

# Τι σημαίνει στην πραγματικότητα γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>;

Υπεύθυνη χρήση των  
ορυκτών καυσίμων

Απομάκρυνση  
της κύριας πηγής  
των αερίων του  
θερμοκηπίου

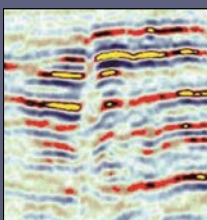
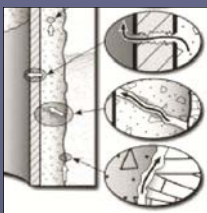
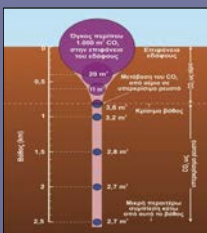
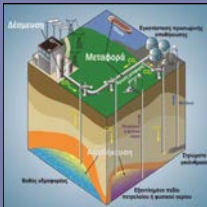
Επαναφορά του  
άνθρακα στο  
υπέδαφος

Παροχή του αναγκαίου χρόνου για την ανάπτυξη  
ενεργειακών πηγών  
φιλικών προς το κλίμα



CO<sub>2</sub>GeoNet Ευρωπαϊκό Δίκτυο Αριστείας

# Περιεχόμενα



**Η κλιματική αλλαγή και η ανάγκη γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> .....4**

**1. Πού και πόσο CO<sub>2</sub> μπορούμε να αποθηκεύσουμε στο υπέδαφος; .....6**

**2. Πώς μπορούμε να μεταφέρουμε και να εγχύσουμε μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub>; .....8**

**3. Τι συμβαίνει στο CO<sub>2</sub> μόλις βρεθεί στον ταμιευτήρα αποθήκευσης; ..... 10**

**4. Θα μπορούσε να διαρρεύσει το CO<sub>2</sub> από τον ταμιευτήρα και, εάν ναι, ποιες θα ήταν οι συνέπειες; ..... 12**

**5. Πώς μπορούμε να παρακολουθούμε τη θέση αποθήκευσης στο βάθος και την επιφάνεια; ..... 14**

**6. Ποια κριτήρια ασφάλειας πρέπει να επιβληθούν και να τηρηθούν; ..... 16**

**Λεξιλόγιο Όρων .....18**

**Τι είναι το CO<sub>2</sub>GeoNet; .....19**

Το παρόν Φυλλάδιο συντάχθηκε χάρη στη συμβολή των:  
**Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Rimmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kanvadias.**

Μετάφραση και επιμέλεια ελληνικής έκδοσης:  
**Απόστολος Αρβανίτης και Γεώργιος Χατζηγιάννης**

# Ένα όραμα για το μέλλον

Όχι άλλες καπνίζουσες καμινάδες  
Ένας αγωγός μεταφέρει το CO<sub>2</sub> και  
το εισάγει στο υπέδαφος  
Αυτό είναι καλό για τη Γη



© Sapienza URS

Μάσσιμο, ετών 10, Ρώμη - Ιταλία

Για τα παιδιά μας  
η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> έχει νόημα



# Η κλιματική αλλαγή και η ανάγκη γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>

**Σχήμα 1**  
Οι παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> που συνδέονται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες φθάνουν τους 30 δισ. τόνους (Gt) ανά έτος, που αντιστοιχούν σε 8,1 Gt άνθρακα: 6,5 Gt από καύση ορυκτών καυσίμων και 1,6 Gt από αποδάσωση και γεωργικές πρακτικές.

## Το ανθρώπινο γένος εκλύει υπερβολική ποσότητα CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα

Έχει γίνει αποδεκτό σήμερα ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες διαταράσσουν τον κύκλο του άνθρακα στον πλανήτη μας. Πριν από τη βιομηχανική επανάσταση και πηγαίνοντας πίσω περίπου 10.000 χρόνια, αυτός ο κύκλος που βρισκόταν σε τέλεια ισορροπία και αφορούσε τη φυσική ανταλλαγή του άνθρακα μεταξύ της γεώσφαιρας, της βιόσφαιρας, των ωκεανών και της ατμόσφαιρας, είχε οδηγήσει σε χαμηλή διακύμανση συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα

(περίπου 280 ppm, δηλ. 0,028%). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 250 χρόνων, η παραγωγική μας καύση ορυκτών καυσίμων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση, τη βιομηχανία και τις μεταφορές, έχει προκαλέσει ακατάπαυτη αύξηση της ποσότητας του CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα (Σχ. 1). Περίπου το ήμισυ αυτής της πλεονάζουσας ανθρωπογενούς ποσότητας έχει απορροφηθεί εκ νέου από τη βλάστηση και έχει διαλυθεί στους ωκεανούς, με τη δεύτερη περίπτωση (δηλ. τη διάλυση στους ωκεανούς) να προκαλεί όξινα φαινόμενα, που έχουν ενδεχομένως αρνητικές επιπτώσεις στα φυτά και τα ζώα της θάλασσας. Το υπόλοιπο έχει συγκεντρωθεί στην ατμόσφαιρα και συμβάλλει στην αλλαγή του κλίματος, επειδή το CO<sub>2</sub> είναι ένα αέριο θερμοκηπίου που παγιδεύει μέρος της θερμότητας του ήλιου, προκαλώντας θέρμανση της επιφάνειας της γης. Πρέπει να ληφθούν άμεσα ριζικά μέτρα για να σταματήσει η σημερινή ατμοσφαιρική συκέντρωση CO<sub>2</sub> των 387 ppm (ήδη υπάρχει αύξηση +38% σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα) προτού αυξηθεί πέρα από το κρίσιμο επίπεδο των 450 ppm στις επόμενες δεκαετίες. Οι ειδικοί σε όλο τον κόσμο συμφωνούν ότι πάνω από αυτό το επίπεδο, πιθανότατα δεν θα είναι πλέον δυνατό να αποτραπούν πολύ σοβαρές συνέπειες.

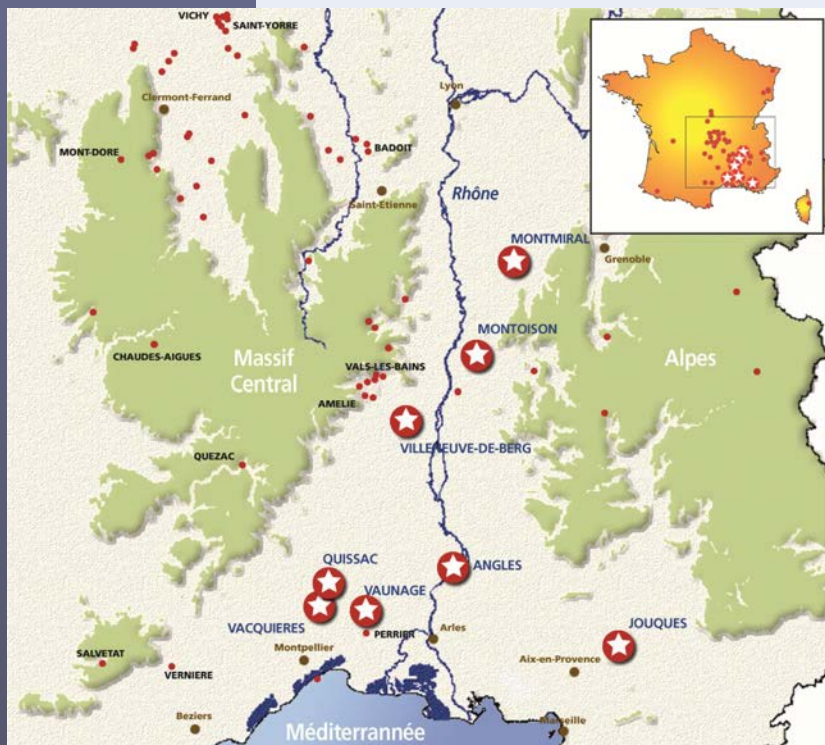


© BRGM im@gg

## Επιστροφή του άνθρακα πίσω στο έδαφος

**Σχήμα 2**  
Επαρχία της Γαλλίας με ανθρακούχα νερά.

- ★ Φυσικά πεδία CO<sub>2</sub>
- Εκμεταλλεύσιμα ανθρακούχα νερά (πόσιμα νερά, spa)



© BRGM im@gg

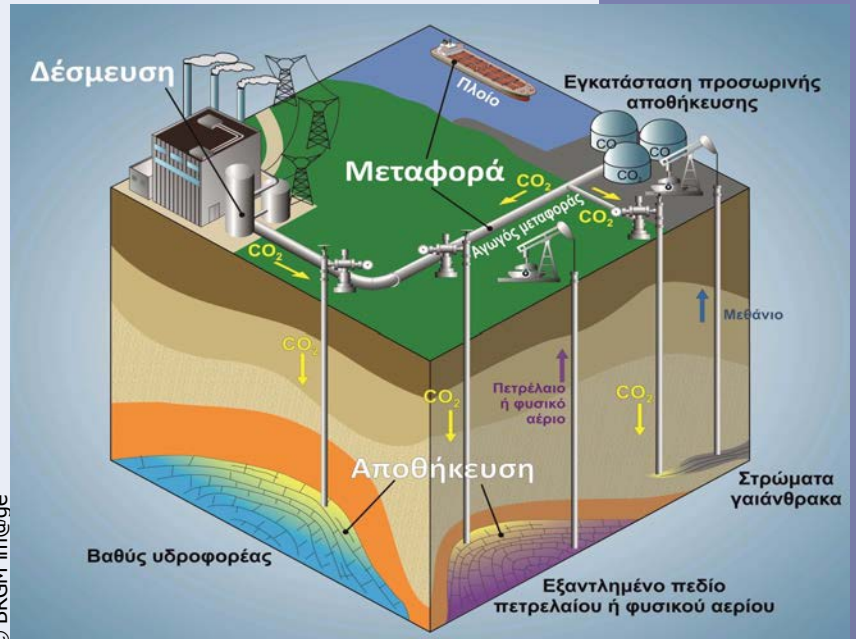
Από την έναρξη της Βιομηχανικής Εποχής στη δεκαετία του 1750, ο κόσμος μας έχει εξαρτηθεί πολύ από τα ορυκτά καύσιμα, κι έτσι δεν μας εκπλήσσει το γεγονός ότι η μετατροπή της κοινωνίας μας σε μια άλλη, η οποία θα βασίζεται σε φιλικές προς το κλίμα ενεργειακές πηγές, θα χρειαστεί και χρόνο και χρήμα. Αυτό που χρειαζόμαστε, σαν ένα πρώτο βήμα, είναι μια βραχυπρόθεσμη λύση που θα βοηθήσει στη μείωση της εξάρτησής μας από τα ορυκτά καύσιμα και τη χρησιμοποίησή τους με τρόπο που δεν θα μολύνει, δίνοντάς μας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο για να αναπτυχθούν τεχνολογίες και υποδομές προκειμένου να οικοδομηθεί ένα μέλλον βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μια τέτοια επιλογή είναι η δημιουργία ενός κλειστού «κύκλου» στο σύστημα παραγωγής ενέργειας, διά του οποίου ο άνθρακας που εξορύσσεται αρχικά από το έδαφος υπό μορφή αερίου, πετρελαίου και κάρβουνου (γαιάνθρακα) θα επιστρέφει πάλι υπό μορφή CO<sub>2</sub>. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι η αποθήκευση του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος δεν αποτελεί ανθρώπινη ανακάλυψη, αλλά ένα εξ' ολοκλήρου φυσικό, πολύ διαδεδομένο φαινόμενο, που εκδηλώνεται με την παρουσία ταμειωτήρων CO<sub>2</sub>, οι οποίοι υφίστανται εδώ και χιλιάδες έως εκατομμύρια χρόνια. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η σειρά οκτώ φυσικών ταμειωτήρων CO<sub>2</sub> στη νοτιο-ανατολική Γαλλία που ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια ερευνών πετρελαίου τη δεκαετία του 1960 (Σχ. 2). Αυτές και πολλές άλλες φυσικές τοποθεσίες σε ολόκληρο τον κόσμο αποδεικνύουν ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι καινούριοι να αποθηκεύσουν CO<sub>2</sub> με αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο για πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους.



## Δέσμευση και Αποθήκευση του CO<sub>2</sub>: ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος μετριασμού

Μεταξύ του φάσματος των μέτρων που χρειάζεται να εφαρμοσθούν επείγοντως ώστε να μετριαστεί η κλιματική αλλαγή και οξίνιση των ωκεανών, η Δέσμευση και Αποθήκευση του CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS\*) μπορεί να παίξει αποφασιστικό ρόλο καθώς θα μπορούσε να συμβάλει κατά 33% στη μείωση του CO<sub>2</sub>, που απαιτείται μέχρι το 2050. Η τεχνολογία CCS περιλαμβάνει τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με κάρβουνο ή φυσικό αέριο και σε βιομηχανικές μονάδες (χαλυβουργεία, τσιμεντοβιομηχανίες, διυλιστήρια, κλπ), τη μεταφορά του με αγωγό ή πλοίο σε μια θέση αποθήκευσης και την έγχυσή του μέσω γεώτρησης\* σε έναν κατάλληλο γεωλογικό σχηματισμό για μακροχρόνια αποθήκευση (Σχ. 3). Εν όψει της παγκόσμιας αύξησης του πληθυσμού και της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς και της σημερινής έλλειψης μεγάλης κλίμακας εναλλακτικών «καθαρών» πηγών ενέργειας, η χρήση ορυκτών καυσίμων θα συνεχίσει να είναι αναπόφευκτη βραχυπρόθεσμα. Χρησιμοποιώντας όμως την τεχνολογία CCS, η ανθρωπότητα θα μπορούσε να προχωρήσει προς ένα δρόμο περιβαλλοντικά φιλικό, ενώ συγχρόνως να δημιουργήσει μια γέφυρα προς μια παγκόσμια οικονομία βασισμένη σε βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.

© BRGM im@at

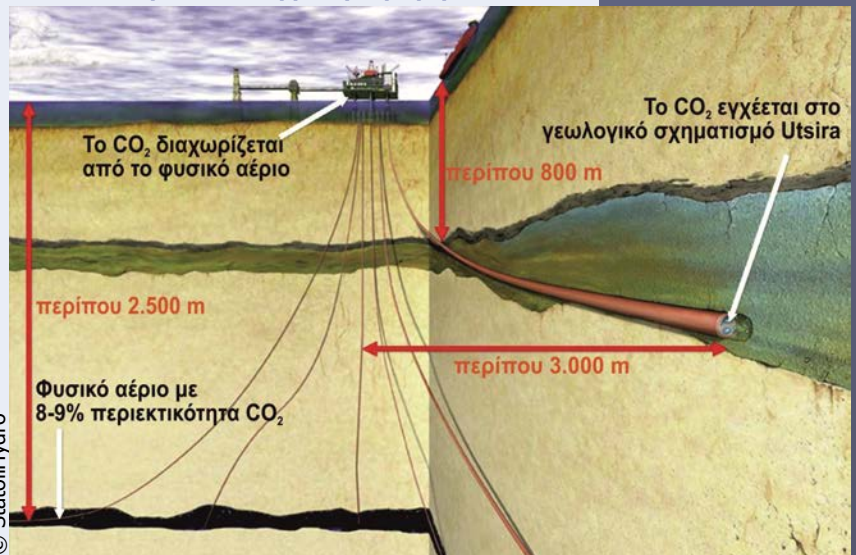


### Βασικές ερωτήσεις για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>

Το Δίκτυο Αριστείας CO<sub>2</sub>GeoNet δημιουργήθηκε υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σαν μια ομάδα ερευνητικών ινστιτούτων που μπορούν να διατηρήσουν την Ευρώπη στην πρώτη γραμμή των διεθνών ερευνών μεγάλης κλίμακας. Ένας από τους στόχους του CO<sub>2</sub>GeoNet είναι η διακίνηση σαφών επιστημονικών πληροφοριών για τα τεχνικά ζητήματα της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Προκειμένου να ενθαρρυνθεί ο διάλογος για τις ουσιαστικές πτυχές αυτής της ζωτικής σημασίας τεχνολογίας, οι ερευνητές του CO<sub>2</sub>GeoNet έχουν ετοιμάσει βασικές απαντήσεις σε διάφορες συχνές ερωτήσεις. Στις επόμενες σελίδες, θα βρείτε επεξηγήσεις για το πώς μπορεί να εφαρμοστεί η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>, κάτω από ποιες συνθήκες καθίσταται δυνατή, και ποια είναι τα κριτήρια για την ασφαλή και αποτελεσματική εφαρμογή της.

#### Σχήμα 4

**Κατακόρυφη τομή της θέσης Sleipner στη Νορβηγία.** Το φυσικό αέριο, που εξορύσσεται από βάθος 2.500 m, περιέχει αρκετό ποσοστό CO<sub>2</sub> που πρέπει να απομακρυνθεί ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τα εμπορικά πρότυπα. Αντί της απελευθέρωσής του στην ατμόσφαιρα, το δεσμευόμενο CO<sub>2</sub> εγχέεται σε βάθος περίπου 1.000 m μέσα στον αμμώδη υδροφορέα\* Utsira.



**Σχήμα 3**  
Σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, το CO<sub>2</sub> δεσμεύεται από το διαχωρισμό του από τα άλλα αέρια. Στη συνέχεια υπόκειται σε συμπίεση και μεταφέρεται με αγωγό ή πλοίο στη θέση γεωλογικής αποθήκευσής του: μεγάλα βάθη υδροφορείς, εξαντλημένα πεδία πετρελαίου και φυσικού αερίου, μη-εξορύξιμα στρώματα γαιάνθρακα (κάρβουνο).

© StatoilHydro

### Η παγκόσμια ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS είναι σε άνθηση

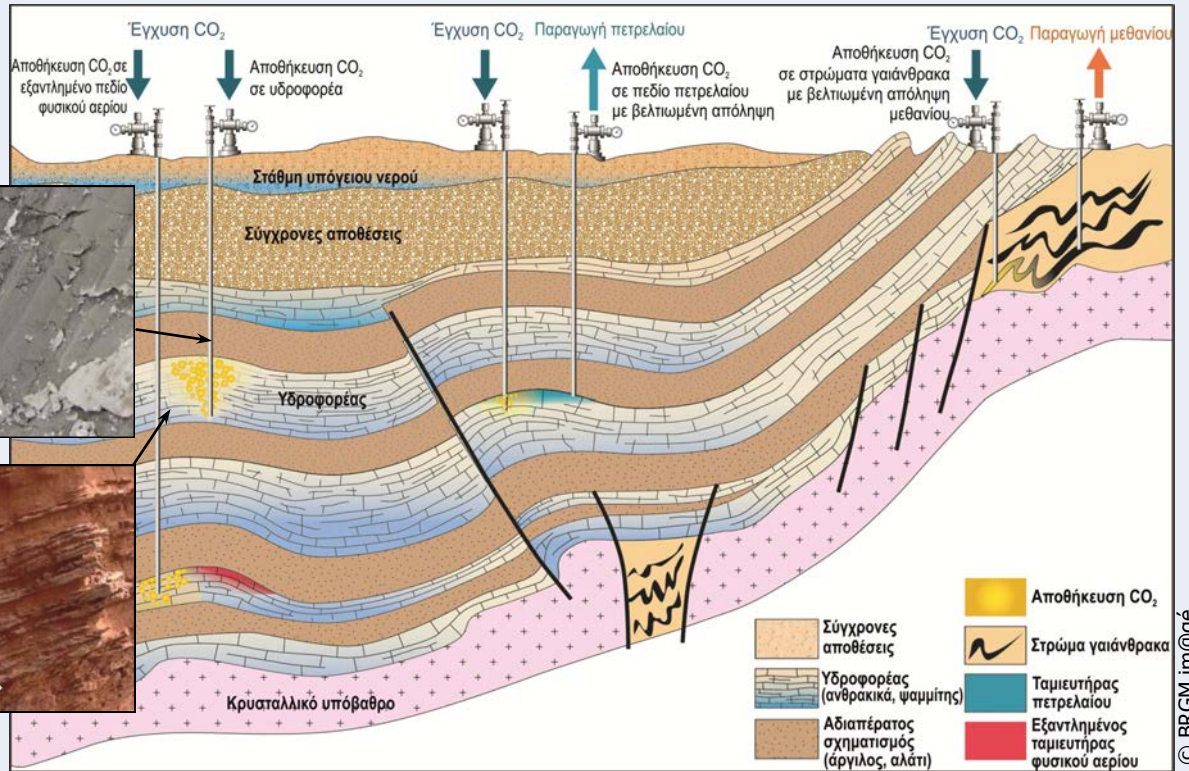
Από τη δεκαετία του 1990 έχουν εκτελεστεί μεγάλα ερευνητικά προγράμματα CCS σε Ευρώπη, Ηνωμένες Πολιτείες, Καναδά, Αυστραλία και Ιαπωνία. Έχει ήδη αποκτηθεί πολλή γνώση από τα πρώτα παγκόσμια μεγάλης κλίμακας έργα επίδειξης, όπου το CO<sub>2</sub> έχει εγχυθεί υπόγεια σε μεγάλο βάθος για αρκετά χρόνια: Στο Sleipner της Νορβηγίας (περίπου 1 εκατ. t/έτος από το 1996) (Σχ. 4), στο Weyburn του Καναδά (περίπου 1,8 εκατ. t/έτος από το 2000) και στο In Salah της Αλγερίας (περίπου 1 εκατ. t/έτος από το 2004). Η διεθνής συνεργασία για την έρευνα της αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, που ενθαρρύνθηκε από τον IEAGHG\* και το CSLF\* στις παραπάνω τοποθεσίες και αλλού, ήταν ιδιαίτερα σημαντική για τη διεύρυνση της κατανόησης και των γνώσεών μας και την ανάπτυξη μιας παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα αποτελεί η ειδική έκθεση του IPCC\* για τη δέσμευση και αποθήκευση του CO<sub>2</sub> (2005), η οποία περιγράφει τη σημερινή κατάσταση της γνώσης και τα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να επιτραπεί η ευρεία εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας. Υπάρχει ήδη σημαντική τεχνική εμπειρία και ο κόσμος προχωρεί σήμερα με σιγουριά στη φάση της επιδεικτικής εφαρμογής. Επιπλέον, εκτός από την τεχνική ανάπτυξη, έχουν καταρτισθεί και νομοθετικά, κανονιστικά, οικονομικά και πολιτικά πλαίσια και έχει αξιολογηθεί η κοινωνική αντίληψη και υποστήριξη. Στην Ευρώπη, ο στόχος είναι η ανάληψη και εκτέλεση 12 επιδεικτικών έργων μεγάλης κλίμακας στο χρονικό διάστημα μέχρι το 2015 ώστε να καταστεί δυνατή η ευρεία εμπορική ανάπτυξη μέχρι το 2020. Για το σκοπό αυτό, εκδόθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιανουάριο του 2008 το «Πακέτο δράσης για το κλίμα και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», το οποίο προτείνει μια Οδηγία για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> και άλλα μέτρα για την προώθηση της ανάπτυξης και ασφαλούς χρήσης της τεχνολογίας CCS.

\* Βλέπε λεξιλόγιο όρων στο τέλος.



# Πού και πόσο CO<sub>2</sub> μπορούμε να αποθηκεύσουμε στο υπέδαφος;

Το CO<sub>2</sub> δεν μπορεί να εγχέεται οπουδήποτε υπόγεια, πρέπει πρώτα να εντοπίζονται κατάλληλοι σχηματισμοί πετρωμάτων που θα το φιλοξενήσουν. Πιθανοί ταμειυτήρες για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> υπάρχουν σ' ολόκληρο τον κόσμο και προσφέρουν επαρκή χωρητικότητα ώστε να συμβάλλουν σημαντικά στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής που οφείλεται σε ανθρωπογενή αίτια.



**Σχήμα 1**  
Το CO<sub>2</sub> εγχέεται σε βαθιά γεωλογικά στρώματα πετρωμάτων και πετρωμάτων (βλ. ψαμμίτη στο κάτω ένθετο) των οποίων υπέρκεινται αδιαπέρατα πετρώματα (βλ. αργιλόλιθο στο επάνω ένθετο) που εμποδίζουν τη διαφυγή του CO<sub>2</sub> στην επιφάνεια. Οι κύριες επιλογές αποθήκευσης περιλαμβάνουν:  
1. Εξαντλημένους ταμειυτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου με βελτιωμένη ανάκτηση, όπου είναι δυνατό  
2. Υδροφορείς που περιέχουν αλμυρό νερό ακατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση  
3. Βαθιά μη εξορυγμένα στρώματα γαιάνθρακα που συνδέονται τοπικά με βελτιωμένη ανάκτηση μεθανίου.

Υπάρχουν τρεις κύριες επιλογές αποθήκευσης για το CO<sub>2</sub> (Σχ. 1):

1. Τα εξαντλημένα πεδία φυσικού αερίου και πετρελαίου – ευρέως γνωστά λόγω της έρευνας και εκμετάλλευσης των υδρογονανθράκων, προσφέρουν άμεση δυνατότητα αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.
2. Αλμυροί υδροφορείς – προσφέρουν μεγαλύτερο δυναμικό αποθήκευσης, αλλά γενικά δεν είναι τόσο καλά γνωστοί.
3. Μη εξορυγμένα στρώματα γαιάνθρακα – αποτελούν μια επιλογή για το μέλλον, μόλις λυθεί το πρόβλημα της έγχυσης μεγάλων όγκων CO<sub>2</sub> μέσα στο χαμηλής διαπερατότητας\* γαιάνθρακα.

## Οι ταμειυτήρες

Μόλις εγχυθεί υπόγεια μέσα σε ένα κατάλληλο πέτρωμα ταμειυτήρα, το CO<sub>2</sub> συγκεντρώνεται στους πόρους μεταξύ των κόκκων και στις διαρρήξεις, μετακινώντας και αντικαθιστώντας μ' αυτόν τον τρόπο κάθε υπάρχον ρευστό όπως αέριο, νερό ή πετρέλαιο. Συνεπώς, τα πετρώματα που είναι κατάλληλα για να φιλοξενήσουν το γεωλογικά αποθηκευμένο CO<sub>2</sub> πρέπει να έχουν μεγάλο πορώδες\* και διαπερατότητα. Τέτοιοι σχηματισμοί πετρωμάτων, που είναι το αποτέλεσμα απόθεσης ιζημάτων κατά το γεωλογικό παρελθόν, εντοπίζονται συνήθως στις ονομαζόμενες «ιζηματογενείς λεκάνες». Κατά θέσεις, αυτοί οι περατοί σχηματισμοί εναλλάσσονται με αδιαπέρατα πετρώματα, που μπορούν να δράσουν σαν αδιαπέρατο

στεγανό. Συχνά, οι ιζηματογενείς λεκάνες φιλοξενούν ταμειυτήρες υδρογονανθράκων και πεδία φυσικού CO<sub>2</sub>, γεγονός που αποδεικνύει την ικανότητά τους να συγκρατούν ρευστά για μεγάλες χρονικές περιόδους, έχοντας παγιδευμένο με φυσικό τρόπο πετρέλαιο, αέριο, ακόμα και καθαρό CO<sub>2</sub> για εκατομμύρια χρόνια. Σε σκαριφήματα που δείχνουν πιθανές επιλογές αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, το υπέδαφος συχνά απεικονίζεται σαν μια υπερ-απλουστευμένη, ομοιογενής, στρωματοειδής δομή. Στην πραγματικότητα, όμως, το υπέδαφος συνίσταται από ανομοιογενώς καταμεμημένους και τοπικά ρηγματωμένους σχηματισμούς πετρωμάτων, ταμειυτήρες\* και πετρώματα-καλύμματα, σχηματιζόμενες σύνθετες, ετερογενείς δομές. Απαιτείται η σε βάθος γνώση της θέσης και η γεωεπιστημονική εμπειρία προκειμένου να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των υπόγειων δομών που προτείνονται για μακροχρόνια αποθήκευση του CO<sub>2</sub>.

Οι πιθανοί ταμειυτήρες αποθήκευσης CO<sub>2</sub> θα πρέπει να πληρούν πολλά κριτήρια, μεταξύ των οποίων τα ουσιαστικά είναι τα εξής:

- επαρκές πορώδες, επαρκής διαπερατότητα και επαρκής αποθηκευτική ικανότητα,
- η παρουσία υπερκειμένου αδιαπέρατου πετρώματος - το ονομαζόμενο «πέτρωμα-κάλυμμα»\* (π.χ. αργίλος, αργιλόλιθος, μάργα, ορυκτό αλάτι), που εμποδίζει τη μετανάστευση του CO<sub>2</sub> προς τα πάνω,
- η παρουσία «δομών παγίδευσης» - με άλλα λόγια χαρακτηριστικά, όπως ένα θολωτό πέτρωμα-κάλυμμα, το οποίο μπορεί να ελέγξει την έκταση



της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> μέσα στο σχηματισμό αποθήκευσης,

- θέση με βάθος μεγαλύτερο των 800 m, όπου οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές, ώστε να καθιστούν δυνατή την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> σε μια συμπίεσμένη φάση ρευστού και έτσι να μεγιστοποιείται η ποσότητα που αποθηκεύεται,
- η απουσία πόσιμου νερού: το CO<sub>2</sub> δεν θα εγχυθεί σε νερά που είναι κατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση και δραστηριότητες.

## Πού θα βρεθούν θέσεις αποθήκευσης στην Ευρώπη

Οι ιζηματογενείς λεκάνες έχουν ευρεία εξάπλωση σε ολόκληρη την Ευρώπη, για παράδειγμα υπεράκτια στη Βόρεια Θάλασσα ή σε χερσαίο χώρο στην περιφέρεια των οροσειρών των Άλπεων (Σχ. 2). Πολλοί σχηματισμοί στις Ευρωπαϊκές λεκάνες πληρούν τα κριτήρια γεωλογικής αποθήκευσης και σήμερα πραγματοποιείται από ερευνητές χαρτογράφηση και χαρακτηρισμός τους. Άλλες Ευρωπαϊκές περιοχές συνίστανται από αρχαίο συμπαγή φλοιό, όπως ένα μεγάλο μέρος της Σκανδιναβίας, και έτσι δεν φιλοξενούν πετρώματα κατάλληλα για αποθήκευση CO<sub>2</sub>.

Ένα παράδειγμα περιοχής με δυνατότητα αποθήκευσης είναι η Νότια Πέρμια Λεκάνη, που εκτείνεται από την Αγγλία μέχρι την Πολωνία (απεικονίζεται στο Σχήμα 2 με το μεγαλύτερο ελλειψοειδές σχήμα). Τα ιζήματα έχουν επηρεαστεί από πετρογενετικές διαδικασίες που άφησαν ένα τμήμα των πόρων γεμάτο με αλμυρό νερό, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Τα αργιλικά στρώματα που υπάρχουν μεταξύ των πορωδών ψαμμιτών έχουν συμπαγοποιηθεί σε στρώματα χαμηλής διαπερατότητας, τα οποία εμποδίζουν την άνοδο των ρευστών. Μεγάλο μέρος των ψαμμιτικών σχηματισμών εντοπίζεται σε βάθη μεταξύ 1 και 4 km, όπου η πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να αποθηκεύεται το CO<sub>2</sub> σαν μια πυκνή φάση. Η περιεκτικότητα σε άλατα στα νερά των σχηματισμών αυξάνεται σε αυτό το διάστημα βάθους από 100 g/l περίπου σε 400 g/l, με άλλα λόγια, γίνονται πολύ πιο αλμυρά από το θαλασσινό νερό (35 g/l). Οι κινήσεις στη λεκάνη έχουν προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση του ορυκτού άλατος, δημιουργώντας εκατοντάδες θολωτές δομές, οι οποίες στη συνέχεια παγίδευσαν φυσικό αέριο. Πρόκειται για αυτές τις παγίδες που μελετώνται ως ενδεχόμενες θέσεις αποθήκευσης CO<sub>2</sub> και εκτέλεσης πιλοτικών έργων.

## Αποθηκευτική Ικανότητα

Πολιτικοί, ρυθμιστικές αρχές και φορείς εκτέλεσης της αποθήκευσης πρέπει να γνωρίζουν την αποθηκευτική ικανότητα του CO<sub>2</sub>. Συνήθως οι υπολογισμοί της αποθηκευτικής ικανότητας είναι κατά μεγάλη προσέγγιση με βάση την έκταση στο χώρο των πιθανά κατάλληλων σχηματισμών. Η ικανότητα μπορεί να αξιολογηθεί σε διάφορες κλίμακες, από την εθνική κλίμακα για πρόχειρες εκτιμήσεις, μέχρι κλίμακα λεκάνης και κλίμακα ταμιευτήρα για πιο ακριβείς υπολογισμούς, που λαμβάνουν υπόψη την ετερογένεια και πολυπλοκότητα της πραγματικής γεωλογικής δομής.

**Ογκομετρική Ικανότητα:** Οι δημοσιευμένες εθνικές ικανότητες αποθήκευσης βασίζονται γενικά σε υπολογισμούς του όγκου των πόρων των σχηματισμών. Θεωρητικά, η αποθηκευτική ικανότητα ενός συγκεκριμένου σχηματισμού μπορεί να υπολογιστεί με πολλαπλασιασμό του εμβαδού του με το πάχος του, το μέσο πορώδες του και τη μέση πυκνότητα του CO<sub>2</sub> σε συνθήκες βάθους ταμιευτήρα. Ωστόσο,



Σχήμα 2  
Γεωλογικός Χάρτης της Ευρώπης που απεικονίζει τη θέση των κύριων ιζηματογενών λεκανών (κόκκινα ελλειψοειδή), όπου μπορούν να εντοπιστούν κατάλληλοι ταμιευτήρες για αποθήκευση CO<sub>2</sub> (με βάση το Γεωλογικό Χάρτη της Ευρώπης, κλίμακας 1:5.000.000).

επειδή ο χώρος των πόρων είναι ήδη κατειλημμένος από νερό, μόνο ένα μικρό τμήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση, που γενικά θεωρείται ότι είναι περίπου 1-3%. Αυτός ο συντελεστής αποθηκευτικής ικανότητας εφαρμόζεται στη συνέχεια κατά την εκτίμηση της ογκομετρικής ικανότητας.

**Ρεαλιστική Ικανότητα:** Περισσότερες εκτιμήσεις της ρεαλιστικής ικανότητας μπορούν να γίνουν σε μεμονωμένες θέσεις αποθήκευσης μέσω λεπτομερών ερευνών. Το πάχος του σχηματισμού δεν είναι σταθερό και οι ιδιότητες του ταμιευτήρα μπορεί να ποικίλουν ακόμα και σε μικρές αποστάσεις. Η γνώση του μεγέθους, του σχήματος και των γεωλογικών ιδιοτήτων των δομών μας επιτρέπει να μειώσουμε τις αβεβαιότητες στους υπολογισμούς του όγκου. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν προσομοιώσεις στον υπολογιστή ώστε να προβλεφθεί η έγχυση του CO<sub>2</sub> και η κίνηση μέσα στον ταμιευτήρα προκειμένου να εκτιμηθεί μια ρεαλιστική αποθηκευτική ικανότητα.

**Βιώσιμη Ικανότητα:** Η ικανότητα δεν είναι απλώς ένα ζήτημα πετροφυσικής. Κοινωνικο-οικονομικοί παράγοντες επηρεάζουν επίσης το εάν μια κατάλληλη θέση θα χρησιμοποιηθεί ή όχι. Για παράδειγμα, η μετακίνηση του CO<sub>2</sub> από την πηγή προς τη θέση αποθήκευσης θα διέπεται από το κόστος μεταφοράς. Επιπλέον, η ικανότητα εξαρτάται από την καθαρότητα του CO<sub>2</sub>, καθώς η παρουσία άλλων αερίων θα μειώσει το διαθέσιμο για το CO<sub>2</sub> όγκο του ταμιευτήρα. Τέλος, οι πολιτικές επιλογές και η δημόσια αποδοχή θα έχουν τον τελευταίο λόγο για το εάν θα αξιοποιηθεί στην πραγματικότητα η διαθέσιμη ικανότητα του ταμιευτήρα ή όχι.

Συμπερασματικά, γνωρίζουμε ότι η ικανότητα αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> στην Ευρώπη είναι μεγάλη, ακόμη και αν υπάρχουν αβεβαιότητες που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα και ετερογένεια του ταμιευτήρα και με κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες. Στο έργο της E.E. GESTCO\* υπολογίστηκε η αποθηκευτική ικανότητα του CO<sub>2</sub> σε πεδία υδρογονανθράκων στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (μέσα και γύρω από αυτήν) στους 37 Gt, όπου μεγάλες εγκαταστάσεις σ' αυτήν την περιοχή θα ήταν δυνατό να εγχύσουν CO<sub>2</sub> για αρκετές δεκαετίες. Η επικαιροποίηση και η περαιτέρω χαρτογράφηση των αποθηκευτικών ικανοτήτων στην Ευρώπη αποτελεί ένα θέμα συνεχιζόμενης έρευνας στα μεμονωμένα κράτη - μέλη και μέσω του Έργου EU Geocarapacity\* συνολικά για την Ευρώπη.



# Πώς μπορούμε να μεταφέρουμε και να εγχύσουμε μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub>;

Μετά τη δέσμευσή του στη βιομηχανική μονάδα, το CO<sub>2</sub> υπόκειται σε συμπίεση, μεταφέρεται και στη συνέχεια εγχέεται μέσα στο σχηματισμό του ταμιευτήρα μέσω μιας ή αρκετών γεωτρήσεων. Η συνολική αλυσίδα πρέπει να βελτιστοποιηθεί ώστε να καταστεί δυνατή η αποθήκευση μερικών εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> ανά έτος.

## Συμπίεση

Το CO<sub>2</sub> συμπιέζεται σε μορφή πυκνού ρευστού που καταλαμβάνει σημαντικά λιγότερο χώρο από ένα αέριο.

Μόλις το CO<sub>2</sub> διαχωριστεί από το καυσαέριο στη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ή τη βιομηχανική μονάδα, το ρεύμα υψηλής συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> που προκύπτει αφυδατώνεται και συμπιέζεται, καθιστώντας πιο αποτελεσματική τη μεταφορά και αποθήκευση (Σχ. 1). Η αφυδάτωση είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η διάβρωση του εξοπλισμού και των υποδομών και, κάτω από μεγάλη πίεση, ο σχηματισμός υδριτών (στερεοί κρύσταλλοι με μορφή πάγου που είναι δυνατόν να βουλώσουν τον εξοπλισμό και τους αγωγούς). Η συμπίεση πραγματοποιείται μαζί με την αφυδάτωση ακολουθώντας μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων: επαναλαμβανόμενοι κύκλοι συμπίεσης, ψύξης και διαχωρισμού ύδατος. Η πίεση, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα σε νερό πρέπει να προσαρμοστούν στον τρόπο μεταφοράς και τις απαιτήσεις της πίεσης στη θέση αποθήκευσης. Βασικοί παράγοντες για το σχεδιασμό της εγκατάστασης του συμπιεστή είναι ο ρυθμός ροής του αερίου, οι πιέσεις αναρρόφησης και εκκένωσης, η θερμοχωρητικότητα του αερίου, και η απόδοση του συμπιεστή. Υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία για τη συμπίεση και ήδη εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα σε πολλά βιομηχανικά πεδία.

**Σχήμα 1**  
Στάδια γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Προκειμένου να μεταφερθεί το CO<sub>2</sub> από το σημείο εκπομπής του προς την ασφαλή και διαρκή αποθήκευσή του, πρέπει να διατρέξει μια ολόκληρη αλυσίδα λειτουργιών που περιλαμβάνει δέσμευση, συμπίεση, μεταφορά και έγχυση.

## Μεταφορά

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να μεταφερθεί είτε με πλοίο ή με αγωγό.

Η μεταφορά του CO<sub>2</sub> με πλοίο εκτελείται σήμερα μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα (10.000-15.000 m<sup>3</sup>) για βιομηχανικές χρήσεις, αλλά θα μπορούσε να αποτελέσει μια ελκυστική επιλογή στο μέλλον για

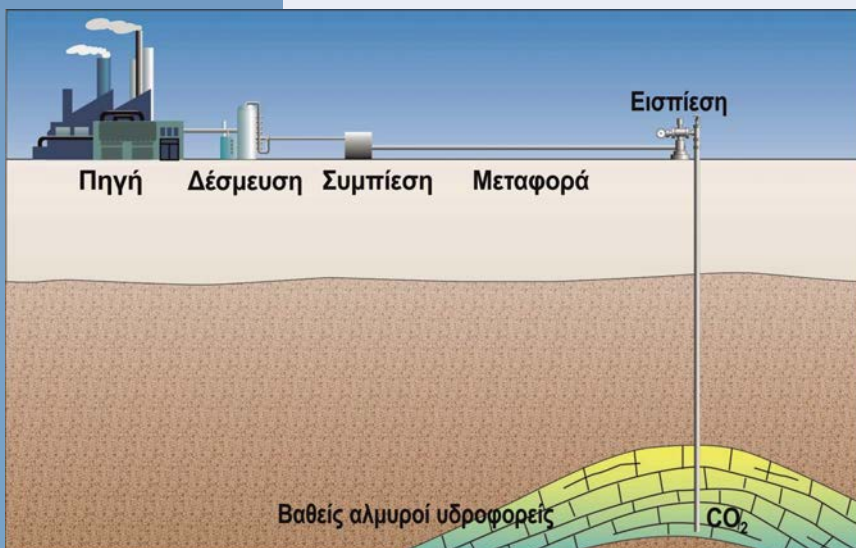
έργα της τεχνολογίας CCS όπου μια παράκτια πηγή είναι πολύ μακριά από έναν κατάλληλο ταμιευτήρα. Κατάλληλα για τη μεταφορά του CO<sub>2</sub> είναι τα πλοία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά «υγροποιημένου αερίου πετρελαίου» (LPG). Ειδικότερα, τα ημι-κατεψυγμένα συστήματα είναι υπό συνθήκες και συμπίεσης και ψύξης, και έτσι το CO<sub>2</sub> μπορεί να μεταφερθεί σε ρευστή μορφή. Τα πιο καινούργια πλοία LPG έχουν όγκους έως 200.000 m<sup>3</sup> και μπορούν να μεταφέρουν 230.000 τόνους CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, η μεταφορά με πλοίο δεν παρέχει εφοδιασμό και διακίνηση συνεχούς ροής και είναι απαραίτητες οι ενδιάμεσες εγκαταστάσεις αποθήκευσης στο λιμάνι ώστε να επιτευχθεί η επαναφόρτωση του CO<sub>2</sub>.

Σήμερα εφαρμόζεται η μεταφορά μέσω αγωγών για μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιούνται από πετρελαϊκές εταιρίες στη Βελτιωμένη Ανάκτηση Πετρελαίου\* (περίπου 3.000 km αγωγών CO<sub>2</sub> στον κόσμο, οι περισσότεροι στις Η.Π.Α.). Ο τρόπος αυτός είναι οικονομικότερος από άποψη κόστους σε σύγκριση με τη μεταφορά με πλοίο και επιπλέον προσφέρει το πλεονέκτημα της παροχής συνεχούς ροής από τη μονάδα δέσμευσης μέχρι τη θέση αποθήκευσης. Όλοι οι υπάρχοντες αγωγοί CO<sub>2</sub> λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις κάτω από υπερκρίσιμες συνθήκες για το CO<sub>2</sub>, κάτω από τις οποίες αυτό συμπεριφέρεται σαν αέριο αλλά έχει την πυκνότητα υγρού. Τρεις σημαντικοί παράγοντες καθορίζουν την ποσότητα που μπορεί να διαχέριστεί ένας αγωγός: η διάμετρος του, η πίεση κατά το μήκος του και, συνεπώς, το πάχος των τοιχωμάτων του.

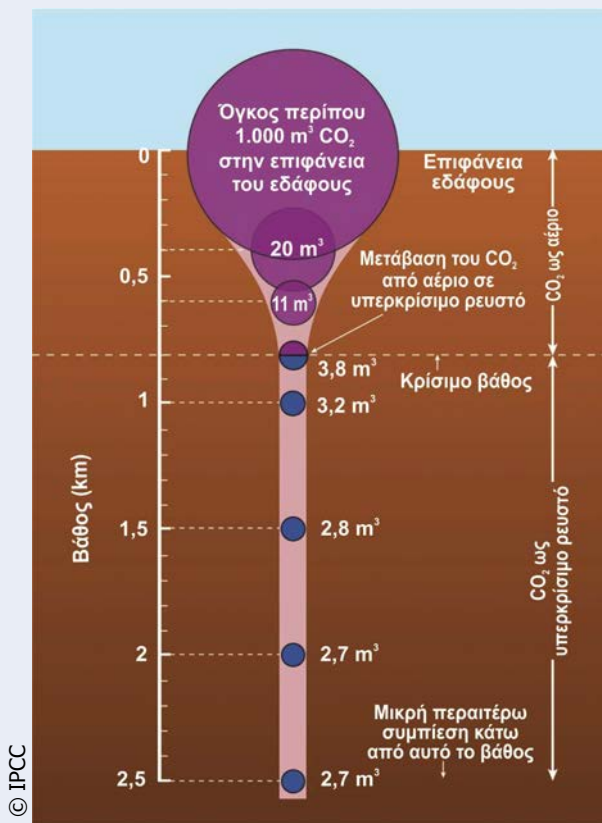
## Έγχυση

Όταν το CO<sub>2</sub> φθάσει στη θέση αποθήκευσης, εγχέεται με πίεση στον ταμιευτήρα (Σχ. 2).

Η πίεση έγχυσης πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πίεση του ταμιευτήρα ώστε να μετακινηθεί το ρευστό του ταμιευτήρα μακριά από το σημείο έγχυσης. Ο αριθμός των γεωτρήσεων έγχυσης εξαρτάται από την ποσότητα του CO<sub>2</sub> που θα αποθηκευτεί, το ρυθμό έγχυσης (όγκος CO<sub>2</sub> που εγχέεται ανά ώρα), τη διαπερατότητα και το πάχος του ταμιευτήρα, τη μέγιστη πίεση ασφαλούς έγχυσης και τον τύπο της γεώτρησης. Καθώς ο κύριος στόχος είναι η μακροχρόνια ανάσχεση του CO<sub>2</sub>, πρέπει να είμαστε βέβαιοι για την υδραυλική ακεραιότητα του σχηματισμού. Οι υψηλοί ρυθμοί έγχυσης μπορεί να προκαλέσουν αυξήσεις πίεσης στο σημείο έγχυσης, ιδιαίτερα σε σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας. Η πίεση έγχυσης δεν πρέπει συνήθως να υπερβαίνει την πίεση θραύσης του πετρώματος καθώς μπορεί να προκληθεί ζημιά στον ταμιευτήρα ή το υπερκείμενο στεγανό πέτρωμα. Χρησιμοποιούνται γεωμηχανική ανάλυση και μοντέλα για να προσδιοριστεί η μέγιστη πίεση έγχυσης ώστε να αποφευχθεί η διάρρηξη του σχηματισμού.







© IPCC

**Σχήμα 2**  
Όταν εγχυθεί υπόγεια, το CO<sub>2</sub> γίνεται ένα πυκνό υπερκρίσιμο\* ρευστό σε βάθος περίπου 0,8 km. Ο όγκος του μειώνεται εντυπωσιακά από 1.000 m<sup>3</sup> στην επιφάνεια μέχρι 2,7 m<sup>3</sup> στα 2 km βάθος. Το γεγονός αυτό αποτελεί έναν από τους παράγοντες που κάνουν τόσο ελκυστική τη γεωλογική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>.

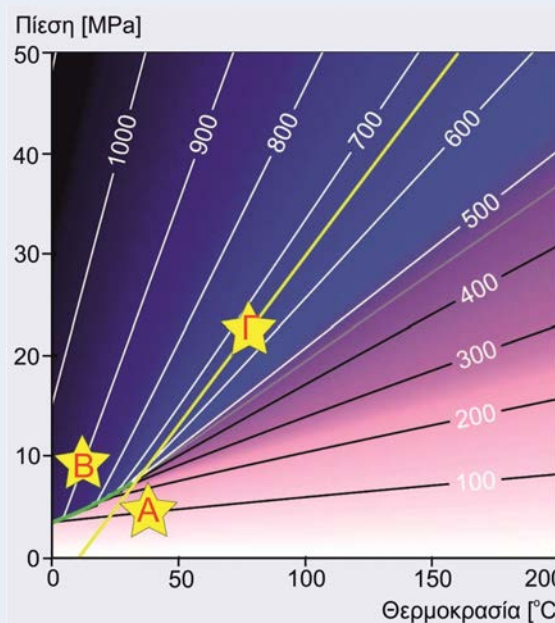
Χημικές διεργασίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν το ρυθμό έγχυσης του CO<sub>2</sub> μέσα στο σχηματισμό. Ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος του ταμιευτήρα, τη σύσταση των ρευστών και τις συνθήκες του ταμιευτήρα (όπως θερμοκρασία, πίεση, όγκος, συγκέντρωση, κλπ), είναι δυνατόν να εμφανιστούν κοντά στη γεώτρηση διαδικασίες διαλυτοποίησης ορυκτών και απόθεσης νέων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένους ή μειωμένους ρυθμούς έγχυσης. Μόλις εγχυθεί το CO<sub>2</sub>, ένα μέρος του διαλύεται στο αλμυρό νερό του ταμιευτήρα και μειώνεται ελαφρά το pH\*, ρυθμιζόμενο από τη διαλυτοποίηση των ανθρακικών ορυκτών που υπάρχουν στο φιλοξενόν πέτρωμα. Τα ανθρακικά αποτελούν τα πρώτα ορυκτά που διαλύονται καθώς έχουν πολύ υψηλό ρυθμό αντίδρασης και η διαλυτοποίηση ξεκινάει μόλις αρχίζει η έγχυση. Αυτή η διαδικασία διαλυτοποίησης μπορεί να αυξήσει το πορώδες του πετρώματος και την εγχυτότητα\*. Ωστόσο, μετά τη διαλυτοποίηση, τα ανθρακικά ορυκτά μπορεί να επαναποτεθούν και να προκαλέσουν συγκόλληση του σχηματισμού γύρω από τη γεώτρηση. Υψηλοί ρυθμοί ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να περιορισθεί η μείωση της διαπερατότητας κοντά στη γεώτρηση, μετατοπίζοντας με αυτόν τον τρόπο την περιοχή της γεωχημικής ισορροπίας της απόθεσης πιο μακριά. Η ξήρανση αποτελεί ένα άλλο φαινόμενο που προκαλείται από την έγχυση. Μετά τη φάση της οξίνισης, το υπολειμματικό νερό που έχει παραμείνει γύρω από τη γεώτρηση έγχυσης διαλύεται στο εγχέομενο

ξηρό αέριο, το οποίο με τη σειρά του συγκεντρώνει χημικά είδη στην άλμη\*. Ορυκτά (όπως τα άλατα) μπορούν έπειτα να αποθεθούν όταν η άλμη είναι αρκετά συμπυκνωμένη, μειώνοντας έτσι τη διαπερατότητα γύρω από τη γεώτρηση. Αυτά τα θέματα εγχυτότητας εξαρτώνται από σύνθετες αλληλοεπιδρούσες διεργασίες που εμφανίζονται τοπικά γύρω από τη γεώτρηση έγχυσης, αλλά που επίσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το χρόνο και την απόσταση από τη γεώτρηση έγχυσης. Για την αξιολόγηση αυτών των επιδράσεων χρησιμοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις. Οι ρυθμοί ροής της έγχυσης πρέπει να διαχειρίζονται με προσοχή ώστε να αντιμετωπίζονται επιτυχώς διαδικασίες που θα μπορούσαν να περιορίσουν την έγχυση των επιθυμητών ποσοτήτων του CO<sub>2</sub>.

### Σύσταση ρεύματος CO<sub>2</sub>

Η σύσταση και η καθαρότητα του ρεύματος CO<sub>2</sub>, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας δέσμευσης, έχουν σημαντική επίδραση σε όλες τις επακόλουθες πτυχές ενός έργου αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Η παρουσία ενός μικρού ποσοστού άλλων ουσιών, όπως νερού, υδρόθειου (H<sub>2</sub>S), οξειδίων θείου και αζώτου (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), αζώτου (N<sub>2</sub>) και οξυγόνου (O<sub>2</sub>), θα επηρεάσει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του CO<sub>2</sub> και τη συναφή συμπεριφορά του και τις επιπτώσεις του. Συνεπώς, η παρουσία τέτοιων ουσιών πρέπει να ληφθεί προσεκτικά υπόψη κατά το σχεδιασμό των φάσεων συμπίεσης, μεταφοράς και έγχυσης καθώς επίσης και κατά τη ρύθμιση των συνθηκών λειτουργίας και του εξοπλισμού.

Συμπερασματικά, η μεταφορά και έγχυση μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> είναι ήδη εφικτές. Ωστόσο, εάν η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> αναπτυχθεί ευρέως, όλα τα στάδια που εμπλέκονται πρέπει να προσαρμόζονται σε κάθε έργο αποθήκευσης ξεχωριστά. Οι βασικές παράμετροι είναι οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρεύματος του CO<sub>2</sub> (Σχ. 3), οι ρυθμοί ροής και οι συνθήκες στα ανάντη της ροής και στον ταμιευτήρα.



© BGR

**Σχήμα 3**  
Πυκνότητα του καθαρού CO<sub>2</sub> (σε kg/m<sup>3</sup>) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η κίτρινη γραμμή αντιστοιχεί σε μία τυπική βαθμίδα πίεσης και θερμοκρασίας σε μια ιζηματογενή λεκάνη. Σε βάθη μεγαλύτερα των 800 m (~8 MPa), οι συνθήκες στον ταμιευτήρα διευκολύνουν τις μεγάλες πυκνότητες (μπλε σκίαση). Η πράσινη καμπύλη αποτελεί το όριο της φάσης μεταξύ αέριου και υγρού CO<sub>2</sub>. Οι τυπικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για τη δέσμευση, μεταφορά και αποθήκευση υποδεικνύονται από τα A, B και Γ αντίστοιχα.

# Τι συμβαίνει στο CO<sub>2</sub> μόλις βρεθεί στον ταμιευτήρα αποθήκευσης;

Μόλις εγχυθεί στον ταμιευτήρα, το CO<sub>2</sub> θα ανέβει επιπλέοντας και θα πληρώσει τα κενά των πόρων κάτω από το πέτρωμα-κάλυμμα. Με την πάροδο του χρόνου, ένα μέρος του CO<sub>2</sub> θα διαλυθεί και τελικά θα μετατραπεί σε ορυκτά. Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και συμβάλλουν σε μόνιμη παγίδευση.

## Μηχανισμοί παγίδευσης

Όταν εγχέεται σε έναν ταμιευτήρα, το CO<sub>2</sub> γεμίζει τα κενά των πόρων του πετρώματος, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ήδη γεμάτα με άλμη, δηλ. με αλμυρό νερό.

Καθώς εγχέεται το CO<sub>2</sub>, οι ακόλουθοι μηχανισμοί ξεκινούν να λαμβάνουν χώρα: Ο πρώτος θεωρείται ο πιο σημαντικός και εμποδίζει το CO<sub>2</sub> να ανέβει στην επιφάνεια. Οι άλλοι τρεις τείνουν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια της αποθήκευσης με το πέρασμα του χρόνου.

### 1. Συγκέντρωση κάτω από το πέτρωμα-κάλυμμα (Δομική παγίδευση)

Καθώς το πυκνό CO<sub>2</sub> είναι «ελαφρύτερο» από το νερό, αρχίζει να ανεβαίνει προς τα πάνω. Αυτή η κίνηση σταματά όταν το CO<sub>2</sub> συναντά ένα στρώμα πετρώματος που είναι αδιαπέρατο, το ονομαζόμενο «πέτρωμα-κάλυμμα». Αυτό το πέτρωμα-κάλυμμα, που συνήθως αποτελείται από άργιλο ή αλάτι, ενεργεί σαν μια παγίδα, εμποδίζοντας το CO<sub>2</sub> να ανέβει περαιτέρω και οδηγώντας σε συγκέντρωσή του ακριβώς από κάτω. Το **Σχήμα 1** απεικονίζει την ανοδική κίνηση του CO<sub>2</sub> δια μέσου των κενών των πόρων του πετρώματος (μπλε χρώμα) μέχρι να φθάσει στο πέτρωμα-κάλυμμα.

### 2. Ακίνητοποίηση σε μικρούς πόρους (Υπολειμματική παγίδευση)

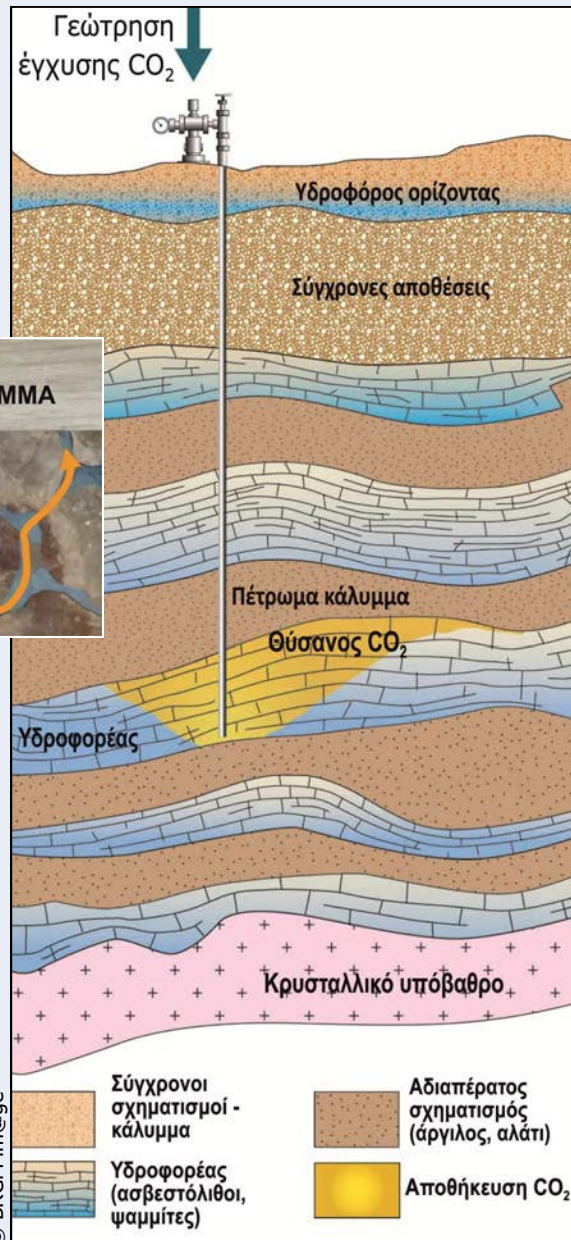
Η υπολειμματική ακίνητοποίηση εμφανίζεται όταν τα κενά των πόρων στο πέτρωμα του ταμιευτήρα είναι τόσο στενά ώστε το CO<sub>2</sub> δεν μπορεί πλέον να κινηθεί προς τα πάνω, παρά τη διαφορά στην πυκνότητα με το περιβάλλον νερό. Αυτή η διαδικασία εμφανίζεται κυρίως κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> και μπορεί τυπικά να ακίνητοποιήσει ένα μικρό ποσοστό του εγχέομένου CO<sub>2</sub>, ανάλογα με τις ιδιότητες του πετρώματος του ταμιευτήρα.

### 3. Διαλυτοποίηση (Παγίδευση Διάλυσης)

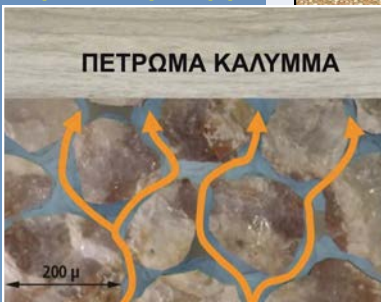
Ένα μικρό ποσοστό του εγχέομένου CO<sub>2</sub> διαλύεται, ή μεταφέρεται μέσα στο διάλυμα, από την άλμη που είναι ήδη υπέρκομη στα κενά των πόρων του ταμιευτήρα. Μια συνέπεια της διαλυτοποίησης είναι ότι το νερό με διαλυμένο CO<sub>2</sub> είναι βαρύτερο από το νερό χωρίς διαλυμένο CO<sub>2</sub>, και τείνει να κινηθεί προς τα κάτω στον πυθμένα του ταμιευτήρα. Ο ρυθμός διάλυσης εξαρτάται από την επαφή μεταξύ του CO<sub>2</sub> και της άλμης. Η ποσότητα του CO<sub>2</sub> που μπορεί να διαλυθεί περιορίζεται από μια μέγιστη συγκέντρωση. Ωστόσο, λόγω της κίνησης του εγχέομένου CO<sub>2</sub> προς τα πάνω και του νερού με το διαλυμένο CO<sub>2</sub> προς τα κάτω, υπάρχει μια συνεχής ανανέωση της επαφής μεταξύ άλμης και CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας έτσι την ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί. Αυτές οι διαδικασίες είναι σχετικά αργές επειδή λαμβάνουν χώρα μέσα σε στενά κενά των πόρων. Πρόχειρες εκτιμήσεις που έγιναν στο έργο Sleipner δείχνουν ότι περίπου 15% του εγχέομένου CO<sub>2</sub> διαλύεται 10 χρόνια μετά από την έγχυση.

### 4. Ορυκτοποίηση (Ορυκτολογική Παγίδευση)

Το CO<sub>2</sub>, ειδικά σε συνδυασμό με την άλμη στον ταμιευτήρα, μπορεί να αντιδράσει με τα ορυκτά



Μικροσκοπική άποψη.



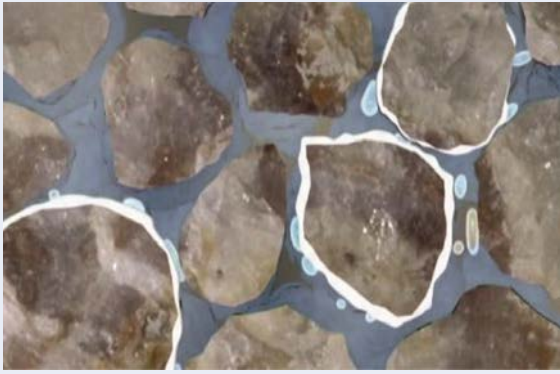
**Σχήμα 1**  
Το εγχέομενο CO<sub>2</sub>, το οποίο είναι πιο ελαφρύ από το νερό, τείνει να ανεβαίνει και σταματά από τα υπερκείμενα αδιαπέρατα πετρώματα.



## Πώς τα γνωρίζουμε όλα αυτά;

Η γνώση αυτών των διαδικασιών προέρχεται από τέσσερις κύριες πηγές πληροφοριών:

- **Εργαστηριακές μετρήσεις:** σε δείγματα πετρωμάτων μπορούν να εκτελεστούν πειράματα μικρής κλίμακας για ορυκτοποίηση, ροή και διαλυτοποίηση, δίνοντας έτσι μια εικόνα των βραχυχρόνιων και μικρής κλίμακας διαδικασιών.
- **Αριθμητικές προσομοιώσεις:** έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικοί κώδικες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του CO<sub>2</sub> για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (Σχ. 4). Για την εξακρίβωση των αριθμητικών προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται εργαστηριακά πειράματα.
- **Μελέτη των φυσικών ταμιευτήρων CO<sub>2</sub>,** όπου το CO<sub>2</sub> (γενικά ηφαιστειακής προέλευσης) έχει παγιδευτεί υπόγεια για μεγάλες χρονικές περιόδους, συχνά εκατομμύρια χρόνια. Ένα τέτοιο περιβάλλον αναφέρεται ως ένα «φυσικό ανάλογο»\*. Αυτές οι θέσεις μας παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του αερίου και τις πολύ μακροχρόνιες συνέπειες της παρουσίας του CO<sub>2</sub> στο υπέδαφος.
- **Παρακολούθηση των υπαρχόντων επιδεικτικών έργων γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>,** όπως το Sleipner (έξω από τις ακτές της Νορβηγίας), το Weyburn (Καναδάς), το In Salah (Αλγερία) και το K12-B (έξω από τις ακτές της Ολλανδίας). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε βραχυπρόθεσμη βάση μπορούν να συγκριθούν με πραγματικά δεδομένα πεδίου (υπαίθρου) και να βοηθήσουν στη βελτίωση και τελειοποίηση των μοντέλων.

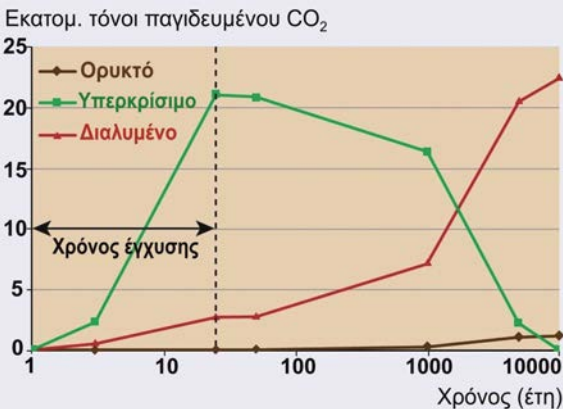


**Σχήμα 2**  
Πυκνό CO<sub>2</sub> που μεταναστεύει προς τα πάνω (φυσάλιδες ανοιχτού μπλε χρώματος), διαλύεται και αντιδρά με τους κόκκους του πετρώματος, οδηγώντας σε απόθεση ανθρακικών ορυκτών στα όρια των κόκκων (άσπρο χρώμα).

δημιουργώντας το πέτρωμα. Ορισμένα ορυκτά μπορούν να διαλυθούν, ενώ κάποια άλλα μπορούν να αποτεθούν, ανάλογα με το pH και τα ορυκτά που συνιστούν το πέτρωμα του ταμιευτήρα (Σχ. 2). Οι εκτιμήσεις στο Sleipner δείχνουν ότι μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό του CO<sub>2</sub> θα ακινητοποιηθεί μέσω ορυκτοποίησης μετά από μια πολύ μεγάλη χρονική περίοδο. Μετά από 10.000 χρόνια, μόνο 5% του εγχόμενου CO<sub>2</sub> θα πρέπει να ορυκτοποιηθεί, ενώ το 95% θα διαλυθεί, χωρίς να παραμείνει καθόλου CO<sub>2</sub> σαν μια ξεχωριστή πυκνή φάση.

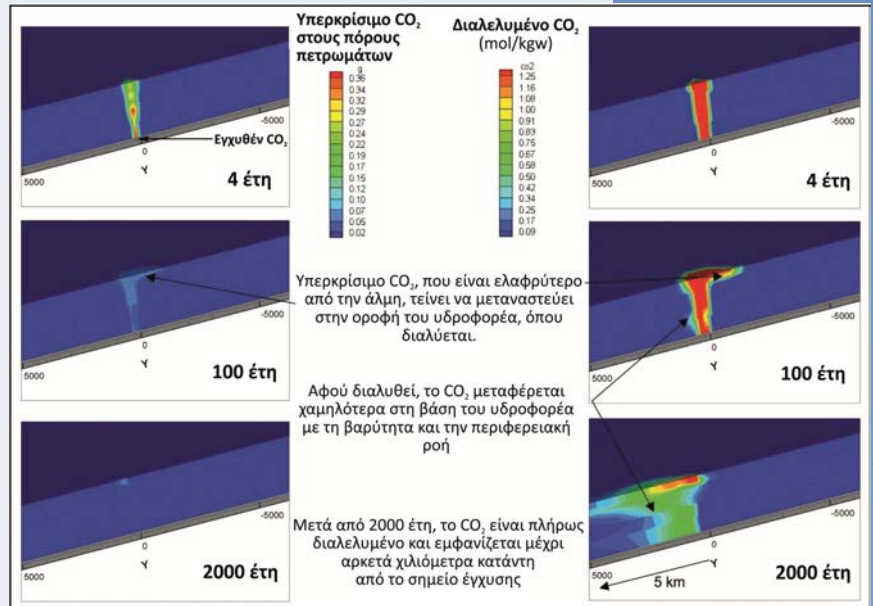
Η σχετική σημασία αυτών των μηχανισμών παγίδευσης εξαρτάται από τη συγκεκριμένη τοποθεσία, δηλ. από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει κάθε μεμονωμένη θέση. Για παράδειγμα, σε θολωτούς ταμιευτήρες, το CO<sub>2</sub> θα παραμείνει κυρίως σε μια πυκνή φάση ακόμη και για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ σε επίπεδους ταμιευτήρες, όπως στο Sleipner, το μεγαλύτερο μέρος του εγχόμενου CO<sub>2</sub> θα διαλυθεί ή θα ορυκτοποιηθεί.

Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η εξέλιξη του ποσοστού του CO<sub>2</sub> στους διάφορους μηχανισμούς παγίδευσης στην περίπτωση του Sleipner.



**Σχήμα 3**  
Εξέλιξη του CO<sub>2</sub> στις διάφορες μορφές του στον ταμιευτήρα του Sleipner σύμφωνα με τις προσομοιώσεις ροής. Το CO<sub>2</sub> παγιδεύεται σε υπερκρίσιμη μορφή από τους μηχανισμούς 1 και 2, σε διαλυμένη μορφή από το μηχανισμό 3 και σε ορυκτολογική μορφή από το μηχανισμό 4.

**Σχήμα 4**  
Κατασκευή 3D μοντέλου μετανάστευσης CO<sub>2</sub> σε έναν υδροφορέα μετά την έγχυση 150.000 τόνων για πάνω από 4 χρόνια στον υδροφορέα Dogger στη Γαλλία. Απεικονίζεται το υπερκρίσιμο CO<sub>2</sub> (αριστερά) και το διαλυμένο CO<sub>2</sub> στην άλμη (δεξιά) μετά από 4, 100 και 2.000 χρόνια από την έναρξη της έγχυσης. Η προσομοίωση βασίζεται σε δεδομένα πεδίου (υπαίθρου) και πειράματα.



Μόνο από τη συνεχή διασταύρωση αναφορών και ελέγχων αυτών των τεσσάρων πηγών πληροφόρησης είναι δυνατόν να αποκτηθεί αξιόπιστη γνώση για όλες τις διαδικασίες που συμβαίνουν σε βάθος περίπου 1.000 m κάτω από τα πόδια μας.

Συμπερασματικά, γνωρίζουμε ότι η ασφάλεια μιας θέσης αποθήκευσης CO<sub>2</sub> τείνει να αυξάνει με το χρόνο. Το πιο κρίσιμο σημείο είναι να βρεθεί ένας ταμιευτήρας με κατάλληλο πέτρωμα-κάλυμμα από πάνω του, που μπορεί να συγκρατεί το CO<sub>2</sub> (δομική παγίδευση). Όλες οι διαδικασίες που σχετίζονται με τη διάλυση, ορυκτοποίηση και υπολειμματική παγίδευση λειτουργούν υπέρ της παρεμπόδισης της μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> προς την επιφάνεια.

# Θα μπορούσε να διαρρεύσει το CO<sub>2</sub> από τον ταμιευτήρα και, εάν ναι, ποιες θα ήταν οι συνέπειες;

Με βάση τη μελέτη των φυσικών συστημάτων, οι προσεκτικά επιλεγμένες θέσεις αποθήκευσης δεν αναμένεται να παρουσιάσουν κάποια σημαντική διαρροή. Οι φυσικοί ταμιευτήρες που περιέχουν αέριο μας βοηθούν να κατανοήσουμε τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το αέριο παγιδεύεται ή απελευθερώνεται. Επιπλέον, οι θέσεις που παρουσιάζουν διαρροές μας βοηθούν να καταλάβουμε ποιες θα μπορούσαν να είναι οι πιθανές επιπτώσεις διαρροής του CO<sub>2</sub>.

## Δίοδοι διαρροής

Γενικά, οι πιθανές δίοδοι διαρροής είναι είτε ανθρωπογενείς (όπως οι βαθιές γεωτρήσεις) είτε φυσικές (όπως τα συστήματα διαρρήξεων και τα ρήγματα). Και οι ενεργές και οι εγκαταλελειμμένες γεωτρήσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν διόδους μετανάστευσης επειδή, κατ' αρχάς, διαμορφώνουν μια άμεση σύνδεση μεταξύ της επιφάνειας και του ταμιευτήρα, και δεύτερον, αποτελούνται από ανθρωπογενή υλικά που μπορούν να διαβρωθούν κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων (Σχ. 1). Μια πρόσθετη δυσκολία αποτελεί το γεγονός ότι όλες οι γεωτρήσεις δεν έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση όμοιων τεχνικών και, έτσι οι νεώτερες γεωτρήσεις είναι γενικά πιο ασφαλείς από τις παλαιότερες. Σε κάθε περίπτωση, ο κίνδυνος λόγω διαρροής μέσω γεωτρήσεων αναμένεται να είναι χαμηλός επειδή και οι νέες και οι παλιές γεωτρήσεις μπορούν να παρακολουθούνται πολύ αποτελεσματικά με τη χρήση ευαίσθητων γεωχημικών και γεωφυσικών μεθόδων, αλλά και επειδή η τεχνολογία για κάθε απαραίτητη διορθωτική ενέργεια υπάρχει ήδη από τη βιομηχανία πετρελαίου.

Η ροή κατά μήκος φυσικών ρηγμάτων και διαρρήξεων, που θα μπορούσαν να υπάρχουν στο πέτρωμα-κάλυμμα ή τα υπερκείμενα\*, είναι πιο σύνθετη επειδή έχουμε να κάνουμε με ακανόνιστα, επίπεδα χαρακτηριστικά με ποικίλη διαπερατότητα. Μια καλή επιστημονική και τεχνική κατανόηση των φυσικών συστημάτων, που είτε παρουσιάζουν διαρροή είτε είναι χωρίς διαρροή, θα μας επιτρέψει να σχεδιάσουμε έργα αποθήκευσης CO<sub>2</sub> που να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τους φυσικούς ταμιευτήρες, οι οποίοι

έχουν παγιδεύσει CO<sub>2</sub> και μεθάνιο για χιλιάδες έως εκατομμύρια χρόνια.

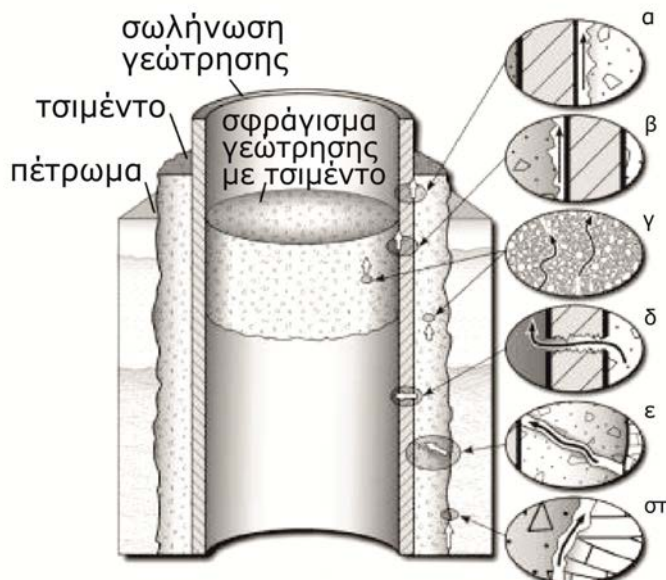
## Φυσικά ανάλογα: Μαθήματα από την Εμπειρία - Διδάγματα

Τα φυσικά συστήματα (τα ονομαζόμενα «ανάλογα») αποτελούν ανεκτίμητες πηγές πληροφόρησης για τη βελτίωση της κατανόησης της μετανάστευσης του αερίου στο βάθος και της φυσικής ανταλλαγής αερίων μεταξύ της γης και της ατμόσφαιρας. Τα κύρια ευρήματα, που προέρχονται από τη μελέτη πολυάριθμων φυσικών ταμιευτήρων αερίου, με διαρροή ή χωρίς διαρροή, είναι τα εξής:

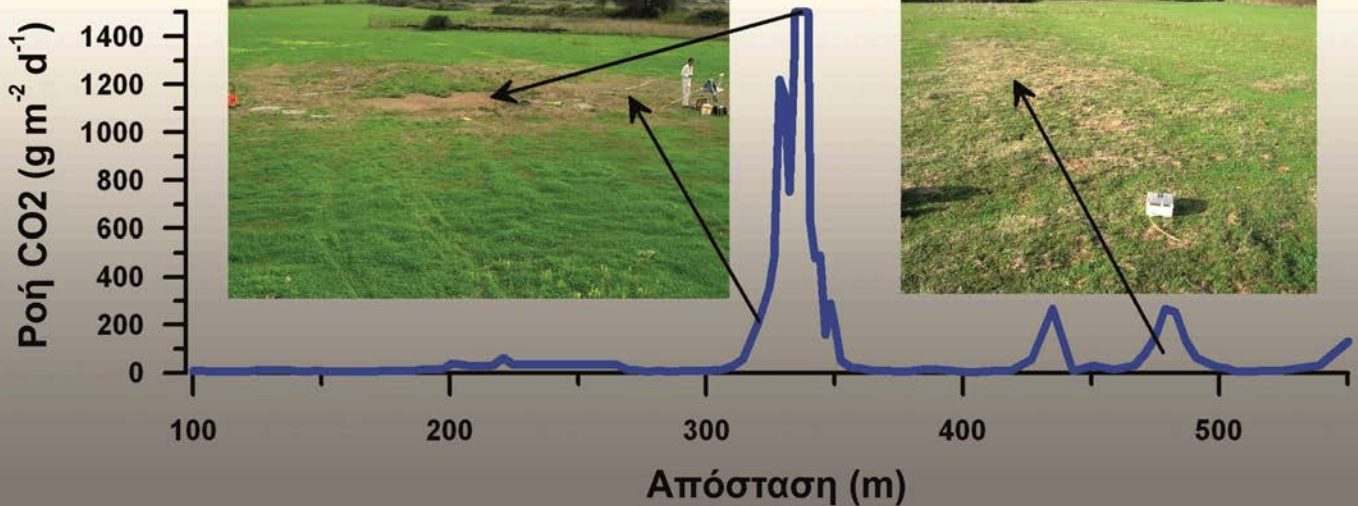
- Κάτω από ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, το παραγόμενο με φυσικό τρόπο αέριο μπορεί να παγιδευτεί για εκατοντάδες χιλιάδες έως εκατομμύρια χρόνια.
- Υπάρχουν απομονωμένοι ταμιευτήρες και θύλακες αερίου ακόμα και στα λιγότερο ευνοϊκά γεωλογικά περιβάλλοντα (ηφαιστειακές περιοχές).
- Η μετανάστευση οποιασδήποτε σημαντικής ποσότητας αερίου απαιτεί οριζόντια μεταφορά (δηλ. ροή καθοδηγούμενη από την πίεση) επειδή η διάχυση είναι μια πολύ αργή διαδικασία.
- Για να συμβεί οριζόντια μεταφορά, οι συνθήκες του ρευστού στον ταμιευτήρα πρέπει να βρίσκονται κοντά στη λιθοστατική πίεση\* για να διατηρούνται τα ρήγματα και οι διαρρήξεις ανοιχτές ή να δημιουργούνται με μηχανικό τρόπο δίοδοι.
- Οι περιοχές όπου δημιουργούνται φυσικές διαρροές αερίων στην επιφάνεια εντοπίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε έντονα διαρρηγμένες ηφαιστειακές και σεισμικές περιοχές, με οπές αερίων να βρίσκονται κατά μήκος ενεργών ή προσφάτως ενεργοποιημένων ρηγμάτων.
- Σπάνια μόνον εμφανίζονται σημαντικές διαρροές αερίων και τείνουν να περιοριστούν σε έντονα ρηγματωμένες ηφαιστειακές και γεωθερμικές περιοχές, όπου το CO<sub>2</sub> παράγεται συνεχώς από φυσικές διαδικασίες.
- Ανώμαλες συγκεντρώσεις αερίων στην επιφάνεια συνήθως εμφανίζονται ως τοπικά σημεία που έχουν περιορισμένη χωρική επίπτωση στο περιβάλλον κοντά στην επιφάνεια.

Κατά συνέπεια, απαιτείται ο συνδυασμός ενός αριθμού ειδικών συνθηκών πριν εμφανιστεί διαρροή. Ως εκ τούτου, είναι πολύ απίθανο να συμβεί διαρροή σε μια καλά επιλεγμένη και προσεκτικά σχεδιασμένη και κατασκευασμένη θέση γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Μολονότι η πιθανότητα διαρροής είναι μικρή, οι σχετικές διεργασίες και οι ενδεχόμενες επιπτώσεις πρέπει να είναι πλήρως κατανοητές προκειμένου να επιλεγθούν, να σχεδιασθούν και να λειτουργήσουν οι

**Σχήμα 1**  
Πιθανές δίοδοι του CO<sub>2</sub> μέσα σε μία γεώτρηση. Διαφυγή μέσω εξαλλοιωμένου υλικού (γ, δ, ε) ή κατά μήκος διεπαφών (α, β, στ).







όσο το δυνατόν πιο ασφαλείς θέσεις γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

### Επιπτώσεις στον άνθρωπο

Αναπνέουμε CO<sub>2</sub> συνέχεια. Το CO<sub>2</sub> είναι επικίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου μόνο σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις, με τιμές μέχρι 5.000 ppm (5%), προκαλώντας πονοκεφάλους, ζάλη και ναυτία. Τιμές πάνω από αυτό το επίπεδο μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και το θάνατο εάν η έκθεση έχει μεγάλη διάρκεια, ειδικά από ασφυξία όταν η συγκέντρωση του οξυγόνου στον αέρα πέσει κάτω από το 16%, επίπεδο το οποίο απαιτείται για τη διατήρηση της ανθρώπινης ζωής. Ωστόσο, εάν το CO<sub>2</sub> διαρρεύσει σε ανοικτή ή επίπεδη περιοχή, διασκορπίζεται γρήγορα στον αέρα, ακόμα και με ασθενείς ανέμους. Έτσι, ο πιθανός κίνδυνος για τους πληθυσμούς περιορίζεται σε διαρροές που γίνονται σε κλειστά περιβάλλοντα ή τοπογραφικά χαμηλές περιοχές (βυθίσματα), όπου οι συγκεντρώσεις μπορεί να ανέβουν επειδή το CO<sub>2</sub> είναι πυκνότερο από τον αέρα και έχει την τάση να συγκεντρώνεται κοντά στο έδαφος. Είναι χρήσιμη η γνώση των χαρακτηριστικών των περιοχών που παρουσιάζουν φαινόμενα διαφυγής αερίων προκειμένου να γίνει πρόληψη και διαχείριση των κινδύνων. Στην πραγματικότητα, πολλοί άνθρωποι ζουν σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από καθημερινές φυσικές εκπομπές αερίου. Για παράδειγμα, στο Ciampino της Ιταλίας κοντά στη Ρώμη, τα σπίτια βρίσκονται μόνο 30 μέτρα από τις οπές των αερίων, όπου οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στο έδαφος φθάνουν το 90% και περίπου 7 τόνοι CO<sub>2</sub> απελευθερώνονται καθημερινά στην ατμόσφαιρα. Οι κάτοικοι της περιοχής αποφεύγουν κάθε κίνδυνο ακολουθώντας απλές προφυλάξεις, όπως να μην κοιμούνται στο υπόγειο και να αερίζουν καλά τα σπίτια τους.

### Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Οι πιθανές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα θα ποικίλουν ανάλογα με το εάν η θέση αποθήκευσης βρίσκεται στην ξηρά ή τη θάλασσα.

Στα θαλάσσια οικοσυστήματα, η κύρια επίδραση της διαρροής του CO<sub>2</sub> είναι η τοπική μείωση του pH και οι συναφείς επιπτώσεις αφορούν πρωτίστως τα ζώα που ζουν στο θαλάσσιο πυθμένα και δεν μπορούν να απομακρυνθούν. Ωστόσο, οι συνέπειες είναι χωρικά περιορισμένες και το οικοσύστημα δείχνει σημάδια ανάκαμψης σε σύντομο διάστημα μετά την υποχώρηση της διαρροής.

Σε χερσαία οικοσυστήματα, οι επιπτώσεις μπορούν σε γενικές γραμμές να συνοψισθούν ως εξής:

- **Βλάστηση** - Αν και οι συγκεντρώσεις του εδαφικού αερίου CO<sub>2</sub> μέχρι περίπου 20-30% μπορούν πραγματικά να ευνοήσουν τη λίπανση των φυτών και να αυξήσουν το ρυθμό ανάπτυξης για ορισμένα είδη, τιμές πάνω από αυτό το όριο μπορεί να είναι καταστροφικές για κάποια είδη, αλλά όχι για όλα τα φυτά. Όμως, αυτή η επίδραση είναι εξαιρετικά τοπικού χαρακτήρα γύρω από την οπή του αερίου και η βλάστηση παραμένει εύρωστη και υγιής ακόμα και μόνο λίγα μέτρα μακριά (Σχ. 2).
- **Ποιότητα υπόγειου νερού** - Η χημική σύσταση του υπόγειου νερού θα μπορούσε να αλλοιωθεί από την προσθήκη του CO<sub>2</sub>, καθώς το νερό γίνεται πιο όξινο και μπορούν να απελευθερωθούν στοιχεία από τα πετρώματα και τα ορυκτά του υδροφορέα. Ακόμα και εάν διαρρεύσει CO<sub>2</sub> σε υδροφορέα με πόσιμο νερό, οι επιδράσεις θα παραμείνουν τοπικές και η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων μελετάται σήμερα από ερευνητές. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι πολλοί υδροφορείς σε ολόκληρη την Ευρώπη είναι εμπλουτισμένοι σε φυσικό CO<sub>2</sub>, και αυτό το νερό πράγματι εμφιαλώνεται και πωλείται ως «αφρώδες μεταλλικό νερό».
- **Ακεραιότητα του πετρώματος** - Η οξίνιση του υπόγειου νερού μπορεί να οδηγήσει σε διαλυτοποίηση και μειωμένη δομική ακεραιότητα του πετρώματος και σε σχηματισμό καταβροθών. Ωστόσο, αυτός ο τύπος επίπτωσης εμφανίζεται μόνο κάτω από πολύ ειδικές γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες (ενεργός τεκτονική, υδροφορείς με μεγάλους ρυθμούς ροής, ορυκτολογία πλούσια σε ανθρακικά), οι οποίες δεν είναι πιθανό να συναντώνται πάνω από μια θέση γεωλογικής αποθήκευσης που έχει κατασκευαστεί από τον άνθρωπο.

Συμπερασματικά, καθώς οι επιπτώσεις οποιασδήποτε υποθετικής διαρροής CO<sub>2</sub> θα εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη τοποθεσία, επισημαίνεται ότι μια ολοκληρωμένη γνώση του υποκειμένου γεωλογικού και τεκτονικού περιβάλλοντος θα μας επιτρέψει να αναγνωρίσουμε κάθε πιθανή δίοδο μετανάστευσης αερίου, να επιλέξουμε θέσεις με τη μικρότερη πιθανότητα διαρροής CO<sub>2</sub>, να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του αερίου και κατ' αυτόν τον τρόπο να αξιολογήσουμε και να αποτρέψουμε κάθε σημαντική επίπτωση στον άνθρωπο και το οικοσύστημα.

**Σχήμα 2**  
Επιπτώσεις της διαρροής CO<sub>2</sub> στη βλάστηση με υψηλή (αριστερά) και μειωμένη (δεξιά) ροή. Οι επιπτώσεις περιορίζονται στην περιοχή διαφυγής του CO<sub>2</sub>.

# Πώς μπορούμε να παρακολουθούμε τη θέση αποθήκευσης στο βάθος και την επιφάνεια;

Όλες οι θέσεις αποθήκευσης CO<sub>2</sub> θα πρέπει να παρακολουθούνται για λειτουργικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς λόγους καθώς και για λόγους ασφάλειας. Πρέπει να χαραχθεί μια στρατηγική προσδιορισμού της ακριβούς παρακολουθήσεως και του τρόπου με τον οποίο θα γίνει αυτή.

## Γιατί χρειαζόμαστε την παρακολούθηση;

Η επίδοση της θέσης παρακολούθησης αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για να διασφαλισθεί η επίτευξη του κύριου στόχου της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>, δηλαδή της μακροχρόνιας απομόνωσης από την ατμόσφαιρα του ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub>. Οι λόγοι για την παρακολούθηση των θέσεων αποθήκευσης είναι πάρα πολλοί, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται και οι ακόλουθοι:

- **Λειτουργικοί:** έλεγχος και βελτιστοποίηση της διαδικασίας έγχυσης.
- **Ασφάλειας και περιβαλλοντικοί:** ελαχιστοποίηση ή αποτροπή οποιασδήποτε επίπτωσης στους ανθρώπους, την άγρια φύση και τα οικοσυστήματα που βρίσκονται κοντά σε μια θέση αποθήκευσης, και διασφάλιση του μετριασμού της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.
- **Κοινωνικοί:** παροχή στο κοινό των αναγκαίων πληροφοριών για την κατανόηση της ασφάλειας της θέσης αποθήκευσης και βοήθεια για την απόκτηση της δημόσιας εμπιστοσύνης.
- **Οικονομικοί:** οικοδόμηση της εμπιστοσύνης της αγοράς στην τεχνολογία CCS και επαλήθευση των αποθηκευμένων όγκων CO<sub>2</sub> έτσι ώστε αυτοί να πιστωθούν ως «εκπομπές που αποφεύγονται» σε μελλοντικές φάσεις του Σχεδίου Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ETS).

Η παρακολούθηση και της αρχικής κατάστασης του περιβάλλοντος (που ονομάζεται «βασική ή αναφοράς») και της μεταγενέστερης επίδοσης της θέσης, αποτελεί μια σημαντική κανονιστική απαίτηση στην Οδηγία της Ε.Ε. για την τεχνολογία CCS, η οποία δημοσιεύθηκε στις 23 Απριλίου 2009. Οι φορείς εκτέλεσης της τεχνολογίας CCS πρέπει να είναι σε θέση να αποδείξουν ότι η επίδοση της αποθήκευσης συμμορφώνεται με τους κανονισμούς και θα συνεχίσει να συμμορφώνεται μακροπρόθεσμα. Η παρακολούθηση αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας που θα μειώσει τις αβεβαιότητες για την επίδοση της θέσης, και έτσι θα πρέπει να συνδέεται πολύ στενά με τις δραστηριότητες διαχείρισης της ασφάλειας.

## Ποιοι είναι οι στόχοι της παρακολούθησης;

Η παρακολούθηση μπορεί να εστιασθεί σε ποικίλους στόχους και διαδικασίες σε διαφορετικά τμήματα της

θέσης, όπως:

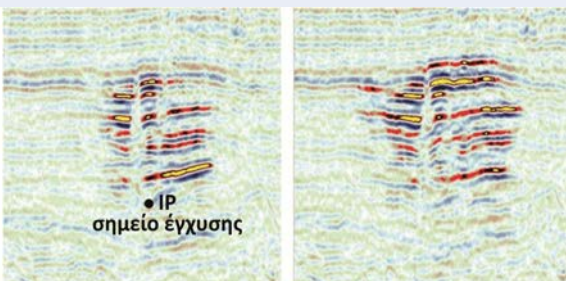
- Απεικόνιση του θυσάνου – ανίχνευση του CO<sub>2</sub> καθώς αυτό μεταναστεύει από το σημείο έγχυσης. Η διαδικασία αυτή παρέχει βασικά δεδομένα για την έλεγχο ακρίβειας των μοντέλων που προβλέπουν τη μελλοντική κατανομή του CO<sub>2</sub> στη θέση. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές ώριμες τεχνικές, κυρίως οι επαναλαμβανόμενες σεισμικές έρευνες, που έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία σε διάφορα επιδεικτικά και πιλοτικά έργα (**Σχ. 1**).
- Ακεραιότητα του πετρώματος-καλύμματος – απαραίτητη για να αξιολογηθεί εάν το CO<sub>2</sub> είναι απομονωμένο μέσα στον ταμιευτήρα αποθήκευσης και να καταστεί δυνατή η έγκαιρη προειδοποίηση οποιασδήποτε απροσδόκητης μετανάστευσης του CO<sub>2</sub> προς τα πάνω. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη διάρκεια της φάσης της έγχυσης ενός έργου, όταν οι πιέσεις του ταμιευτήρα είναι σημαντικά, αλλά προσωρινά, αυξημένες.
- Ακεραιότητα της γεώτρησης. Πρόκειται για ένα σημαντικό θέμα καθώς οι βαθιές γεωτρήσεις θα μπορούσαν δυνητικά να παράσχουν μια άμεση διόδο για μετανάστευση του CO<sub>2</sub> στην επιφάνεια. Οι γεωτρήσεις έγχυσης CO<sub>2</sub> καθώς και οποιοσδήποτε γεωτρήσεις παρατήρησης ή προϋπάρχουσες εγκαταλελειμμένες γεωτρήσεις πρέπει να παρακολουθούνται με προσοχή κατά τη διάρκεια της φάσης έγχυσης και μετά, προκειμένου να αποτραπεί μια ξαφνική διαφυγή του CO<sub>2</sub>. Η παρακολούθηση χρησιμοποιείται επίσης για την επαλήθευση της αποτελεσματικής σφράγισης όλων των γεωτρήσεων όταν αυτές δεν χρειάζονται πλέον. Υπάρχοντα συστήματα γεωφυσικής και γεωχημικής παρακολούθησης, τα οποία συνιστούν συνήθη πρακτική στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, μπορούν να εγκατασταθούν μέσα ή πάνω από τις γεωτρήσεις, ώστε να παρέχεται έγκαιρη προειδοποίηση και να διασφαλίζεται η ασφάλεια.
- Μετανάστευση στα υπερκείμενα. Σε θέσεις αποθήκευσης όπου πρόσθετες, πιο ρηχές ενότητες πετρώματων έχουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του πετρώματος-καλύμματος, τα υπερκείμενα μπορεί να διαμορφώσουν ένα βασικό τμήμα για τη μείωση του κινδύνου διαφυγής του CO<sub>2</sub> στη θάλασσα ή την ατμόσφαιρα. Εάν η παρακολούθηση στον ταμιευτήρα ή γύρω από το πέτρωμα-κάλυμμα δείχνει μια απροσδόκητη μετανάστευση μέσω του πετρώματος-καλύμματος, τότε η παρακολούθηση των υπερκειμένων θα είναι απαραίτητη. Πολλές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση του θυσάνου ή την παρακολούθηση της ακεραιότητας του πετρώματος-καλύμματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στα υπερκείμενα.
- Διαρροή στην επιφάνεια και ατμοσφαιρική ανίχνευση και μέτρηση. Προκειμένου να διασφαλισθεί ότι το CO<sub>2</sub>, που έχει εγχυθεί, δεν έχει μεταναστεύσει στην επιφάνεια, υπάρχει διαθέσιμη μια σειρά γεω-

**Σχήμα 1**  
Σεισμική απεικόνιση για την παρακολούθηση του θυσάνου του CO<sub>2</sub>\* στο πιλοτικό έργο στο Sleipner πριν από την έγχυση (που ξεκίνησε το 1996) και μετά την έγχυση (μετά από 3 και 5 χρόνια αντίστοιχα).

Πριν την έγχυση (1994)

2,35 Mt CO<sub>2</sub> (1999)

4,36 Mt CO<sub>2</sub> (2001)





χημικών και βιοχημικών τεχνικών καθώς και τεχνικών τηλεπισκόπησης, για να εντοπίζονται διαρροές και να αξιολογείται και να παρακολουθείται η κατανομή του CO<sub>2</sub> στο έδαφος και η διασπορά του στην ατμόσφαιρα ή το θαλάσσιο περιβάλλον (Σχ. 2).

- Ποσότητα αποθηκευμένου CO<sub>2</sub> για κανονιστικούς και οικονομικούς σκοπούς. Αν και η ποσότητα του εγχέομένου CO<sub>2</sub> μπορεί εύκολα να μετρηθεί στην κεφαλή της γεώτρησης, η ποσοτικοποίηση στον ταμιευτήρα αποτελεί τεχνικά μια μεγάλη πρόκληση. Εάν συμβεί διαρροή κοντά στην επιφάνεια, τότε οι ποσότητες που απελευθερώνονται θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν για λογιστικούς σκοπούς μέσα στις εθνικές απογραφές των αερίων θερμοκηπίου και στα μελλοντικά σχήματα ETS της Ε.Ε.
- Εδαφικές μετακινήσεις και μικροσεισμικότητα\*. Η αυξημένη πίεση του ταμιευτήρα λόγω της έγχυσης CO<sub>2</sub> θα μπορούσε, σε ειδικές περιπτώσεις, να αυξήσει την πιθανότητα μικροσεισμικότητας και εδαφικών μετακινήσεων μικρής κλίμακας. Υπάρχουν τεχνικές μικροσεισμικής παρακολούθησης και μέθοδοι εξ' αποστάσεως (έρευνες από αεροπλάνα ή δορυφόρους) που μπορούν να μετρήσουν ακόμα και πολύ μικρή εδαφική παραμόρφωση.

### Πώς γίνεται η παρακολούθηση;

Έχει ήδη εφαρμοσθεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών παρακολούθησης σε υπάρχοντα έργα επίδειξης και έρευνας. Αυτές περιλαμβάνουν μεθόδους που παρακολουθούν άμεσα το CO<sub>2</sub> και μεθόδους που μετρούν έμμεσα τις επιδράσεις του στα πετρώματα, τα ρευστά και το περιβάλλον. Οι άμεσες μετρήσεις περιλαμβάνουν την ανάλυση των ρευστών από βαθιές γεωτρήσεις ή τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των αερίων στο έδαφος ή την ατμόσφαιρα. Οι έμμεσες μέθοδοι περιλαμβάνουν γεωφυσικές διασκοπήσεις και παρακολούθηση μεταβολών της πίεσης σε γεωτρήσεις ή μεταβολών του pH στο υπόγειο νερό. Θα απαιτηθεί παρακολούθηση των θέσεων αποθήκευσης είτε βρίσκονται στην ξηρά είτε στη θάλασσα. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών παρακολούθησης θα εξαρτηθεί από τα τεχνικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της θέσης και τους στόχους της παρακολούθησης. Υπάρχει ήδη διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα τεχνικών παρακολούθησης (Σχ. 3), πολλές από τις οποίες έχουν καθιερωθεί στις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτές οι τεχνικές προσαρ-

μόζονται στα πλαίσια του CO<sub>2</sub>. Σήμερα, είναι επίσης σε εξέλιξη έρευνα για τη βελτιστοποίηση των υπάρχουσών μεθόδων ή την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης και αξιοπιστίας, τη μείωση του κόστους, την αυτοματοποίηση της λειτουργίας και την επίδειξη αποτελεσματικότητας.

### Στρατηγική παρακολούθησης

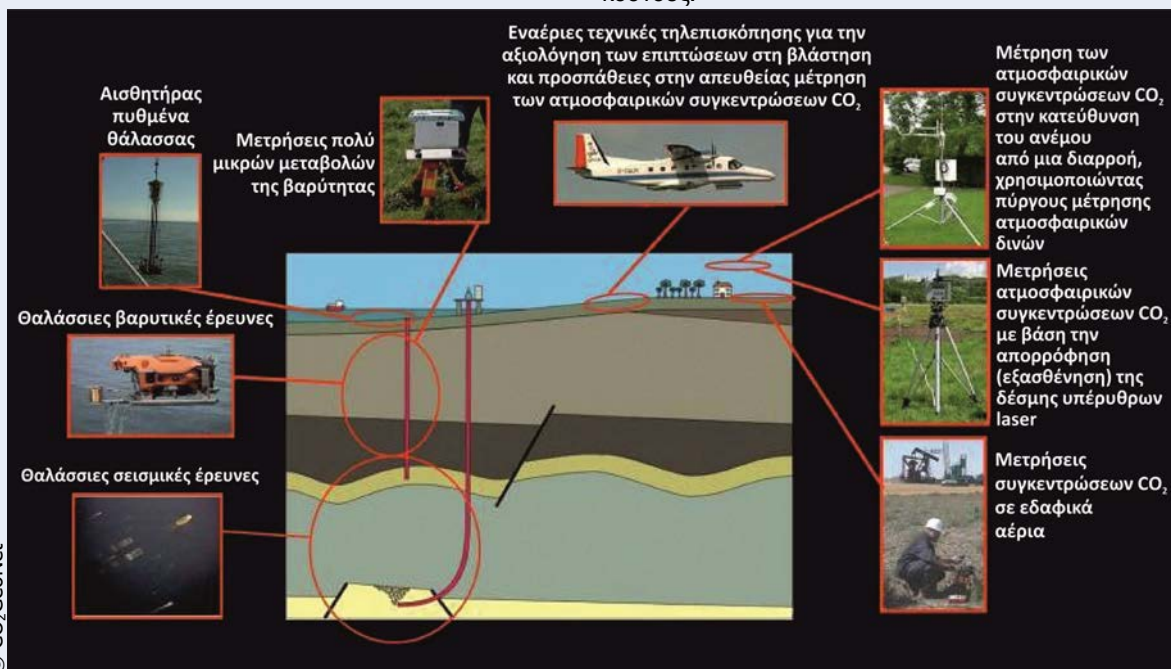
Κατά το σχεδιασμό της στρατηγικής παρακολούθησης, πρέπει να ληφθούν πολλές αποφάσεις που εξαρτώνται (α) από τις ειδικές γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που εμφανίζονται σε κάθε θέση ξεχωριστά, όπως η γεωμετρία και το βάθος του ταμιευτήρα, η αναμενόμενη εξάπλωση του θυσάνου του CO<sub>2</sub>, οι πιθανές διαδρομές διαρροής, η γεωλογία των υπερκειμένων, ο χρόνος και ο ρυθμός ροής της έγχυσης καθώς και (β) από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά, όπως η τοπογραφία, η πυκνότητα του πληθυσμού, οι υποδομές και τα οικοσυστήματα. Αφού ληφθούν οι αποφάσεις σχετικά με τις πιο κατάλληλες τεχνικές μέτρησης και τις θέσεις, πρέπει να διεξαχθούν βασικές έρευνες πριν από τις εργασίες έγχυσης για να χρησιμοποιήσουν ως αναφορά για όλες τις μελλοντικές μετρήσεις. Τελικά, κάθε πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να είναι ευέλικτο, ώστε να μπορεί να εξελιχθεί, καθώς το έργο της αποθήκευσης εξελίσσεται. Μια στρατηγική παρακολούθησης, ικανή να ενσωματώσει όλα αυτά τα θέματα και ταυτόχρονα να βελτιώσει τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, θα αποτελέσει ένα κρίσιμο στοιχείο στην ανάλυση κινδύνου και στην επαλήθευση της ασφάλειας της θέσης και της αποδοτικότητας.

Συμπερασματικά, σημειώνεται ότι γνωρίζουμε ότι η παρακολούθηση μιας θέσης αποθήκευσης CO<sub>2</sub> είναι ήδη εφικτή με πολλές τεχνικές που είναι διαθέσιμες στην αγορά ή είναι υπό ανάπτυξη. Σήμερα είναι σε εξέλιξη έρευνες, όχι μόνο για την ανάπτυξη νέων εργαλείων (ιδιαίτερα για χρήση στον πυθμένα της θάλασσας), αλλά επίσης και για τη βελτιστοποίηση της επίδοσης της παρακολούθησης και τη μείωση του κόστους.



© CO<sub>2</sub>GeoNet

**Σχήμα 2**  
Σημαντήρας παρακολούθησης με ηλιακά πάνελ για παροχή ενέργειας, πλωτήρες και συσκευή δειγματοληψίας αερίου στον πυθμένα της θάλασσας.



**Σχήμα 3**  
Μια μικρή επιλογή που απεικονίζει το εύρος των διαθέσιμων τεχνικών για την παρακολούθηση διαφορετικών τμημάτων ενός συστήματος αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

# Ποια κριτήρια ασφάλειας πρέπει να επιβληθούν και να τηρηθούν;

**Προκειμένου να διασφαλισθεί η ασφάλεια και η αποδοτικότητα της αποθήκευσης, πρέπει να επιβληθούν από τις ρυθμιστικές αρχές και να τηρηθούν από τους φορείς εκτέλεσης οι αναγκαίες συνθήκες για το σχεδιασμό και τη λειτουργία του έργου.**

Αν και η γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> είναι σήμερα ευρέως αποδεκτή ως μια από τις αξιόπιστες επιλογές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, απομένουν να θεσπιστούν κριτήρια ασφάλειας σε σχέση με την υγεία του ανθρώπου και το τοπικό περιβάλλον πριν αναπτυχθούν ευρέως εργασίες βιομηχανικής κλίμακας. Τέτοια κριτήρια μπορούν να καθοριστούν ως οι απαιτήσεις που επιβάλλονται στους φορείς εκτέλεσης από τις ρυθμιστικές αρχές ώστε να διασφαλισθεί ότι οι επιπτώσεις στην τοπική υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον (συμπεριλαμβανομένων των υπογείων υδάτινων πόρων) είναι ασήμαντες σε βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη βάση.

Ένα βασικό ζήτημα της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> είναι ότι αυτή πρέπει να είναι μόνιμη, και συνεπώς, δεν πρέπει να αναμένονται διαρροές στις θέσεις αποθήκευσης. Ωστόσο, το σενάριο «τι θα γίνει εάν;» εννοεί ότι πρέπει να εκτιμηθούν οι κίνδυνοι και οι φορείς εκτέλεσης υποχρεούνται να σεβαστούν τα μέτρα που εμποδίζουν οποιαδήποτε διαρροή ή μη ομαλή συμπεριφορά των θέσεων. Σύμφωνα με το IPCC, το εγχεόμενο CO<sub>2</sub> πρέπει να παραμείνει στο υπέδαφος για τουλάχιστον 1.000 χρόνια, γεγονός που θα επέτρεπε στις συγκεντρώσεις του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> να σταθεροποιηθούν ή να μειωθούν μέσα από τη φυσική ανταλλαγή με τα νερά των ωκεανών, ελαχιστοποιώντας έτσι την άνοδο της θερμοκρασίας της επιφάνειας λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ωστόσο, πρέπει να εκτιμηθούν οι τοπικές επιπτώσεις σε μια χρονική κλίμακα που κυμαίνεται από ημέρες μέχρι πολλές χιλιάδες χρόνια. Κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου αποθήκευσης CO<sub>2</sub> μπορούν να προσδιοριστούν διάφορα κύρια στάδια (**Σχ. 1**). Η ασφάλεια θα διασφαλισθεί πλήρως με:

- προσεκτική επιλογή και χαρακτηρισμό της θέσης,
- εκτίμηση της ασφάλειας,
- σωστή εκτέλεση και λειτουργία,

σταση του ρεύματος του CO<sub>2</sub>, προσέχοντας ιδιαίτερα οποιεσδήποτε προσμίξεις δεν αφαιρέθηκαν κατά τη διάρκεια της δέσμευσης. Αυτό είναι σημαντικό προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε δυσμενής αλληλεπίδραση με τη γεώτρηση, τον ταμιευτήρα, το πέτρωμα-κάλυμμα και, σε περίπτωση διαρροής, με κάθε υπερκείμενο υπόγειο νερό.

## Κριτήρια ασφάλειας για το σχεδιασμό του έργου

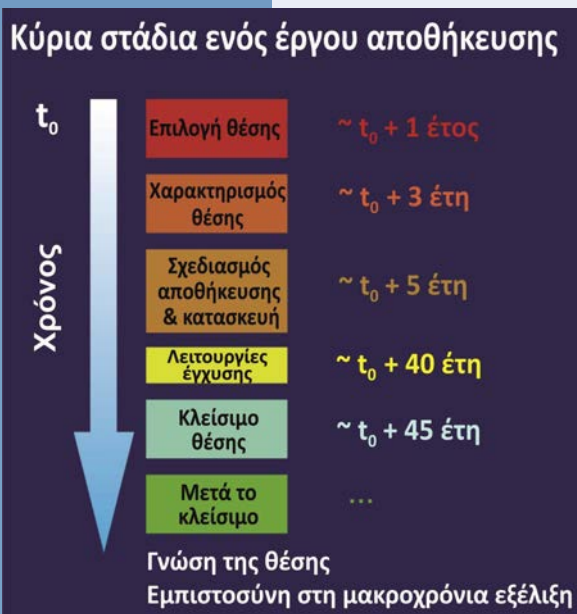
Η ασφάλεια πρέπει να επιδεικνύεται πριν ξεκινήσει η εκτέλεση και λειτουργία του έργου.

Σε σχέση με την επιλογή της θέσης, τα κύρια τμήματα που πρέπει να εξεταστούν περιλαμβάνουν:

- τον ταμιευτήρα και το πέτρωμα-κάλυμμα,
- τα υπερκείμενα και ιδιαίτερα τα αδιαπέρατα στρώματα που θα μπορούσαν να δράσουν ως δευτερεύοντα στεγανά,
- την παρουσία (δια)περατών ρηγμάτων ή γεωτρήσεων που θα μπορούσαν να δράσουν ως δίοδοι προς την επιφάνεια,
- τους υδροφορείς πόσιμοι νερού,
- τον πληθυσμό και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς στην επιφάνεια.

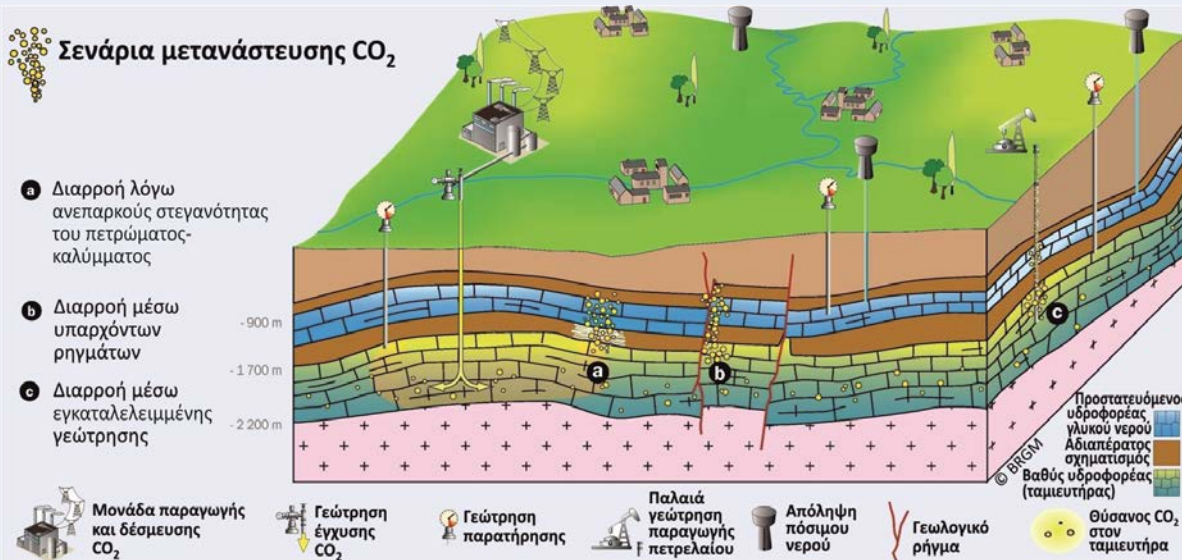
Για την εκτίμηση της γεωλογίας και της γεωμετρίας της θέσης αποθήκευσης χρησιμοποιούνται τεχνικές της έρευνας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η ροή του ρευστού καθώς και η χημική και γεωμηχανική μοντελοποίηση του CO<sub>2</sub> μέσα στον ταμιευτήρα επιτρέπουν προβλέψεις της συμπεριφοράς του CO<sub>2</sub> και του μακροχρόνιου αποτελέσματος, καθώς και καθορισμό των παραμέτρων για αποτελεσματική έγχυση. Ως αποτέλεσμα, ο προσεκτικός χαρακτηρισμός της θέσης πρέπει να καθιστά ικανό τον καθορισμό ενός σεναρίου «κανονικής» συμπεριφοράς αποθήκευσης, που να αντιστοιχεί σε μια θέση κατάλληλη για αποθήκευση και όπου είμαστε βέβαιοι ότι το CO<sub>2</sub> θα παραμείνει στον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια, η εκτίμηση κινδύνου πρέπει να εξετάζει λιγότερο εύλογα σενάρια για τη μελλοντική κατάσταση της αποθήκευσης, περιλαμβάνοντας εμφανίσεις απροσδόκητων γεγονότων. Ειδικότερα, είναι σημαντικό να προβλέπεται κάθε πιθανή δίοδος διαρροής, πιθανή εμφάνιση και πιθανές επιδράσεις (**Σχ. 2**). Κάθε σενάριο διαρροής πρέπει να αναλύεται από ειδικούς και, όπου είναι δυνατόν, να εφαρμόζονται αριθμητικά μοντέλα, για να αξιολογείται η πιθανότητα εμφάνισης και η ενδεχόμενη σοβαρότητα. Σαν παράδειγμα, η εξέλιξη της έκτασης του θυσάνου του CO<sub>2</sub> πρέπει να χαρτογραφείται με προσοχή προκειμένου να ανιχνευθεί οποιαδήποτε σύνδεση με ρηγματωμένη ζώνη. Η ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων εισόδου και οι αβεβαιότητες πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά στην εκτίμηση κινδύνου. Η εκτίμηση πιθανών επιδράσεων του CO<sub>2</sub> στους ανθρώπους και το περιβάλλον πρέπει να αντιμετωπίζεται μέσα από μελέτες εκτίμησης επιπτώσεων, που αποτελεί τη συνήθη πρακτική κάθε διαδικασίας αδειοδότησης μιας βιομηχανικής εγκατάστασης. Σ' αυτήν τη διαδικασία, θα

**Σχήμα 1**  
Τα διάφορα στάδια ενός έργου αποθήκευσης.



- κατάλληλο σχέδιο παρακολούθησης,
  - επαρκές σχέδιο αποκατάστασης.
- Οι σχετικοί κρίσιμοι στόχοι είναι:
- να διασφαλισθεί η παραμονή του CO<sub>2</sub> στον ταμιευτήρα,
  - να διατηρηθεί η ακεραιότητα της γεώτρησης,
  - να διαφυλαχθούν οι φυσικές ιδιότητες του ταμιευτήρα (συμπεριλαμβανομένων του πορώδους, της διαπερατότητας, της εγχυτότητας) και της αδιαπέρατης φύσης του πετρώματος-καλύμματος.
  - να ληφθεί υπόψη η σύ-





**Σχήμα 2**  
Παράδειγμα σεναρίων πιθανών διαρροών.

εξετάζονται και τα κανονικά σεσάρια και τα σεσάρια διαρροής, ώστε να εκτιμηθεί κάθε πιθανός κίνδυνος που συνδέεται με την εγκατάσταση.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης, από τη βραχυπρόθεσμη μέχρι τη μακροπρόθεσμη βάση, πρέπει να καταρτίζεται σύμφωνα με την ανάλυση της εκτίμησης κινδύνου και πρέπει να ελέγχει τις κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζονται μέσα στα διάφορα σεσάρια. Οι κύριοι στόχοι του είναι η απεικόνιση της μετανάστευσης του θυσάνου του CO<sub>2</sub>, ο έλεγχος της ακεραιότητας της γεώτρησης και του πετρώματος-καλύμματος, η ανίχνευση οποιασδήποτε διαρροής CO<sub>2</sub>, η αξιολόγηση της ποιότητας του υπόγειου νερού και η διασφάλιση ότι καμία ποσότητα CO<sub>2</sub> δεν έχει φθάσει στην επιφάνεια. Το σχέδιο αποκατάστασης και μετριασμού αποτελεί το τελευταίο τμήμα της εκτίμησης ασφάλειας και αποσκοπεί στον ορισμό λεπτομερούς καταλόγου διορθωτικών ενεργειών που πρέπει να αναπτυχθούν σε περίπτωση διαρροής ή μη ομαλής συμπεριφοράς. Το σχέδιο καλύπτει την ακεραιότητα του πετρώματος-καλύμματος και την περίπτωση αστοχίας (βλάβης) της γεώτρησης, κατά τις περιόδους της έγχυσης και μετά την έγχυση, και εξετάζει ακραίες λύσεις αποκατάστασης, όπως της αναστρεψιμότητας (δηλ. ακύρωσης) της αποθήκευσης. Η υπάρχουσα τεχνολογία περιλαμβάνει τυπικές τεχνικές πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως ολοκλήρωση των εργασιών επισκευής ή διέγερσης υφιστάμενης παραγωγικής γεώτρησης (workover), μείωση της πίεσης έγχυσης, μερική ή πλήρη απομάκρυνση αερίου, εξαγωγή νερού για μείωση της πίεσης, εξαγωγή αβαθούς αερίου, κλπ.

### Κριτήρια ασφάλειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου και μετά το κλείσιμο

Η κύρια μέριμνα για την ασφάλεια συνδέεται με τη φάση λειτουργίας· μετά τη διακοπή της έγχυσης, η μείωση της πίεσης θα καταστήσει τη θέση ασφαλή-στερη.

Η εμπιστοσύνη στην ικανότητα έγχυσης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> με ασφαλή τρόπο βασίζεται στην εμπειρία των βιομηχανικών εταιριών. Το CO<sub>2</sub> είναι ένα αρκετά κοινό προϊόν που χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανίες, κι έτσι ο χειρισμός αυτής της ουσίας δεν γειρεί κάποια καινούρια προβλήματα. Ο σχεδιασμός και έλεγχος των εργασιών θα βασίζεται κυρίως στην τεχνολογία της βιομηχανίας του πετρελαίου και φυσικού αερίου, ιδιαίτερα στην εποχιακή αποθήκευση φυσικού αερίου ή τη βελτιωμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR). Οι κύριες παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- η πίεση έγχυσης και ο ρυθμός ροής - η πρώτη πρέ-

πει να διατηρείται κάτω από την πίεση θραύσης, δηλ. την πίεση πάνω από την οποία προκαλούνται διαρρήξεις μέσα στο πέτρωμα-κάλυμμα,

- ο εγχεόμενος όγκος, προκειμένου να ανταποκρίνεται στις προβλέψεις που έγιναν από τη μοντελοποίηση,
- η σύσταση του εγχεόμενου ρεύματος CO<sub>2</sub>,
- η ακεραιότητα της(των) γεώτρησης(-ων) έγχυσης και κάθε γεώτρησης μέσα ή κοντά στην επέκταση του θυσάνου του CO<sub>2</sub>,
- η επέκταση του θυσάνου του CO<sub>2</sub> και η ανίχνευση οποιασδήποτε διαρροής,
- η ευστάθεια του εδάφους.

Κατά τη διάρκεια της έγχυσης, η πραγματική συμπεριφορά του CO<sub>2</sub> που εγχέεται θα πρέπει να συγκρίνεται επανειλημμένα με τις προβλέψεις. Αυτό βελτιώνει σταθερά τη γνώση μας για τη θέση. Αν ανιχνευθεί οποιαδήποτε μη ομαλή συμπεριφορά, το πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να επικαιροποιηθεί και να γίνουν διορθωτικές ενέργειες εάν κριθεί αναγκαίο. Στην περίπτωση που υπάρχει υποψία για κάποια διαρροή, τα κατάλληλα εργαλεία παρακολούθησης θα μπορούσαν να επικεντρωθούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή της θέσης αποθήκευσης, από τον ταμιευτήρα μέχρι την επιφάνεια. Με αυτήν την ενέργεια μπορεί να ανιχνευθεί η άνοδος του CO<sub>2</sub> και, επιπλέον, οποιαδήποτε δυσμενής επίπτωση που θα μπορούσε να βλάψει τους υδροφορείς πόσιμου νερού, το περιβάλλον και, τελικά, τους ανθρώπους.

Όταν ολοκληρωθεί η έγχυση, ξεκινά η φάση του κλεισίματος: οι γεωτρήσεις πρέπει να κλειστούν κατάλληλα και να εγκαταλειφθούν, η μοντελοποίηση και το πρόγραμμα παρακολούθησης πρέπει να επικαιροποιηθούν και, εάν είναι αναγκαίο, πρέπει να ληφθούν διορθωτικά μέτρα για να μειώσουν τους κινδύνους. Μόλις το επίπεδο κινδύνου θεωρηθεί ότι είναι αρκετά χαμηλό, η ευθύνη της αποθήκευσης θα μεταφερθεί σε εθνικές αρχές και το σχέδιο παρακολούθησης μπορεί να σταματήσει ή να ελαχιστοποιηθεί.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία θεσπίζει ένα νομικό πλαίσιο για να διασφαλίσει ότι η δέσμευση και αποθήκευση του CO<sub>2</sub> αποτελεί μια διαθέσιμη επιλογή μετριασμού, και ότι μπορεί να γίνει με ασφάλεια και υπευθυνότητα.

Συμπερασματικά, τονίζεται ότι τα κριτήρια ασφάλειας αποτελούν ουσιώδες ζήτημα για την επιτυχή βιομηχανική ανάπτυξη της αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Αυτά πρέπει να προσαρμόζονται σε κάθε συγκεκριμένη θέση αποθήκευσης. Αυτά τα κριτήρια θα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη δημόσια αποδοχή, και ουσιαστικά στη διαδικασία αδειοδότησης, για την οποία οι ρυθμιστικές αρχές πρέπει να αποφασίσουν θέτοντας το επίπεδο λεπτομέρειας για τις απαιτήσεις της ασφάλειας.

**Άλμη:** πολύ αλμυρό νερό, δηλ. περιέχει μεγάλη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων.

**Βελτιωμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery, EOR):** μια τεχνική που βελτιώνει την παραγωγή πετρελαίου με έγχυση ρευστών (όπως ατμός ή CO<sub>2</sub>) και βοηθά την κινητοποίηση του πετρελαίου στον ταμειυτήρα.

**CCS:** Δέσμευση και Αποθήκευση του CO<sub>2</sub>.

**CSLF:** Carbon Sequestration Leadership Forum. Μια διεθνής πρωτοβουλία για την κλιματική αλλαγή που επικεντρώνεται στην ανάπτυξη βελτιωμένων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών, για το διαχωρισμό και τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα και τη μεταφορά και ασφαλή αποθήκευσή του σε μακροχρόνια βάση.

**Γεώτρηση:** κυκλική οπή που γίνεται με διάτρηση, ειδικά μια βαθιά οπή μικρής διαμέτρου, όπως μια γεώτρηση πετρελαίου.

**Διαπερατότητα:** ιδιότητα ή ικανότητα ενός πορώδους πετρώματος να μεταδίδει ένα ρευστό· αποτελεί μέτρο της σχετικής ευκολίας της ροής του ρευστού κάτω από μια βαθμίδα πίεσης.

**EU Geocarapacity:** ένα ερευνητικό έργο της ΕΕ, που ασχολήθηκε με την εκτίμηση της συνολικής γεωλογικής αποθηκευτικής ικανότητας που υπάρχει στην Ευρώπη για τις ανθρωπογενείς εκπομπές του CO<sub>2</sub>.

**Εγχευσιμότητα:** χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία ένα ρευστό (όπως το CO<sub>2</sub>) μπορεί να εγχυθεί σε ένα γεωλογικό σχηματισμό. Ορίζεται ως ο ρυθμός έγχυσης που διαιρείται με τη διαφορά πίεσης μεταξύ του σημείου έγχυσης μέσα στη βάση της γεώτρησης και του σχηματισμού.

**GESTCO:** ένα Ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο που έχει ολοκληρωθεί και στο οποίο εκτιμήθηκαν οι δυνατότητες γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> σε 8 χώρες (Νορβηγία, Δανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Βέλγιο, Ολλανδία, Γερμανία, Γαλλία και Ελλάδα).

**Θύσανος CO<sub>2</sub>:** χωρική κατανομή του υπερκρίσιμου CO<sub>2</sub> μέσα στις ενότητες των πετρωμάτων.

**IEAGHG:** Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας - Πρόγραμμα Έρευνας & Ανάπτυξης Αερίων Θερμοκηπίου. Μια διεθνής συνεργασία που αποσκοπεί στην αξιολόγηση τεχνολογιών μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, τη διάδοση των αποτελεσμάτων αυτών των μελετών, και τον προσδιορισμό στόχων για έρευνα, ανάπτυξη και επίδειξη καθώς και την προώθηση των κατάλληλων εργασιών.

**IPCC:** International Panel on Climate Change - Διεθνής Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή. Ιδρύθηκε το 1988 από τον WMO (Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας) και το UNEP (Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον) για την αξιολόγηση

των επιστημονικών, τεχνικών και κοινωνικο-οικονομικών πληροφοριών που σχετίζονται με την κατανόηση της κλιματικής αλλαγής, τις πιθανές επιπτώσεις της και τις επιλογές για προσαρμογή και μετριασμό. Στο IPCC και τον Al Gore απονεμήθηκε το Νόμπελ Ειρήνης για το 2007.

**Λιθοστατική πίεση:** η δύναμη που ασκείται σε ένα πέτρωμα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους από τα υπερκείμενα πετρώματα. Η λιθοστατική πίεση αυξάνει με το βάθος.

**Μικροσεισμικότητα:** ελαφρά δόνηση ή κραδασμός στο φλοιό της γης, που δεν σχετίζεται με σεισμούς, και που μπορεί να προκληθεί από διάφορα φυσικά ή τεχνητά μέσα.

**pH:** το μέτρο της οξύτητας ενός διαλύματος· όταν το pH είναι 7, το διάλυμα είναι ουδέτερο.

**Πέτρωμα-κάλυμμα:** αδιαπέρατο στρώμα πετρωμάτων που δρα ως εμπόδιο στην κίνηση ρευστών και αερίων και το οποίο διαμορφώνει μια παγίδα όταν υπερκείται ενός ταμειυτήρα.

**Πορώδες:** ποσοστό του φαινομενικού όγκου ενός πετρώματος που δεν καταλαμβάνεται από ορυκτά. Τα κενά αυτά ονομάζονται πόροι και μπορούν να πληρωθούν από διάφορα ρευστά· συνήθως, σε βαθιά πετρώματα αυτό το ρευστό είναι αλμυρό νερό αλλά μπορεί επίσης να είναι πετρέλαιο ή αέριο όπως το μεθάνιο ή επίσης φυσικά σχηματισμένο CO<sub>2</sub>.

**Ταμειυτήρας:** σώμα πετρώματος ή ιζήματος, που είναι επαρκώς πορώδες και (δια)περατό, ώστε να φιλοξενεί και να αποθηκεύει CO<sub>2</sub>. Ψαμίτες και ασβεστόλιθοι είναι τα πιο κοινά πετρώματα ταμειυτήρων.

**Υδροφορέας:** (δια)περατό σώμα πετρώματος που περιέχει νερό. Οι πιο επιφανειακοί υδροφορείς περιέχουν γλυκό νερό που χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση. Αυτοί που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος είναι γεμάτοι με αλμυρό νερό, το οποίο είναι ακατάλληλο για χρήση σε φθορούν ανθρώπινες ανάγκες. Ονομάζονται αλμυροί υδροφορείς.

**Υπερκείμενα:** τα γεωλογικά στρώματα που βρίσκονται μεταξύ του πετρώματος-καλύμματος του ταμειυτήρα και της επιφάνειας της γης (ή του θαλάσσιου βυθού).

**Υπερκρίσιμο:** η κατάσταση ενός ρευστού σε τιμές πίεσης και θερμοκρασίας πάνω από τις κρίσιμες τιμές (31,03°C και 7,38 MPa για το CO<sub>2</sub>). Οι ιδιότητες τέτοιων ρευστών μεταβάλλονται συνεχώς, από την πιο αέρια μορφή σε χαμηλές πιέσεις σε πιο υγρή μορφή σε υψηλές πιέσεις.

**Φυσικό ανάλογο:** ένας ταμειυτήρας φυσικού CO<sub>2</sub>. Υπάρχουν θέσεις με διαρροές και θέσεις χωρίς διαρροές και η μελέτη τους μπορεί να βελτιώσει την κατανόησή μας για την τύχη του CO<sub>2</sub> σε μακροχρόνια βάση στα βαθιά γεωλογικά συστήματα.

## Για περισσότερα:

**Η Ειδική Έκθεση για CCS της Διεθνούς Ομάδας για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)**

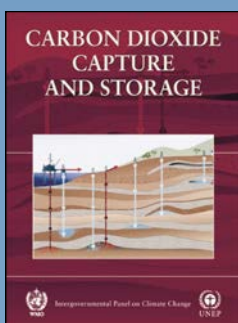
[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)

**Η ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission) για CCS:**

[http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/index_en.htm)

**Η ιστοσελίδα του IEAGHG με εργαλεία παρακολούθησης (monitoring tools):**

[http://www.co2captureandstorage.info/co2tool\\_v2.1beta/introduction.html](http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html)





# Τι είναι το CO<sub>2</sub>GeoNet;

Το CO<sub>2</sub>GeoNet είναι η Ευρωπαϊκή επιστημονική κοινότητα στην οποία μπορείς να απευθυνθείς για σαφείς και εκτενείς πληροφορίες για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>, μια καινοτόμο και ζωτικής σημασίας τεχνολογία μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Το CO<sub>2</sub>GeoNet ιδρύθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως ένα Δίκτυο Αριστείας στα πλαίσια του 6<sup>ου</sup> Προγράμματος Πλαισίου (σύμβαση FP6 της ΕΕ 2004-2009). Συνδέει 13 ινστιτούτα από 7 Ευρωπαϊκές χώρες, όλα με υψηλό διεθνές προφίλ και κρίσιμη μάζα αναφορικά με την έρευνα στη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>. Το 2008, το CO<sub>2</sub>GeoNet ενεγράφη ως μια μη κερδοσκοπική Ένωση σύμφωνα με το Γαλλικό Δίκαιο έτσι ώστε να συνεχίσει τις δραστηριότητές του και μετά το τέλος της υποστήριξης από την ΕΕ.

Το CO<sub>2</sub>GeoNet έχει ευρεία εμπειρία σε ερευνητικά έργα που αντιμετωπίζουν: τον ταμιευτήρα, το πέτρωμα-κάλυμμα, τις πιθανές διαδρομές μεταναστεύσεως του CO<sub>2</sub> μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, τα εργαλεία παρακολούθησης, τις πιθανές επιπτώσεις στους ανθρώπους και τα οικοσυστήματα, τη δημόσια αντίληψη και επικοινωνία. Το CO<sub>2</sub>GeoNet προσφέρει μια ποικιλία υπηρεσιών σε τέσσερις κύριους τομείς: 1) κοινή έρευνα, 2) εκπαίδευση, κατάρτιση και ανάπτυξη ικανοτήτων, 3) επιστημονικές συμβουλές, 4) πληροφόρηση και επικοινωνία.

Το CO<sub>2</sub>GeoNet έχει αποκτήσει σταδιακά δύναμη και έχει γίνει μια διαρκής και ισχυρή επιστημονική αναφορά και αυθεντία στην Ευρώπη, που μπορεί να παρέχει την απαραίτητη επιστημονική υποστήριξη για την ευρείας κλίμακας και ασφαλή ανάπτυξη της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Η διεύρυνση αυτής της κοινότητας ώστε να δώσει πανευρωπαϊκή κάλυψη είναι σε εξέλιξη μέσω του Έργου CGS Europe, μιας Δράσης Συντονισμού που χρηματοδοτείται από το FP7 της ΕΕ (2010-2013). Το CGS Europe συνδέει τον πυρήνα της Ένωσης CO<sub>2</sub>GeoNet με 21 άλλα ερευνητικά ινστιτούτα, καλύπτοντας έτσι 28 Ευρωπαϊκές χώρες (24 Κράτη Μέλη και 4 Συνδεδεμένες Χώρες). Σαν αποτέλεσμα, μια ομάδα - δεξαμενή μερικών εκατοντάδων επιστημόνων είναι διαθέσιμη, ικανή να ασχοληθεί με όλες τις πτυχές της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> μέσω διεπιστημονικής ενοποίησης. Σκοπός μας είναι να εφοδιάζονται οι ενδιαφερόμενοι και το κοινό με ανεξάρτητες και επιστημονικά έγκυρες πληροφορίες για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>.



## CO<sub>2</sub>GeoNet: το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Αριστείας στη Γεωλογική Αποθήκευση του CO<sub>2</sub>

**BGR** (Γερμανία), **BGS** (Ην. Βασίλειο), **BRGM** (Γαλλία), **GEUS** (Δανία), **HWU** (Ην. Βασίλειο), **IFPEN** (Γαλλία), **IMPERIAL** (Ηνωμ. Βασίλειο), **NIVA** (Νορβηγία), **OGS** (Ιταλία), **IRIS** (Νορβηγία), **SPR** Sintef (Νορβηγία), **TNO** (Ολλανδία), **URS** (Ιταλία)



[www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

## CGS Europe: η Παν-Ευρωπαϊκή Δράση Συντονισμού για τη Γεωλογική Αποθήκευση του CO<sub>2</sub>

**CO<sub>2</sub>GeoNet** (τα 13 μέλη που αναφέρονται παραπάνω), **CzGS** (Δημοκρατία της Τσεχίας), **GBA** (Αυστρία), **GEOCOMAR** (Ρουμανία), **GEO-INZ** (Σλοβενία), **G-IGME** (Ελλάδα), **GSI** (Ιρλανδία), **GTC** (Λιθουανία), **GTK** (Φινλανδία), **LEGMC** (Λετονία), **ELGI**



[www.cgseurope.net](http://www.cgseurope.net)

(Ουγγαρία), **LNEG** (Πορτογαλία), **METU-PAL** (Τουρκία), **PGI-NRI** (Πολωνία), **RBINS-GSB** (Βέλγιο), **SGU** (Σουηδία), **SGUDS** (Σλοβακία), **S-IGME** (Ισπανία), **SU** (Βουλγαρία), **TTUGI** (Εσθονία), **UB** (Σερβία), **UNIZG-RGNF** (Κροατία)

## Το CO<sub>2</sub>GeoNet έχει κερδίσει ευρεία αναγνώριση στην Ευρωπαϊκή και διεθνή σκηνή

Το CO<sub>2</sub>GeoNet επιδοκιμάζεται και υποστηρίζεται από το Carbon Sequestration Leadership Forum (Καθοδηγητικό Φόρουμ για τη δέσμευση και αποθήκευση του Άνθρακα, CSLF)



Το CO<sub>2</sub>GeoNet συνεργάζεται στενά με το Πρόγραμμα Αερίων Θερμοκηπίου του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEAGHG)



## Υπόβαθρο του φυλλαδίου

Προκειμένου να αυξηθεί η γνώση και ευαισθητοποίηση του κοινού για τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>, το CO<sub>2</sub>GeoNet αντιμετώπισε το κυρίαρχο ερώτημα: «Τι σημαίνει στην πραγματικότητα γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>;». Μια ομάδα διαπρεπών επιστημόνων από το CO<sub>2</sub>GeoNet συνέταξε επίκαιρες απαντήσεις σε έξι συναφείς ερωτήσεις, που βασίζονται στην έρευνα και την εμπειρία σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο στόχος αυτής της ενέργειας είναι να παρσαχθεί σαφής και αντικειμενική επιστημονική πληροφόρηση σε ένα ευρύ κοινό και να ενθαρρυνθεί ο διάλογος στα ουσιώδη ερωτήματα που αφορούν τα τεχνικά ζητήματα της γεωλογικής αποθήκευσης του CO<sub>2</sub>. Η εργασία αυτή, που συνοψίζεται στο παρόν φυλλάδιο, παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια μιας ημερίδας Εκπαίδευσης και Διαλόγου που έλαβε χώρα στο Παρίσι στις 3 Οκτωβρίου 2007.

Το φυλλάδιο «Τι σημαίνει στην πραγματικότητα γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>;» είναι διαθέσιμο για κατέβασμα (download) σε πολλές γλώσσες στην ιστοσελίδα:

[www.co2geonet.com/brochure](http://www.co2geonet.com/brochure)

# CO<sub>2</sub>GeoNet

## Το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Αριστείας στη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub>



[www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

Γραμματεία: [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com)

**BGS** Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI



Η Ελληνική έκδοση μεταφράστηκε και εκτυπώθηκε στα πλαίσια του έργου του FP7 “CGS Europe — Pan-European coordination action on CO<sub>2</sub> Geological Storage” από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και Μελετών (Ι.Γ.Μ.Ε.Μ.) του Εθνικού Κέντρου Βιώσιμης και Αειφόρου Ανάπτυξης (Ε.Κ.Β.Α.Α.)

