento durante eventi meteorologici estremi, si propone un bacino di ritenzione complementare (bacino di raccolta) con funzione di sedimentazione aggiuntiva. Questa struttura ha lo scopo di immagazzinare temporaneamente l'acqua, consentendo un deflusso graduale una volta che le portate di picco si siano attenuate, e di migliorare la sedimentazione prima della re-immissione nel sistema fluviale. L'analisi idrografica ha quantificato i volumi totali di deflusso per ciascun periodo di ritorno e sono stati calcolati i volumi di stoccaggio corrispondenti quando il flusso di attraversamento limite è fissato a 2,41 m³/s (Tabella 4):

Tabella 4. Volume totali di deflusso e stoccaggio richiesto a deflusso limite 2.41 m³/s per periodo di ritorno

Periodo di ritorno (anni)	Volume Totale del idrogramma (m ³)	Volume di stoccaggio richiesto a 2,41 m ³ /s (m ³)	Percentuale del volume totale dell'evento
10	6 594.4	Non richiesto (capacità della conduzione sufficiente)	-
50	23 391.0		-
100	34 943.7		-
200	49 531.6	18 412	37%
200 + cambiamento climatico	64 391.2	25 142	39%

Il bacino di detenzione deve essere posizionato con accuratezza per ottimizzare la connettività idraulica con il torrente e consentire un'efficace deviazione e re-immissione, tenendo conto sia dell'idoneità topografica che dell'accessibilità per la manutenzione a lungo termine. Le fasi future del progetto perfezioneranno la geometria di stoccaggio e le prestazioni di sedimentazione per garantire il raggiungimento degli obiettivi di mitigazione delle inondazioni.

5. DISCUSSIONE

5.1. Implicazioni per la sicurezza e l'esercizio ferroviario

L'implementazione del metodo senza scavo mediante *relining* si è rivelata fondamentale per mantenere l'integrità strutturale e operativa della linea ferroviaria Gardermobanen durante eventi di pioggia estrema. Date le condizioni di copertura superficiale e di resistenza geotecnica del sottosuolo, il *pipe-bursting* è stato escluso a causa del rischio associato di sollevamento del terreno, che avrebbe potuto compromettere la stabilità della ferrovia. La tecnica di *relining* scelta ha offerto una soluzione minimamente invasiva che ha garantito la continuità del servizio, in linea con le priorità operative del committente (BaneNOR).

5.2. Prestazioni idrauliche e ambientali

La maggiore capacità idraulica, con un aumento fino al 48% rispetto alla condotta originale, riduce significativamente il rischio di ostruzione dell'ingresso e di allagamento. Ciò è particolarmente evidente in scenari con periodi di ritorno di 50 e 100 anni, in cui sia la velocità che l'elevazione dell'acqua a monte sono ottimizzate per favorire il trasporto dei sedimenti fini, riducendo così il rischio di depositi all'ingresso del canale di attraversamento ferroviario o al suo interno. Tuttavia, in condizioni climatiche con un periodo di ritorno superiore a 200 anni, il sistema raggiunge comunque i suoi limiti di progettazione. Ciò indica la necessità di infrastrutture complementari, come un bacino di ritenzione offline, proposto per gestire volumi di deflusso eccezionali.

Inoltre, l'impatto ambientale è stato ridotto al minimo. La tecnica senza scavo ha evitato l'escavazione e preservato gli habitat locali, in linea con l'obiettivo più ampio dello sviluppo di infrastrutture sostenibili. La riduzione dell'interruzione del servizio e del disturbo della superficie ha contribuito anche all'accettazione sociale e ambientale.

In questo caso, la soglia di rischio accettabile è stata determinata sulla base di periodi di ritorno fino a 200 anni, per il cui rischio di alluvione è definito sia dalla probabilità che dalle conseguenze di eventi estremi secondo la norma NS 5814:2008 (SN, 2008). Nella considerazione di un rischio accettabile l'intervento ha previsto un'area di pianura alluvionale controllata che funge da *buffer* temporaneo durante eventi di portata estrema, fornendo una protezione funzionale per l'infrastruttura ferroviaria che non viene raggiunta dall'acqua nella zona di allagamento temporaneo. Questi risultati dimostrano che la soluzione adottata soddisfa i criteri di sicurezza nazionali e le norme tecniche di BaneNOR, garantendo la resilienza a lungo termine.

5.3. Efficacia in termini di costi e implicazioni più ampie

Mentre i costi iniziali di installazione del rivestimento interno della condotta sono stati stimati produrre un risparmio compreso tra il 35% e il 40% rispetto al costo totale richiesto dai metodi tradizionali a cielo aperto, il beneficio complessivo diventa più evidente se si includono i risparmi indiretti, come la riduzione dei costi di ripristino ecologico, di intervento sul territorio e di interruzione dell'attività, nonché gli effetti sociali (Chan & Eng, 2022) (Pipelife, 2022), a conferma del vantaggio del *relining* non solo in termini di fattibilità, ma anche di ritorno sull'investimento a lungo termine. Questo caso costituisce un precedente per futuri progetti di mitigazione delle inondazioni in infrastrutture ferroviarie vulnerabili. Esso evidenzia il valore dell'integrazione dell'innovazione tecnica con la sensibilità ambientale, soprattutto in un contesto di crescente variabilità climatica. Gli interventi futuri potrebbero trarre vantaggio dall'adozione di un approccio ibrido che combini l'ottimizzazione idraulica con soluzioni basate sulla natura per una maggiore adattabilità.

6. CONCLUSIONE

Il *relining* senza scavo del canale di attraversamento ferroviario di Lillestrøm ha risolto con successo un grave rischio di alluvione utilizzando una soluzione che bilancia le prestazioni idrauliche, la protezione dell'ambiente e la fattibilità operativa. Il *relining* ha ripristinato la capacità di deflusso, ridotto l'ostruzione dei sedimenti e prolungato la durata di vita dell'attraversamento sotterraneo. L'intervento non solo ha migliorato l'efficienza idraulica, ma ha anche dimostrato il valore dei metodi non invasivi in ambienti urbani e di trasporto con spazi limitati.

Misure complementari di controllo delle inondazioni, tra cui la detenzione, lo smaltimento delle acque in eccesso e la stabilizzazione dell'erosione, hanno rafforzato la resilienza del sistema contro futuri eventi di pioggia estrema. Nel loro insieme, questi sforzi sono in linea con gli standard nazionali di gestione delle inondazioni e con gli obiettivi di adattamento al clima. Il progetto ha fornito un modello replicabile per interventi simili lungo la ferrovia Gardermobanen e laddove le infrastrutture debbano essere ottimizzate senza compromettere la continuità del servizio.

Il lavoro futuro comprenderà ispezioni programmate, monitoraggio dei sedimenti e valutazione idraulica continua. Il successo di questo intervento sostiene la più ampia adozione di tecnologie *trenchless* (senza scavo) nella pianificazione della resilienza delle infrastrutture, in particolare laddove l'affidabilità del servizio e la sensibilità ecologica sono prioritarie.

7. RINGRAZIAMENTI

Questo progetto è stato finanziato da BaneNOR le cui conoscenze tecniche del caso di studio e supporto durante la progettazione sono state fondamentali per il successo dell'iniziativa.

8. REFERENZE

- BaneNOR (2014) Technical Regulations (TRV) for the Railway Network. TVR 520 "Substructure/Planning and construction. Chapter 11. Drainage. Available at: https://trv.banenor.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/Drenering
- Chan, W., & Eng, G. (2022). Pipe bursting allows non interrupted railway service for sewer replacement. International Society for Trenchless Technology (ISTT) North American No-Dig Conference, 381.
- Evrard, O., Persoons, E., Vandaele, K., & van Wesemael, B. (2007). Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt. Agriculture, Ecosystems & Environment. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2006.02.019>
- Federal Highway Administration FHWA (2024) Hydraulic Design of Highway Culverts. HY-8 Version 8.0.0. Available at www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/software/hy8/

- Glad, P. A., Stenius, S., Leine, A.-L. Ø., Væringstad, T., Holmqvist, E., Dahl, M.-P. J., & Trondsen, E. (2022). Guide no 1-2022. Guide for flood calculations in small unregulated fields (Veileder nr 1-2022. Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt). Norwegian Directorate of Water Resources and Energy (NVE).
- Granerød, M., Stabell, D., Mjelstad, H., Therese, H., & Tajet, T. (2023). METinfo Hendelserapport. No. 26/2023 Ekstremværet "Hans", ekstremt mye nedbør i deler av Sør-Norge 07.-09. august 2023 (Extreme storm "Hans", extremely high precipitation in parts of southern Norway 07-09 August 2023). Oslo: Meteorologisk institutet.
- IPBA (2012) Guideline for pipe bursting of the International pipe bursting association. (2012). The International Pipe Bursting Association (IPBA). Retrieved from www.nassco.org
- Jin, H., Piratla, K. R., & Matthews, J. C. (2015, August 18). Decision-Making Guidance for Culvert Rehabilitation and Replacement Using Trenchless Techniques. <https://doi.org/10.1061/9780784479360.132>
- Kaushal, V., & Najafi, M. (2020). Comparative Assessment of Environmental Impacts from Open-Cut Pipeline Replacement and Trenchless Cured-in-Place Pipe Renewal Method for Sanitary Sewers. <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES5060048>
- Krizek, R. J., Parmelee, R. A., Kay, J. N., & Elnaggar, H. A. (1971). Structural analysis and design of pipe culverts. NCHRP Report.
- Matthews, J. C., Selvakumar, A., & Condit, W. (2012). Demonstration and evaluation of an innovative water main rehabilitation technology: Cured-in-Place Pipe (CIPP) lining. *Water Practice & Technology*. <https://doi.org/10.2166/WPT.2012.028>
- Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). (2014). Reestablishing vegetation on interventions along rivers. A compilation of methods and experiences from the Tana River valley.
- Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). (2016) Rapport nr 81-2016. Klimaendringer og framtidige flommer i Norge, 09.2016
- Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). (2016) JBV & SVV: Rapport nr 28-2016. Overvannshåndtering og drenering for veg og jernbane. Naturfareprosjektet Delprosjekt 5 Flom og vann på avveie, 2016
- Norwegian Environment Agency portal. (n.d.). Retrieved from Miljødirektoratet.no
- SN. STANDARD NORWAY (2008) 2008. Requirements to risk assessments (In Norwegian). NS 5814:2008.
- NVE Atlas and cartographic data. (n.d.). Retrieved from <https://www.nve.no/>
- Pipelife (2022) Pipe Bursting for Non-Disruptive Renewal of Water Main in Heimdal. (2022, January 26). Retrieved February 2, 2025
- Putri, M. M. (2014). Hydraulic capacity of culverts under sediment transport.
- SCALGO Live (no date) Main website. [Online]. Available at: <https://scalgo.com/en-US/> (Accessed: March 20, 2025).
- Scholz, M. (2015). Capacity Down Pipe: Comparisons with Other Sustainable Drainage Systems. *Science Discovery*. <https://doi.org/10.11648/J.SD.S.2015030201.12>
- Simicevic, J., & Sterling, R. L. (2001). Guideline for pipe bursting. Technical report #2001.02 (U. S. A. C. of Engineers, Ed.). U.S. Army Corps of Engineers. Engineering Research and Development Center (ERDC).
- Syachrani, S., Jeong, H. S., Rai, V., Chae, M. J., & Iseley, T. (2010). A risk management approach to safety assessment of trenchless technologies for culvert rehabilitation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2010.05.005>
- Statens vegvesen (SVV). (2018) Handbook N200. Road construction (Håndbok N200 Vegbygging). Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration).
- Statens vegvesen (SVV). (2018b) Rapport Nr.681 Lærebok Drenering og håndtering av overvann. Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration).
- Statens vegvesen (SVV). (2020) Handbook V240. Water management Flood calculations and hydraulic dimensioning. (2020). Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration). Retrieved from www.vegvesen.no
- Tetreault, J., Moore, I. D., Hoult, N. A., Tanzil, D., & Maher, M. (2018). Development of a Sustainability Evaluation System for Culvert Replacement and Rehabilitation Projects. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000315)