



▶  
**PROF. MARCO  
BENVENUTI SU  
AFFIORAMENTO DI  
OFIOLITE**

**LOC. PONTE ALLA PIERA ANGIARI (AR)**

Foto di Stefano Farinelli

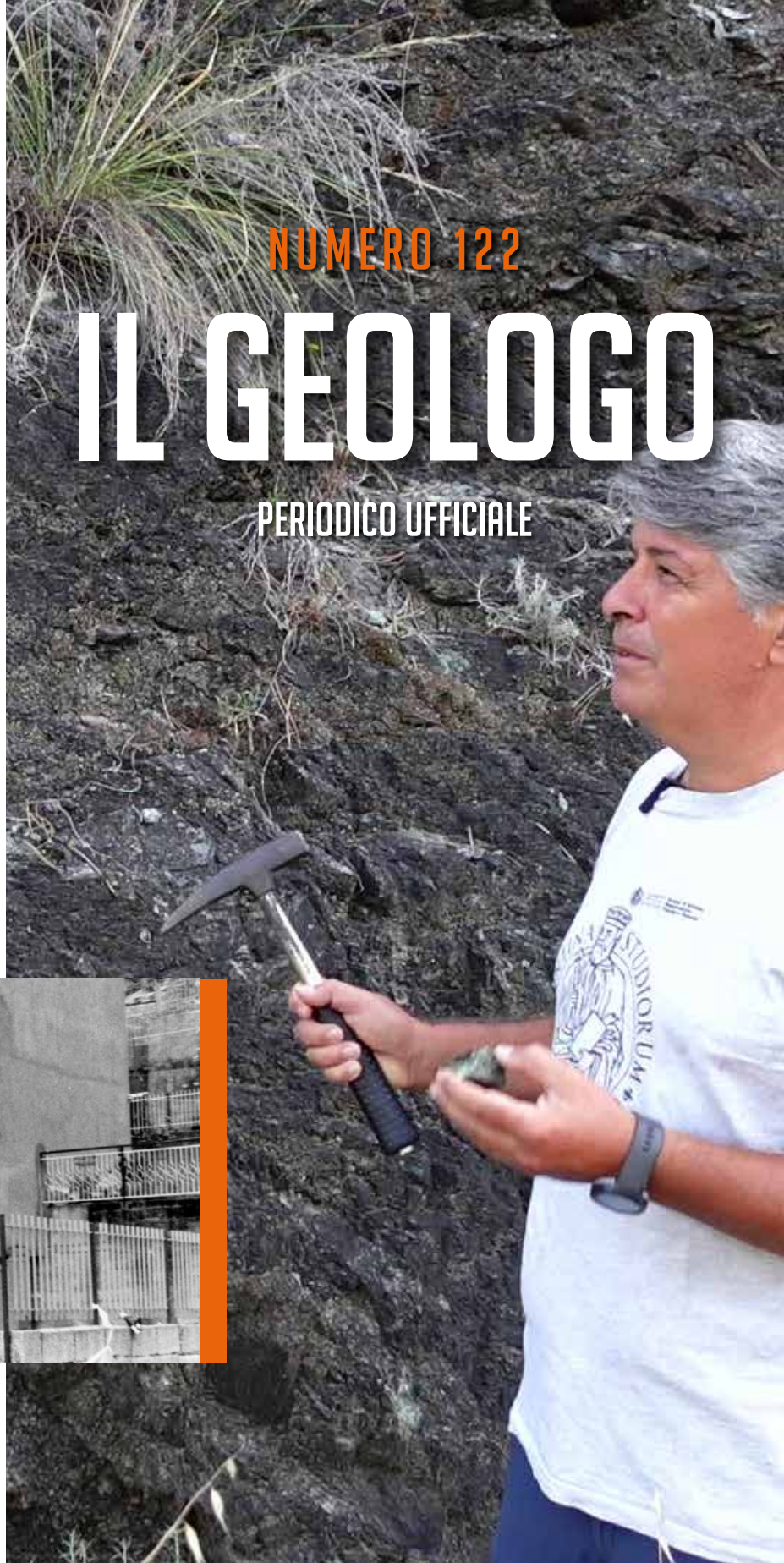
**LESIONE SU PARETE  
TRASVERSALE**

Articolo a Pagina 12  
▼



**ogt**

ORDINE del  
GEOLOGI della  
TOSCANA



**NUMERO 122**

# IL GEOLOGO

PERIODICO UFFICIALE

# Geognostica Medicea

## indagini geologiche e ambientali

Geognostica Medicea opera nel settore delle indagini di sottosuolo, garantendo un servizio completo in ambito geognostico e ambientale.

La notevole esperienza maturata negli anni in tutte le tematiche relative al sottosuolo e la rapidità di intervento, fanno di Geognostica Medicea un partner affidabile per i professionisti e le imprese che operano nel settore geologico e ambientale.



Sondaggi

Prove penetrometriche

Geofisica

Iniezioni in falda

Misure inclinometriche

Bonifiche e monitoraggio ambientale

### Geognostica Medicea

Via del Botteghino 103

50018 – Scandicci (FI)

Daniele +39 349 6684494

Lorenzo +39 328 4896574

Email: [info@geognosticamedicea.it](mailto:info@geognosticamedicea.it)

# Sottocontrollo



Foto: Arianna Pesci - Elaborazione: Codevintec



Foto: CGT - Siena

## Strumenti - anche a noleggio - per: monitoraggio sismico

- > monitoraggio depositi sotterranei
- > monitoraggio infrastrutture
- > esplorazione faglie
- > microzonazione sismica

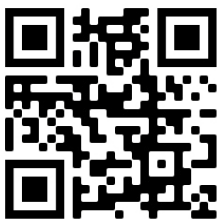
## gallerie, ponti, viadotti

- > analisi deformazioni o cedimenti
- > ricerca di vuoti, ammaloramenti, distacchi

## studio del sottosuolo

- > indagini sismiche
- > monitoraggio versanti in frana

Tecnologie



Codevintec rappresenta anche:



**CODEVINTEC**

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it



 KELLER

# KELLER UNPLUGGED!

LEVEL & GROUNDWATER MONITORING



KOLIBRI  
DESKTOP



## KELLER ADT1-TUBE

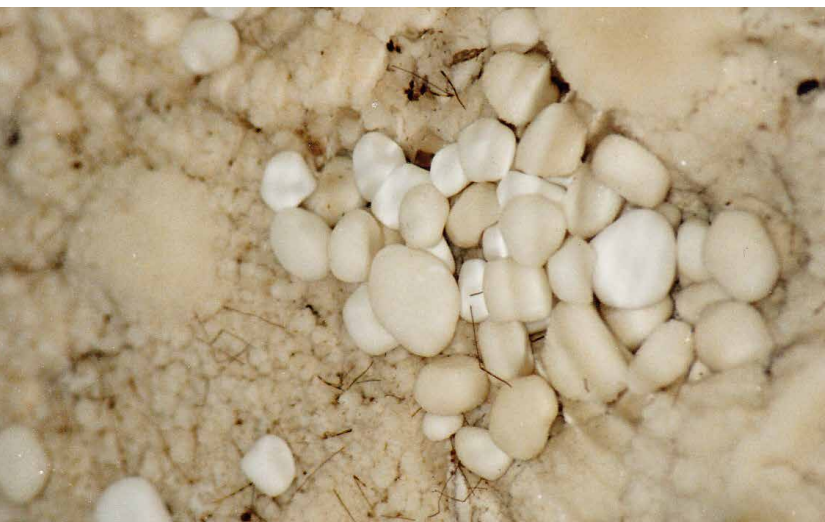
- Remote data transmission unit with logger function
- Measured values: barometer, temperature and moisture sensor, real-time clock (RTC), battery capacity / voltage
- For installation in 2" tubes
- Robust stainless steel metal housing
- Long-life battery enables autonomous operation for up to 5 years
- Software KOLIBRI DESKTOP included
- ADT1-Box available for wall installation

# N. 122

## SOMMARIO



**ESEMPIO DI CATTIVA OPERAZIONE DI RIEMPIMENTO DI TERRA  
DIETRO AL MURO DI SOSTEGNO**



**#FOTOGEOLOGIA**  
Foto di Antonio Muti

- 07 **EDITORIALE**  
RICCARDO MARTELLI  
Presidente dell'ordine dei Geologi  
della Toscana
- 09 **DALLA REDAZIONE**  
ALESSANDRO DANESI  
Coordinatore di redazione
- 10 **#FOTOGEOLOGIA**
- 12 **PILLOLE DI GEOTECNICA**  
Oggi parliamo della spinta  
delle terre
- 17 **TESI DI LAUREA**  
Analisi dei dati telerilevati per  
lo studio delle deformazioni del  
terreno indotte dalle attività di  
Underground Gas Storage
- 23 **TESI DI LAUREA**  
La rara paragenesi a cloritoide +  
biotite + granato nelle metapeliti  
della Lesser Himalayan Sequence  
(Himalaya Nepalese); petrografia,  
minero-chimica, reazioni  
metamorfiche e modellizzazione  
termodinamica

# COMUNICATO STAMPA – I°/2024

## LABORATORI GEOTECNICI AUTORIZZATI DELLA TOSCANA

### LE PROVE CERTIFICATE NON POSSONO ESSERE SOGGETTE A RIBASSO

#### NOTA DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI-SERVIZIO TECNICO CENTRALE

Negli ultimi mesi del 2023 le Associazioni dei laboratori, in relazione alla persistenza nella mancanza di applicazione di quanto previsto all'art. 116, comma 11 del D.Lgs 36/2023 (Codice dei Contratti Pubblici), hanno portato all'attenzione del Servizio Tecnico Centrale la difficoltà delle strutture autorizzate ad operare in un mercato che continua a praticare senza alcun controllo affidamenti indiretti ed in sub-appalto insieme all'istruzione di gare di appalto a prezzi non congrui ed in sostanziale spregio delle norme di legge.

Il Servizio Tecnico Centrale per la prima volta, con la nota 0001059 del gennaio 2024, ha preso posizione nei confronti di tale perdurante situazione attivando il tavolo tecnico relativo alla elaborazione del tariffario di riferimento nazionale per rispondere a quanto previsto dalla legge a tutela della sicurezza delle opere e delle persone a garanzia della terzietà delle strutture autorizzate.

E' intenzione del gruppo di lavoro, proprio a difesa delle prerogative attribuite ai laboratori prove autorizzati, nel rispetto delle norme di legge e delle regole della concorrenza, contrastare in ogni modo le irregolarità dei bandi e le pratiche commerciali scorrette che non tutelano né la dignità del nostro lavoro né gli interessi delle stazioni appaltanti sia pubbliche che private.



*Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*  
*Servizio Tecnico Centrale*

Con varie mail e note Codeste Associazioni hanno segnalato violazioni delle prescrizioni di cui il D.Lgs 36/2023 per l'affidamento ed il pagamento delle prove ufficiali di laboratorio ed *in situ* da parte di Amministrazioni pubbliche o Soggetti delegati a riguardo.

Trattasi delle indicazioni dell'art. 116 comma 11, che di seguito si riporta, in particolare per ciò che riguarda la disposizione che specifica che le relative spese non sono soggette a ribasso.

#### Art. 116

11. *Gli accertamenti di laboratorio e le verifiche tecniche obbligatorie inerenti alle attività di cui al presente articolo e alle attività di cui all'allegato II.14 oppure specificatamente previsti dal capitolato speciale d'appalto di lavori, sono disposti dalla direzione dei lavori o dall'organo di collaudo o di verifica di conformità, imputando la spesa a carico delle somme a disposizione accantonate a tale titolo nel quadro economico. Tali spese non sono soggette a ribasso. I criteri per l'individuazione dei costi sono individuati dall'allegato II.15. In sede di prima applicazione l'allegato II.15 è abrogato e sostituito da corrispondente decreto del Ministro delle infrastrutture e trasporti, adottato su proposta del Consiglio superiore dei lavori pubblici, che lo sostituisce integralmente anche in qualità di allegato al codice.*

Al riguardo si conferma che questo Servizio Tecnico Centrale si adopererà affinché tale disposizione venga correttamente applicata, anche attraverso la prossima attivazione del tavolo tecnico previsto all'art. 3 dell'allegato II.15 del D.lgs 36/2023.



**ogt**  
 ORDINE del  
 GEOLOGI della  
 TOSCANA

**EDITORIALE**

# IL PUNTO



IL GEOLOGO | EDITORIALE

**RICCARDO MARTELLI**

PRESIDENTE DELL'ORDINE DEI GEOLOGI DELLA TOSCANA

**C**are colleghe e cari colleghi, mancano dodici mesi al termine di questa consiliatura e lascio per l'ultimo editoriale il bilancio di questa lunga ed importante esperienza. Questo spazio mi è tuttavia propizio per anticipare quelle che saranno le tante attività che porteremo avanti insieme, prima di arrivare al termine di otto anni di grande lavoro collettivo, per cui vogliamo fortemente trovare continuità negli anni a venire, proseguendo una stagione fondata su una più ampia unione della nostra piccola grande comunità, orientata verso una stabile collaborazione con tutte le categorie dell'area tecnica.

A breve, saremo chiamati a portare il nostro contributo nel Congresso Nazionale dei Geologi, che si terrà a Palermo nel mese di maggio e lo faremo con gli interventi delle nostre iscritte ed iscritti nella loro veste di membri del CNG, di Epap e naturalmente di consiglieri dell'Ordine dei Geologi della Toscana. E' un congresso molto atteso, nel quale si discuterà di lavoro, di ricerca, di sostenibilità, in una parola, di futuro. Cercheremo insieme di rendere più nitida possibile l'immagine di quello che sarà lo scenario nel quale andremo a muoverci, quali le richieste del mercato, quali le offerte che saremo capaci di fornire

col nostro rinnovamento e con l'ulteriore consolidamento delle nostre competenze specifiche. Sarà un congresso che si articolerà in due tappe: a Palermo si darà inizio ad un percorso partecipativo con tavoli di lavoro che avranno il compito di elaborare e sintetizzare su quali pilastri poggerà il mondo delle Scienze della Terra di domani, e che troverà il suo compimento nella seconda tappa, prevista per il mese di novembre, a Genova. Forse, visto che lo sguardo andrà lontano, sarà davvero l'occasione di mettere da parte una volta per tutte la cultura frusta e poco attrattiva per le giovani generazioni, del geologo maschio



**ogt**  
ORDINE del  
GEOLOGI della  
TOSCANA

con la barba, vestito con pantaloni di velluto e camicia a quadri, l'Estwing nella mano destra ed il caschetto protettivo, magari provando anche a superare il complesso del geologo reietto, messo all'angolo dalle altre professioni cattive, che gli tolgono il pane da sotto i denti.

Chi oggi porta avanti questa professione è una donna, è un uomo, è un funzionario, una dirigente, un docente, una ricercatrice, geologhe e geologi che lavorano ogni giorno insieme a tutti i soggetti del mondo delle professioni tecniche e scientifiche, perché il lavoro è modulare e tutte le professionalità concorrono nel portarlo a compimento. Siamo membri stabili di una comunità allargata di tecnici e scienziati, all'interno della quale tutti sono chiamati a dare il proprio contributo di sapere e sensibilità.

Con questo spirito, nel prossimo autunno riproporremo l'assemblea degli iscritti dell'Ordine dei Geologi della Toscana, che si terrà a Firenze il 25 ottobre. In quella occasione

parleremo di risorse: oggi infatti la richiesta dei mercati si è orientata in modo netto, a causa delle pressanti necessità di una transizione ecologica, e culturale, aggiungo io. Sposteremo l'attenzione sulla nostra Toscana, per interrogarci su qual è stata la nostra esperienza nello sfruttamento delle risorse naturali, qual è l'attuale situazione e quali possono essere gli scenari che ci si prospettano davanti. Queste sono le domande alle quali cercheremo di dare una risposta con colleghe e colleghi che operano nel settore della ricerca e della modellazione del sottosuolo, invitando anche le amministrazioni a fornire il loro contributo sulle prospettive che abbiamo ed alle quali possiamo puntare. Il tema delle materie prime strategiche è attuale e molto pressante e vogliamo capire se, in questo contesto, possiamo ambire a fornire un contributo tecnico-scientifico qualificato o se dobbiamo accontentarci di restare solo testimoni di quello che accade. Sicuramente siamo protagonisti da sempre nei settori della geotermia e nel settore dell'estrazione di materiale lapideo,

dove la capacità tecnica della nostra categoria ed il grande rispetto e cura che rivolgiamo alla nostra Terra ci porta ad essere punti di riferimento per una gestione sostenibile di tali risorse.

Ma soprattutto lo siamo per la risorsa più preziosa che abbiamo: l'acqua.

Per questi grandi temi cercheremo di presentare studi avanzati e buone pratiche, per capire fin dove possiamo spingerci, quale bilancio possiamo permetterci.

Ogni tanto la congiuntura internazionale ci mette di fronte a nuove prospettive, ma la velocità con cui queste prospettive nascono e muoiono è sempre maggiore. Di questo si dovrebbe tener conto nella progettazione dei percorsi formativi delle nostre università, andando a potenziare le materie fondamentali come le matematiche, le fisiche, le chimiche e la geologia di base. Questo, nel renderci più capaci di osservare e descrivere i processi naturali, ci renderebbe ancor più flessibili.





**ogt**  
ORDINE del  
GEOLOGI della  
TOSCANA



**ALESSANDRO DANESI**  
COORDINATORE DI REDAZIONE

**C**are lettrici, cari lettori, eccoci ad un nuovo numero della rivista dei Geologi Toscani!

In questo numero è stato deciso di pubblicare, oltre alle consuete rubriche, la Tesi di un giovane laureato "figlio d'Arte" e futuro Geologo, che con intraprendenza e passione ha chiesto alla nostra redazione di veder pubblicato un abstract della sua Tesi di laurea.

Tutta la redazione ha accolto con entusiasmo l'arrivo di un documento da parte di un futuro collega augurandoci e augurando a Lui un futuro pieno di soddisfazioni professionali.

In queste settimane un tema si apre all'orizzonte occupando una parte dei nostri pensieri: è opportuno continuare

a stampare la rivista o trasformarla in una rivista online? Entrambe le possibilità hanno punti a favore e motivi di contrarietà e la scelta non è semplice, tuttavia essendo questa pubblicazione di tutti i Geologi Toscani ci auguriamo che ognuno voglia dare un contributo, un'opinione o un consiglio.

Riteniamo che la forma cartacea sia una estensione dell'operato degli autori e in qualche modo ci unisce tutti fisicamente anche se la carta stampata sta progressivamente lasciando il passo alle pubblicazioni digitali in tutti i campi.

In ogni caso questa è una decisione da prendere collegialmente con la massima partecipazione da parte degli iscritti pertanto, essendo

una decisione da affrontare in totale condivisione, organizzeremo momento di discussione e ascolto in occasione della prossima assemblea dei Geologi della Toscana che si terrà a Firenze il 25 ottobre 2024 (<https://www.geologitoscana.it/notizie-e-comunicati/assemblea-iscritti-2024-save-the-date/>).

A questo proposito troverete una pagina di presentazione dell'assemblea con i nuovi sponsor che sarà aggiornata con i programmi ed i temi nelle prossime settimane.

Ci auguriamo, come sempre, di ricevere da parte vostra segnalazioni, articoli, foto e tutto quanto vorreste vedere nella rivista di tutti i Geologi toscani.

Vi auguro una buona lettura.

**TECNA** Srl

Via Achille Grandi, 51 - 52100 AREZZO - tel **0575 323501**, fax **0575 1979797**, cell: **335 1020000**, e-mail: **tecna@geognostica.it**  
**AUTORIZZAZIONE MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI AD EFFETTUARE E CERTIFICARE PROVE GEOTECNICHE SUI TERRENI N. 4542 DEL 13/04/2012**

Perforazioni a carotaggio continuo

Perforazioni a distruzione di nucleo

Carotaggio continuo di tipo ambientale

Prove Penetrometriche statiche CPT

Prove Penetrometriche statiche CPTE

Prove Penetrometriche statiche CPTU

Prove penetrometriche dinamiche SPT

Prove penetrometriche dinamiche DPSH

Prove con dilatometro piatto Marchetti DMT



**CQOP SOA**  
CONSTRUTTORI QUALIFICATI OPERE PUBBLICHE  
OS 21 : II OS 20-B : I  
Attestazione : 65213 / 10 / 00

**IMQ**  
CERTIFIED  
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM  
ISO 9001:2015

**MORETTI**

Micropali e pali di sottofondazione

Tiranti a trefoli ed in barre, ancoraggi

Prove scissometriche VBT

**ANISIG**  
Associazione Nazionale  
Imprese Specializzate  
in Indagini Geognostiche

Pozzi per acqua

Prove permeabilità Lefranc

Prove permeabilità Lugeon

Prelievo campioni indisturbati

Installazione tubi inclinometrici

Installazione tubi per down-hole

Numero Verde  
**800 102000**



## #FOTOGEOLOGIA

Formazione del Macigno del dominio Toscano

A cura di Antonio Muti



All'interno delle gallerie di captazione delle sorgenti del nucleo Arenaceo della formazione del Macigno del dominio Toscano, che costituiscono ancora oggi gli acquedotti storici realizzati nel XIX sec per le comunità di Suvereto Sassetta e Castagneto Carducci, e più in generale in presenza di volumi concavi percorsi da acque che presentano alti livelli di ione  $\text{CO}_3^{--}$ , si possono osservare delle concrezioni carbonatiche all'interno di vaschette che devono la loro origine dal lento stillicidio delle gocce su piccoli residui organici formando queste piccole formazioni geologiche chiamate "Perle di Grotta".

Questo fenomeno è frequentissimo nelle grotte carsiche ma assume un aspetto unico all'interno delle formazioni terrigene delle Arenarie con appena il 10-15% di matrice carbonatica, rappresentando una rarità geologica.



A CURA DEL PROF. PIERO FOCARDI

## PILLOLE DI GEOTECNICA

# OGGI PARLIAMO DI SPINTA DELLE TERRE

**I**l bravissimo collega Gualberto Meazzini, insieme al quale per molti anni ho svolto attività professionale, parlando della spinta delle terre sui muri di sostegno diceva, scherzando “Se la terra non spinge tutti i muri tengono; se la terra spinge non c’è muro che tiene”.

Il fatto che tanti muri di sostegno in pietra, in mattoni, senza cementificazione e armature, stiano tranquillamente in piedi mentre altri di più forte struttura talvolta si lesionano e cadono parrebbe dar ragione all’assioma che la spinta può essere ben diversa nei vari casi fino ad essere in molti casi assente e in altri di elevata intensità.

### Cerchiamo di capire perché.

In un ammasso di terreno in condizioni statiche alla profondità generica  $z$ , la pressione verticale è espressa dalla relazione:

$$\sigma_v = \gamma z$$

e la pressione orizzontale dalla relazione:

$$\sigma_h = K \sigma_v$$

In presenza di falda freatica alla tensione orizzontale efficace:

$$\sigma'_h = K \sigma'_v$$

va aggiunta la pressione esercitata dalle pressioni neutre

In condizioni statiche la tensione orizzontale efficace è espressa dalla relazione:

$$\sigma'_{ho} = K_0 \sigma'_{v0}$$

dove  $K_0$  è definito coefficiente di spinta a riposo e in genere ha valore compreso tra 0,4 e 0,6. Per terreni naturali normalmente consolidati viene spesso utilizzata la formula di Jaky (1944):

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

Per terreni sovraconsolidati viene spesso utilizzata la seguente formula proposta da vari autori:

$$K_0(OC) = K_0(NC) OCR^{0.5}$$

L’effetto di maggior compattezza, che nel caso di argille si manifesta con la riduzione dell’indice dei vuoti, non è conseguente  $K_0$  solo alla sovraconsolidazione per cause statiche ma può essere conseguente ad altri fenomeni quali essiccazione, variazione del livello di falda, capillarità, cementazione, incrudimento tixotropico, creep.

In terreni argillosi soggetti a variazioni volumetriche per assorbimento o perdita di umidità, le tensioni variano in condizioni di contenimento e di conseguenza subisce delle variazioni in funzione delle condizioni climatiche. Questo fenomeno si riflette sulla spinta sui muri di contenimento ed è evidente dall'andamento stagionale delle misure deformometriche di capisaldi messi a cavallo di fratture di muri sulla collina di San Miniato -Firenze preso come esempio (Fig. 1). Le condizioni di equilibrio della terra a riposo vengono alterate se si agisce sul terreno con un meccanismo di allentamento o di compressione raggiungendo condizioni di rottura muovendo il terreno in senso orizzontale verso l'esterno (equilibrio plastico attivo) o contro il terreno (equilibrio plastico passivo).

Nella ipotesi che non vi siano tensioni tangenziali sulla superficie di contatto tra la parete ed il terreno da una condizione di partenza per la quale ad una altezza generica  $z$  si hanno pressione verticale  $\sigma_{v0} = \gamma z$  e pressione orizzontale  $\sigma_{h0} = K_a \sigma_{v0}$  si passa a

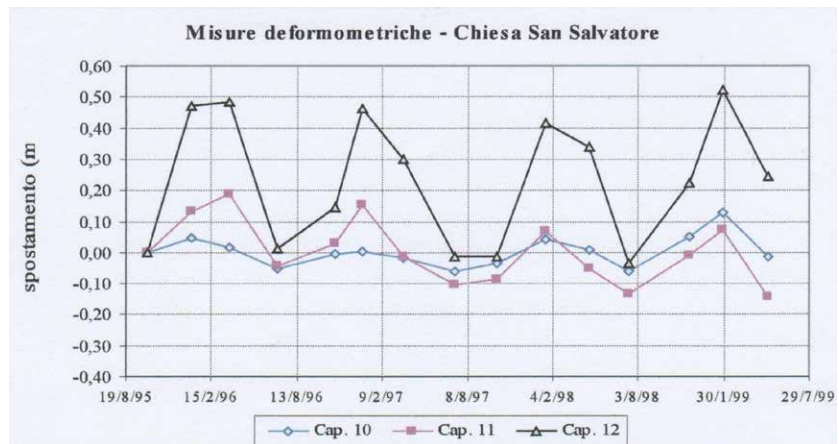
$$\sigma_{ha} = \sigma_{v0} K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

Dalla quale si vede che in un terreno con coesione  $\sigma_{ha}$  è negativo per una altezza

$$z_0 = \frac{2c\sqrt{K_p}}{\gamma} \quad (2)$$

dando formalmente ragione al collega geologo sulla effettiva spinta nulla della terra su molte opere di contenimento.

Nella progettazione dei muri di sostegno la coesione viene trascurata in quanto assente nei terreni incoerenti e anche nei materiali a grana fine nelle verifiche a lungo termine e la spinta può essere facilmente calcolata come area delle tensioni orizzontali efficaci e delle pressioni neutre dovute alla eventuale presenza di falda acquifera. Nella normalità i muri sono costruiti dopo aver fatto lo scavo, procedendo



▲  
**FIGURA 1**

Monitoraggio di lesioni su muri di sostegno con movimenti stagionali dovuti a rigonfiamento e ritiro della terra retrostante di natura argillosa.



▲  
**FIGURA 2**

Esempio di cattiva operazione di riempimento di terra dietro al muro di sostegno.

poi al riempimento del vuoto rimasto tra il terreno in sito e l'opera con materiale con alto angolo di attrito interno al fine di contenere il coefficiente  $K_a$  e di conseguenza la spinta.

È inoltre necessario effettuare feritoie nel muro per favorire il deflusso della acqua in modo da eliminare o comunque contenerne la spinta, ricordando che, in assenza di un efficiente drenaggio la spinta sul muro può aumentare fino a raddoppiare! Purtroppo, questi accorgimenti

di buona regola spesso vengono trascurati e lo spazio tra il muro eretto e la pendice dello scavo viene spesso colmato da materiale di risulta del cantiere (terra, macerie, legname, scotico, ecc.) anziché di materiale drenante come evidenziato dalla figura 2.

Sarà per deformazione professionale ma spesso mi soffermo a guardare le feritoie per vedere la loro disposizione e funzionamento reso evidente da tracce di ossidazione e dalla crescita di vegetazione.



**FIGURA 3**

Tipica lesione su parete trasversale di edificio in conseguenza alla spinta del muro collocato dietro la costruzione.

Molte volte lo spettacolo è deludente per scarso numero di feritoie e mancanza di esse nella parte basale fondamentali per abbattere la falda freatica.

In occasione di una di queste osservazioni fui incuriosito da un muro molto alto con feritoie ben allineate e disposte a più livelli che spiccavano perché rifinite in cotto. Incuriosito dal fatto che le feritoie non mostravano segni di passaggio di acqua le ispezionai attentamente e mi accorsi che erano cieche, cioè non

attraversavano il muro ed avevano solo uno scopo decorativo!

Se il muro è vincolato e non può avere traslazioni non è più valido il regime di Rankine e la spinta corrisponde a quella della terra a riposo.

Nel corso della mia attività professionale mi sono occupato di vari casi di lesioni a edifici conseguenti a errati interventi eseguiti nel tentativo di stabilizzare muri a retta con collegamenti strutturali quali puntoni tra il muro a retta e l'edificio.

Questi interventi possono mettere in

crisi l'edificio che subisce lesioni del tipo di quella indicata nella figura 3.

Un caso abbastanza frequente di dissesti nei fabbricati è rappresentato da interventi eseguiti su muri eretti per la protezione di locali interrati. Questi muri indipendenti dalla costruzione delimitano uno spazio denominato in gergo scannafosso, nel quale sono raccolte le acque freatiche drenate dal muro.

La copertura di questi spazi per ricavare dei volumi con solai collegati all'edificio genera una forza sulla struttura da parte del muro che non corrisponde più al regime di spinta attiva di Rankine ma a quella della terra a riposo e è fortemente incrementata dalla spinta dell'acqua conseguente al tamponamento delle feritoie eseguito per mantenere asciutti i nuovi locali.

A titolo di esempio un muro alto 3 metri a protezione di una terra con angolo di attrito interno di  $30^\circ$ , peso di volume di 1,9 t/mc e 1,0 t/mc quando saturato determina le seguenti spinte nelle varie condizioni:

|                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| $S_A = 2,85 \text{ t/ml}$     | Libero di traslare               |
| $S_0 = 4,27 \text{ t/ml}$     | Vincolato                        |
| $S_{0,w} = 6,75 \text{ t/ml}$ | Vincolato e in presenza di falda |

Pertanto i fenomeni possono manifestarsi anche dopo un certo periodo dalla esecuzione dell'intervento in occasione di un evento meteorico particolarmente intenso con conseguente impulso dovuto alla pressione dall'acqua.

Gli effetti della spinta dell'acqua in una situazione di muro a retta collegato alla struttura sono ben evidenziati nella figura 4 nella quale sono riportati i movimenti di una lesione in un edificio situato sull'Appennino Toscano monitorati in continuo nel periodo 2010-2012. Gli ampliamenti della frattura avvenivano sistematicamente in occasione di eventi meteorici particolarmente intensi.



FIGURA 4

Monitoraggio in continuo di una lesione con ampliamento progressivo condizionato dalla spinta dell'acqua [Misure fornite dal laboratorio Ellet].

La classica progettazione dei muri di sostegno è finalizzata al ripristino delle condizioni statiche di equilibrio di una limitata fascia di terreno che si estende per una distanza poco inferiore all'altezza del muro edificato.

Se la massa di terreno da sorreggere è molto più estesa, siamo in presenza di un movimento franoso e i criteri fino ad ora trattati di spinta della terra in condizioni di riposo o di equilibrio plastico attivo non sono

più validi. Il problema deve essere analizzato con modelli che tengono conto della geometria della massa, delle condizioni idrogeologiche e dei parametri di resistenza lungo la superficie di scorrimento.

Riferendosi alla teoria di Rankine, l'unica certezza che abbiamo è che in presenza di fenomeni gravitativi le sollecitazioni massime di un'opera incastrata nel substrato stabile possono raggiungere i valori relativi

all'equilibrio plastico passivo del terreno situato a monte del manufatto.

Siamo nella condizione espressa dal collega geologo quando parlando della progettazione dei muri di sostegno diceva: "quando la terra spinge non c'è muro che tenga a meno che non si ricorra a interventi ingenti e a soluzioni particolari.

Ma questo è un altro discorso.



Geognostica e consolidamento terreni

www.mappogeognostica.it

Mappo Geognostica srl

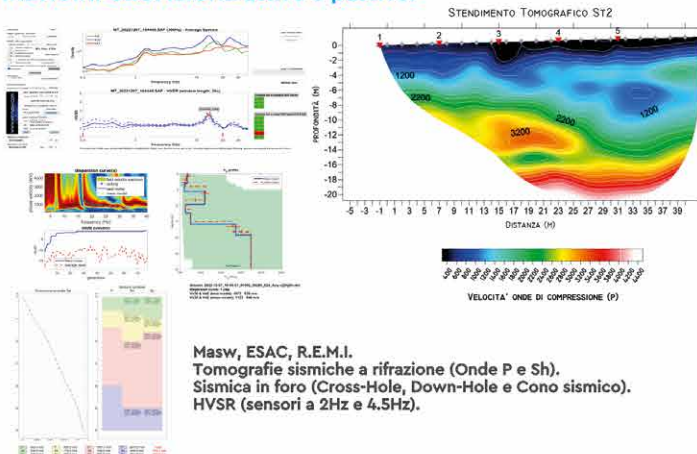
Loc. Biagioni 60 • 55010 Spianate LU • Tel. 0583 20799 • Fax 0572 930069  
email: mappogeognostica@virgilio.it



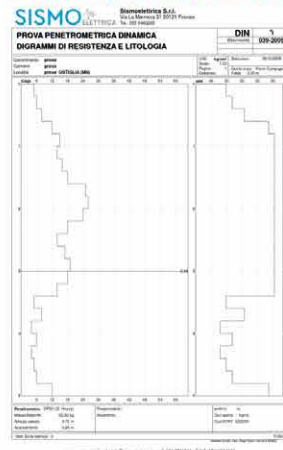
## Le nostre attività

Indagini geognostiche in situ (prove penetrometriche CPT/DPSH, CPTe, CPTu)  
 Indagini geognostiche indirette (geofisiche, geoelettriche, sismoelettriche ed elettromagnetiche)  
 Monitoraggi geotecnici (rilievi inclinometrici e vibrometrici)  
 Ricerche serbatoi acquiferi, geotermici  
 Rilievi geofisici in foro e video ispezioni fino a profondità comprese da 0 a 500 m

### INDAGINI GEOFISICHE attive e passive:

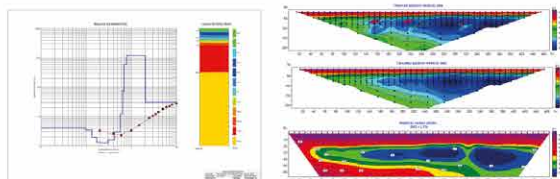


### PROVE PENETROMETRICHE:



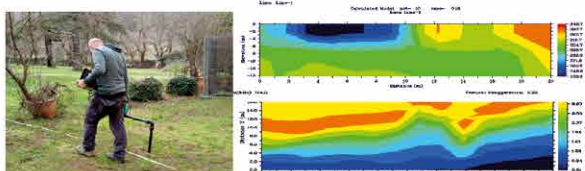
Prove C.P.T., D.P.S.H., CPTe, CPTu.

### INDAGINI GEOELETTRICHE:



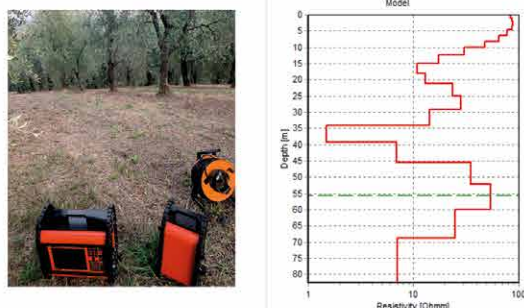
Sondaggi Elettrici Verticali(SEV) di resistività elettrica.  
 Modelli tomografici 2D e 2.5D di resistività geoelettrica (geoelettrica multielettrodo).  
 Misure di polarizzazione indotta I.P. (geoelettrica multielettrodo).

### INDAGINI ELETTRICHE VLF:



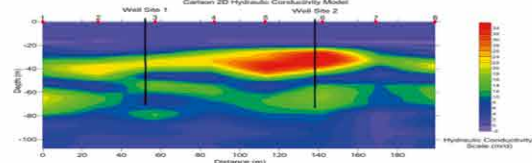
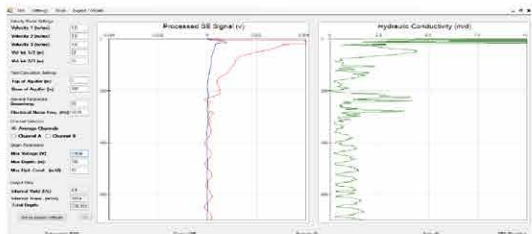
Sezioni tomografiche 2D ed in pianta di resistività da elettromagnetometro.

### INDAGINI ELETTRICHE TDEM:



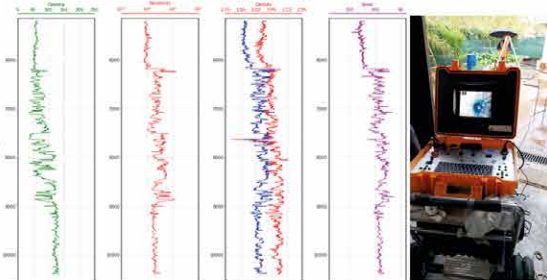
Profili 1D di resistività (loop 20 m \* 20, m 40 m \* 40 m, 100 m \* 100 m).

### INDAGINI SIMOOLETTRICHE (EKS):



Sondaggi elettrocinetici verticali (EKS) e modelli 2D di conducibilità idraulica.

### WELL LOGS e Videoispezione in foro:



Sonda Log elettrico multiparametrico.  
 Sonda Log parametri chimico-fisici dei Fluidi (FTC).  
 Sonda Log sonico (FWS) e verifiche cementazione (CBL).



# TESI DI LAUREA

## ANALISI DEI DATI TELERILEVATI PER LO STUDIO DELLE DEFORMAZIONI DEL TERRENO INDOTTE DALLE ATTIVITÀ DI UNDERGROUND GAS STORAGE

### Introduzione

Gli obiettivi stabiliti dall'Accordo di Parigi del 2015 mirano a ridurre le emissioni di gas serra aumentando l'uso delle fonti rinnovabili. Il gas naturale è un importante ponte di passaggio tra le fonti fossili e le fonti rinnovabili; infatti, il suo stoccaggio nel sottosuolo rappresenta una metodologia utile alla transizione energetica, in quanto favorisce la modularità dell'utilizzo di una "fonte non rinnovabile" - il gas naturale stesso - ad integrazione delle fonti rinnovabili, poiché fonti solari ed eoliche non sono sempre disponibili. Il lavoro di tesi è consistito nello studio delle deformazioni del suolo nelle aree contermini ad alcuni siti in cui si svolge l'attività di stoccaggio di gas naturale; i tre siti prescelti si trovano tutti in Bassa Sassonia nel nord della Germania: Etzel nei pressi di Friederburg nella contea di Wittmund, Uelsen nella contea di Bentheim, e Rehden nella contea di Diepholz. Per lo studio delle deformazioni del

suolo sono stati acquisiti ed analizzati i dati di libero e gratuito accesso provenienti dal servizio European Ground Motion Service (EGMS); è stata quindi effettuata un'analisi incrociata con i dati dei tassi di estrazione ed iniezione di gas naturale che sono forniti dall'associazione Gas Infrastructure Europe (GIE) tramite la piattaforma Advanced Gas Storage Indicator, (AGSI, 2016).

### Impianti Underground Gas Storage (UGS) e siti di studio

La tecnica dello stoccaggio sotterraneo consiste nell'immettere, immagazzinare e estrarre secondo necessità il gas naturale all'interno di cavità preesistenti; le tipologie di cavità utilizzate per queste operazioni sono rappresentate da siti quali giacimenti di idrocarburi esauriti, acquiferi e cavità in rocce saline (Platt, 2009) (figura 1).

Lo stoccaggio può essere descritto come un processo ciclico: il volume viene riempito nella stagione estiva, calda e di basso consumo, mentre



Candidato:  
**NERI LANDINI**

Relatore: Prof. Emanuele Intrieri

Correlatore: Prof. Matteo Del Soldato

durante i mesi invernali freddi e di norma con maggiori utilizzi, il gas viene estratto ed immesso nella rete di distribuzione.

Ogni tipo di impianto di stoccaggio ha caratteristiche fisiche e geotecniche specifiche, come porosità, permeabilità e capacità di immagazzinamento del gas, nonché aspetti di natura economica legati ai costi di preparazione, gestione e manutenzione del sito.

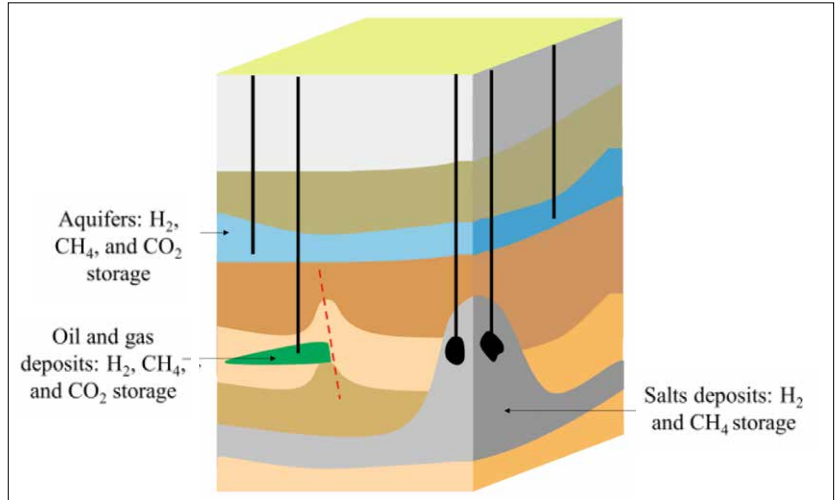
Nel mondo ad oggi sono stati realizzati quasi 1000 siti di stoccaggio, di cui il 70% ubicati negli USA e buona parte dei restanti concentrati in Europa, dove ci sono oltre 150 siti UGS attivi, il 42% dei quali si trova in Germania, tra cui Rehden, Emden e Uelsen, e in Italia, con Minerbio (metrocittà di Bologna) quale sito principale. La Francia è il terzo Paese in Europa, con Chemery, Lussagnet e Izaute come siti più attivi.

Per quanto riguarda la tipologia di UGS a livello globale, i giacimenti esauriti di gas hanno la frazione più significativa (75% del volume di lavoro totale degli impianti; Zhang et al., 2017) rispetto

agli altri tipi di stoccaggio, per effetto dell'alto numero di giacimenti attivati dall'industria degli idrocarburi giunti ormai a fine vita estrattiva, combinato con la facilità di adattamento delle infrastrutture esistenti alla nuova attività.

### Casi di studio

La scelta dei siti oggetto dello studio è stata fatta in quanto rappresentano tipi diversi di strutture geologiche idonee allo stoccaggio sotterraneo di gas naturale; in dettaglio, il sito di Etzel utilizza una struttura in matrice salina, Uelsen sfrutta un acquifero poroso ed il sito di Rehden è un giacimento esaurito di gas naturale, da cui in precedenza veniva estratto metano. I tre siti di stoccaggio sono caratterizzati da formazioni geologiche simili originatesi dalla sedimentazione in ambiente marino. I siti di Etzel e Rehden appartengono alla stessa unità geologica, lo Zechstein del Permiano, mentre a Uelsen è presente la formazione del Buntsandstein, che si è formata nel Triassico, figura 2.

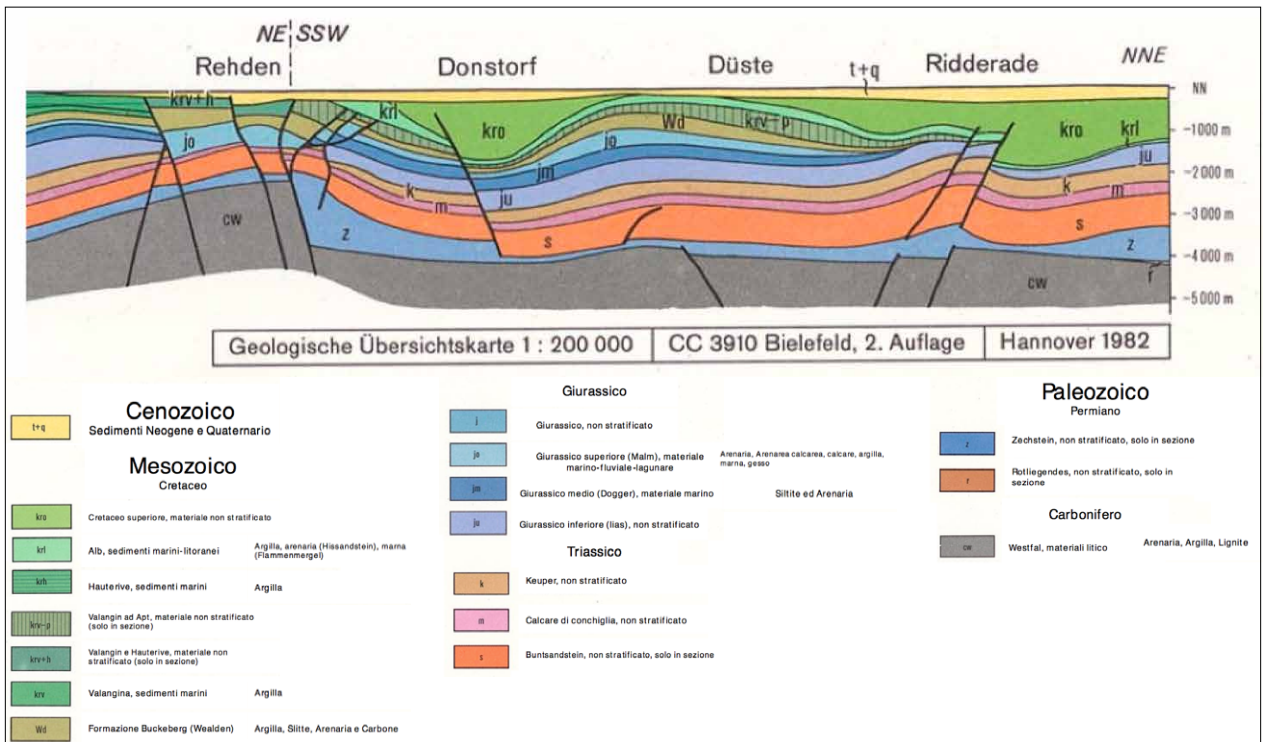


**FIGURA 1**

Differenti formazioni geologiche per lo stoccaggio sotterraneo di gas naturale; da: [Tarkowski, et al., 2021].

Immagine della sezione e legenda della carta nazionale della Germania, CC3910 Bielefeld, Hannover 1982; da: [The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 2023].

**FIGURA 2**



Caratteristiche 3 siti

| Nome Impianto                      | Etzel                   | Uelsen            | Giacimento di Gas esaurito |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Tipo di stoccaggio                 | Caverna salina          | Acquifero poroso  | Giacimento di Gas esaurito |
| Formazione geologica               | Domo Salino (Zechstein) | Arenaria (Bunter) | Dolomia (Zechstein)        |
| Profondità giacimento (m)          | 1200                    | 1500              | 2000                       |
| Anno di costruzione                | 1970                    | 1997              | 1993                       |
| Numero di pozzi (UGS)              | 51 (75)                 | 7                 | 9                          |
| Volume di lavoro (m <sup>3</sup> ) | 4.550.000.000,00        | 860.000.000,00    | 3.900.000.000,00           |



TABELLA 1

Caratteristiche dei 3 siti: Etzel, Uelsen, Rehden.

Il primo impianto di stoccaggio di gas naturale è quello gestito da Astora a Rehden, con una capacità operativa di gas di quasi  $4 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> ad una profondità di 2.000 m su un'area sotterranea di circa 8 km<sup>2</sup> con 9 pozzi di estrazione. La struttura è collocata a nord-est rispetto al centro abitato di Rehden; il sito è operativo dal 1993.

Il sito di Etzel è gestito dall'ente Storag Etzel, ma per le sue grandi dimensioni è stato appaltato a quattro aziende diverse (EGL, EKB, ESE e FSG Crystal), le quali si dividono la gestione dei pozzi. Il sito è composto da un insieme di 75 caverne in attività; 51 di queste sono dedicate allo stoccaggio di gas naturale, mentre le altre 24 sono dedicate all'immagazzinamento di petrolio greggio. L'impianto UGS si trova nel comune di Friedeburg a 5,4 km dalla città; si sviluppa sopra un grande domo salino lungo circa 12 km e largo 5 km, la cui profondità arriva fino a 5 km sotto la superficie, partendo da una quota di 750 m. La roccia salina è ideale per lo sviluppo di caverne artificiali grazie alle sue particolari proprietà chimiche e fisiche: il sale può essere sciolto con l'acqua e la sua struttura cristallina lo rende solido e impermeabile; queste proprietà favoriscono uno stoccaggio sicuro e permanente nei depositi salini profondi. L'impianto nel suo complesso ha una capacità di stoccaggio pari a un volume di  $4,55 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>.

L'ultimo sito si trova vicino al confine tra la Germania e l'Olanda, nella contea di Bentheim, nei pressi della città di Itterbeck. La società responsabile dell'impianto è Storengy una azienda del gruppo Engie. Il sito sfrutta le arenarie porose della formazione geologica di età triassica chiamata Bunter, che si trovano qui a una profondità di 1490 m, e sono accessibili attraverso 7 pozzi di stoccaggio, con un volume operativo di gas di circa  $0,86 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>.

Le informazioni sui tre siti sono riportate sinteticamente nella tabella 1.

## Metodi

Per lo sviluppo delle analisi dei dati interferometrici si è usufruito della piattaforma EGMS e della piattaforma AGSI. EGMS usufruisce dei dati SAR provenienti dai satelliti Sentinel 1-A e 1-B (Raspini, et al., 2022). Utilizzando la tecnica interferometrica, è possibile rilevare e analizzare spostamenti millimetrici del terreno, come movimenti di versante o fenomeni di subsidenza, quindi sia i movimenti a componente prevalentemente orizzontale sia verticale.

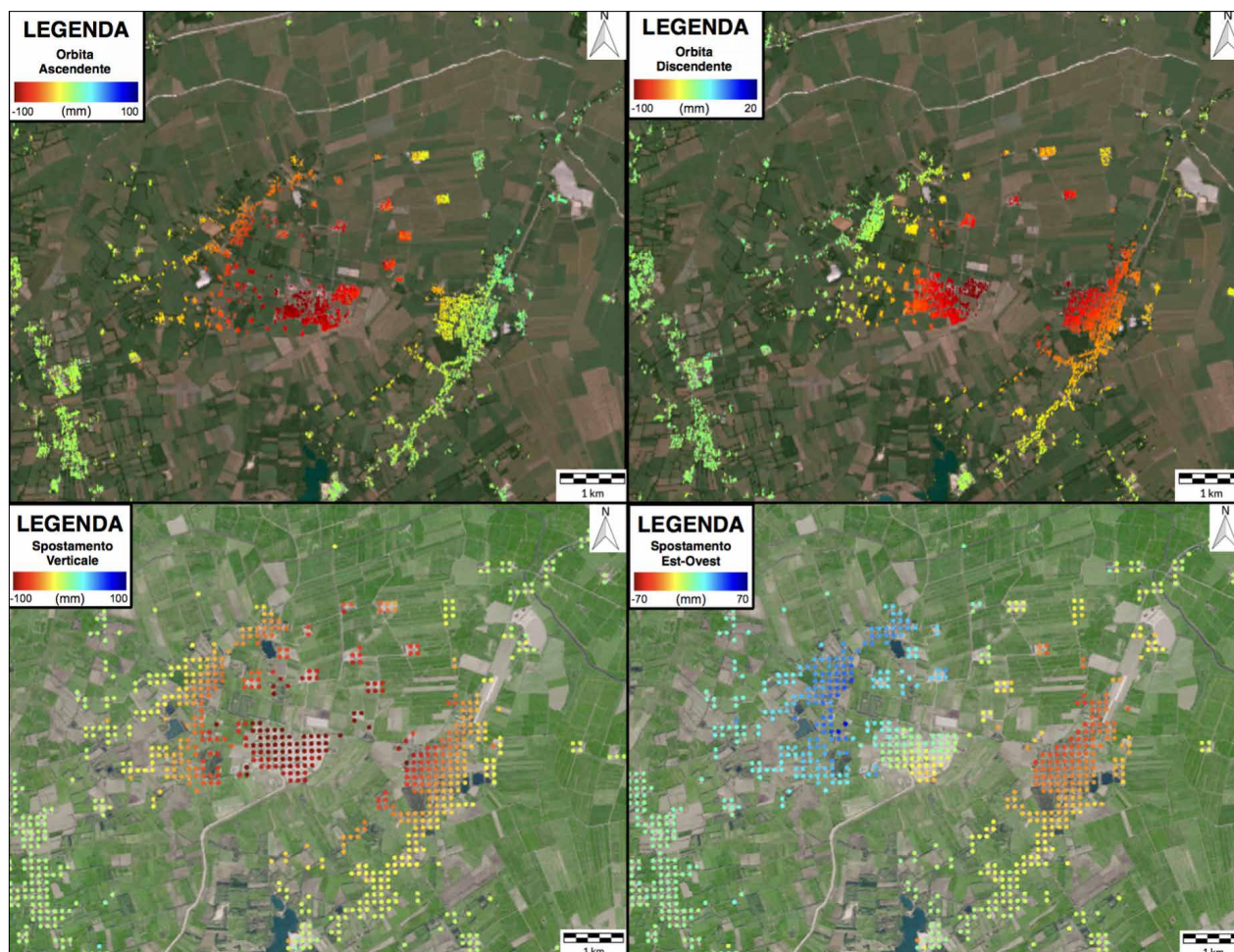
Per poter elaborare al meglio questa notevole quantità di dati, in questo lavoro è stata utilizzata l'applicazione EGMStream. Questa applicazione è stata sviluppata dai ricercatori

dell'Università di Firenze per scaricare e convertire i dati EGMS, indipendentemente dal livello di elaborazione, utilizzando un elenco di link disponibili per il download direttamente dal visualizzatore EGMS (Festa & Del Soldato, 2023) e poterli inserire nel programma QGIS per l'analisi delle serie temporali dei singoli PS.

Per il proseguo della elaborazione è stato utilizzata la piattaforma AGSI nella quale è possibile visualizzare i dati relativi all'attività dei vari impianti dell'UE oltre a quelli di Serbia, Ucraina e Regno Unito. Tutti i dati possono essere scaricati in vari formati (csv; json; xlsx) con una serie temporale che inizia dal gennaio 2011 circa, con aggiornamento settimanale dei dati. Questo sito permette di gestire molteplici dati dei singoli impianti appartenenti alle aziende del settore, come i tassi di estrazione ed iniezione del gas giornalieri, la capacità totale dell'impianto di immagazzinamento e lo stato di riempimento dei vari giacimenti.

## Risultati e discussione

Per tutti e tre i siti sono stati analizzate le aree intorno all'impianto valutando la presenza di elementi a rischio per delineare l'area di studio, in particolare gli insediamenti residenziali e industriali.



**FIGURA 3**

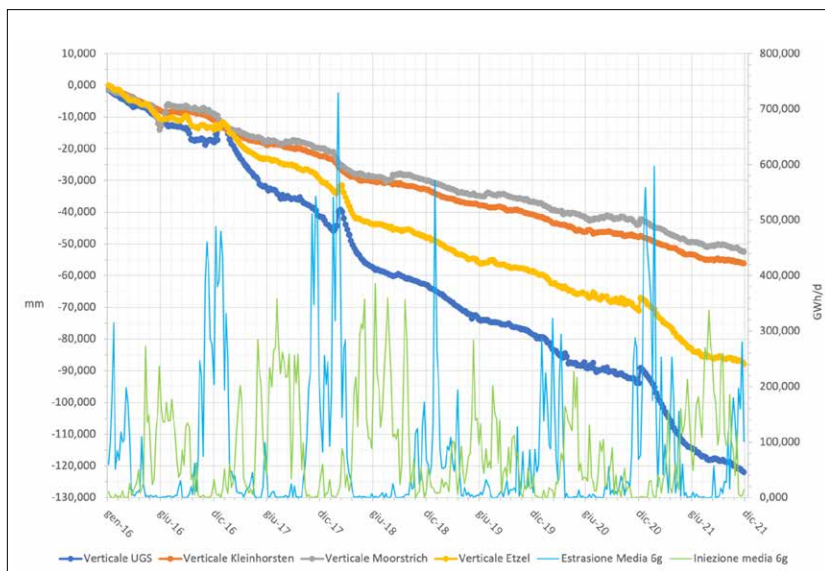
Mappa della deformazione del terreno dell'impianto di Etzel, con la componente Verticale ed Est-Ovest ed orbita ascendente e discendente.

Analizzando i dati dell'attività di stoccaggio nell'arco del periodo dal gennaio del 2016 al dicembre 2021, i tre impianti presentano andamenti ciclici di ricarica e svuotamento corrispondenti ai periodi estivi ed invernali con dei momenti di minore attività relazionabili a lavori di manutenzione o sviluppo dei pozzi. I tassi di estrazione ed iniezioni massimi sono registrati nell'impianto di Etzel (figura 4) poiché è l'impianto con volumi maggiori e gestito da più aziende.

Nell'analisi dei movimenti verticali del terreno a Uelsen si nota una

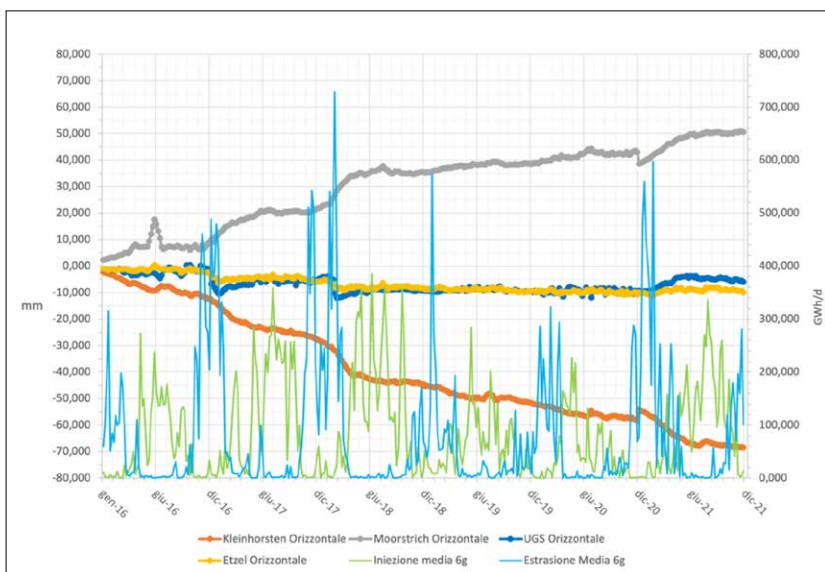
correlazione stagionale con l'attività dell'impianto di stoccaggio, sovrimposto a un trend in abbassamento costante nel tempo, con una deformazione cumulata di circa 10mm. Durante interventi tecnici che limitavano l'attività, si è registrata una significativa diminuzione dei movimenti verticali, confermando la stretta relazione tra le deformazioni del terreno e l'attività dell'impianto. Gli spostamenti est-ovest sono minimi, con solo l'area di Itterbeck che mostra una stagionalità coerente con l'attività del sito.

Nel contesto del sito di Rehden, le deformazioni del suolo differiscono dagli altri siti analizzati. Con una capacità cinque volte maggiore di Uelsen, il sito mostra una deformazione del suolo inferiore nel periodo considerato, con un abbassamento totale della metà rispetto al primo sito. Le deformazioni seguono un andamento stagionale correlato all'attività dell'impianto, con un generale abbassamento nel tempo. Durante un periodo di ridotta attività, si osserva una diminuzione delle deformazioni. Nonostante il volume di gas immesso ed estratto sia significativamente superiore a Uelsen, le deformazioni lungo l'asse est-ovest sono minimali, suggerendo un normale assestamento del terreno.



**FIGURA 4**

Grafico spostamenti verticali e dati iniezione ed estrazione del sito di Etzel, dell'impianto UGS e le città di Kleinhorsten e Moorstrich.



**FIGURA 5**

Grafico spostamenti orizzontali e dati iniezione ed estrazione del sito di Etzel, dell'impianto UGS e le città di Kleinhorsten e Moorstrich.

Il sito di Etzel si distingue per le sue deformazioni estese e significative del terreno, che mostrano una stretta correlazione con l'attività dell'impianto di stoccaggio (Figura 3-4).

Le serie temporali evidenziano un andamento decrescente delle deformazioni verticali, con picchi correlati ai momenti di estrazione di gas; queste deformazioni si estendono anche alle aree circostanti, con abbassamenti fino a 120mm in corrispondenza dell'impianto UGS e 90 mm nelle città adiacenti (figura 4). La componente est-ovest degli spostamenti rivela un cono di deformazione ben definito, con variazioni diverse nelle città circostanti ma sempre con una specularità centrata nell'area dell'impianto (figura 5).

La maggiore elasticità del materiale di stoccaggio permette un'intensa attività estrattiva e iniettiva, contribuendo all'accentuazione delle deformazioni del terreno. Ulteriori indagini sono necessarie per valutare l'evoluzione nel tempo di queste deformazioni e per valutare eventuali rischi per le strutture nelle aree abitate circostanti.

## Conclusioni

Le tecniche interferometriche, insieme all'utilizzo della piattaforma EGMS e ai dati sull'attività degli impianti UGS provenienti da AGSI, hanno fornito un quadro dettagliato delle deformazioni del terreno correlate all'estrazione ed iniezione di gas nei siti di Rehden, Etzel ed Uelsen.

Dopo aver raccolto i dati per ciascuno dei tre siti indagati, sono stati evidenziati gli elementi a rischio presenti nelle zone limitrofe.

1. Per quanto riguarda il sito di Uelsen, l'analisi delle deformazioni verticali suggerisce una chiara correlazione con l'attività estrattiva ed iniettiva del sito UGS. Questa relazione è particolarmente evidente in

quanto gli abbassamenti del terreno sono chiaramente legati ai cicli di estrazione e iniezione. Tuttavia, le deformazioni lungo la componente est-ovest risultano minori, indicando un movimento più contenuto in detta direzione.

2. Per il sito di Rehden, caratterizzato da profondità maggiori e da una formazione di arenaria più rigida, le deformazioni verticali sono inferiori rispetto a Uelsen. L'andamento stagionale delle deformazioni è coerente con l'attività del sito, con una stabilizzazione durante i periodi di ridotta capacità di estrazione e iniezione. Le deformazioni lungo la componente est-ovest sono minime, indicando un assestamento del terreno di lieve entità. La maggiore profondità e le caratteristiche geotecniche dell'arenaria contribuiscono a una deformazione complessivamente contenuta.
3. Il sito di Etzel presenta le deformazioni più significative, con una componente verticale caratterizzata da un

andamento in abbassamento continuo con picchi di accelerazione correlati alle variazioni dell'attività estrattiva. La componente est-ovest mostra un cono di deformazione centrato sull'impianto (Figure 3-4-5), indicando un notevole impatto dell'attività del sito sull'area circostante. L'assenza di una deformazione periodica stagionale è un tratto distintivo. La maggiore prossimità alla superficie del sito e la sua intensa attività contribuiscono a una deformazione più consistente rispetto agli altri due.

4. In questo lavoro si è scelto di non investigare siti italiani, in quanto le aziende non mettono a disposizione i dati dell'attività di stoccaggio diversificati impianto per impianto, ma riassumono tutto in un unico dato dell'azienda principale. Questo ha impedito lo studio nel nostro paese, anche se la piattaforma EGMS fornisce dati Sentinel-1 su tutto il territorio italiano.

## BIBLIOGRAFIA

AGSI, 2016. Advanced Gas Storage Indicator. [Online] Available at: <https://agsi.gie.eu/#/unavailability>

Buttarazzi, M., 2019-2020. Transizione energetica ottimale. s.l.:Libera Università Internazionale Degli Studi Sociali "Luiss- Guido Carli".

Crosetto, M. et al., 2020. Review The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion Service. remote sensing, pp. 1-20.

Festa, D. & Del Soldato, M., 2023. EGMStream, a desktop app for EGMS data downstream. EGMStream, a desktop app for EGMS data downstream, 15(10), p. 2581.

Platt, H., 2009. Underground Gas Storage: Why and how. Geological Society, London, Special Publications, pp. 25-37.

Raspini, F. et al., 2022. Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. Earth-Science Reviews, Volume 235.

Tarkowski, R., Ullasz-Misiak, B. & Tarkowski, P., 2021. Storage of hydrogen, natural gas, and carbon dioxide - geological and legal conditions. International Journal of Hydrogen Energy, p. 20010-20022.

The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 2023. Geoportal of the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. [Online] Available at: <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=en#/>

Zhang, G. et al., 2017. Challenges to and proposals for underground gas storage (UGS) business in China. Natural Gas Industry B, Volume IV, pp. 231-237.

## TESI DI LAUREA

# LA RARA PARAGENESI A CLORITOIDE + BIOTITE + GRANATO NELLE METAPELITI DELLA LESSER HIMALAYAN SEQUENCE (HIMALAYA NEPALESE): PETROGRAFIA, MINERO-CHIMICA, REAZIONI METAMORFICHE E MODELLIZZAZIONE TERMODINAMICA



Candidata:  
**SARA NERONE**

Relatore: Prof.ssa Chiara Groppo

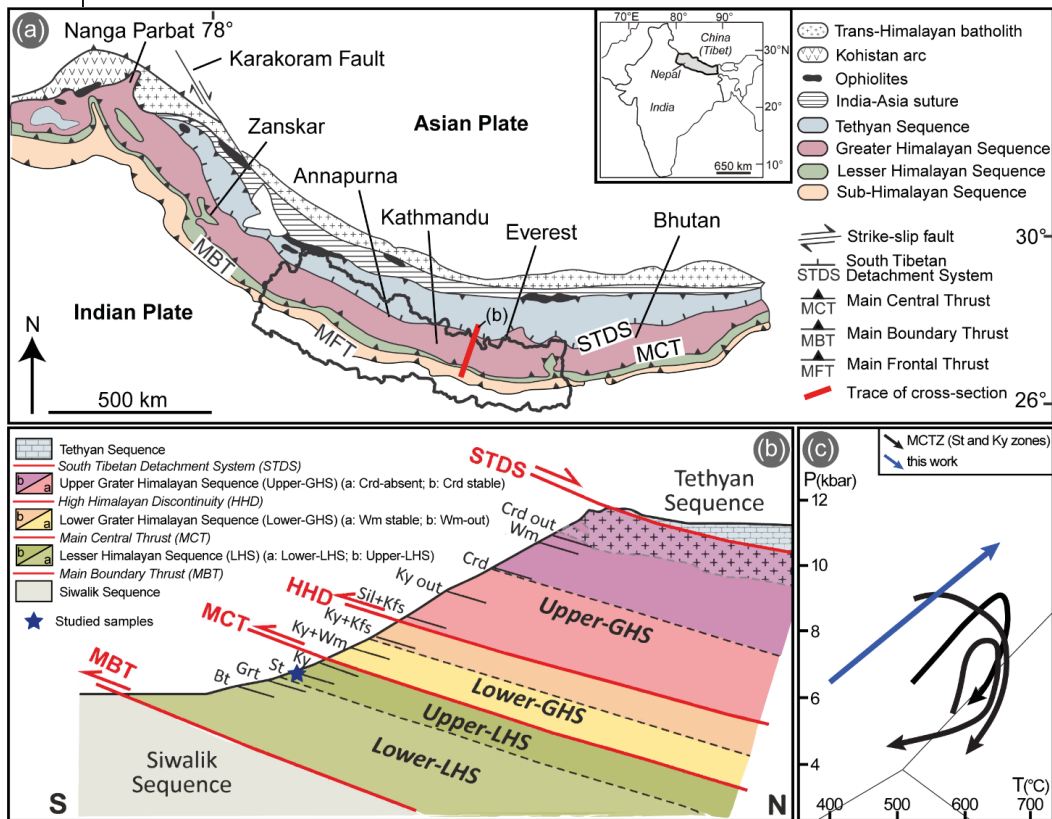
Correlatore: Prof. Franco Rolfo

### 1. Introduzione

Le rocce metamorfiche del sistema pelitico sono le più utilizzate per lo studio petrologico finalizzato a stimare le condizioni di pressione (P) e temperatura (T) raggiunte da porzioni di crosta continentale. Esse, infatti, sviluppano in genere paragenesi caratterizzate da un elevato numero di fasi, che possono essere ben vincolate attraverso la modellizzazione termodinamica. È noto che, nel sistema pelitico, il cloritoide generalmente non è stabile per temperature (T) superiori alle condizioni di facies scisti verdi, mentre la biotite è un minerale indice di facies anfibolitica (Hoschek, 1969; Bushmin & Glebovitsky, 2008). In letteratura, sono tuttavia riportati alcuni casi in cui è stata riconosciuta la paragenesi cloritoide + biotite ± granato in rocce metapelitiche (eg., Wang & Spear, 1991; Droop & Harte, 1995; Sengupta, 2012; Saki et al., 2021). In particolare, questa associazione mineralogica è stata riportata in contesti di metamorfismo di contatto, in sequenze barroviane di bassa pressione e, ancora più sporadicamente, in sequenze barroviane di pressione intermedia. Questo studio si focalizza su questa paragenesi, riconosciuta per la prima volta in metapeliti provenienti

dalla Upper Lesser Himalayan Sequence in Nepal orientale, una sequenza meta-sedimentaria caratterizzata da metamorfismo di tipo barroviano con condizioni di picco in facies anfibolitica.

In questo lavoro di Tesi, è stato combinato lo studio petrografico, microstrutturale e minero-chimico di due campioni rappresentativi contenenti la paragenesi cloritoide + biotite ± granato, con uno studio di modellizzazione termodinamica. L'obiettivo è duplice: (i) riconoscere quale tra le combinazioni di database termodinamici e modelli di soluzione solida disponibili per il calcolo termodinamico è la più adatta per studiare questo tipo di paragenesi; (ii) indagare l'influenza delle variabili intensive (P, T) ed estensive (X) sulla stabilità della paragenesi cloritoide + biotite + granato, per individuare quella più rilevante. Tra le variabili prese in considerazione in letteratura troviamo: le condizioni P-T, la composizione chimica del sistema, la composizione della fase fluida e la cinetica delle reazioni. In questa Tesi è stata indagata l'influenza dello stato di ossidazione del sistema ( $XFe_2O_3$ ) e il grado di saturazione in acqua ( $XH_2O$ ), nonché la possibilità di condizioni metastabili dovute a barriere cinetiche.



**FIGURA 1**

(a) Schema geologico semplificato della catena Himalayana in cui è evidenziato il confine politico del Nepal (modificato da Yakymchuk & Godin, 2012); (b) Sezione geologica semplificata non in scala lungo un transetto orientato circa N-S in Nepal centro-orientale. Sono evidenziate le isograde che segnano la comparsa o la scomparsa dei minerali indice di facies, che sottolineano un gradiente metamorfico inverso nella LHS; (c) Percorsi P-T per la MCTZ, caratterizzata da un metamorfismo progrado di tipo barroviano, tratti da Goscombe et al. (2018). La freccia blu rappresenta il gradiente termobarico preso in considerazione in questo lavoro per la modellizzazione termodinamica.

## 2. Inquadramento geologico

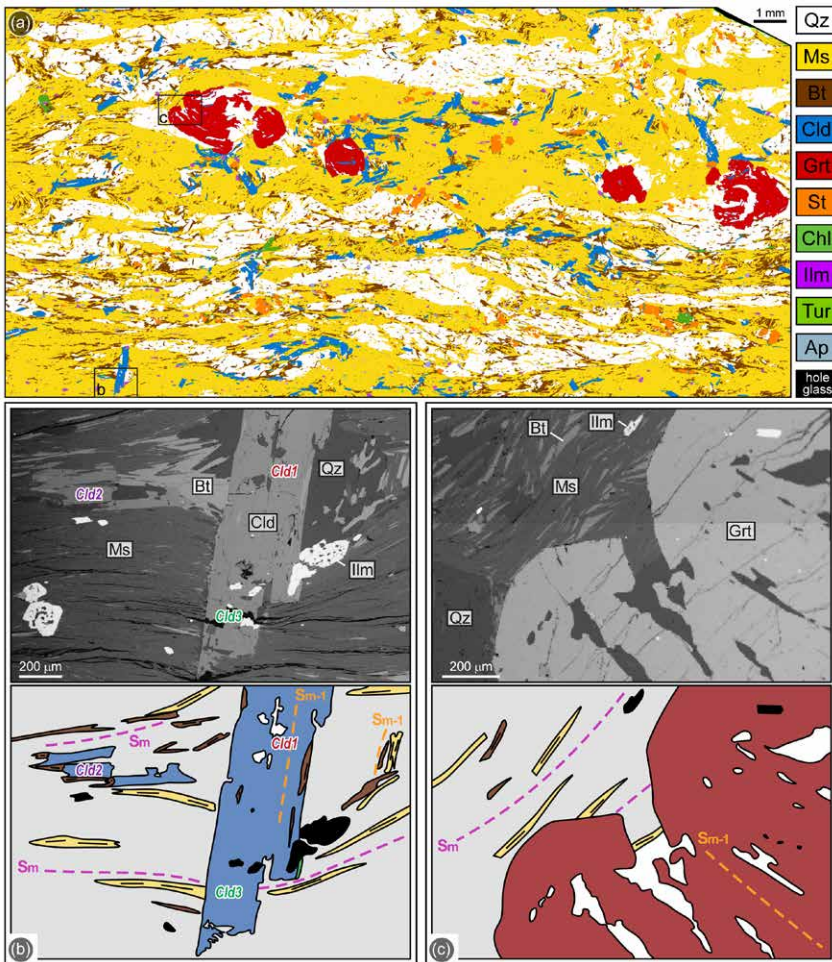
La catena Himalayana è il risultato della convergenza e successiva collisione continentale tra la placca Indiana e quella Euroasiatica (Le Pichon et al., 1992; Najman et al., 2010). In Himalaya vengono generalmente distinte quattro unità tettono-stratigrafiche principali (Fig. 1a; Gansser, 1964; Le Fort, 1975; Upreti, 1999), derivanti dall'originaria sequenza sedimentaria deposta sul margine settentrionale della placca Indiana. Dall'alto al basso strutturale, e da N a S, esse sono: la Tethyan Sedimentary Sequence, la Greater Himalayan Sequence, la Lesser Himalayan Sequence e la Sub-Himalayan Zone o Siwalik Sequence. La Lesser Himalayan Sequence (LHS) è delimitata a letto dal Main Boundary Thrust (MBT) e a tetto dal Main Central Thrust (MCT). La discontinuità tettonica che delimita a tetto la Upper-LHS (MCT) è in realtà una spessa zona di deformazione (Main Central Thrust Zone, MCTZ; e.g., Goscombe et al., 2006; Searle et al., 2008; Carosi et al., 2018), che coinvolge sia la parte alta della LHS (ovvero la Upper-LHS, da cui provengono i campioni studiati) sia la parte bassa della Greater Himalayan Sequence. La LHS è suddivisa su base litostratigrafica e metamorfica (Fig. 1b;

Stöcklin, 1980) in Lower-LHS, costituita da rocce di basso grado metamorfico (Stöcklin & Bhattarai, 1977; Kohn et al., 2010; Martin et al., 2011), e in Upper-LHS, caratterizzata da metamorfismo di picco in facies anfibolitica (Stöcklin, 1980; Martin et al., 2011; Fig. 1c). L'aumento del grado metamorfico verso N e quindi verso l'alto strutturale definisce un tipico metamorfismo inverso (Fig. 1b; e.g., Searle et al., 2008).

## 3. Metodi

La paragenesi cloritoide + biotite + granato è stata riconosciuta attraverso uno studio petrografico e microstrutturale di dettaglio di quattro campioni al microscopio ottico in luce polarizzata. Si tratta di micascisti a due miche ± clorite con porfiroblasti di granato, cloritoide e staurolite. Tra i campioni studiati, sono stati selezionati due campioni (19a-2a e 19a-4), considerati maggiormente rappresentativi, per le successive indagini di dettaglio al microscopio elettronico a scansione (SEM) dotato di uno spettrometro a dispersione di energia (EDS), ubicato presso il Dipartimento di Scienze della Terra (Università degli Studi di Torino) e per la successiva modellizzazione



**FIGURA 2**

(a) Mappa multispettrale processata del campione 19a-4. Si noti staurolite e clorite prevalentemente statiche sulla foliazione principale; (b) Porfiroblasto di cloritoide che cresce da pre-cinematico (Cld1) a sin-cinematico (Cld2) e post-cinematico (Cld3) rispetto alla foliazione principale. Le generazioni pre- e sin-cinematiche sono in equilibrio con la biotite (Back Scattered Electron image, BSE, e sketch ridisegnato della microfotografia). (c) Porfiroblasto di granato che presenta un nucleo pre-cinematico rispetto alla foliazione principale e che include una foliazione precedente costituita da biotite e mica bianca (BSE image e sketch ridisegnato della microfotografia). Lo sfondo grigio in (b) e (c) indica la matrice e consiste prevalentemente di mica bianca. Le abbreviazioni dei minerali sono tratte da Whitney & Evans (2010).

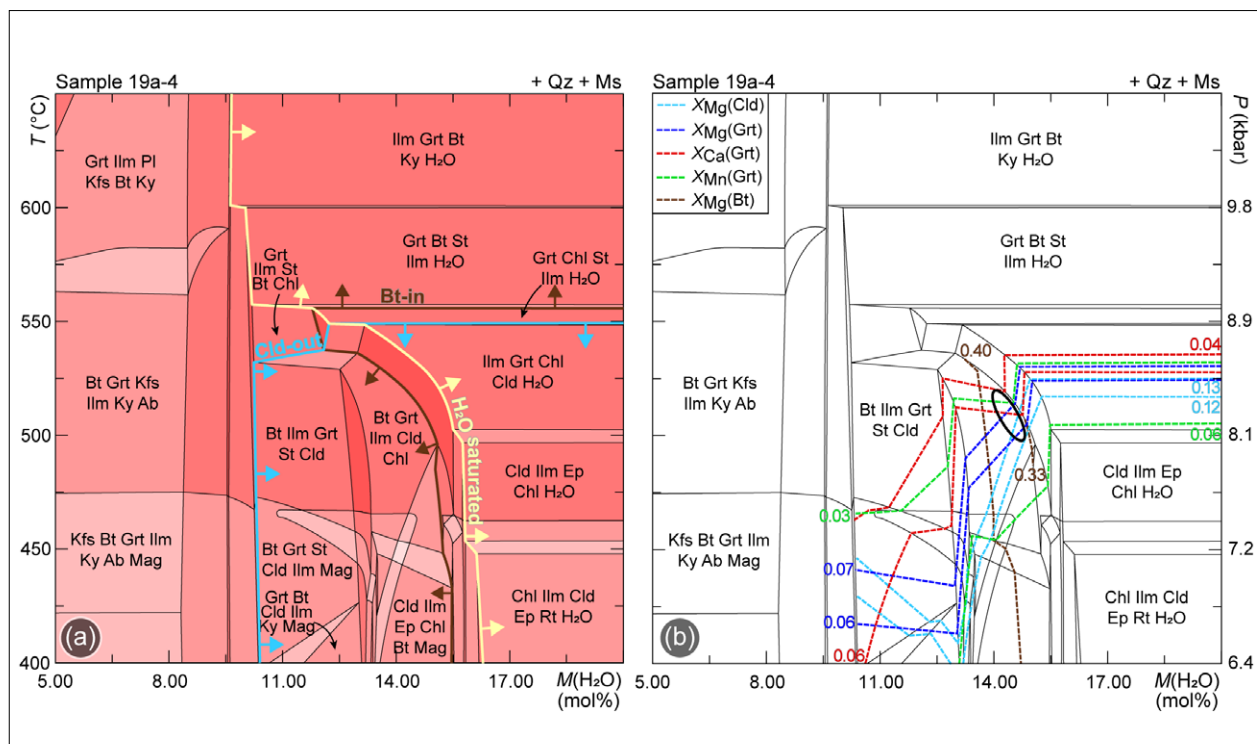
termodinamica. Utilizzando il SEM-EDS, sono state eseguite mappe composizionali multispettrali ad alta risoluzione dell'intera sezione sottile, processate attraverso il software Multispec © per ricavare una stima modale (%vol) delle fasi mineralogiche. È stata poi svolta una caratterizzazione minero-chimica delle fasi principali, normalizzando le analisi con il software "NORM" (Ulmer, 1986), per evidenziare possibili variazioni composizionali nei minerali principali. La composizione dei minerali principali combinata con la percentuale modale delle fasi è servita a calcolare la composizione roccia totale utilizzata per la modellizzazione termodinamica.

Il successivo studio di modellizzazione termodinamica è stato svolto

utilizzando il software Perple\_X 6.9.0 (Connolly, 1990, 2009), testando tre combinazioni di database termodinamici e modelli di soluzione solida attraverso il calcolo di chemografie AFM ( $A=Al_2O_3 - 3K_2O$ ;  $F=FeO_{tot}$ ;  $M=MgO$ ). Le chemografie sono state calcolate lungo un gradiente termo-barico compatibile con l'evoluzione metamorfica nota in letteratura per la Upper-LHS (Fig. 1c). L'influenza dei parametri intensivi (P, T) ed estensivi (X) sulla stabilità della paragenesi cloritoide + biotite è stata indagata attraverso il calcolo di diagrammi di fase isochimici (pseudosezioni) P-T e P/T-X, queste ultime calcolate lungo lo stesso gradiente delle chemografie. Le pseudosezioni sono state calcolate considerando la composizione chimica dei due campioni, con pura  $H_2O$  come fase fluida. I due parametri estensivi presi in considerazione sono: a) lo stato di ossidazione del sistema ( $XFe_2O_3$ ) e b) il contenuto in acqua del sistema ( $XH_2O$ , %mol), variabile da condizioni di sottosaturazione a condizioni di sovrasaturazione. Per tutte le tipologie di pseudosezioni sono state calcolate le isoplete composizionali delle fasi coinvolte nella paragenesi.

#### 4. Risultati e discussioni

I quattro campioni studiati mostrano relazioni di equilibrio tra biotite, cloritoide e granato, e tra staurolite e clorite (Fig. 2). Staurolite e clorite generalmente sostituiscono i primi tre, crescendo statiche sulla foliazione principale. Per i due campioni selezionati per le analisi di maggior dettaglio, la composizione chimica



**FIGURA 3**

a) Pseudosezione P/T-X(H<sub>2</sub>O) calcolata per il campione 19a-4 in cui si nota come condizioni di sottosaturazione in H<sub>2</sub>O favoriscano la stabilità della paragenesi cloritoide + biotite; (b) La stessa pseudosezione con riportate le isoplete composizionali modellizzate per granato, cloritoide e biotite che permettono di vincolare lo sviluppo della paragenesi a condizioni di leggera sottosaturazione in H<sub>2</sub>O (ellisse nero).

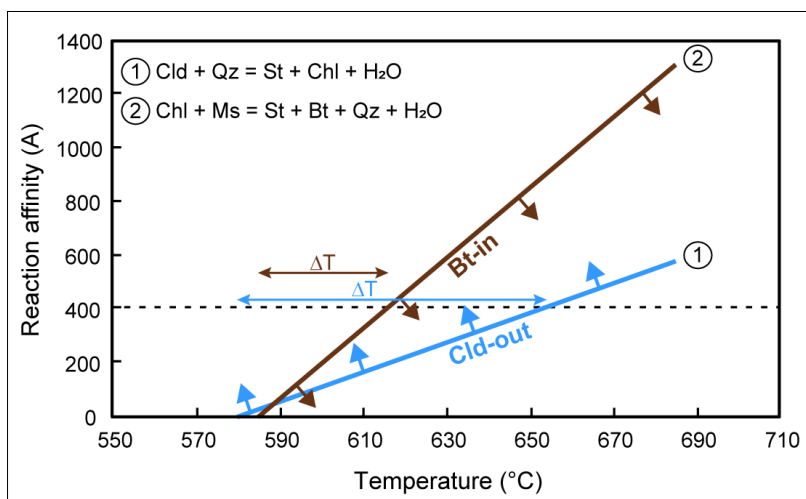
delle fasi non varia particolarmente in funzione della posizione microstrutturale (Fig. 2e). L'unica eccezione è rappresentata dal granato del campione 19a-4 che risulta leggermente zonato.

Per comprendere quale combinazione di database termodinamico e modelli di soluzione solida fosse la più adatta per lo studio di questa paragenesi, sono state testate tre combinazioni. Tra queste, due sono state scartate perché le chemografie AFM non prevedevano campi a cloritoide + biotite + granato o perché questi erano limitati a composizioni del sistema troppo ferrifere rispetto a quelle dei campioni analizzati. L'unica combinazione che ha restituito risultati compatibili con la paragenesi osservata è quella che associa il database termodinamico di Holland & Powell (1998) (ds55) con il modello di soluzione solida per la biotite di White et al. (2007). Tutte le pseudosezioni discusse nella Tesi sono quindi state calcolate con questa combinazione.

Le pseudosezioni P-T evidenziano come la curva di scomparsa del cloritoide si trova a temperature minori rispetto alla curva di comparsa della biotite, non permettendo lo sviluppo di campi a cloritoide + biotite che rispecchiano la paragenesi osservata. Più in generale, all'aumentare della pressione le curve biotite-in e cloritoide-out si allontanano. L'andamento delle due curve spiega piuttosto bene come mai l'associazione a cloritoide + biotite sia stata riconosciuta principalmente in contesti di metamorfismo di contatto e in sequenze barroviane di bassa pressione (e.g. Wang & Spear, 1991; Saki et al., 2021), mentre

in sequenze barroviane di media pressione essa è decisamente più rara (e.g. Sengupta, 2012). In questi ultimi casi, è quindi verosimile che la paragenesi cloritoide + biotite sia influenzata anche da altri fattori, oltre che dalle condizioni P-T.

Le pseudosezioni P/T-X(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sottolineano come all'aumentare dello stato di ossidazione del sistema, le curve di scomparsa del cloritoide e di ingresso della biotite tendono ad allontanarsi, con la conseguenza che, per qualunque condizione di X(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), non vengono predetti campi a cloritoide + biotite. I risultati della modellizzazione mostrano che le pseudosezioni P/T-X(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) falliscono nel predire la coesistenza di cloritoide, biotite e granato, che anzi è meno probabile all'aumentare dello stato di



**FIGURA 4**

Grafico A-T che evidenzia come la reazione di scomparsa del cloritoide avvenga a temperature più alte rispetto a quella di scomparsa della biotite se non si considera un approccio all'equilibrio.

ossidazione del sistema.

Le pseudosezioni P/T-X(H<sub>2</sub>O) (Fig. 3) mostrano come in condizioni di sovrasaturazione in H<sub>2</sub>O (campi in cui compare H<sub>2</sub>O come fase in eccesso), il cloritoide viene consumato a temperature minori rispetto alla comparsa della biotite; in condizioni di sottosaturazione in H<sub>2</sub>O (corrispondenti ai campi in cui non è presente H<sub>2</sub>O come fase in eccesso), vengono modellizzati numerosi campi di coesistenza cloritoide + biotite (Fig. 3a). Per entrambi i campioni, le isoplete composizionali di cloritoide, biotite e granato convergono tutte nello stesso campo, in condizioni di leggera sottosaturazione in H<sub>2</sub>O (Fig. 3b). Nel complesso, quindi, le pseudosezioni P/T-X(H<sub>2</sub>O) riescono a predire la coesistenza di cloritoide, biotite e granato con composizioni prossime a quelle misurate, suggerendo che lo sviluppo di questa paragenesi è favorito da leggere condizioni di sottosaturazione in H<sub>2</sub>O.

La presenza o l'assenza di una fase fluida libera in un sistema metamorfico ha importanti implicazioni per la cinetica delle reazioni (e.g. Pattison & Tinkham, 2009), poiché il fluido rimuove le barriere cinetiche alla nucleazione. È stato quindi investigato il parametro di affinità della reazione (A; ovvero la differenza nell'energia libera di Gibbs tra i prodotti stabili ma ancora non cristallizzati e i reagenti metastabili) seguendo il procedimento di Waters & Lovegroove (2002). Assumendo un valore di A = 400 J per moli di ossigeno nel porfiroblasto prodotto come la barriera energetica per la nucleazione di staurolite, che è un prodotto sia della reazione che consuma cloritoide sia di quella che produce biotite, si nota come la reazione di scomparsa del cloritoide avvenga a temperature superiori rispetto alla reazione di comparsa della biotite (Fig. 4).

## 5. Conclusioni

I risultati ottenuti integrando lo studio petrografico, microstrutturale e minero-chimico con uno studio di modellizzazione termodinamica hanno permesso di:

1. riconoscere in campioni provenienti dalla Upper-LHS del Nepal orientale i rapporti di equilibrio tra cloritoide e biotite, riportati in letteratura in poche altre località;
2. identificare il database di Holland & Powell (1998) (ds55) unito al modello di soluzione solida per la biotite di White et al. (2007) come l'unica combinazione, tra quelle testate, adeguata allo studio della paragenesi cloritoide + biotite;
3. evidenziare come i parametri intensivi (P, T) influenzino in modo marginale lo sviluppo della paragenesi;
4. escludere che lo stato di ossidazione del sistema abbia giocato un ruolo rilevante nello sviluppo della paragenesi cloritoide + biotite e mostrare come, al contrario, condizioni ossidanti inibiscano la coesistenza di cloritoide e biotite;
5. evidenziare che il grado di saturazione in H<sub>2</sub>O è in grado di influenzare in modo significativo la stabilità della paragenesi cloritoide + biotite; in particolare, condizioni di leggera sottosaturazione in H<sub>2</sub>O favoriscono la stabilità di questa paragenesi, riuscendo a predire composizioni di cloritoide, biotite e granato prossime a quelle misurate;
6. individuare che anche fattori cinetici possono aver giocato un ruolo nello sviluppo di questa paragenesi; in particolare, l'efficienza della cinetica delle reazioni è intrinsecamente legata alla disponibilità di una fase fluida.

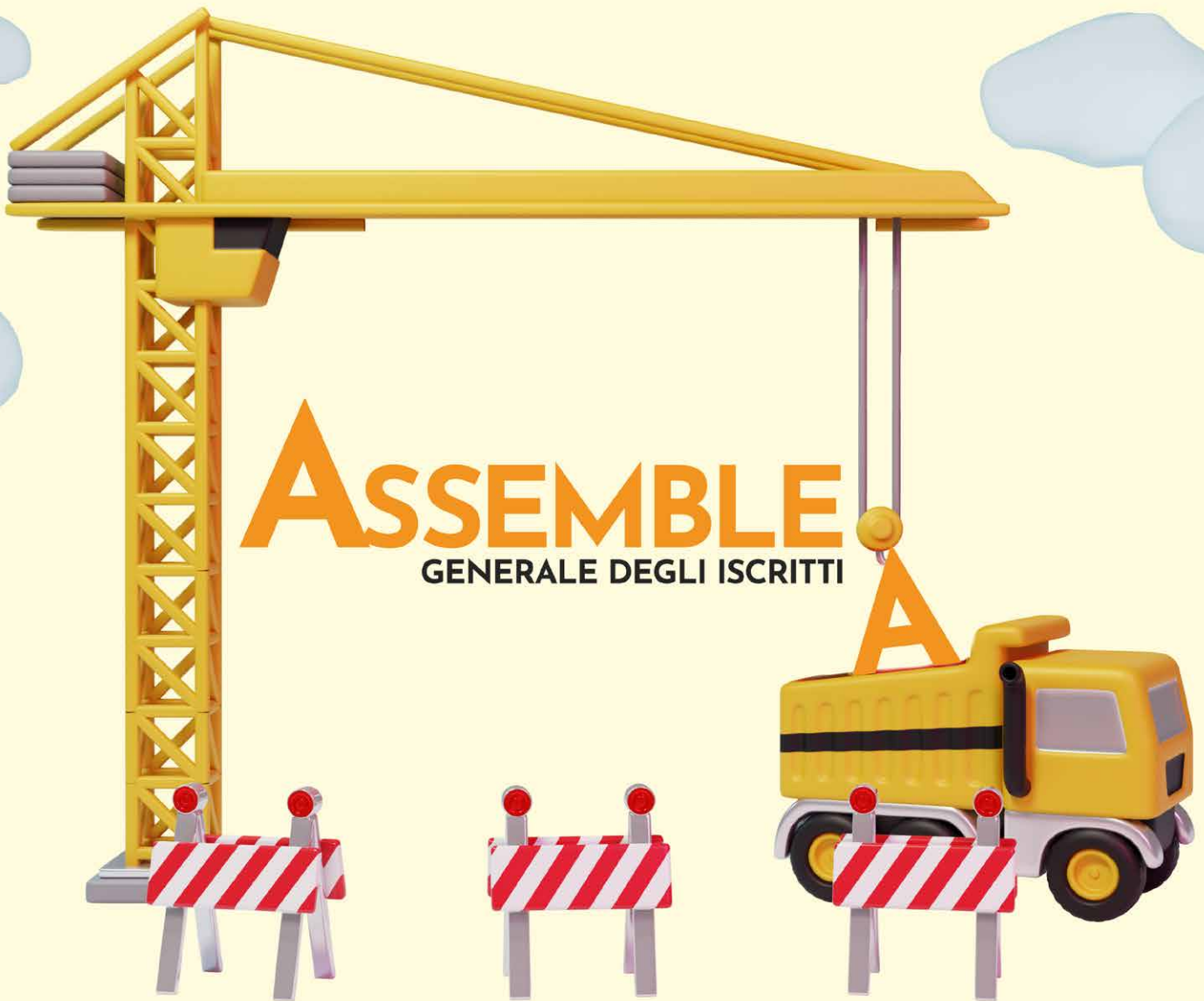
## BIBLIOGRAFIA

- Bushmin S. & Glebovitsky V.A. (2008) - Scheme of Mineral Facies of Metamorphic Rocks. *Geology of Ore Deposits*, 50, 659-669.
- Carosi R., Montomoli C., Iaccarino S. & Visonà D. (2018) - Structural evolution, metamorphism and melting in the Greater Himalayan Sequence in central-western Nepal. *Geological Society, London, Special Publications*, 483, SP483.3.
- Connolly J.A.D. (1990) - Multivariate phase diagrams: An algorithm based on generalized thermodynamics. *American Journal of Science*, 290, 666-718.
- Connolly J.A.D. (2009) - The geodynamic equation of state: what and how. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, Q10014.
- Droop G.T.R. & Harte B. (1995) - The effect of Mn on the phase relations of medium grade pelites: constraints from natural assemblages on petrogenetic grid topology. *Journal of Petrology*, 36, 1549-1578.
- Gansser A. (1964) - *Geology of the Himalayas*. London, Interscience Publishers, p. 289.
- Goscombe B., Gray D. & Hand M. (2006) - Crustal architecture of the Himalayan metamorphic front in eastern Nepal. *Gondwana Research*, 10, 232-255.
- Goscombe B., Gray D. & Foster D.A. (2018) - Metamorphic response to collision in the Central Himalayan Orogen. *Gondwana Research*, 57, 191-265.
- Holland T.J.B. & Powell R. (1998) - An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 309-344.
- Hoschek G. (1969) - The stability of staurolite and chloritoid and their significance in metamorphism of pelitic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 22, 208-232.
- Kohn M.J., Paul S.K. & Corrie S.L. (2010) - The lower Lesser Himalayan sequence: a Paleoproterozoic arc on the northern margin of the Indian plate. *Geological Society of America Bulletin*, 122, 323-335.
- Le Fort P. (1975) - Himalaya: the collided range. Present knowledge of the continental arc. *American Journal of Science*, 275A, 1-44.
- Le Pichon X., Fournier M. & Jolivet L. (1992) - Kinematics, topography, shortening, and extrusion in the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 11, 1085-1098.
- Martin A.J., Burg K.D., Kaufman A.J. & Gehrels G.E. (2011) - Stratigraphic and tectonic implications of field and isotopic constraints on depositional ages of Proterozoic Lesser Himalayan rocks in central Nepal. *Precambrian Research*, 185, 1-17.
- Najman Y., Appel E., Boudagher-Fadel M., Brown P., Carter A., Garzanti E., Godin L., Han J., Liebke U., Oliver C., Parrish R. & Vezzoli G. (2010) - Timing of India-Asia collision: geological, biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints. *Journal of Geophysical Research*, 115, B12416.
- Pattison D.R.M. & Tinkham D.K. (2009) - Interplay between equilibrium and kinetics in prograde metamorphism of pelites: an example from the Nelson aureole, British Columbia. *Journal of Metamorphic Geology*, 27, 249-279.
- Saki A., Miri M. & Oberhänsli R. (2021) - Pseudosection modelling of the Precambrian meta-pelites from the Poshtuk area, NW Iran. *Periodico di Mineralogia*, 90, 325-340.
- Searle M.P., Law R.D., Godin L., Larson K.P., Streule M.J., Cottle J.M. & Jessup M.J. (2008) - Defining the Himalayan Main Central Thrust in Nepal. *Journal of the Geological Society of London*, 165, 523-534.
- Sengupta N. (2012) - Stability of chloritoid+biotite-bearing assemblages in some meta-pelites from the Palaeoproterozoic Singhbhum Shear Zone, eastern India and their implications. *Geological Society Special Publications*, 365, 91-116.
- Stöcklin J. (1980) - *Geology of Nepal and its regional frame*. *Journal of the Geological Society of London*, 137, 1-34.
- Stöcklin J. & Bhattarai K.D. (1977) - *Geology of Kathmandu area and Central Mahabharat range: Nepal Himalaya*. In: *Himalaya Report*, Department of Mines and Geology, Kathmandu, Nepal, 86 p.
- Ulmer P. (1986) - NORM - Program for cation and oxygen mineral norms. Computer Library, Institut für Mineralogie und Petrographie, ETH-Zentrum, ETH-Zentrum, Zürich, Switzerland.
- Upreti B.N. (1999) - An overview of the stratigraphy and tectonics of the Nepal Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17 (special issue), 577-606.
- Wang P. & Spear F.S. (1991) - A field and theoretical analysis of garnet+chlorite+chloritoid+biotite assemblages from the tristate (MA, CT, NY) area USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106, 217-235.
- Waters D.J. & Lovegrove D.P. (2002) - Assessing the extent of disequilibrium and overstepping of prograde metamorphic reactions in metapelites from the Bushveld Complex aureole, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 135-149.
- White R.W., Powell R. & Holland T.J.B. (2007) - Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 511-527.
- Whitney D.L. & Evans B.W. (2010) - Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Yakymchuk C. & Godin L. (2012) - Coupled role of deformation and metamorphism in the construction of inverted metamorphic sequences: an example from far-northwest Nepal. *Journal of Metamorphic Geology*, 30, 513-535.



**ogt**  
ORDINE dei  
GEOLOGI della  
TOSCANA

# LAVORI IN CORSO



## ASSEMBLEA GENERALE DEGLI ISCRITTI

ASSEMBLEA GENERALE  
GEOLOGI TOSCANA 2024

**25 OTTOBRE 2024 - FIRENZE**





**ogt**  
ORDINE dei  
GEOLOGI della  
TOSCANA



ANNO XXXIV N°122 • APRILE 2024

Periodico d'informazione dell'Ordine dei Geologi della Toscana

#### **DIRETTORE RESPONSABILE**

Riccardo Martelli

#### **COORDINAMENTO EDITORIALE**

Alessandro Danesi

#### **CONSIGLIO DELL'ORDINE**

Alessandro Cortopassi, Alessandro Danesi, Daria Duranti, Simone Frosini, Chiara Lapira, Elisa Livi, Gaddo Mannori, Riccardo Martelli, Samuel Medoro, Iacopo Parenti, Monica Salvadori

#### **COMMISSIONE SCIENTIFICA**

Massimo Baglione, Gianluca Cornamusini, Lorella Francalanci, Roberto Giannecchini, Brunella Raco, Simone Sartini, Enrico Tavarnelli

#### **COMITATO DI REDAZIONE**

Giancarlo Lari, Guido Lavorini, Stefano Farinelli, Donato Merola, Maria Chiara Piccardi, Massimo Della Schiava, Luciano Sergiampietri

#### **EDITORE**

Ordine dei Geologi della Toscana,  
Via Vittorio Fossombroni, 11, 50136 Firenze

#### **DIREZIONE E REDAZIONE CENTRALE**

Via Vittorio Fossombroni, 11 - 50136 Firenze  
Tel. 055 2340878 - fax 055 2269589  
email: [il\\_geologo@geologitoscana.it](mailto:il_geologo@geologitoscana.it)  
[www.geologitoscana.it](http://www.geologitoscana.it)

#### **PUBBLICITÀ**

Agicom srl  
Viale Caduti in Guerra, 28 - 00060 Castelnuovo di Porto (RM)  
Tel. 069078285 - fax 069079256  
[agicom@agicom.it](mailto:agicom@agicom.it)  
[www.agicom.it](http://www.agicom.it)

#### **CREATIVITÀ E GRAFICA**

Agicom Graphic Ideas

#### **STAMPA**

Spadamedia Srl

**POSTE ITALIANE SPA** - Spedizione in Abbonamento Postale 70% - DCB FI  
Autorizzazione Tribunale di Lucca N. 531 del 17/09/90

Fatti salvo gli obblighi di legge, la redazione declina ogni responsabilità riguardo ai contenuti degli spazi pubblicitari, che non possono in alcun modo essere considerati rappresentativi, prossimi o indicativi della politica dell'ordine di cui la rivista è organo. Tutte le inserzioni pubblicitarie sono gestite dalla Agicom srl. È espressamente vietata la riproduzione di testi e foto ai sensi e per gli aggetti dell'art. 65 della legge n. 633-22.4.1941.



**FORMAZIONE VALDARNESE (3° FASE)  
DEI CIOTTOLAMI DI LATERINA**

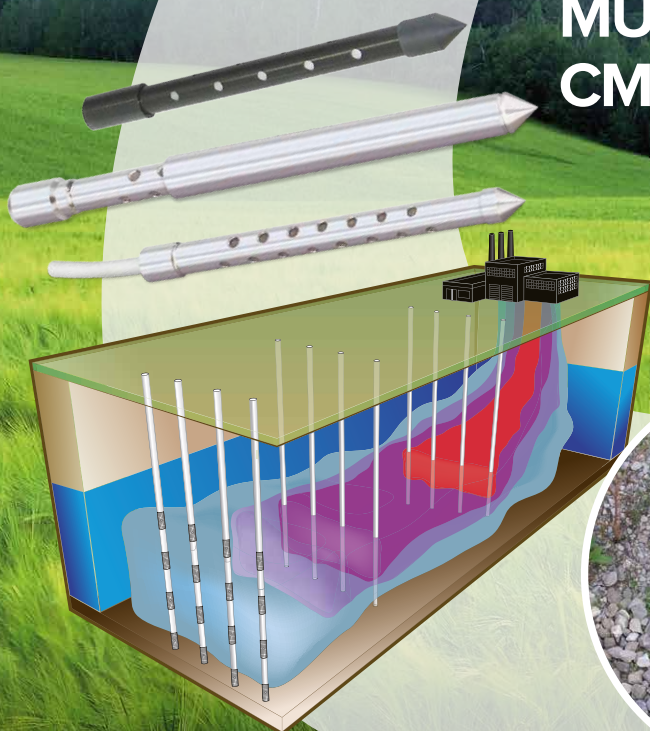
**PARCO FLUVIALE SAN SALVATORE  
(BUCINE, LUNGO IL TORRENTE OMONIMO)**

Foto di Emanuele Fornasari



**PROFILAZIONE  
MULTILIVELLO**

HRSC - CARATTERIZZAZIONE AD ALTA RISOLUZIONE DEI SITI  
**SISTEMI DI MONITORAGGIO  
MULTILIVELLO SOLINST®  
CMT® E WATERLOO®**



**LA PROFILAZIONE 3D DEI CONTAMINANTI: ELEMENTO FONDAMENTALE PER DEFINIRE UNA CORRETTA STRATEGIA DI BONIFICA E PER MONITORARNE L'EFFICACIA.**

Con più di 5.000 installazioni in tutto il mondo, i **sistemi multilivello Solinst® CMT® e Waterloo®** consentono di monitorare zone isolate ad intervalli discreti in un **singolo piezometro**, senza rischio di contaminazione incrociata. Mediante l'utilizzo di uno o più transetti di sistemi multilivello, è possibile ricostruire il profilo del plume inquinante e tracciarne l'**evoluzione nel tempo**.

Da sempre impegnati nell'offrire le soluzioni tecnologiche più avanzate e affidabili per misure e monitoraggio di livello, campionamenti low-flow e indisturbati, analisi qualitative delle acque sotterranee o di superficie. Abbiamo selezionato i migliori prodotti disponibili sul mercato internazionale per soddisfare le esigenze dei professionisti del settore.



**MISURE DI LIVELLO**



**CAMPIONAMENTO  
LOW-FLOW**



**DATALOGGER  
E TELEMETRIE**



**BONIFICA  
IDROCARBURI**

**Solinst®**

DISTRIBUTORI UFFICIALI PER L'ITALIA E RIVENDITORI PER CROAZIA, SLOVENIA E SVIZZERA DEI PRODOTTI SOLINST®

**Una partnership di successo che dura da oltre trent'anni.**

**EGEO** +lab

[WWW.EGEO.LAB.IT](http://WWW.EGEO.LAB.IT)