

CONSIDERAZIONI SULLA SUBSIDENZA PRODotta DAL DRENAGGIO DI ACQUIFERI PROFONDI

Premessa

Tradizionalmente i fenomeni di subsidenza nelle rocce cristalline compatte come gneiss e graniti sono ritenuti trascurabili, ma osservazioni recenti hanno dimostrato che questa assunzione non è sempre valida.

Il caso di studio più significativo (Zangerl C. e l.,2003) è quello del tunnel autostradale del San Gottardo in Svizzera, dove misurazioni geodetiche ad alta precisione hanno rivelato subsidenza in superficie fino a 12 cm lungo un tratto di circa 10 km, situato diverse centinaia di metri sopra il tunnel.

Questo risultato è sorprendente perché la profondità del tunnel (diverse centinaia di metri) farebbe considerare praticamente nulli gli abbassamenti del livello del suolo, e la litologia (rocce cristalline compatte) suggerirebbe un comportamento rigido e scarsamente deformabile.

L'analisi temporale e spaziale dei dati ha suggerito invece agli Autori una correlazione chiara tra la costruzione del tunnel (1970–1977), l'ingresso di acqua nel tunnel durante lo scavo, e la successiva evoluzione delle deformazioni superficiali.

Prima della realizzazione del progetto, si era notato un sollevamento orogenetico medio di circa 1 mm/anno, mentre dopo la costruzione si osserva una subsidenza significativa, causata da un processo di consolidazione idromeccanica su larga scala indotta dal drenaggio delle acque sotterranee: lo scavo del tunnel ha creato una depressione piezometrica e l'acqua fluisce verso il tunnel, riducendo la pressione neutra e aumentando gli sforzi efficaci fino a determinare deformazioni sensibili dell'ammasso roccioso.

Il drenaggio all'interno della galleria del Gottardo (sia per quanto riguarda la storica galleria autostradale sia per la più recente Galleria di base ferroviaria) è un processo costantemente in atto ed è attivo tutt'oggi durante il normale esercizio, non si è limitato alla sola fase di scavo.

Sotto il piano di transito scorrono tubazioni e canali di drenaggio che raccolgono queste acque e le trasportano costantemente verso l'esterno, ai portali di uscita (Nord e Sud).

Un aspetto cruciale della gestione attuale è la separazione dei liquidi. Le acque d'infiltrazione (pulite e calde, poiché riscaldate dal calore della roccia profonda) viaggiano in condotte separate rispetto alle acque di servizio o di lavaggio (potenzialmente inquinate da residui di pneumatici, oli o liquidi antincendio).

L'acqua pulita e calda che esce continuamente dai portali della galleria ferroviaria di base viene convogliata in appositi bacini di raffreddamento (come quelli di Pollegio a sud) per poi essere reimpressa nei fiumi locali a temperature ecologicamente compatibili, e sfruttata in superficie per il riscaldamento o progetti di acquacoltura.

Il sistema è così vitale che i piani di risanamento e raddoppio della galleria autostradale del Gottardo prevedono proprio il rifacimento e l'ottimizzazione di queste canalizzazioni, isolando in modo ancora più netto il drenaggio naturale della montagna dagli scarichi della circolazione stradale.

Si rileva che il fenomeno descritto è analogo, ma non identico, a quello osservato nei terreni soffici e nelle rocce sedimentarie, ed è poco documentato, anche se si è già verificato in almeno due casi importanti :

1)Caso di Oslo (Norvegia): la subsidenza era attribuita alle argille sopra il basamento roccioso.

2)Caso della diga di Zeuzier (Svizzera): subsidenza fino a 13 cm collegata a un tunnel distante 1.5 km.

2.Andamento della subsidenza nel tempo

Nella pubblicazione non è riportata una curva esplicita subsidenza-tempo, ma sono presenti solo valori geodetici in due epoche principali (1918–1970, 1970–1998) e profili spaziali di subsidenza (Figure 1, 4, 5)

Quindi la curva nel tempo va ricostruita indirettamente., tenendo presente che la legge temporale della subsidenza nel tempo è assimilabile a:

$$s(t) = s_{\infty}(1 - e^{-t/\tau})$$

dove:

- $s_{\infty} \approx 120$ mm
- τ = tempo caratteristico (qualche anno–decennio)

Quella rappresentata nella figura è quindi una ricostruzione coerente con il modello fisico descritto , ma per una curva reale servirebbero livellazioni intermedie (non pubblicate) oppure il report geodetico citato (Salvini 2002)

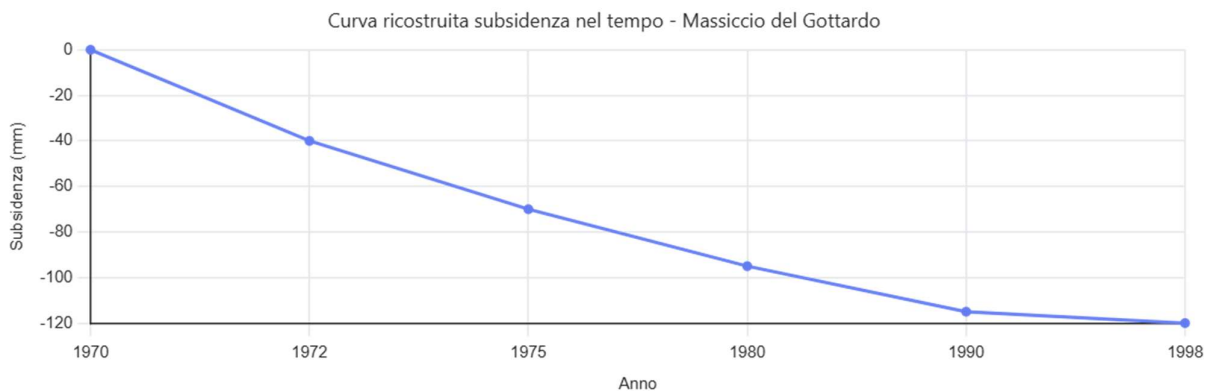


Figura 1: ricostruzione realistica della subsidenza nel tempo.

Alcune considerazioni sulle cause della subsidenza negli ammassi rocciosi cristallini

Nelle rocce cristalline, che permettono la circolazione attraverso le discontinuità di grandi dimensioni (faglie, fratture, diaclasi) e attraverso quelle meno visibili (leptoclasti) il meccanismo della riduzione di volume causato dal drenaggio parte dalla decompressione delle discontinuità maggiori, le faglie.

Queste dislocazioni , che si comportano alla stregua di camini per la circolazione dei fluidi, hanno un effetto diverso sulla piezometria secondo che presentino asperità, irregolarità , chiusure e interruzioni, o che siano invece ben aperte e continue. Questo effetto è rappresentato dal coefficiente di Biot, proporzionale allo stato di fratturazione; la sua determinazione gioca quindi un ruolo importante. Infatti , quando il fluido si accumula localmente vicino a una faglia, la sua pressione locale aumenta leggermente. in dipendenza dal coefficiente di Biot .Dato che il mezzo ha una risposta meccanica significativa ,questa

Engeology 27 maggio 2026

piccola sovrappressione indotta dal fluido può essere sufficiente a mantenere le faglie "aperte" (o più permeabili), favorendo la connettività idraulica tanto più quanto maggiore è il coefficiente di Biot.

Il coefficiente di Biot, indicato come α , misura in sostanza quanto la pressione dei pori contribuisce alla deformazione totale di una roccia porosa saturata.

Matematicamente:

$$\alpha = 1 - \frac{K_{\text{bulk}}}{K_{\text{solid}}}$$

dove:

K_{bulk} = modulo di compressibilità drenata della roccia (scheletro poroso, con pori vuoti)

K_{solid} = modulo della matrice solida (minerale)

- $\alpha = 1$ → lo scheletro è molto cedevole e tutta la pressione di poro contribuisce allo sforzo efficace (roccia molto fratturata o molto porosa).
- $\alpha = 0$ → roccia "perfetta" non porosa e non fratturata → la pressione dei pori non ha alcun effetto.

In pratica le rocce reali hanno $0.2 < \alpha < 1.0$.

Gli Autori hanno evidenziato che coefficiente di Biot agisce sulla subsidenza degli ammassi rocciosi che vengono drenati da un tunnel, in quanto eliminando con il drenaggio tutta o parte della pressione neutra abbiamo che aumenta il carico sull'ammasso, cioè lo stress efficace, che fa contrarre la roccia generando subsidenza. Valori massimi del coefficiente di Biot, vicini a 1, determinano le condizioni più favorevoli per la subsidenza.

Nel caso Gottardo si è accertato un valore $\alpha \approx 0.7$; sulla base delle predette relazioni la consolidazione della matrice produce 2–7 cm di subsidenza (solo matrice)

Se non si tenesse conto del coefficiente di Biot ($\alpha = 0$) questo abbassamento di una vasta area alla superficie del suolo non sarebbe previsto. Il coefficiente di Biot quindi controlla il trasferimento di carico fluido → roccia, regolando la deformazione volumetrica, che è ad esso proporzionale:

$$\varepsilon_v \propto \alpha \Delta p$$

Negli ammassi rocciosi le fratture drenano rapidamente, mentre la matrice risponde lentamente. La determinazione di α consente di chiarire quanto si possono deformare matrice intatta e apertura discontinuità; posto che la subsidenza è data da

$$\text{subsidenza} \sim \alpha \times \text{volume drenato} \times \text{compressibilità}$$

il coefficiente di Biot rappresenta il fattore di amplificazione della subsidenza da drenaggio

La valutazione di questo parametro fornisce quindi un prezioso contributo in sede progettuale, e sempre viene compiuta una iniziale stima teorica, che si ottiene dalla relazione:

Engeology 27 maggio 2026

$$\alpha = 1 - \frac{K_{dry}}{K_s}$$

dove:

- K_{dry} = modulo di compressibilità della roccia drenata
- K_s = modulo dei grani solidi

In quanto α dipende dalla rigidezza dello scheletro da un lato e dalla rigidezza dei minerali (quarzo, feldspati, miche) dall'altro.

Un metodo indiretto rapido (molto usato se mancano dati completi è quell di ricorrere alle misure di letteratura

Litologia	α
granito compatto	0.5 – 0.8
gneiss fratturato	0.6 – 0.9
rocce molto fratturate	1

Nel caso del Gottardo la roccia è gneiss fratturato , e il valore utilizzato dagli Autori è di 0.7.

Avendone la possibilità, si impostano poi le procedure per la misurazione diretta .

3. Discussione dei risultati

I risultati analizzati evidenziano come il fenomeno della subsidenza in ammassi rocciosi cristallini, tradizionalmente considerato trascurabile, possa invece assumere valori significativi quando intervengono condizioni favorevoli di drenaggio e accoppiamento idromeccanico.

Il caso del Gottardo dimostra in modo chiaro che il decremento della pressione neutra prodotto dal drenaggio del tunnel, che si protrae ancora oggi, determina l' aumento degli sforzi efficaci e può generare deformazioni cumulative misurabili a scala territoriale anche in rocce cristalline. La subsidenza osservata è sensibile ma modesta, compatibile con un processo di consolidazione lenta e distribuita.

Un elemento centrale che emerge è il ruolo non trascurabile della matrice rocciosa, oltre alle fratture. Infatti le fratture aperte danno rapidità all'abbassamento piezometrico e al drenaggio, mentre la matrice controlla la risposta deformativa nel lungo periodo.

3.1 Ruolo del coefficiente di Biot

Dall'analisi risulta che il coefficiente di Biot non è solo un parametro locale, ma un vero e proprio fattore di amplificazione della subsidenza, dal momento che valori elevati ($\alpha \approx 0.7$, come nel Gottardo) implicano un forte accoppiamento fluido–solido. Si sottolinea che i valori di quest coefficiente ricavati in laboratorio sono in generale inferiori a quelli misurabili o valutabili su scala regionale . Infatti in campo il valore α dell'ammasso (rock mass) è quasi sempre maggiore di quello dei test di laboratorio perché in presenza di fratturazione, anisotropia, eterogeneità, è scontato che esistano strutture geologiche particolarmente “deboli” caratterizzate da alto valore del coefficiente di Biot.

3.2 Effetti della stratificazione e dei parametri idraulici

L'analisi dei sistemi multistrato mostra che la subsidenza è il risultato di una integrazione verticale non lineare, dove la trasmissività controlla la distribuzione spaziale e temporale della pressione, l'immagazzinamento influenza il ritardo e la durata del fenomeno, mentre il coefficiente di Biot modula l'intensità della deformazione.

Ne derivano due comportamenti estremi:

Parametri idrogeologici	Effetto
Alta diffusività (T alta, S basso)	risposta rapida, subsidenza limitata
Bassa diffusività (T bassa, S alto)	subsidenza lenta ma prolungata

Fra i parametri caratterizzanti la struttura idrogeologica , è da sottolineare il ruolo determinante della connettività delle discontinuità aperte. Dal momento che tutti i parametri elencati sono influenzati dalla connettività idraulica, questo elemento strutturale emerge come fattore dominante. La connettività in sistemi ben connessi favorisce un flusso diffuso e continuo, in sistemi disconnessi dà origine a un comportamento discreto e non lineare, mentre in condizioni intermedie favorisce un comportamento complesso, con attivazione progressiva dei domini.

Questo implica che velocità della subsidenza varia sensibilmente nel tempo.

Conclusioni

L'analisi sviluppata consente di trarre alcune conclusioni generali di rilievo sia teorico che applicativo.

1. La subsidenza in rocce cristalline non è trascurabile , soprattutto in condizioni di drenaggio permanente di opere sotterranee , in quanto la creazione di depressioni piezometriche associate a tunnel modifica lo stato tensionale, induce consolidazione, può produrre effetti su larga scala e a lungo termine.
2. La subsidenza è un processo non lineare e multi-scala che dipende dalla combinazione di parametri idraulici (trasmissività, storage) proprietà meccaniche, struttura del sistema, in cui la connettività delle discontinuità aperte è il fattore dominante.
3. Nei progetti per la previsione della subsidenza è necessario integrare dati geologici, idraulici e geomeccanici, distinguendo anzitutto la rete delle fratture aperte connesse , la matrice, i compartimenti isolati.

Bibliografia

Zangerl, C.; Eberhardt, E.; Loew, S.; Evans, K.F. (2003)

Coupled hydromechanical modelling of surface subsidence in crystalline rock masses due to tunnel drainage

In: *ISRM 2003 – Technology Roadmap for Rock Mechanics*.

Editore: South African Institute of Mining and Metallurgy.

Caso Gottardo (Svizzera), subsidenza fino a 12 cm legata al drenaggio profondo.

1. **Zangerl, C.; Eberhardt, E.; Loew, S. (2003)**

Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock: numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms

Rivista: *Hydrogeology Journal*, Vol. 11. Editore: Springer. Analisi dettagliata del caso Gottardo e meccanismi HM accoppiati.

2. **Zangerl, C. (2003)**

Analysis of Surface Subsidence in Crystalline Rocks above the Gotthard Highway Tunnel, Switzerland

Tesi di dottorato, ETH Zürich. Studio completo (monitoraggi + modellazione).

3. **Karlsrud, K.; Sander, L. (1979)**

Subsidence problem caused by rock-tunnelling in Oslo

In: *Evaluation and Prediction of Subsidence*.

Editore: American Society of Civil Engineers (ASCE), New York. Caso Oslo: drenaggio attraverso roccia → consolidazione delle argille sovrastanti.]

4. **Lombardi, G. (1992)**

The FES rock mass model - Part 2: Some examples

Rivista: *Dam Engineering*, Vol. 3. Caso diga di Zeuzier (Svizzera): ~13 cm di subsidenza indotta da una galleria drenante in acquifero fratturato.

5. **Schmidt, B. (1989)**

Consolidation settlement due to soft ground tunneling

In: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro.

Editore: Balkema/ISSMGE. Rassegna di casi classici in terreni soffici drenati da tunnel

6. **Peck, R.B. (1969)**

Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground

In: *7th ICSMFE State of the Art Report*.

Editore: ISSMFE. Anche se più generale, include cedimenti da consolidazione indotta da drenaggio durante scavi in sotterraneo.

7. **Attewell, P.B.; Farmer, I.W. (1974)**

Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay

Rivista: *Canadian Geotechnical Journal*.

Editore: NRC Canada. Include effetti combinati di drenaggio e consolidazione.

8. **Mair, R.J.; Taylor, R.N. (1997)**

Bored tunnelling in the urban environment

In: *14th ICSMFE*.

Editore: Balkema. Riferimenti a subsidenza da drawdown piezometrico indotto da tunnel urbani.