

## Progetto sperimentale di iniezione d'acqua in unità geologiche profonde per il controllo della subsidenza costiera: il caso di studio di Lido Adriano (Ravenna)

Diego Vicinanza<sup>1</sup>, Paolo Ciavola<sup>2</sup>, Simona Biagi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile - CIRIAM, Seconda Università di Napoli – Via Roma n.29 – 81031 Aversa (CE), Tel.: +39 081 5010245, Fax: +39 081 5037370, Email: diegovic@unina.it

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara - Via Saragat n. 1 - 44100 Ferrara, Tel.: +39 0532 974622, Fax ++39 0532 974767, Email: cvp@unife.it

<sup>3</sup>Eni S.p.A. Div. Exploration & Production, Unità Geografica Italia - Via del Marchesato n. 13 - 48023 Marina di Ravenna (RA), Tel.: +39 0544 512013, Fax +39 0544 512052, Email: simona.biagi@eni.it

### Riassunto

La costa emiliano-romagnola è soggetta a fenomeni di subsidenza naturale dovuta essenzialmente a cause tettoniche e a compattazione degli strati di sedimento quaternari. Il fenomeno ha subito un generale incremento a partire dalla fine degli anni '50, con valori dei cedimenti che sono passati da millimetri a qualche centimetro all'anno. Si è accertato che l'estrazione d'acqua dal sottosuolo è stata la causa principale di tale incremento, mentre si ritiene che solo per limitati tratti del litorale romagnolo la produzione di gas da alcuni giacimenti on/offshore posti in prossimità della costa ravennate possa anche avere contribuito alla subsidenza totale osservata.

La memoria descrive i primi risultati di un esperimento di campo "unico" al mondo presso la località Lido Adriano (Ravenna) per il controllo della subsidenza costiera. Il progetto, iniziato nel Marzo del 2003, ha come obiettivo principale il mantenimento della pressione del giacimento di gas denominato "Angela-Angelina", mediante iniezione d'acqua in unità geologiche profonde (circa 4000 m). I risultati preliminari analizzati durante la fase di iniezione iniziale sono stati incoraggianti. Durante questa fase sono stati iniettati 150 m<sup>3</sup>/giorno (160.000 m<sup>3</sup> in totale). Il monitoraggio effettuato durante il periodo 2003-2006 ha mostrato un incremento di pressione di 25 bar causati dall'attività di iniezione d'acqua. Il progetto prevede nel suo sviluppo futuro un incremento della portata fino a 2500 m<sup>3</sup>/giorno. Un aspetto interessante, dal punto di vista della sostenibilità ambientale del progetto, è l'utilizzo dell'acqua di mare per l'iniezione in falda profonda, adoperando l'acqua captata dal sistema di drenaggio BMS (Beach Management Systems) installato sulla spiaggia, ed avente anche la finalità di stabilizzare l'arenile.

**Parole chiave:** subsidenza costiera, controllo della subsidenza, iniezione d'acqua, BMS, RSA.

### Abstract

*The Emilia-Romagna coastline (Northern Italy) is affected by subsidence generated by tectonic processes through compaction and deformation of Quaternary sediments. Subsidence has been increasing starting from the end of 50's, shifting from rates of millimetres to several centimetres per year. It has been recognized that the subsurface water extraction has been the main cause of this increase, while it is felt that only for some parts of such coastline the gas production from a few on/offshore fields located very near to the Ravenna coast could also have contributed to the total observed subsidence.*

*The paper reports the first results from a unique field experiment taking place at Lido Adriano (Italy). The project started in March 2003 having as main object the pressure maintenance of the gas reservoir, obtained by injection of sea water at about 4000 m depth. Preliminary results analysed during the early injection phase were encouraging. During this period 150 m<sup>3</sup>/day were pumped down (a total of 160.000 m<sup>3</sup>). The pressure monitoring during the period 2003-2006 showed an increase*

*of pressure of 25 bars due to the injection activity. In the future the project will increase the injection rate to 2500 m<sup>3</sup>/day. An interesting “environmentally sustainable” aspect of the project is the use of sea-water for reinjection, using water collected through BMS (Beach Management System) that has also the role of stabilizing the beach and contrast erosion trend.*

**Keywords:** *coastal subsidence, subsidence control, water injection, BMS, RSA.*

## **Introduzione**

In Italia, a tutt'oggi, circa il 40% delle spiagge è in erosione, così come riportato in “Lo stato dei litorali italiani”, pubblicato sulla rivista Studi Costieri (AA.VV., 2006). Le cause sono comunemente da ascrivere all'azione del moto ondoso e delle correnti da esso indotte, nonché al ridotto apporto di materiale solido trasportato dai corsi d'acqua, alla distruzione delle dune costiere ed alla costruzione di opere marittime. Accanto a tali cause, se si considerano scale temporali di media estensione (10-100 anni), possono risultare non trascurabili, ai fini della dinamica litoranea, anche gli effetti indotti da fenomeni di subsidenza del fondale, con ripercussioni talvolta anche vistose.

Come è noto i fenomeni di subsidenza sono indotti da cause naturali o antropiche. Nel primo caso, la subsidenza è rappresentata da un lento abbassamento della crosta terrestre di ampiezza pari a qualche mm/anno provocato, nella maggior parte dei casi, dal costipamento dei sedimenti incoerenti dovuto al peso di quelli sovrastanti o da movimenti del substrato roccioso.

La subsidenza antropica è invece dovuta essenzialmente all'attività dell'uomo, in particolare all'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acqua, petrolio, gas, ecc.) ed al prosciugamento di valli e di terreni paludosi. Pur essendo anche questo tipo di subsidenza un fenomeno che si manifesta in modo lento e graduale, esso è in generale caratterizzato da un'evoluzione temporale più rapida e da abbassamenti del suolo più elevati rispetto alla subsidenza naturale.

Quando il fenomeno di subsidenza avviene in prossimità della fascia costiera esso inevitabilmente innesca un complesso fenomeno di interazione con l'evoluzione naturale della linea di riva. Esso rappresenta un problema di notevole complessità trattandosi di un processo di interazione fortemente non lineare tra i cedimenti della spiaggia emersa e sommersa per effetto della subsidenza e le sue modificazioni morfologiche (erosione o accrescimento) dovute alla sollecitazione del modo ondoso.

La costa emiliano-romagnola è soggetta al fenomeno della subsidenza naturale dovuta a cause tettoniche e a compattazione degli strati di sedimenti quaternari.

L'analisi dei dati ricavati dalle campagne di misura effettuate dall'Istituto Geografico Militare, Idroser e Comune di Ravenna evidenzia come tutta l'area ravennate sia caratterizzata da elevati valori di abbassamento (Regione Emilia-Romagna-Idroser Agenzia, 1996). Nel periodo 1892-1950 la subsidenza a Ravenna città è stata di circa 4 mm/anno, tra il 1959 e il 1970 di circa 25 mm/anno, tra il 1970 e il 1977 di circa 40 mm/anno (valore più alto registrato). Negli ultimi 20 anni il fenomeno risulta in riduzione, pur rimanendo su valori pari a 20 mm/anno, decisamente superiori alla soglia naturale (Regione Emilia-Romagna-Idroser Agenzia, 1996).

La fascia costiera ravennate è stata oggetto di monitoraggio geodinamico fin dai primi anni del secolo scorso. Diversi sono stati, e tuttora sono, gli enti nazionali, regionali, locali che si sono occupati della misurazione degli spostamenti verticali del territorio attraverso l'utilizzo di diverse metodologie quali livellazione geometrica, GPS, interferometria differenziale SAR e l'analisi interferometrica su diffusori puntuali. A tal proposito è stato recentemente realizzato il rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola affidata ad ARPA dalla Regione Emilia-Romagna ([http://www.arpa.emr.it/ingamb/rr\\_subsidenza\\_satelliti.htm](http://www.arpa.emr.it/ingamb/rr_subsidenza_satelliti.htm)). In essa viene anche presentato l'andamento delle velocità medie di abbassamento del suolo nel periodo 2002-2006 per la fascia costiera romagnola e il relativo entroterra. Le prime serie storiche che si sono rese disponibili per la ricostruzione dell'andamento della subsidenza a scala comunale sono i dati storici di IGM e del Consorzio di Bonifica di Ravenna, nonché

le livellazioni geometriche fatte eseguire dal Comune di Ravenna. La subsidenza del territorio ravennate è stata periodicamente controllata dal Comune attraverso una serie di campagne di livellazione geometrica effettuate su una rete composta da oltre 700 capisaldi, per un totale di 640 km di linee distribuiti uniformemente su tutto il territorio comunale. Le misure sono state eseguite seguendo idonee specifiche tecniche, che impongono il rispetto di prefissati valori di tolleranza relativamente allo scarto quadratico medio sulle compensazioni di rete e alle chiusure degli anelli formati dalle linee di livellazione. Nel tempo si è arrivati ad un infittimento delle linee di livellazione lungo la fascia costiera su quasi tutta l'estensione comunale.

Di rilevante interesse per la previsione dei tassi di subsidenza e dei potenziali effetti causati dalla produzione di gas nell'area costiera di Ravenna è il lavoro svolto da un gruppo di ricercatori nazionali e internazionali. Questo gruppo di lavoro ha portato a termine recentemente uno studio interdisciplinare per la modellazione e previsione dei comportamenti del giacimento metanifero di Angela-Angelina (Ravenna), ubicato nelle immediate vicinanze della costa ravennate. La subsidenza indotta dall'estrazione di gas e i suoi effetti sull'ambiente, in particolare sulla morfologia costiera, sono riportati in un volume speciale pubblicato per il settimo simposio internazionale sulla subsidenza, svoltosi in Cina nell'Ottobre del 2005 (AA.VV., 2005).

Di particolare interesse per questo lavoro risulta, tra le altre, la memoria di Barends et al. (2005a) riguardante le informazioni disponibili lungo la costa ravennate relativamente ai tassi di subsidenza indotti dall'estrazione del gas. I dati raccolti dagli Autori relativi agli studi precedentemente svolti nell'area in esame possono così essere riassunti:

- dati di livellazioni eseguite dall'IGM nel periodo 1877-1903 e 1950-1956 (Salvioni, 1957) riportati in Teatini et al. (2005). I valori medi di subsidenza possono considerarsi compresi tra 0.4 - 0.7 cm/anno e sono da ritenersi di origine naturale in quanto la quantità di estrazione di acqua da falda della Provincia di Ravenna era ancora molto bassa;
- Gambolati e Teatini (1998) utilizzando le elaborazioni di Salvioni (1957) stimarono che la subsidenza naturale nella Provincia di Ravenna fosse compresa tra 0.15-0.25 cm/anno;
- Teatini et al. (2005), rivedendo tutti i dati disponibili nel periodo compreso tra il 1897-2002 (Fig. 1), valuta che i valori da attribuire alla subsidenza naturale siano compresi tra 0.55-0.7 cm/anno. Risulta altresì evidente un incremento di 4.6 cm/anno nel periodo 1950-1977. Tali incrementi di subsidenza, chiaramente di natura antropica, sono da attribuirsi alla captazione di acqua da falda superficiale avvenuta per scopi civili ed industriali. Dopo il 1977, infatti, con una diminuzione di questa captazione, i valori si sono notevolmente ridotti.

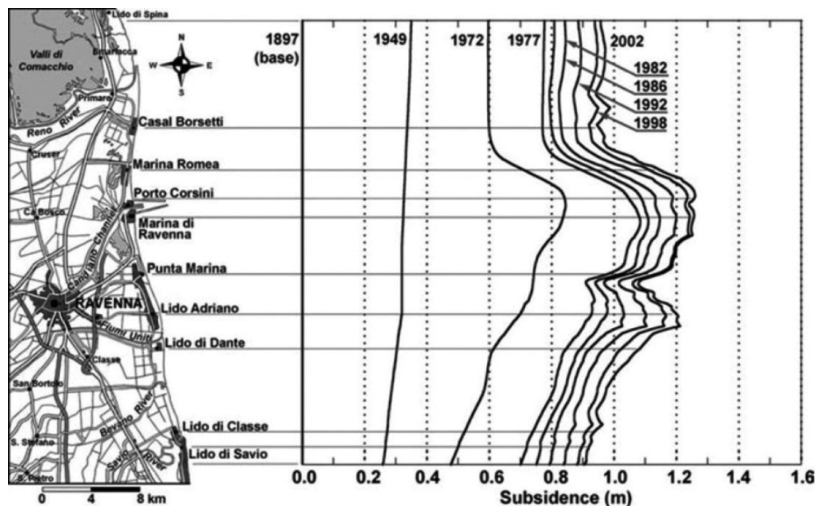


Figura 1 - Subsidenza costiera ravennate nel tempo dopo Teatini et al. (2005).

Sulla base degli studi fatti da Polo (2002) e Teatini et al. (2005), Houtenbos et al. (2005) stimano che un valore medio di subsidenza naturale possa essere valutato nell'ordine di 4-5 mm/anno (Figg. 1 e 2). Per ciò che concerne la valutazione della subsidenza antropica indotta dall'estrazione di gas, Houtenbos et al. (2005) fanno riferimento ai dati di cinque monitoraggi (livellazioni) effettuati dal Comune di Ravenna durante il periodo 1982-2002. Gli Autori valutano che nel suddetto periodo l'estrazione di gas abbia contribuito alla subsidenza antropica mediamente nella misura di 0.29 cm/anno a Fiumi

Uniti e di 0.24 cm/anno a Lido di Dante.

Il confronto tra questi dati e le previsioni del modello matematico di Schroot et al. (2005) al centro del campo *offshore* di estrazione metanifera Angela-Angelina mostra un incremento della velocità di subsidenza per il periodo 2003-2015 (Fig. 3), seguito da un *rebound* negli anni successivi. Infine, Barends et al. (2005b) evidenziano come questa previsione degli incrementi di subsidenza (9 cm nel periodo 2003-2015), accoppiati con prevedibili incrementi del livello medio del mare, potrebbero modificare l'attuale assetto geomorfologico dell'area e, quindi, richiedere miglioramenti delle attuali misure di protezione costiera nella zona compresa tra Lido di Dante e Lido Adriano.

Negli ultimi anni, proprio alla luce dei monitoraggi fatti e delle ricerche scientifiche in corso, la Regione Emilia Romagna ha cercato di approfondire gli studi mirati al contenimento dei suddetti fenomeni, alla luce dei quali, pur riconoscendo nel gas naturale una delle risorse di maggiore rilevanza del territorio, ha comunque altresì evidenziato la necessità di limitare o eliminare gli effetti di subsidenza innescati dalla estrazione del gas attraverso l'utilizzazione delle migliori tecnologie disponibili e di scelte gestionali ispirate a modelli di sviluppo sostenibile.

A seguito di ciò, in data 12/10/2002 è stato sottoscritto tra, Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A un Protocollo di Intesa avente come obiettivo "la realizzazione di un progetto sperimentale sulla iniezione di acque nel pozzo a terra Angelina 1, ai fini del controllo e mantenimento della pressione degli acquiferi di livelli produttivi e la fattibilità di tecniche innovative di stabilizzazioni e recupero della spiaggia a basso impatto ambientale". Il progetto sperimentale è stato realizzato, sotto la denominazione "Progetto Angela-Angelina pressure maintenance". A fronte dei confortanti risultati ottenuti, si è deciso di rinnovare il Protocollo di Intesa tra i medesimi soggetti firmatari (27/04/2006, durata triennale), con l'intento di far progredire i risultati ottenuti nella prima fase ed arrivare ad un incremento della portata di acqua di mare da iniettare, destinata in questo caso alla immissione

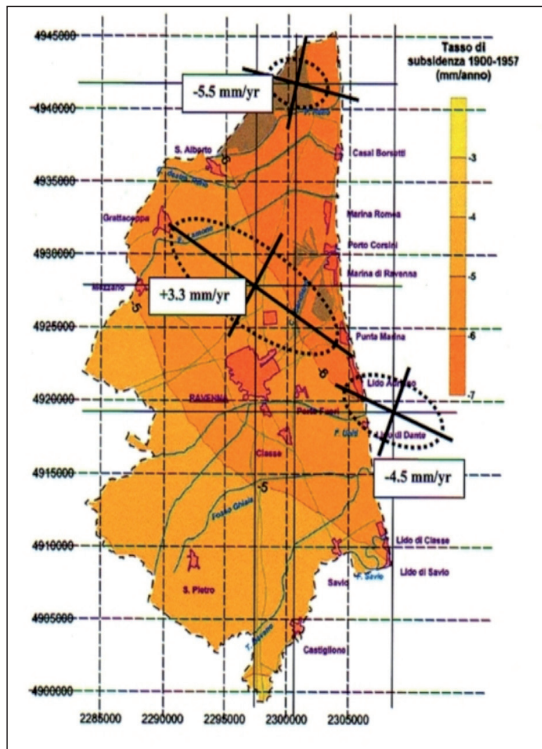


Figura 2 - Tasso di subsidenza naturale nel periodo 1900-1957 da Polo (2002).

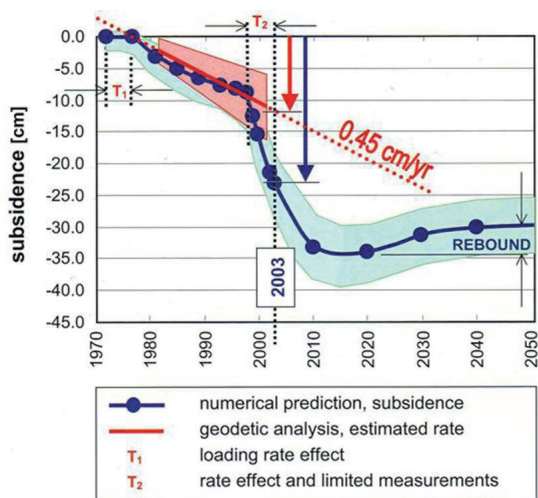


Figura 3 - Confronto tra le previsioni del modello di Schroot et al. (2005) e i valori stimati dall'analisi geodetica di Houtenbos et al. (2005), da Barends et al. (2005).

in pozzi localizzati nel campo di Angela-Angelina, ubicato a largo di Lido Adriano (Ravenna). È quindi stato avviato il progetto denominato “*Angela-Angelina water injection*”, attualmente in corso. Questa memoria descrive i risultati sperimentali ottenuti nell’ambito di questo progetto di ricerca che rappresenta un caso “unico” al mondo per il controllo della subsidenza.

## **Stato dell’arte sull’iniezione di acqua nei giacimenti di idrocarburi**

### ***Giacimenti di petrolio***

L’iniezione d’acqua nei giacimenti di petrolio è un processo industriale consolidato, largamente impiegato da tutti gli operatori a scala mondiale.

Considerazioni teoriche, studi di laboratorio e, soprattutto, risultati di campo hanno ampiamente dimostrato che l’applicazione di tale processo consente in generale d’incrementare la percentuale di recupero di petrolio mantenendo nel contempo elevate le portate dei pozzi. Tale effetto positivo è principalmente conseguenza:

- del sostentamento della pressione di giacimento che viene mantenuta ad un livello prefissato (di norma inferiore o uguale al valore iniziale);
- della sostituzione del petrolio nei pori della roccia serbatoio con l’acqua iniettata, e della spinta dello stesso da parte dell’acqua verso i pozzi produttori (il cosiddetto “spiazzamento”).

Poiché il mantenimento di pressione contrasta e/o annulla la compattazione degli strati mineralizzati costituenti il giacimento, compattazione che è la causa della subsidenza, l’iniezione d’acqua è stata proposta ed applicata come una delle misure atte a prevenire/mitigare la subsidenza stessa.

Una delle prime applicazioni dell’iniezione d’acqua in giacimenti di petrolio eseguita a tale scopo, ovvero per mitigare la subsidenza, si è avuta nel caso del campo di Wilmington (California).

Questo campo è costituito da 7 livelli di sabbia consolidata alternati ad argilla, posti a profondità compresa fra i 750 m e 1800 m e mineralizzati ad olio medio-pesante. Poco dopo l’entrata in produzione nel 1936, si sono manifestati i primi segni di subsidenza che è andata progressivamente aumentando sino a raggiungere complessivamente i 7.9 m nel 1958.

L’ubicazione del giacimento, posto al di sotto della città di Long Beach e del relativo porto, e l’entità del fenomeno hanno indotto le Autorità di controllo e l’operatore ad avviare nel 1958 un progetto pilota d’iniezione d’acqua di mare per arrestare o quanto meno mitigare la subsidenza (Fig. 4).



Figura 4 - Effetto della subsidenza su di un idrante nel porto di Long Beach (Foto tratta da [http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ozsvath/images/long\\_beach\\_subsidence.htm](http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ozsvath/images/long_beach_subsidence.htm)).

I risultati positivi di tale progetto pilota hanno portato nel decennio 1958-1968 a estendere la *water injection* a tutto il giacimento che è stato ripressurizzato su valori pari a circa 80%-90% della pressione iniziale. A partire dal 1968 la subsidenza si è arrestata praticamente in tutto il campo, e addirittura in alcune zone si è avuto un parziale risollevarimento della superficie del suolo pari a circa il 10% del valore della subsidenza raggiunta in precedenza. Il successo del progetto d'iniezione d'acqua nel campo di Wilmington ha indotto altri operatori ad utilizzare lo stesso processo per mitigare/arrestare la subsidenza nei giacimenti ad olio pesante della California. A titolo esemplificativo si può ricordare il caso del campo di Beverley Hills ubicato in corrispondenza della parte Sud dell'abitato della città di Los Angeles, in zona, quindi, fortemente urbanizzata. In tale campo, entrato in produzione nel 1966, il manifestarsi di lievi fenomeni di subsidenza ha portato a realizzare nel 1969 un progetto pilota d'iniezione d'acqua per il mantenimento della pressione; progetto che nel periodo 1969-1974 è stato progressivamente esteso a tutto il giacimento. A partire dal 1974, data alla quale la subsidenza massima aveva raggiunto un valore di circa 1200 mm, la subsidenza stessa si è praticamente arrestata confermando l'efficacia dell'iniezione d'acqua come misura di mitigazione.

Un caso più recente, che ha avuto larga risonanza mediatica, è quello del giacimento di Ekofisk ubicato *offshore* nel Mare del Nord. A circa metà degli anni '80 l'operatore (Conoco-Phillips), infatti, verificò che la produzione di olio aveva innescato un importante fenomeno di subsidenza (velocità di abbassamento del fondo mare dell'ordine di 40 cm/anno) che metteva a rischio la sicurezza delle piattaforme, dei pozzi e degli impianti d'estrazione. L'operatore intervenne con una duplice azione: sollevamento delle piattaforme di circa 6 m con una gigantesca opera d'ingegneria, e avvio di un progetto d'iniezione d'acqua di mare su tutto il giacimento per il mantenimento di pressione.

L'efficacia dell'iniezione d'acqua nel contrastare la subsidenza ad Ekofisk si è, però, manifestata più lentamente che nei campi californiani sopra citati a causa della natura della roccia serbatoio di tale giacimento. Quest'ultima, infatti, non è costituita da sabbie più o meno consolidate ma da un calcare molto poroso e "soffice" la cui resistenza meccanica viene indebolita dall'acqua di mare.

Ciò nonostante, a partire dalla metà degli anni '90, l'operatore ha riscontrato una notevole mitigazione del fenomeno della subsidenza con velocità di abbassamento del fondo mare che si sono ridotte a circa 15 cm/anno.

### ***Giacimenti di gas naturale***

Considerazioni teoriche e risultati di campo hanno mostrato che nel caso dei giacimenti di gas naturale l'iniezione d'acqua non sempre è un processo efficiente per la produzione d'idrocarburi in quanto tende a ridurre il recupero finale degli stessi. L'acqua, infatti, sia che venga iniettata sia che entri naturalmente in giacimento per decompressione degli strati acquiferi ad esso idraulicamente connessi, intrappola nei pori volumi importanti di gas che non sono più producibili.

Se in aggiunta a ciò si considera che l'espansione elastica del gas fornisce energia sufficiente alla sua produzione, si comprende come l'iniezione d'acqua sia di fatto mai applicata dagli operatori petroliferi nella coltivazione dei campi a gas.

Anche nel caso di fenomeni di subsidenza associati con la produzione di gas gli operatori, di concerto con le Autorità di controllo, preferiscono realizzare azioni di mitigazione degli effetti della subsidenza stessa che non intervenire a livello di giacimento mantenendone la pressione con iniezione d'acqua.

È questo il caso ben noto dei giacimenti olandesi di Groningen e Ameland per i quali è prevista una subsidenza massima a fine produzione rispettivamente di circa 42 cm e di circa 28 cm. Tali valori sono accettati dalla pubblica opinione e dalle Autorità di controllo, pur essendo tali giacimenti ubicati in prossimità delle coste, in zone dal delicato equilibrio ambientale.

Il fatto che l'iniezione d'acqua non sia utilizzata come tecnica di coltivazione per i campi a gas è una scelta dettata soltanto da valutazioni economiche; ciò non significa, però, che non sia tecnicamente

fattibile o che non possa essere impiegata per mitigare la subsidenza indotta dalla produzione. Infatti, il sostentamento della pressione di giacimento che deriva dall'iniezione nei campi a gas è del tutto identico a quello descritto in precedenza per i giacimenti di petrolio. Del tutto analogo è, quindi, anche l'effetto di ridurre/annullare la compattazione dei livelli mineralizzati e di mitigazione della subsidenza.

Da quanto sopra esposto è evidente che sia il progetto pilota di *water injection* avviato nel pozzo Angelina 1 nel marzo 2003 sia la futura estensione, con conversione di due pozzi produttori in iniettori, rappresenta un'iniziativa altamente innovativa e, di fatto, un "unicum" a scala mondiale.

### **Progetto Angelina Pressure Maintenance**

Le basi sulle quali è stato realizzato il progetto *Angelina Pressure maintenance* sono esplicitate nel Protocollo di intesa tra Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna ed Eni. Una delle problematiche citate all'interno del documento ed individuate nell'ambito dell'allora vigente Programma Regionale di Tutela Ambientale 2001/2003 denominato "Piano di azione Ambientale per un futuro sostenibile", è rappresentata dalla stabilità delle coste Emiliano-Romagnole, in quanto l'ambiente litoraneo è caratterizzato da forti elementi di fragilità a causa della presenza di fenomeni di erosione costiera, di ingressione marina e di subsidenza naturale ed antropica. In tale documento si spiega inoltre come la Regione Emilia Romagna si stesse dotando di un Piano per la gestione integrata della Costa, che prevedeva tra l'altro studi mirati al contenimento dei fenomeni di erosione e subsidenza. Le parti firmatarie del Protocollo individuavano inoltre nel gas naturale una delle risorse più importanti del territorio, il cui utilizzo deve avvenire nell'ambito di una visione complessiva di sviluppo programmato, armonizzato con la valorizzazione degli altri beni e delle altre risorse esistenti. Il documento riconosce in Eni un soggetto deputato al soddisfacimento delle esigenze energetiche del Paese, nell'ottica della conservazione e salvaguardia dell'equilibrio territoriale ed ambientale, non potendo l'utilizzo delle risorse energetiche essere disgiunto dalla tutela dell'ambiente, coerentemente alle politiche di sostenibilità ambientale previste dalla legge.

Alla luce di tutto ciò, le parti firmatarie del Protocollo si sono impegnate, tramite lo strumento dello stesso Protocollo e sotto la supervisione di un Comitato Scientifico scelto d'intesa tra Comune ed Eni, a collaborare alla realizzazione di un progetto sperimentale finalizzato a limitare i fenomeni di compattazione in livelli produttivi a gas e quindi a limitare eventuali effetti impattanti a livello di superficie.

Si è dato seguito al perseguimento degli obiettivi su esposti attraverso un progetto che ha previsto i seguenti interventi:

1. intervento sperimentale di mantenimento e ri-pressurizzazione degli acquiferi di livelli produttivi nell'area di costa tramite l'iniezione di acque nel pozzo *onshore* Angelina 1, ubicato in località Lido Adriano (Ravenna);
  2. validazione sperimentale di una tecnica innovativa e a basso impatto ambientale per la stabilizzazione di una porzione di arenile (BMS), che prevede l'utilizzo dell'acqua di mare ai fini dell'iniezione sopra descritta;
  3. valutazione dell'efficacia e dell'impatto di tali operazioni di iniezione, svolte in contemporanea alla produzione di gas, in termini di contenimento di fenomeni di erosione e subsidenza.
- Si analizzano nel seguito le modalità con cui sono stati attuati gli interventi.

### **Scelta del sito**

Già all'interno del Protocollo di Intesa veniva individuato il campo Angela-Angelina, ed in particolare il pozzo Angelina 1 (Fig. 5), come laboratorio di attuazione del progetto, in virtù delle seguenti considerazioni:

- l'ubicazione *onshore* del pozzo Angelina favorisce logisticamente qualsiasi processo di controllo si intenda attivare, con particolare attenzione all'evoluzione delle pressioni dei livelli iniettati;
- la vicinanza alla Centrale di Ravenna Mare ed alle sue strutture assicura un impatto ambientale assolutamente contenuto;
- il sito di Angelina 1 era già predisposto per un'analisi altimetrica integrata in quanto già inserito nella rete Eni di livellazione geometrica di alta precisione, dotato di un CGPS e di 2 riflettori SAR ed inoltre controllato mediante monitoraggio piezometrico-assessimetrico (Fig. 6).



Figura 5 - Ubicazione sito - foce dei Fiumi Uniti (Ravenna).

Il complesso strutturale di Angela/Angelina e Ravenna Mare Sud è situato nell'*offshore* Nord Adriatico a circa 3 km dalla costa Romagnola nella concessione denominata A.C27.EA di proprietà 100% Eni (Fig. 5).

Il pozzo Angelina 1, perforato nel 1972, è ubicato sulla terraferma sul fianco Nord-Occidentale del campo di Angela-Angelina, in prossimità della foce dei Fiumi Uniti.

La foce attuale del fiume si trova a Nord dell'abitato di Lido di Dante ed il corso del fiume devia verso Nord a circa 1,5 km dallo sbocco a mare. Sulla sponda sinistra dell'area di foce si osserva una spiaggia con caratteristiche miste di tipo fluviale e marino, dato che è influenzata sia dai processi di moto ondoso che di tipo fluviale. Il margine settentrionale di quest'ultima è adiacente ad una massicciata che protegge i terreni coltivati retrostanti e l'impianto di proprietà Eni.

Al fine di comprendere la stabilità della zona di foce a livello morfologico (Billi et al., 2007) hanno svolto una breve analisi dei voli aerei disponibili presso la banca dati della Regione Emilia-Romagna. Si sono scelti 5 voli, rispettivamente del 1943, 1982, 1996, 2002 e 2005. Un ulteriore confronto è infine stato ottenuto tramite la Carta Tecnica Regionale (1978).

Si presentano in questo lavoro solo ingrandimenti della zona di foce dai voli del 1943, 1996 e 2002 (Fig. 7).



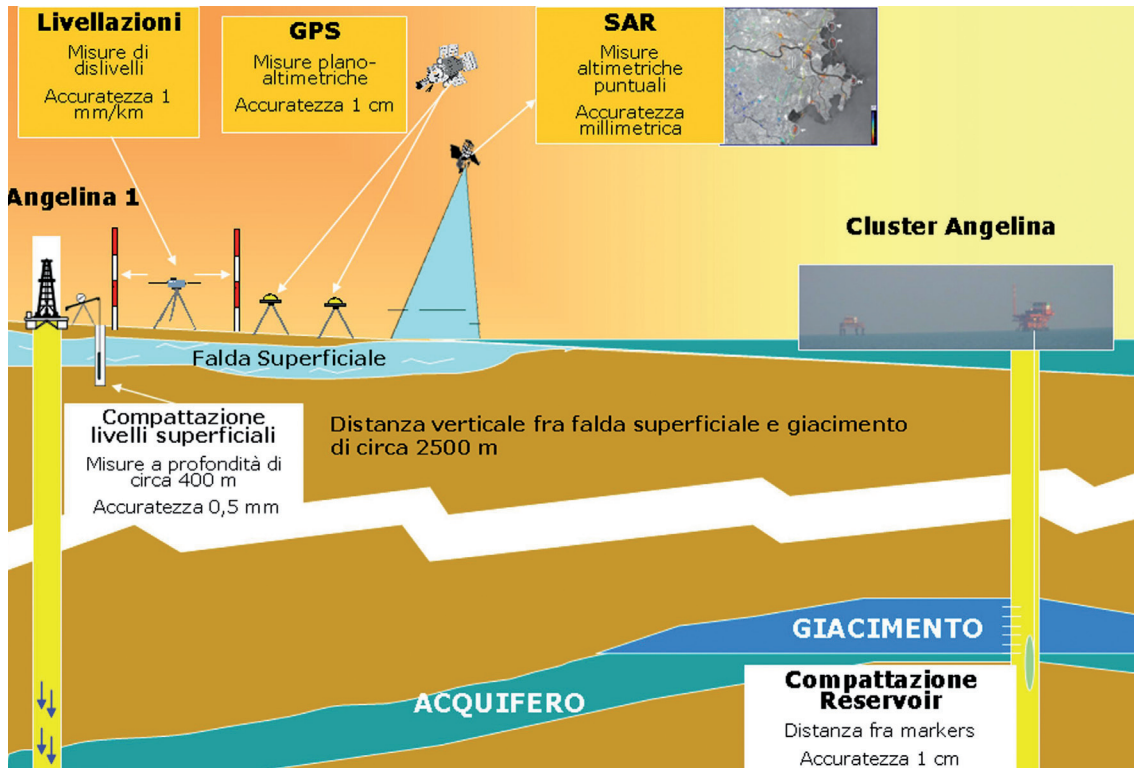


Figura 6 - Monitoraggio adottato.

Prima della fine della Seconda Guerra Mondiale l'abitato di Lido di Dante era inesistente e sulla sponda destra della foce si trovava un'ampia zona occupata da cordoni dunari e zone umide di retrobarriera.

La sponda sinistra presentava un sistema di barre e bassifondi associati ad una piccola freccia litorale che sembrava indicare un trasporto verso la bocca del fiume. Complessivamente la spiaggia era ampia, con larghezze superiori ai 100 m. Nelle immagini del volo della RAF (1943) non si vede un delta sommerso. Un elemento di spicco è il fatto che la costa, a Nord della foce, era orientata NE-SW, in contrasto con l'orientamento attuale. Tra gli anni '70 ed '80 si nota innanzi tutto un consistente impatto antropico lungo le sponde del fiume, ora occupate da insediamenti per la pesca con reti a "bilancino". Tra l'altro in seguito al cambio di orientazione della costa a Nord della foce, ora allineata NNW-SSE, la sponda settentrionale della foce continuava in parte ad essere occupata da vegetazione di tipo palustre, legata agli apporti di acqua dolce da parte del fiume, ma la spiaggia rimaneva comunque larga.

La variazione nell'orientazione della costa e queste ultime osservazioni fanno presupporre che l'apporto solido non fosse più sufficiente a garantire una condizione di equilibrio e che il delta sommerso fosse entrato in una fase erosiva. L'elemento più evidente, a cavallo degli anni '90, è la totale scomparsa della spiaggia a Nord della foce, con conseguente costruzione della massicciata in massi, presente attualmente per proteggere i terreni agricoli, e la centrale Eni ora visibile in alto a sinistra nelle immagini di Figura 7. L'ampiezza della spiaggia, oggetto a sinistra della foce, si è ridotta a poche decine di metri, mentre si nota la formazione di una piccola freccia litorale a parziale occlusione della foce fluviale. Da notare infine che un esame dei rilievi batimetrici, svolti da ARPA nel 2000, non identificano particolari morfologie a cavallo dell'isobata 2 m. Da un esame più attento di tali rilievi si nota però che la densità delle linee batimetriche non era forse sufficiente a risolvere le morfologie sommerse.

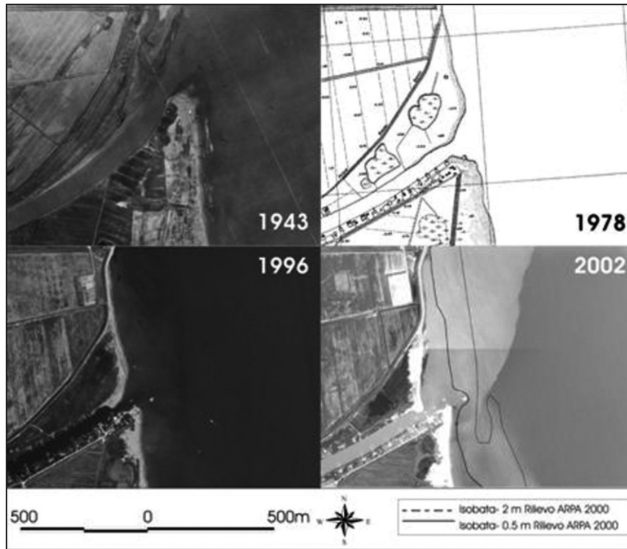


Figura 7 - Evoluzione storica della zona di foce tra il 1943 ed il 2002. Il volo 1996 (AIMA) e 2002 (AGEA) sono di proprietà della CGR Parma, su cessione del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (da Billi et al., 2007).

### Il pozzo Angelina 1

Il pozzo Angelina 1 era mineralizzato a gas nel livello PL-F e al top del livello PL1-K. Il pozzo, completato nel solo PL-F, ha prodotto dal Settembre 1973 al Settembre 1999 ed è stato chiuso per elevata produzione di liquidi di strato (Fig. 8). La produzione cumulativa a tutto il 1999 è stata di 580 MSm<sup>3</sup> (Milioni di metri cubi Standard).

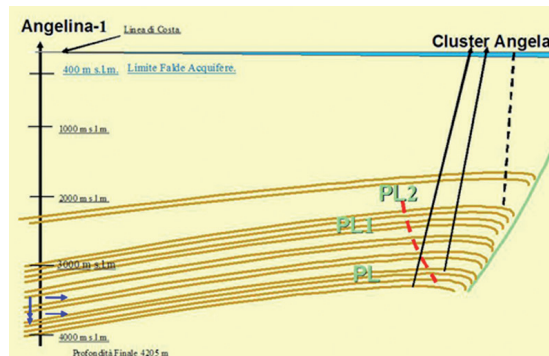


Figura 8 - Profondità dei livelli di produzione.

A partire dal Febbraio 2002 il pozzo Angelina 1 è stato oggetto di interventi, il cui obiettivo era la conversione, mediante approfondimento, del pozzo Angelina 1 da produttore a iniettore. Il progetto iniziale prevedeva lo scompletamento con chiusura mineraria del pozzo Angelina 1 e successivamente l'attraversamento e il completamento dai livelli oggetto di iniezione con un nuovo foro in side track. A scompletamento avvenuto, previo accertamento dello stato del *casing* e della cementazione, è stata appurata la possibilità di utilizzare il foro precedente. Il pozzo è stato quindi approfondito verticalmente, raggiungendo la profondità di 4205 m.

A valle dell'intervento, il pozzo era pronto per l'avvio del processo di iniezione, in cui possono essere distinte due fasi di attività:

- prima fase (*early injection*): iniezione acqua di strato prodotta dal campo, realizzazione test di iniezione e monitoraggio pressioni (realizzata da Marzo 2003).
- seconda fase (a regime): iniezione acqua di mare (start up avvenuto a Gennaio 2006) nei livelli completati in Ang1ApprA e non soggetti a reiniezione di acqua di strato, che comunque continua in contemporanea sui livelli dedicati.

### ***Fase di early injection (acqua di strato)***

In questa fase è avvenuta la sola iniezione di acque di strato, provenienti dal campo *offshore* di Angela-Angelina. Lo schema semplificato del flusso delle acque iniettate è illustrato nella Figura 9.

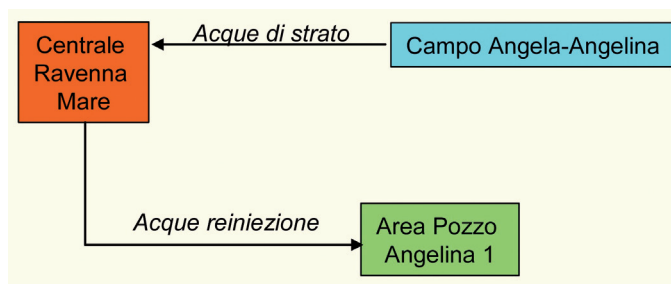
L'acqua di strato proveniente dall'*offshore* viene convogliata nella centrale gas di Ravenna Mare, dove subisce un processo di filtrazione a due stadi, finalizzato alla rimozione dei solidi sospesi trascinati dal fluido, e dove viene additivata con i prodotti chimici necessari all'ottimizzazione del processo di iniezione. Tramite apposita condotta viene poi inviata in area pozzo Angelina 1 alla pressione idonea all'immissione in giacimento.

Il processo di iniezione delle acque di strato in unità geologica profonda è stato autorizzato dalla Provincia di Ravenna, Settore Ambiente e Suolo, a valle di una Conferenza di Servizi nella quale si sono ottenuti i pareri favorevoli del Comune di Ravenna, della sezione provinciale dell'Arpa di Ravenna, dell'Azienda USL e della Regione Emilia Romagna - Servizio Tecnico di bacino Fiumi Romagnoli.

Il provvedimento ha tenuto inoltre conto del fatto che le acque di strato provenienti dal campo di Angela-Angelina appartengono agli stessi corpi geologici del pozzo destinato all'iniezione e che i corpi geologici recettori sono arealmente e verticalmente isolati tra loro e isolati dalle falde acquifere superficiali.

Il provvedimento ha contestualmente autorizzato l'additivazione delle acque di strato con prodotti biocidi ed inibitori di corrosione secondo concentrazioni definite e fisse, ritenuta necessaria al fine di garantire l'efficacia del processo di iniezione ed il mantenimento dell'efficienza dei relativi impianti. Nel documento si elencavano una serie di prescrizioni relative a:

1. condizioni di iniezione, dettate soprattutto dalla necessità di monitorare le quantità di acqua di strato immesse nella formazione; l'autorizzazione rilasciata imponeva infatti un quantitativo massimo giornaliero iniettabile di 150 m<sup>3</sup>/g ed un quantitativo annuo massimo di 55000 m<sup>3</sup>;
2. caratteristiche chimico fisiche, vista la necessità di monitorare sia la composizione delle acque iniettate che la loro compatibilità con le acque della formazione ricevente;
3. andamento delle pressioni dei livelli interessati all'iniezione, dovute alla necessità di verificare se il processo di iniezione è in grado di dar luogo a fenomeni di ripressurizzazione del giacimento.



**Figura 9 - Schema semplificato del flusso delle acque iniettate nella fase di *early injection*.**

Per quanto riguarda il primo punto, in Figura 10 vengono mostrati i parametri più significativi dell'iniezione:

- portata giornaliera;
- quantità cumulativa di acqua iniettata nel periodo considerato;
- pressione di iniezione.

Nel periodo Marzo 2003 - Agosto 2006 è stata iniettata una quantità cumulativa di acqua di strato di oltre 183.294 m<sup>3</sup>. I bassi valori di pressione di iniezione che si evidenziano a partire dagli ultimi mesi del 2006 (Fig. 10) sono conseguenti ad un lavaggio del pozzo che ha ripristinato efficacemente la permeabilità della roccia.

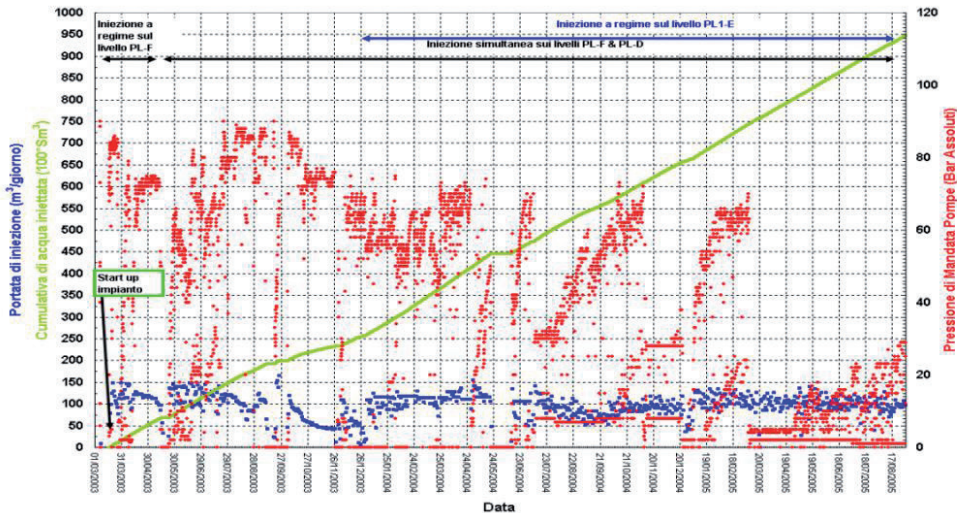


Figura 10 - Andamento dei parametri di iniezione di acqua di strato da start-up ad Agosto 2008.

Come prescritto in sede di autorizzazione all'iniezione, è stato previsto un programma di test di iniettività a cadenza regolare sul pozzo Angelina 1. Le prove di iniezione hanno confermato volta per volta l'indice di iniettività.

Contestualmente all'esecuzione di tali *test*, sono state effettuate misure di pressione statica di pozzo sui livelli interessati dall'iniezione delle acque di strato (livelli PL-F + D). Questa prova è mirata a valutare la capacità del processo di iniezione di favorire la ripressurizzazione, almeno nell'intorno della zona di iniezione.

La prima prova è stata realizzata il 30 Novembre 2003 ed ha fornito un dato di pressione statica di fondo pozzo pari a 228.66 bar. La seconda prova risale al 7 Luglio 2004, e ha dato un valore di pressione di 244.86 bar. La terza prova è stata effettuata il 26 Ottobre del 2006 e ha dato un valore di pressione statica di fondo di 249.7 bar. Tutti i valori sono riferiti al *datum* a 3839 m di profondità. L'analisi dei dati mostra come si sia avuto nell'arco di tempo considerato un aumento di circa 25 bar, dovuto all'attività di iniezione.

In conclusione, la fase di *early injection* ha dato risultati apprezzabili in termini di ripressurizzazione del giacimento, nelle immediate vicinanze del pozzo di iniezione. Per avere effetti apprezzabili anche sull'*offshore* oltre che nell'intorno del pozzo si conta sugli effetti di aumento della portata iniettata.

### **Fase di iniezione a regime**

Nel Gennaio 2006 si è iniziato ad iniettare acqua di mare tramite la *string* lunga del pozzo Angelina 1, aperta nei livelli PL1-E, PL1-K, PL1-Z e PL-K1, mentre l'iniezione di acqua di strato è proseguita nella *string* corta, aperta nei soli livelli PL-F+D (Tab. 2).

Si descrivono nel seguito gli interventi eseguiti per attuare questa fase di progetto. La portata di acqua di mare destinata alla reiniezione è stata fornita da un sistema innovativo denominato BMS (Beach Management System), ideato negli anni '80 dal Danish Geotechnical Institute, che, oltre a fungere da sistema di approvvigionamento dell'acqua mare, rappresenta un nuovo approccio per il controllo dell'erosione costiera e la salvaguardia delle spiagge. La sua struttura è molto semplice (Fig. 11) ed è costituita da un dreno posto parallelamente alla linea di riva al di sotto della linea di falda. La distanza dalla linea di riva e la profondità alla quale il dreno viene posto sono tra i motivi principali che decretano una maggiore o minore efficacia del sistema. Il dreno, attraverso un tubo di raccordo, convoglia l'acqua raccolta ad un pozzetto.

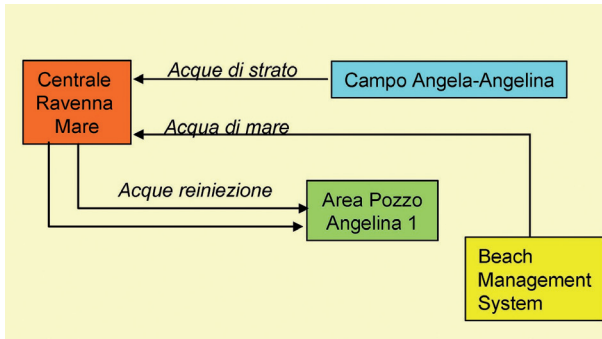


Figura 11 - Schema semplificato del flusso delle acque iniettate nella fase di regime.

Il processo, fino al pozzetto, avviene per gravità mentre da questo l'acqua viene espulsa per mezzo di una pompa. L'abbassamento della quota di saturazione provocato dalla presenza del dreno provoca l'aumento della capacità di infiltrazione della spiaggia, con il risultato di una sostanziale riduzione del flusso di ritorno e quindi della capacità erosiva con un conseguente accrescimento della spiaggia a cavallo della linea di riva. Infatti una capacità di filtrazione maggiore significa un minor trascinarsi di materiale solido (sabbia) da parte dell'onda di ritorno (*back-rush*).

Al fine di un corretto dimensionamento del sistema, si è proceduto nel Febbraio 2003 all'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche e raccolta dati riguardanti il sito che, per la sua prossimità all'area di iniezione, era stato individuato, come il più idoneo alla realizzazione della sperimentazione, ovvero il tratto di arenile prospiciente il lato Nord della foce dei Fiumi Uniti, in località Lido Adriano (Ravenna).

Sulla base degli studi fatti, l'intero sistema di drenaggio è stato dimensionato per una portata di 400 m<sup>3</sup>/g. Il sistema BMS realizzato nel corso del 2004 sul tratto di litorale in esame è costituito da:

- due condotte di drenaggio, funzionanti in parallelo, di ca. 100 m ciascuna, ricoperte di materiale filtrante, collocate a profondità definita nella fascia di battigia longitudinalmente alla linea di costa;
  - tubi di convogliamento delle acque drenate verso la stazione di pompaggio;
  - una stazione di pompaggio per il deflusso dell'acqua drenata costituita da due pozzetti collettori;
  - una condotta di deflusso dell'acqua drenata, che verrà convogliata verso l'impianto di trattamento pre-iniezione situato all'interno della centrale Eni di Ravenna Mare;
  - una condotta di scarico a mare, utilizzata per riciclare a mare l'acqua captata sia in caso di eccesso (riciclo parziale), sia nel caso in cui l'impianto di iniezione a valle abbia problemi (riciclo totale).
- Considerato che le acque reflue del sistema sono costituite da acqua marina filtrata, non si hanno problemi di inquinamento, e per le attività di riciclo a mare è stata ottenuta una presa d'atto da parte della Provincia di Ravenna.

In una prima fase il BMS ha operato in ricircolo totale, attraverso un sistema di valvole ubicato in area pozzo Angelina 1. Nel frattempo sono stati realizzati gli impianti necessari per il processo di iniezione, in particolare:

1. Posa di una condotta in fiberglass interrata da 6" che collega il BMS alla centrale di Ravenna Mare e posa di due condotte interrate da 3" che collegano la centrale al pozzo iniettore Angelina 1.
2. Installazione dell'impianto di trattamento dell'acqua di mare nella centrale di Ravenna Mare.

L'acqua di mare in arrivo dalla condotta da 6" proveniente dal sistema BMS viene accumulata in due serbatoi della capacità di 15 m<sup>3</sup> ciascuno, operanti singolarmente o in parallelo. Da lì due pompe, anch'esse funzionanti singolarmente o in parallelo, inviano l'acqua ad una prima batteria di filtri a cartuccia con grado di filtrazione da 10 micron; dopo la prima filtrazione, l'acqua viene inviata alle pompe di iniezione, che la spingono ad uno secondo stadio di filtrazione costituito da filtri a cartuccia con grado di filtrazione da 3 micron. In uscita viene misurata e registrata la portata, poi una condotta in fiberglass interrata da 3" convoglia l'acqua al pozzo Angelina 1 (Fig. 12).

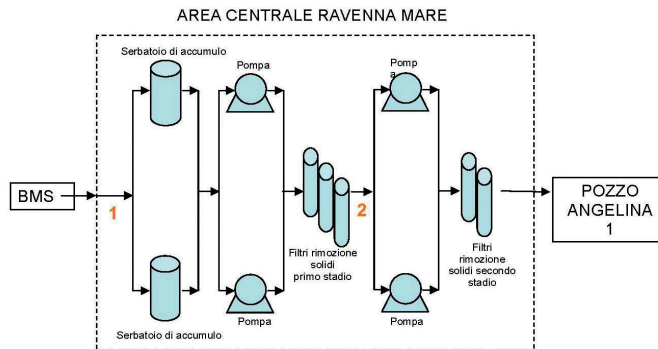


Figura 12 - Schema semplificato dell'impianto di trattamento dell'acqua di mare a monte dell'iniezione.

Il processo di iniezione di acqua mare e le modalità della gestione dello stesso sono stati sottoposti ad un iter autorizzativo che ha comportato, a valle del via libera del Gruppo di Lavoro, l'invio di opportuna istanza alla Provincia di Ravenna, che ha rilasciato apposito nulla osta riguardante il processo di iniezione in Angelina 1 nella sua globalità (acqua di mare e acqua di strato).

Il nulla osta ha fissato in un massimo di 300 m<sup>3</sup>/g la quantità totale di fluido iniettato (somma di acqua di strato più acqua di mare), per un totale massimo annuo di 110000 m<sup>3</sup>, in cui la frazione massima di acqua di strato non deve superare i 66000 m<sup>3</sup> annui e l'acqua di mare i 44.000 m<sup>3</sup> annui.

Contestualmente l'atto prevede di monitorare giornalmente le portate e le pressioni di acqua di mare, analogamente a quanto già stabilito per le acque di strato.

Dal momento che il sistema BMS, in termini di portata di acqua captata, è soggetto all'andamento delle condizioni meteo-marine, si è reso necessario provvedere ad un sistema che ricircolasse a mare l'eventuale eccesso di acqua captata.

La Provincia di Ravenna, esaminata la documentazione relativa alle modalità di sfioro a mare, ha concesso relativo nulla osta. Le disposizioni del provvedimento prevedono che le acque restituite debbano avere caratteristiche tali da non compromettere gli usi previsti per il corpo idrico superficiale recettore (acque marine costiere) nonché le esigenze di tutela dell'ecosistema marino, e che siano adottati tutti gli accorgimenti possibili per evitare che le acque siano contaminate da altri scarichi o per fenomeni di autoinquinamento, dal momento del prelievo a quello della restituzione.

L'iniezione di acqua di mare ha avuto inizio a Gennaio 2006 e prosegue tuttora (Fig. 13).

Analogamente a quanto mostrato per le acque di strato, anche per l'acqua di mare viene mostrato un diagramma con i principali dati di iniezione a tutto agosto 2008. In particolare la quantità cumulativa iniettata al 31/08/08 ammonta a 48.622 m<sup>3</sup>.

### Progetto Angela-Angelina Water Injection

La fase di progetto sperimentale ha dimostrato che il processo di iniezione permette di incrementare la pressione statica esistente all'interno del pozzo di iniezione, condizione basilare per contrastare i fenomeni di subsidenza. Tale risultato, verificato e validato dal Comitato Scientifico facente parte integrante del Gruppo di Lavoro di Progetto e costituito da Università di Ferrara, Università di Urbino, Seconda Università di Napoli, è stato alla base del rinnovo del Protocollo di intesa, siglato in data 27 Aprile 2006, tra Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna ed Eni.

Con tale atto gli enti firmatari hanno sancito la volontà di raggiungere obiettivi di iniezione più ambiziosi, mirati al conseguimento di una ripressurizzazione ancor più significativa ed estesa su più ampia scala.

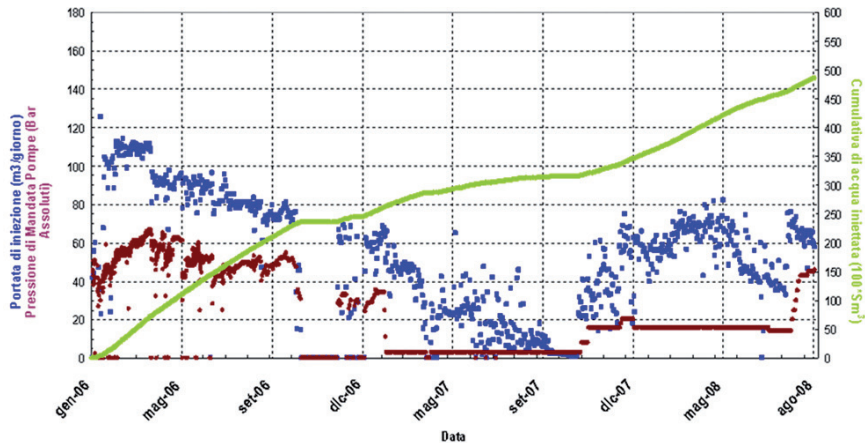


Figura 13 - Andamento dei principali parametri di iniezione acqua di mare, nel periodo da start-up ad Agosto 2008.

Il parametro su cui si agirà è rappresentato dalla portata di acqua di mare reiniettata: il progetto “Angela-Angelina water injection” prevede di arrivare, a regime, ad iniettare 2500 m<sup>3</sup>/g di acqua di mare. Il valore è stato stabilito all’interno dell’attività del Gruppo di Lavoro, a valle dell’esame di modellizzazioni di giacimento che hanno indicato come i pozzi recettori ed in generale la formazione rocciosa presentino caratteristiche tali da assicurare la necessaria iniettività. Inoltre la scelta di pozzi di iniezione localizzati nelle immediate vicinanze della costa permetterà di avere, in caso di esito positivo del progetto, un riscontro facilmente verificabile su quanto il processo di iniezione è in grado di controbilanciare i fenomeni di erosione costiera dovuti ad effetti di subsidenza.

Lo sviluppo progettuale selezionato prevede:

- intervento di conversione dei pozzi da produttori a iniettori di acqua;
- installazione di un sistema di captazione acqua mare denominato R.S.A. (Recupero e Stabilizzazione degli Arenili), basato sullo stesso principio del già descritto BMS; contestualmente agli obiettivi sopra descritti, l’utilizzo di questa modalità di captazione permetterà, auspicabilmente, di stabilizzare il tratto di arenile su cui il sistema R.S.A. verrà installato. Il sito prescelto dovrà quindi essere caratterizzato da un fenomeno erosivo;
- installazione di un sistema di filtrazione acqua di mare;
- installazione di un sistema di additivazione e pompaggio;
- installazione dell’impianto di iniezione in piattaforma;
- posa delle condotte a mare destinate al trasporto dell’acqua di mare dal sito di trattamento al sito finale di iniezione.

L’attività prevede la conversione da produttori di gas ad iniettori dei pozzi ANGELA 2 DIR (che verrà convertito nel pozzo INJ 1) e ANGELA 4 DIR (che verrà convertito nel pozzo INJ 2). Essi sono due dei quattro pozzi esistenti sul cluster Angela (Fig. 5).

Il livello meno profondo si trova a 3065 m di profondità dal piano del fondale; il livello più profondo ed il suo estremo inferiore si trova a 3970 m dal piano del fondale. Dagli studi propedeutici eseguiti risulta la fattibilità tecnica degli interventi.

In particolare, per quanto riguarda Angela 2 Dir, le inflangiatore di testa pozzo non sono ritenute idonee ai fini di un loro reimpiego per le fasi di perforazione. Pertanto è necessario procedere alla chiusura mineraria e alla sostituzione di tutta l’inflangiatura. Anche per Angela 4 Dir si dovrà procedere alla sostituzione della testa pozzo, ed al ricompletamento del pozzo.

Per l’approvvigionamento dell’acqua di mare destinata alla reiniezione, visti i risultati ottenuti nella fase sperimentale, è stato concordato, su decisione del Gruppo di Lavoro, di utilizzare il sistema R.S.A. (Recupero e Stabilizzazione Arenili), basato sul medesimo principio del già descritto BMS

Nei mesi di Giugno/Luglio 2006 sono stati eseguiti dei sondaggi preliminari a profondità di 3 m nei seguenti siti, al fine di ricostruire la successione stratigrafica:

- Lido Dante (settore a Sud della foce dei Fiumi Uniti);
- Lido Adriano (settore a Nord della foce dei Fiumi Uniti);
- Lido di Classe (settore a Nord dell'abitato di Lido di Classe).

In base ai risultati delle analisi dei campioni prelevati, è emerso quanto segue:

1. per il sito Lido Adriano non è possibile potenziare il sistema di captazione esistente, dal momento che sia le dimensioni dell'arenile che le caratteristiche del terreno non permettono di arrivare alla captazione del quantitativo di acqua necessario;
2. sia il sito di Lido di Dante che quello di Lido di Classe presentano invece una stratigrafia idonea all'installazione del sistema.

La spiaggia del lido di Dante, in particolare, è caratterizzata da sabbie medie e fini che garantiscono una piena efficacia del sistema di drenaggio, mentre il Lido di Classe, pur presentando sedimenti nel complesso idonei, induce a molte perplessità a causa della sua lontananza dal campo Angela-Angelina e per la sua appartenenza ad un'area di riserva naturalistica.

Sul sito nell'Aprile 2007 è stata effettuata una dettagliata ricostruzione della stratigrafia e della litologia dei sedimenti incontrati a diversa profondità in tutta l'area interessata all'installazione dei componenti del sistema, attraverso l'analisi diretta delle stratigrafie dei sondaggi, prelievo di campioni e analisi in situ.

Sono stati riscontrati valori di permeabilità superficiale  $K$  da  $1.01 \times 10^{-4}$  a  $6.69 \times 10^{-5}$  m/sec, che sono abbastanza tipici delle sabbie fini, mentre i campioni prelevati ed analizzati in laboratorio hanno mostrato valori di  $K = 3.5 \times 10^{-5}$  m/sec per il primo metro di sabbie e di  $K = 2.5 \times 10^{-5}$  m/sec per le sabbie più profonde (secondo metro).

Il tratto di arenile in cui opererà il sistema RSA sarà interessato da un'attività di monitoraggio, svolta dal Consorzio Ferrara Ricerche, attraverso l'installazione di una serie di piezometri posti lungo il percorso delle tubazioni drenanti, che forniranno informazioni sull'andamento del processo di stabilizzazione ed eventuale recupero di spiaggia indotto dal sistema.

La presenza di una serie temporale di rilievi in condizioni "indisturbate" permetterà un'effettiva valutazione delle capacità del sistema di drenaggio.

### ***Sistema di filtrazione acqua mare***

L'acqua di mare captata dal sistema RSA, giunta in area pozzo Angelina 1, verrà inviata in ingresso alla unità di filtrazione. Sono stati previsti due stadi: il primo, basato su filtri cosiddetti "autopulenti", consentirà la rimozione del particolato solido contenuto nell'acqua di mare avente dimensione maggiore o uguale a 50 micron. Seguirà un secondo stadio, in cui è previsto l'utilizzo di filtri multi-media, che consentirà una rimozione spinta fino a 5 micron. I filtri saranno rivestiti internamente di materiale non aggredibile dall'acqua di mare, così da evitare fenomeni di corrosione. Saranno inoltre dotati di un sistema di automazione e controllo che opererà le fasi di controlavaggio in base al livello di intasamento dei filtri stessi. Verranno predisposte inoltre a monte e a valle della filtrazione prese campione, per il controllo dell'efficienza del sistema. Tutti i parametri di processo significativi verranno inviati alla centrale di Ravenna Mare per permettere il monitoraggio del sistema da parte del personale Eni. La filtrazione e la sua efficienza sono di fondamentale importanza per assicurare che il processo di iniezione in pozzo possa aver luogo in modo efficace e continuativo; la rimozione delle particelle in sospensione evita infatti che i pori della roccia costituente il *reservoir* di iniezione si ostruiscano e la permeabilità dei pozzi diminuisca drasticamente.

Come nel caso del sistema BMS sperimentale, anche per il sistema di captazione attuale valgono le stesse considerazioni, per cui, essendo la portata di acqua captata dipendente dalle condizioni meteorologiche, è stato previsto di stendere in area pozzo Angelina 1 una condotta che ricircolerà a mare l'eccesso di acqua captata.



Una volta filtrata, l'acqua verrà inviata, tramite una condotta in vetroresina DN 6" esistente, alla vicina centrale di Ravenna Mare, che dista circa 1500 m dall'area pozzo Angelina 1.

Giunta in centrale entrerà in un serbatoio atmosferico in vetroresina, che verrà mantenuto sempre in riempimento per evitare che condizioni eccezionalmente sfavorevoli alla captazione, che nemmeno la condotta in vetroresina interrata sotto il piano spiaggia sia in grado di compensare, causando l'interruzione del processo di iniezione. A valle del serbatoio l'acqua sarà inviata ad un miscelatore statico dal quale l'acqua viene inviata a due stadi di pompaggio in serie: il primo porta la pressione dell'acqua da valore atmosferico a 5 bar, il secondo consente di arrivare a 80 bar, valore a cui l'acqua viene introdotta nel sealine da 10" che la porta sulla piattaforma Angela-Angelina.

Per ciascuno dei due stadi di pompaggio sono previste 3 pompe, operanti in parallelo, ciascuna avente capacità pari al 33% della portata da iniettare (105 m<sup>3</sup>/h).

Dopo la filtrazione, l'acqua entra nell'unità di pompaggio, che consentirà di portare il valore della pressione a 200 bar, che rappresenta la pressione di iniezione. Ciascuna delle 3 pompe avrà una capacità pari al 30% della portata totale di iniezione (pari a 105 m<sup>3</sup>/h). Questo per consentire di massimizzare la flessibilità delle operazioni di iniezione. L'acqua, ormai nelle condizioni idonee all'immissione in unità geologica profonda, viene inviata tramite un sealine da 6" al cluster Angela, struttura *offshore* ubicata a circa 400 m dalla piattaforma Angela-Angelina, dove ha luogo il processo di iniezione attraverso i pozzi. Per il trasporto dell'acqua mare dalla piattaforma Angela-Angelina al cluster Angela, verranno posate due linee, diametro 6". Saranno del tutto analoghe, anche se una verrà utilizzata preferenzialmente per le eventuali operazioni di acidificazione che si dovessero rendere necessarie sui pozzi iniettori, mentre la seconda verrà utilizzata per il trasporto del fluido iniettato.

## Conclusioni

Questa memoria illustra gli obiettivi e i primi risultati sperimentali ottenuti nell'ambito di un progetto sperimentale di ricerca per il controllo della subsidenza costiera. Il progetto rappresenta un caso "unico" al mondo di stabilizzazione dei cedimenti innescati dalla subsidenza costiera di origine antropica. L'iniezione di acque nel pozzo a terra Angelina 1 consente di controllare e mantenere la pressione degli acquiferi di livelli produttivi del giacimento di gas ubicato a largo di Lido di Dante (Ravenna). L'iniziativa intrapresa attraverso il protocollo di Intesa tra Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A. sta consentendo lo sfruttamento dei giacimenti di gas naturale, una delle risorse di maggiore rilevanza del territorio Ravennate, minimizzando gli effetti di subsidenza innescati dalla estrazione attraverso l'utilizzazione delle migliori tecnologie disponibili e di scelte gestionali ispirate a modelli di sviluppo sostenibile.

I risultati confortanti ottenuti dal Progetto "Angela-Angelina pressure maintenance" (incremento delle pressioni di 25 bar causati dall'attività di iniezione d'acqua) hanno consentito di rinnovare il Protocollo di Intesa, con l'intento di incrementare le portate d'acqua da iniettare nei pozzi localizzati nel campo di Angela-Angelina, a largo di Lido Adriano (Ravenna). Il progetto "Angela-Angelina water injection", attualmente in corso, prevede un incremento della portata iniettata fino a 2500 m<sup>3</sup>/giorno e prevede l'utilizzo dell'acqua di mare filtrata da un sistema di drenaggio della spiaggia (RSA) che verrà installato sull'arenile compreso tra la foce dei Fiumi Uniti e il Lido di Dante (Ravenna).

## Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano tutti i componenti del gruppo di lavoro costituitosi con il Protocollo di Intesa tra Comune di Ravenna, Provincia di Ravenna, Regione Emilia Romagna ed Eni S.p.A. In particolare si ringraziano: il prof. Paolo Colantoni (Università di Urbino - Eni E&P); Dott. Giuseppe Bortone, Dott. Raffaele Pignone e Dott.ssa Luisa Perini (Regione Emilia-Romagna); Dott. Stenio Naldi (Provincia di Ravenna); Dott.ssa Angela Vistoli (Comune di Ravenna); Ing. Enrico Tavolini, Dott. Walter Rizzi, Ing. Luigi Terzi (Eni E&P).

**Bibliografia**

- AA. VV. (2005) - *Multi-disciplinary assessment of subsidence phenomena in the Ravenna area*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- AA. VV. (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. In "Studi Costieri", vol. 10, Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero.
- Barends B.J., Steedman R., De Groot M.B., Knoeff H.G. e Bijker R. (2005b) - *Environmental effects of land subsidence induced by gas withdrawal along the Ravenna coast - Part II : environmental impact*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Barends B.J., Steedman R., Schroot B.M. (2005a) - *Environmental effects of land subsidence induced by gas withdrawal along the Ravenna coast - Part I : available information*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Billi P., Ciavola P., Boettger C., Salemi E. e Preciso E. (2007) - *Trasporto solido dei Fiumi Uniti e dinamica della zona di foce*. In: Terzo Forum Internazionale "Pianificazione e Tutela del Territorio costiero, questioni, metodi, esperienze a confronto", Vol. 127: 333-361. Maggioli Editore. ISBN: 978-88-387-3482-8.
- Ciavola P., Vicinanza D., Fontana E. (2008) - *Beach drainage as a form of shoreline stabilization: case studies in Italy*. 31<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany (in stampa).
- Gambolati G. e Teatini P. (1998) - *Numerical analysis of land subsidence due to natural compactation of the Upper Adriatic Sea Basin, in CENAS*. G. Gambolati ed., Kluwer Ac. Pub., pp. 103-132.
- Houtenbos A.P.E.M., Hounjet M.W.A. e Barends B.J. (2005) - *Subsidence from geodetic measurements in the Ravenna area*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Polo P. (2002) - *Studio specialistico al fine di valutare l'inondabilità del territorio ravennate*. Rapporto dal Contratto tra MEDingegneria e comune di Ravenna.
- Salvioni G. (1957) - *I movimenti del suolo nell' Italia cento-settentrionale*. Boll. Geodesia e Scienze Affini, XVI, 3.
- Schroot B.M., Fokker P.A., Lutger J.E., Van der Meer B.G.H., Orlic B. e Scheffers B.C. (2005) - *Land subsidence induced by gas production: an integrated approach*. Land Subsidence Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Simp. on Land Subsidence, Shanghai, Cina, Ottobre 2005.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W. e Gonella M. (2005) - *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol. 47: 831-846.

**Manoscritto ricevuto il 5/10/2008, accettato il 5/11/2008.**