



Corso di laurea in Economia e Management

Cattedra di Economia Industriale

## Terre Rare e Autonomia Strategica Europea: Il Caso Norvegese di Fen

---

Prof. Ernesto Cassetta

RELATORE

---

Francesco Carmelo Irrera, 282571

CANDIDATO

Anno Accademico 2024/2025

# Indice

<b>Introduzione .....</b>	4
<b>CAPITOLO 1 - IL MERCATO GLOBALE DELLE TERRE RARE .....</b>	6
1.1 Cosa sono le terre rare .....	6
1.1.1 Classificazione delle terre rare .....	6
1.1.2 La <i>supply-chain</i> delle terre rare.....	8
1.2 Applicazioni e principali settori strategici .....	10
1.2.1 Settore della difesa .....	10
1.2.2 Industria del vetro e tecnologie di visualizzazione.....	10
1.2.3 Batterie ricaricabili e dispositivi elettronici .....	10
1.2.4 Magneti permanenti e motori elettrici .....	11
1.2.5 Applicazioni in medicina .....	11
1.2.6 Impatti economici e geopolitici.....	12
1.3 Letteratura economica .....	12
1.4 Mercato globale: i principali produttori .....	14
1.4.1 Evoluzione storica del mercato .....	14
1.4.2 Crescita del mercato cinese.....	14
1.4.3 Produzione illegale cinese.....	15
1.4.4 Statalizzazione dell'industria .....	15
1.4.5 Mercato globale ed evidenza empirica del dominio cinese .....	16
1.5 Risposta al dominio cinese .....	19
1.5.1 La situazione e le strategie dell'UE.....	19
<b>CAPITOLO 2 - IL RUOLO DELLA NORVEGIA NEL MERCATO DELLE TERRE RARE .....</b>	22
2.1 Risorse minerarie norvegesi: potenziale e limiti .....	22
2.1.1 Il potenziale minerario della Norvegia .....	22
2.1.2 Le sfide geologiche nell'estrazione di terre rare .....	23
2.1.3 Politiche ambientali e sostenibilità dell'industria mineraria.....	24
2.1.4 Il potenziale dell'estrazione mineraria sottomarina .....	24
2.1.5 L'integrazione della Norvegia nella filiera europea delle terre rare.....	25
2.2 Scoperta del giacimento di Fen nella contea meridionale di Telemark .....	26

2.2.1 Il contesto geologico e la riscoperta del sito .....	26
2.2.2 Dimensioni, composizione mineralogica e rilevanza strategica del giacimento .....	27
2.2.3 Rilevanza strategica nella competizione globale sulle terre rare .....	28
2.2.4 Struttura industriale e attori coinvolti.....	29
2.2.5 Sfide sistemiche e prospettive industriali .....	29
<b>CAPITOLO 3 – ANALISI ECONOMICO-QUANTITATIVA DEL GIACIMENTO DI FEN E IMPLICAZIONI PER L’INDUSTRIA EUROPEA DELLE TERRE RARE.</b> .....	<b>32</b>
3.1 Quantificazione delle risorse e vita utile del giacimento.....	32
3.1.1 Stima del volume estraibile di ossidi di terre rare .....	32
3.1.2 Composizione del giacimento: focus sulle terre rare magnetiche .....	33
3.1.3 Stima della vita utile operativa: scenari produttivi e <i>benchmark</i> globali .....	34
3.2 Proiezioni economiche: ricavi, investimenti e <i>break even</i> .....	35
3.2.1 Simulazione dei ricavi annui in diversi scenari di prezzo e <i>output</i> .....	35
3.2.2 Analisi del ROI.....	39
3.3 Impatto sistematico del giacimento di Fen sul mercato e sulla strategia europea ...	41
3.3.1 Riduzione della concentrazione globale e impatto sull’HHI .....	41
3.3.2 Contributo strategico del giacimento di Fen alla domanda europea .....	43
3.4 Integrazione dei criteri ESG e sostenibilità del progetto .....	44
<b>Conclusione .....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografia e sitografia .....</b>	<b>48</b>

# Introduzione

Negli ultimi anni, il crescente *focus* sulla transizione energetica e digitale ha condotto a nuove sfide strategiche per le economie occidentali, rendendo l'accesso alle materie prime critiche una priorità sia politica che economica. Tra queste, le terre rare rivestono un ruolo cruciale. Questi elementi, pur essendo abbondanti nella crosta terrestre, presentano proprietà chimico-fisiche particolari che, unite alla complessità dei processi di estrazione e raffinazione, li rendono risorse strategiche difficili da sostituire. Questo ne accresce la rilevanza anche sotto il profilo della sostenibilità, poiché, l'estrazione e la lavorazione delle terre rare, comportano impatti ambientali e sociali significativi, che richiedono una gestione attenta attraverso politiche industriali e normative adeguate.

Il mercato globale delle terre rare è oggi altamente concentrato. La Cina detiene il controllo su gran parte della filiera, in un contesto caratterizzato da tensioni commerciali e rivalità geo-economiche. Questa concentrazione solleva questioni non solo sull'autonomia strategica di tutti i paesi importatori, ma anche sul grado di vulnerabilità dell'Unione Europea e sulle capacità della stessa di dotarsi di un'industria delle terre rare autonoma.

All'interno del suddetto contesto si inserisce l'oggetto di studio: il giacimento norvegese di Fen. Questo si è trovato recentemente al centro dell'attenzione per le sue dimensioni e per il suo potenziale in termini di ossidi di terre rare. Sebbene la Norvegia non appartenga all'Unione Europea, essa è parte dello Spazio Economico Europeo, risultando così fortemente integrata all'interno del mercato unico europeo. Il presente lavoro ha l'obiettivo di valutare se, e in che misura, un'iniziativa come quella di Fen, possa contribuire a ridisegnare gli equilibri del mercato globale delle terre rare, ridurre la dipendenza dalla Cina e rafforzare una filiera europea resiliente, autonoma e sostenibile.

Il lavoro prende in esame le terre rare da una prospettiva tecnico-industriale, geopolitica ed economica. Si apre con un'analisi delle proprietà chimiche e delle applicazioni industriali di questi elementi, approfondendo la struttura del mercato globale e il ruolo dominante della Cina sull'intera *supply-chain*. Vengono esaminate le implicazioni di

questa concentrazione e le strategie adottate dall'UE per ridurre la dipendenza e garantire una maggiore autonomia.

Successivamente, l'attenzione si sposta sul caso norvegese, con un focus sul potenziale geologico, il contesto normativo e ambientale, e le politiche istituzionali in atto. Il giacimento di Fen viene analizzato per il suo valore strategico nel quadro del mercato unico europeo, anche in relazione a iniziative come l'*European Raw Materials Alliance* e il *Critical Raw Materials Act*.

Infine, viene proposta un'analisi economico-quantitativa del giacimento di Fen. Le stime sulle risorse estraibili e sulla presenza di terre rare magnetiche, la vita utile del giacimento e le simulazioni relative ai ricavi e al ritorno sull'investimento, consentono di valutare la sostenibilità economica del progetto e il suo potenziale contributo al rafforzamento dell'industria europea delle terre rare. A tale analisi si affianca una riflessione sull'integrazione dei criteri ESG (*Environmental, Social, Governance*), oggi essenziali per valutare la fattibilità complessiva e la sostenibilità a lungo termine di un'iniziativa estrattiva.

Con questo approccio, il lavoro, analizza il caso concreto di Fen con l'obiettivo di contribuire al dibattito sulle condizioni necessarie per rafforzare la resilienza dell'industria europea delle terre rare, promuovendo un modello che sia, al contempo, tecnologicamente avanzato, ambientalmente sostenibile e autonomo sotto il profilo geopolitico.

# CAPITOLO 1 - IL MERCATO GLOBALE DELLE TERRE RARE

## 1.1 Cosa sono le terre rare

Le terre rare sono un insieme di 17 elementi chimici della tavola periodica considerati oggigiorno risorse strategiche e critiche per l'economia globale. Questi elementi, essenziali per una vasta gamma di applicazioni tecnologiche, sono suddivisi in due categorie principali: 2 metalli (scandio e ittrio) e 15 lantanoidi (lantanio, cerio, praseodimio, neodimio, promezio, samario, europio, gadolinio, terbio, disproprio, olmio, erbio, tulio, itterbio e lutezio). Questi elementi sono resi unici dalle loro particolari proprietà elettrochimiche, magnetiche e da una spiccata capacità di migliorare talune caratteristiche di diverse leghe. Tutti questi fattori hanno reso queste "terre" degli elementi di cruciale importanza per l'industria moderna e sono utilizzate in numerosi settori ad alto tasso tecnologico.

Il nome "terre rare" potrebbe far pensare a delle materie scarse in natura ma così non è; infatti, questi elementi, si trovano in quantità abbondanti all'interno della crosta terrestre. Ciò che rende "rari" questi elementi è la loro distribuzione dispersa e soprattutto le difficoltà insite nel processo di estrazione e raffinazione. La maggior parte di questi, infatti, si trova all'interno di minerali contenenti più elementi, e ciò rende il processo di recupero particolarmente costoso e difficilmente sostenibile.

### 1.1.1 Classificazione delle terre rare

Per comprendere appieno le differenze tra le diverse terre rare e le loro possibili applicazioni è necessario andarle a classificare. La classificazione più comune è quella basata sulla massa atomica andando a suddividerli in due gruppi (*Ganguli & Cook, 2018*): gli LREE (*Light Rare Earth Elements*) e gli HREE (*Heavy Rare Earth Elements*):

- Gli LREE comprendono il lantanio (La), il cerio (Ce), il neodimio (Nd), il samario (Sm), l'europio (Eu), il gadolinio (Gd) e il terbio (Tb), i quali hanno il numero di massa atomico compreso tra il 57 e il 64 e considerati quindi "leggeri". Questi elementi sono tutti caratterizzati da un

comportamento chimico simile che permette loro di essere separati più facilmente durante la fase di estrazione; inoltre, sono tendenzialmente più reattivi e facilmente ossidabili e per tale motivo sono utili anche come catalizzatori oltre ad essere impiegati in altre applicazioni industriali come i magneti permanenti e le batterie ricaricabili. Gli elementi appartenenti a questo gruppo sono più uniformemente distribuiti all'interno della crosta terrestre, rispetto agli HREE, trovandosi all'interno dei minerali in alte concentrazioni, il che li rende meno costosi e più facili da estrarre.

- Gli HREE comprendono invece gli elementi che hanno un peso atomico maggiore: il disprosio (Dy), l'olmio (Ho), l'erbio (Er), il tulio (Tm), l'itterbio (Yb) e il lutezio (Lu) tutti con numero di massa atomica compreso tra il 65 e il 71 e per questo definiti “pesanti”; a questi si aggiunge l'ittrio(Y) perché possiede caratteristiche chimiche simili ed è spesso trattato con questi. A differenza degli LREE, gli HREE tendono ad essere più stabili chimicamente, meno reattivi e più difficili da ossidare. Grazie a queste proprietà, questi sono utilizzati per applicazioni in cui vi sono alte temperature o dove è richiesta un'elevata stabilità chimica come nelle fibre ottiche o nelle lampade fluorescenti. Questi elementi, a differenza della categoria precedente, sono distribuiti irregolarmente all'interno della crosta rendendoli così difficili e costosi da estrarre.

*(Ganguli & Cook, 2018)*

Le terre rare si trovano in natura sotto forma di ossidi all'interno di diversi minerali, quali la bastnaesite, la monazite e la xenotime; questi possono contenerle in combinazioni variabili, grazie alla capacità degli ioni delle terre rare di sostituirsi reciprocamente. Infatti, alcune terre rare hanno un'importante caratteristica in comune: i loro ioni sono simili sia in termini di dimensioni che di carica e questo permette loro di sostituirsi vicendevolmente all'interno di un minerale senza andare ad alterarne la struttura cristallina. La bastnaesite, per esempio, è un minerale carbonato e la sua formula chimica  $[Ce, La, Y]CO_3F$  indica che al suo interno possono potenzialmente essere presenti il cerio (Ce), il lantanio (La) e l'ittrio (Y). La monazite, invece, è un minerale fosfato con formula chimica  $[Ce, La, Nd, Y, Th]PO_4$  che indica la possibile presenza al suo interno di cerio (Ce), lantanio (La), neodimio (Nd), ittrio (Y) e torio (Th). In ambedue gli esempi la

formula chimica dei minerali indica che possono essere presenti al suo interno una o più terre rare con la combinazione di queste ultime che può variare a seconda degli elementi presenti durante la formazione del minerale.

### 1.1.2 La *supply-chain* delle terre rare

La *supply-chain* delle terre rare è composta da quattro diverse fasi: esplorazione, estrazione, lavorazione (suddivisa in concentrazione e separazione) e produzione. (*Ganguli & Cook, 2018*)

Nonostante le fasi siano simili a quelle di altre *supply-chain* minerarie, quella delle terre rare si distingue per una maggiore complessità dovuta dalla necessità di estrarre da altri minerali dove, spesso, sono presenti in bassa concentrazione. La fase dell'esplorazione consiste nell'identificare, tramite tecnologie geologiche avanzate, le aree geografiche più promettenti nelle quali potrebbero risiedere minerali con un'alta concentrazione di terre rare. La ricerca si basa su due gruppi di minerali: minerali primari (bastnasite, monazite e xenotime) e minerali secondari come, per esempio, le argille ioniche di cui sono ricche molte regioni cinesi. Il passaggio successivo è quello di mappare i giacimenti e attuare delle perforazioni per valutare la qualità e la quantità del deposito. Dopo aver ottenuto dei risultati soddisfacenti in questa fase, si passa all'estrazione in cui il processo *core* è il *mining*. Possono essere attuate diverse tipologie di tecniche estrattive, le quali variano in base alla geologia del giacimento. Tra queste abbiamo l'estrazione mineraria a cielo aperto (possibile quando il giacimento è poco profondo ed è possibile scavare direttamente dalla superficie), estrazione sotterranea (utilizzata per giacimenti difficili da raggiungere) ed estrazione di argille ioniche (il minerale è raccolto direttamente da depositi di argille ricche di terre rare). (*Cummins Inc., n.d.*)

A seguito dell'estrazione dei minerali, ha inizio la fase della lavorazione dove questi vengono trattati per estrarre le terre rare. La fase della lavorazione può a sua volta essere suddivisa in altre due sottofasi: concentrazione e separazione. Nella prima, il minerale grezzo, caratterizzato da una bassa concentrazione di terre rare, attraversa un processo di arricchimento per aumentare la concentrazione del materiale utile. Vi possono essere diverse metodologie con cui ciò può essere raggiunto e, tra queste, abbiamo:

- a) frantumazione e macinazione del minerale grezzo così da ottenere particelle di dimensioni inferiori
- b) la separazione gravitazionale che permette di separare le impurità dal minerale

- c) trattamenti chimici per eliminare ulteriori impurità e ottenere un'elevata concentrazione di terre rare.

Alla fine di questo processo di concentrazione i minerali possono avere una concentrazione di terre rare molto più elevata del minerale grezzo che, inizialmente, non ne contiene più del 15%; per esempio, la bastnasite lavorata, può contenere al suo interno fino al 70% di terre rare, percentuale che può arrivare al 90% nelle argille ioniche presenti in Cina. (*Ganguli & Cook, 2018*)

La seconda sottofase della lavorazione è la separazione; questo è il processo più difficile e che comporta i maggiori costi nell'intera *supply-chain* a causa di diversi fattori, tra cui l'elevata complessità dei processi chimici, l'alto consumo energetico, la necessità di impianti specializzati e infine gli alti costi di gestione dovuti allo smaltimento di rifiuti tossici e radioattivi. L'obiettivo di questa fase è ottenere ossidi di terre rare partendo dai minerali che ne contengono una concentrazione elevata. Ciò è reso possibile attraverso diverse tecniche:

- a) separazione chimica (trattando i minerali con acidi o sostanze chimiche)
- b) scambio ionico (sfruttando la differenza delle cariche ioniche per separare le terre rare dal minerale)
- c) estrazione con solventi (utilizzando delle soluzioni liquide in base a quelle che sono le affinità dei diversi elementi presenti).

Alla fine di questo processo si ottengono dei composti di elevata purezza, come per esempio ossidi o carbonati di terre rare, che possono successivamente essere utilizzati all'interno delle industrie. Una volta ottenuti questi composti, si passa alla fase di produzione dove, attraverso processi di riduzione, gli ossidi e i carbonati sono trasformati in metalli. Questi possono essere ottenuti attraverso due processi (*Speed Supply Co., Ltd., 2022*):

- a) elettrolisi (per ridurre i composti ossidati in metallo)
- b) riduzione chimica (dove i composti puri sono trattati con degli agenti riducenti così da ottenere il risultato desiderato).

Ottenuti i metalli, le terre rare vengono impiegate in numerose applicazioni all'interno di industrie tecnologicamente avanzate.

## 1.2 Applicazioni e principali settori strategici

Le terre rare hanno un ruolo cruciale in molte delle moderne applicazioni industriali legate ai settori di innovazione tecnologica come l'industria *automotive*, nel settore della difesa, l'industria nucleare, l'industria *high-tech*, quella petrolifera e per le tecnologie *green* legate alle energie rinnovabili.

### 1.2.1 Settore della difesa

Le terre rare hanno un ruolo rilevante nell'ambito della difesa grazie al loro impiego in applicazioni innovative. (*Massari & Ruberti, 2012*) Questi elementi sono infatti ampiamente utilizzati nel settore per applicazioni avanzate in determinati strumenti/apparecchi come i visori notturni, armi di precisione guidate, parti di aeroplani (per esempio ogni caccia F-35 contiene circa 416 kg di terre rare (*Tabella 1*)) ed equipaggiamento di comunicazione e geolocalizzazione.

### 1.2.2 Industria del vetro e tecnologie di visualizzazione

La prima industria da considerare è sicuramente quella del vetro, con la quale le terre rare hanno avuto un primo *boom* negli anni '60, essendo all'epoca la principale industria in cui questi elementi erano utilizzati. Infatti, in quegli anni, si svilupparono le prime televisioni a colori e, questi elementi, furono di cruciale importanza per poter trasmettere le immagini a colori grazie alle loro proprietà spettroscopiche (per esempio l'europio (Eu) mostra una luminescenza rossa e il terbio (Tb) verde). Grazie a queste proprietà, alcune terre rare, l'europio (Eu) e l'ittrio (Y), hanno inoltre consentito di sviluppare gli schermi a LED, caratterizzati da un'elevata efficienza energetica, i quali hanno permesso a tutti gli individui di risparmiare energia.

### 1.2.3 Batterie ricaricabili e dispositivi elettronici

Un'altra importante applicazione delle terre rare è quella che riguarda le batterie ricaricabili; industrializzate tra gli anni '70 e '80, impiegano anodi realizzati con leghe a base di lantanio (La) e, la loro richiesta è ampiamente aumentata negli ultimi due decenni perché utilizzate negli smartphone, nei PC e anche nelle macchine elettriche dove, oltre al lantanio (La), è utilizzato il cerio (Ce). Inoltre, possiamo trovare le terre rare, oltre che nella batteria, anche nella fotocamera, dove l'utilizzo di piccole quantità di lantanio (La) riduce la distorsione delle lenti, nello schermo, nel quale, grazie all'ittrio (Y) si ottengono

colori più luminosi in modo efficiente e infine anche nei piccoli speaker dei dispositivi dove, grazie all'utilizzo di magneti di neodimio (Nd) il suono è reso migliore. Sono proprio magneti come quest'ultimo una delle principali applicazioni delle terre rare.

#### 1.2.4 Magneti permanenti e motori elettrici

Questi particolari magneti sono chiamati magneti permanenti, corpi magnetizzati che di conseguenza generano un proprio campo magnetico, e che sono utilizzati in grandi quantità all'interno di macchine che richiedono un motore elettrico come le vetture ibride e le turbine eoliche. Prendendo in considerazione queste ultime, più in particolare modelli che generano circa 3,5 megawatt di elettricità, possono contenere fino a 600 kg di terre rare (*Tabella 1*). Magneti fatti di neodimio (Nd), invece, sono utilizzati per microfoni o hard-disk dove è richiesto un campo magnetico.

#### 1.2.5 Applicazioni in medicina

Altra importante applicazione delle terre rare negli ultimi anni è stata quella che riguarda la medicina; ciò è stato reso possibile grazie alle loro caratteristiche di magnetismo ed emissione di radiazioni e, un esempio, può essere il gadolinio (Gd) utilizzato come agente di contrasto nelle risonanze magnetiche.

Tabella 1 "Consumo di Elementi delle Terre Rare (REE) nei Principali Prodotti Industriali e Tecnologici"  
Fonte: <sup>1</sup> V. Balaram, 2022. "Sources and applications of rare earth elements", Environmental Technologies to Treat Rare Earth Element Pollution: Principles and Engineering, Arindam Sinharoy, Piet N.L. Lens

Item	Quantità di Terre Rare (REE) Usata nella Produzione
Telefono cellulare	0,0005 kg
Condizionatore	0,12 kg
Toyota Prius	15 kg per unità
Lockheed-Martin F-35	416 kg
Navi militari di superficie	1818 kg
Sommergibili militari	3636 kg
Turbina eolica (3,5 MW di potenza)	600 kg

## 1.2.6 Impatti economici e geopolitici

Come abbiamo visto, le applicazioni delle terre rare sono varie e in continuo sviluppo. Attualmente l'industria *high-tech* e la transizione energetica svolgono un ruolo trainante nella crescente domanda di terre rare, soprattutto, al continuo aumento della richiesta di energia rinnovabile e di veicoli elettrici. Questi continui sviluppi stanno ridefinendo velocemente le dinamiche commerciali, l'intero mercato globale delle terre rare, le annesse questioni geopolitiche e, infine, stanno ponendo sempre più sfide legate alla sostenibilità di tutto il processo industriale.

## 1.3 Letteratura economica

La letteratura economica sulle terre rare si concentra maggiormente su tre aspetti fondamentali: la struttura altamente concentrata del mercato globale, le implicazioni geopolitiche di questa concentrazione, e le difficoltà nell'attuare strategie alternative da parte dei paesi importatori. Diversi studi evidenziano come il dominio cinese lungo tutta la filiera abbia portato alla creazione di un quasi-monopolio generando profonde asimmetrie nei rapporti commerciali e una forte dipendenza da parte di tutte le altre economie. Lo studio di *Mancheri et al. (2018)* evidenzia come la Cina abbia raggiunto questa posizione predominante determinando effetti rilevanti sulle dinamiche di mercato e riducendo le alternative per attori come gli USA e l'UE. Questa situazione è confermata dai report annuali dell'*U.S Geological Survey (USGS 2025)* (*Figura 1*) che mettono in evidenza questo squilibrio nel mercato delle terre rare.

*Figura 1 "Produzione annuale di terre rare e riserve mondiali"* Fonte: U.S. Geological Survey, 2025, Mineral commodity summaries 2025 (ver. 1.2, March 2025)

**World Mine Production and Reserves:** Reserves for Russia, South Africa, the United States, and Vietnam were revised based on company and Government reports.

	<b>Mine production<sup>e</sup></b>	<b>Reserves<sup>11</sup></b>
	<b>2023</b>	<b>2024</b>
United States	41,600	45,000
Australia	1216,000	1213,000
Brazil	140	20
Burma	1243,000	1231,000
Canada	—	—
China	14255,000	14270,000
Greenland	—	—
India	2,900	2,900
Madagascar	122,100	122,000
Malaysia	12310	12130
Nigeria	127,200	1213,000
Russia	2,500	2,500
South Africa	—	—
Tanzania	—	—
Thailand	123,600	1213,000
Vietnam	12300	12300
Other	1,440	1,100
World total (rounded)	376,000	390,000
		<b>&gt;90,000,000</b>

All'interno della stessa letteratura, particolare attenzione è dedicata alle difficoltà di creare catene di approvvigionamento alternative, anche in paesi che stanno incrementando l'attività estrattiva come gli USA e l'Australia. Secondo lo studio di *Firestone & Garofalo (2022)*, la mancanza di infrastrutture adeguate e la lentezza degli investimenti rappresentano ostacoli significativi alla costruzione di una *supply chain* autonoma. Inoltre, lo studio, evidenzia la presenza di un'economia sommersa all'interno del mercato cinese, caratterizzata da produzione illegale, difficile da quantificare ma in grado di influenzare i prezzi globali e generare ulteriori incertezze. L'analisi complessiva della letteratura evidenzia dunque come la strada verso una maggiore autonomia sia complessa e richieda politiche industriali solide e investimenti mirati. In questo scenario, l'avvio di nuove iniziative minerarie in territori politicamente stabili rappresenta una concreta opportunità per ridurre la dipendenza strategica.

## 1.4 Mercato globale: i principali produttori

Per andare a studiare l'attuale mercato globale bisogna prima analizzare come le dinamiche all'interno dello stesso siano cambiate nel corso dei decenni e comprendere come queste terre rare siano distribuite nei diversi continenti.

### 1.4.1 Evoluzione storica del mercato

L'utilizzo e la produzione di questi elementi hanno avuto un vero e proprio *boom* a partire dalla seconda metà del '900 periodo in cui, il principale stato produttore di terre rare, erano gli Stati Uniti d'America. Questa posizione di dominio degli Stati Uniti d'America è durata fino all'inizio degli anni '90 quando sono stati scalzati dalla Cina che, con l'attuazione di politiche mirate allo sviluppo di questo settore industriale e, soprattutto, grazie alle ingenti risorse che si trovavano nel suo sottosuolo, ha raggiunto una posizione dominante nell'attuale mercato.

### 1.4.2 Crescita del mercato cinese

Il raggiungimento di questa posizione è stato reso possibile innanzitutto dal controllo del governo cinese sull'industria delle terre rare con la creazione, nel 1975, del “*National Earth Development and Application Leading Group*”. Nel paese però, i primi scavi, estrazioni e lavorazioni con le terre rare avvengono all'inizio degli anni '80 con una quantità di prodotto modesta ottenuta annualmente sino a quando, a partire dal 1985, la produzione inizia ad aumentare grazie all'introduzione di politiche legate all'esportazione. Nel 1991, poi, il governo cinese ha preso il controllo su tutti i processi legati all'ottenimento di terre rare a partire dai giacimenti di argille ioniche, presenti in abbondanza sul suolo del paese, fino a tutti i processi di estrazione, lavorazione e produzione delle terre rare, i quali sono stati poi successivamente assegnati dal governo ad aziende minerarie di proprietà statale andando così ad escludere da qualunque processo le aziende private. Nei 7 anni successivi, nel periodo dal 1991 al 1998, la produzione cinese di terre rare ha avuto un forte incremento passando da 16.500 a 65.000 tonnellate. Negli anni a seguire, mentre la produzione di terre rare è continuata ad aumentare, le esportazioni sono diminuite fino a che, prima nel 2007, poi nel 2010, sono state introdotte delle tasse sull'esportazione di terre rare lavorate, ossidi di terre e magneti permanenti. Queste restrizioni però non furono accolte in modo positivo dagli Stati Uniti d'America

e dalle altre principali potenze economiche che denunciarono queste restrizioni perché non conformi al protocollo firmato dalla Cina stessa in occasione dell'ingresso di quest'ultima, nel 2001, nella WTO (*World Trade Organization*). Nel 2015 la Cina ha perso la causa ma, nonostante ciò, i livelli di produzione di terre rare sono continuati ad aumentare fino ad arrivare alle 140.000 tonnellate prodotte nel 2020. (*Firestone & Garofalo, 2022*)

#### 1.4.3 Produzione illegale cinese

Dietro questo grande mercato cinese si nasconde però un grande problema legato alla produzione illegale la quale rende difficile sapere con certezza quali siano le effettive quantità di terre rare prodotte nel paese. Questa tipologia di produzione è dovuta ai bassi livelli di controllo, sia ambientale che legislativo, del paese che permettono grandi quantità di produzioni a bassi prezzi nella completa assenza di controllo da parte del governo, il quale sembra aver accettato l'elevato degrado ambientale causato dall'industria delle terre rare. Per comprendere meglio quanto questo fenomeno sia ricorrente nel paese basti pensare che, all'inizio del 2015, solo 87 imprese appartenenti a questa industria rispettavano le leggi sull'ambiente ed erano riconosciute dallo stato. (*Mancheri et al. 2018*)

Questa produzione illegale di terre rare ha avuto risvolti negativi sul livello dei prezzi perché i prodotti illegalmente prodotti venivano venduti a un prezzo inferiore e, con le passate restrizioni (2007 e 2010) legate alle esportazioni, le aziende che producevano illegalmente sono riuscite ad ottenere profitti maggiori rispetto quelle che producevano legalmente. Non vi sono certezze sulle dimensioni di questo mercato nero ma alcuni studi hanno stimato una produzione nera pari al 30% del totale prodotto all'interno nel paese tra il 2005 e il 2012. (*Firestone & Garofalo, 2022*)

Nel gennaio del 2015, però, è stato introdotto un modello di tracciamento delle terre rare per riconoscere la provenienza delle stesse così da andare a limitare la produzione e l'esportazione illegale. (*Mancheri et al. 2018*)

#### 1.4.4 Statalizzazione dell'industria

Oltre a queste azioni, il governo cinese ha attuato un processo di accentramento di produzione e lavorazione di terre rare andando a concentrare tutti i processi in sei aziende

di proprietà statale (*SOEs (state-owned enterprises)*). Per comprendere meglio il risultato successivamente ottenuto, basti pensare che nel giugno del 2016 queste 6 aziende possedevano 22 delle 23 miniere sul suolo statale e ben 54 impianti di separazione ed estrazione sui 59 presenti nel paese. Oltre a controllare l'industria a livello statale, queste aziende hanno iniziato ad investire in progetti sulle terre rare anche in paesi esterni come la Mongolia e il Myanmar. Questo può essere considerato un investimento a lungo termine da parte del governo cinese che, andando ad acquistare e investire in miniere estere, protegge l'industria interna dall'esaurimento delle risorse, dall'aumento dei costi legato alle regolamentazioni ambientali più stringenti rispetto a quelle di paesi del terzo mondo e dall'aumento del costo della manodopera. Questi investimenti esteri possono impattare inoltre la *supply-chain* dell'industria in due diversi modi; da un lato le aziende cinesi lavorano le terre rare direttamente nei paesi esteri andando poi a soddisfare la domanda globale; dall' altro, invece, le stesse aziende possono importare le terre rare da questi paesi andando poi a soddisfare la domanda delle fonderie statali. (*Mancheri et al. 2018*)

Con queste azioni il governo cinese è riuscito a raggiungere l'obiettivo di controllare tutta la filiera dell'industria delle terre rare, dalla perforazione delle miniere fino alla vendita dei prodotti finiti. Questa posizione di monopolio delle aziende cinesi ha dato loro il potere di manipolare il livello dei prezzi disincentivando l'investimento nella produzione non cinese e andando, presumibilmente, ad abbattere la produzione illegale; a riguardo, a causa delle difficoltà di ottenere dati e informazioni dal paese, non vi è certezza sul risultato raggiunto.

#### 1.4.5 Mercato globale ed evidenza empirica del dominio cinese

A livello mondiale, quindi, la Cina ricopre una posizione dominante e, nonostante negli ultimi decenni si siano sviluppati altri mercati, la differenza tra questi e quello cinese è ancora estremamente elevata. Questo grande divario è dovuto, non tanto dalla distribuzione delle terre rare nel suolo dei paesi del mondo, quanto alla difficoltà di riuscire a individuare dei depositi in cui queste siano concentrate a tal punto che sia economicamente conveniente estrarle. Per comprendere meglio ciò analizziamo i dati rilasciati a gennaio 2025 dal *U.S. Geological Survey 2025 (Tabella 2)*.

*Tabella 2 "Produzione globale di terre rare nel 2024: distribuzione, riserve e concentrazione", la tabella illustra l'attuale struttura del mercato delle terre rare; i dati di produzione del 2019 sono riportati a fini comparativi, per offrire una contestualizzazione storica delle tendenze estrattive più rilevanti. Gli 0 presenti nella colonna delle riserve indicano una mancanza di disponibilità di dati per quel determinato paese Fonti: U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey; U.S. Geological Survey, 2025, Mineral commodity summaries 2025 (ver. 1.2, March 2025); U.S. Geological Survey*

Paese	Produzione mineraria	Produzione mineraria	%Produzione minerarie		
	2019	2024	Riserve 2024	2024	%Riserve
USA	26.000	45.000	1.900.000	11,42%	2,09%
Australia	21.000	13.000	5.700.000	3,30%	6,27%
Brasile	1.000	20	21.000.000	0,01%	23,11%
Myanmar	22.000	31.000	0	7,87%	0,00%
Canada	0	0	830.000	0,00%	0,91%
Cina	132.000	270.000	44.000.000	68,54%	48,41%
Groenlandia	0	0	1.500.000	0,00%	1,65%
India	3.000	2.900	6.900.000	0,74%	7,59%
Madagascar	2.000	2.000	0	0,51%	0,00%
Malesia	0	130	0	0,03%	0,00%
Nigeria	0	13.000	0	3,30%	0,00%
Russia	2.700	2.500	3.800.000	0,63%	4,18%
Sud Africa	0	0	860.000	0,00%	0,95%
Tanzania	0	0	890.000	0,00%	0,98%
Thailandia	1.800	13.000	4.500	3,30%	0,00%
Vietnam	900	300	3.500.000	0,08%	3,85%
Altri	0	1.100	0	0,28%	0,00%
Mondo					
totale(arrotondato)	212.400	393.950	90.884.500	100,00%	100,00%

Andando ad analizzare le riserve di terre rare presenti a livello globale si può notare subito che la sola Cina possiede poco meno del 50% di queste e che il primo paese per quantità di riserve possedute, dopo la Cina, è il Brasile con il 23% circa; seguono poi l'India, l'Australia, la Russia, il Sud Africa, il Vietnam e gli USA. Guardando questi dati ci si potrebbe dunque aspettare che il resto del mondo, escludendo la Cina, possa riuscire a

estrarre e ottenere prodotti derivati da terre rare andando a coprire così poco più del 50% del totale. Tuttavia, andando ad analizzare la produzione annuale del 2024 si evidenzia un divario tra primo e secondo produttore molto più significativa di quella tra il primo e il secondo detentore di riserve evidenziando così una vera e propria situazione di quasi-monopolio cinese. La Cina, infatti, con una produzione di 270.000 tonnellate di terre rare ha coperto nel 2024 il 68,54% della produzione globale mentre, il secondo produttore a livello mondiale, gli USA, si limitano a una produzione di 45.000 tonnellate coprendo poco più dell'11% della produzione; un altro problema evidente riguarda la mancanza di capacità estrattiva da parte di quei paesi che, pur possedendo delle rilevanti porzioni di terre rare nel loro suolo, ne producono bassissime quantità a causa di vincoli infrastrutturali, normative ambientali stringenti o mancanza di tecnologie all'avanguardia. Il paese che più risalta all'occhio nell'analisi dei dati è sicuramente il Brasile, il quale, pur detenendo oltre il 23% delle riserve totali, riesce a produrre una quantità minima andando a coprire appena lo 0,01% del mercato. Per andare a evidenziare ulteriormente il dominio cinese in questo mercato è possibile calcolare, utilizzando i dati presentati nella *Tabella 2*, l'indice di *Herfindal-Hirschman* che ci permette di andare a valutare la concentrazione assoluta dell'industria sulla base delle quote di mercato dei singoli operatori. L'HHI si ottiene andando a sommare i quadrati delle quote di mercato (espresso in forma decimale) di ciascun paese produttore. Nell'analisi condotta utilizzando i dati dell'USGS in Excel, sono stati considerati solamente i 13 paesi effettivamente produttori, escludendo quelli che pur possedendo delle riserve, non registrano produzione attiva. Il risultato ottenuto è  $HH=0,492$  ma questo indice viene normalmente espresso moltiplicando il valore ottenuto per 10.000 andando così ad ottenere un  $HH=4.920$ .

Considerando i possibili valori che questo indice può assumere, se questo è inferiore a 1.000 il mercato a cui si riferisce è concorrenziale, se il valore invece è compreso tra 1.000 e 2.000 bisogna ulteriormente analizzare il mercato, mentre se l'indice supera i 2.000 indica una criticità della concorrenza. Il valore ottenuto all'interno del mercato delle terre rare, pari a 4.920, conferma una mancanza di concorrenza nel mercato e quindi il quasi-monopolio cinese. È dunque evidente come, alla maggior parte dei paesi, tra cui quelli più ricchi, sia imposta una dipendenza strutturale dalle forniture provenienti dalla Cina.

## 1.5 Risposta al dominio cinese

Per rispondere al dominio cinese, e rispondere alla suddetta criticità, molti paesi si stanno muovendo così da rendersi almeno parzialmente indipendenti.

### 1.5.1 La situazione e le strategie dell'UE

È di fondamentale importanza analizzare quale sia l'attuale situazione nell'Unione Europea la quale, nonostante la consapevolezza di dover diversificare le fonti di approvvigionamento delle terre rare e l'attuazione di investimenti in nuovi progetti, rimane fortemente vincolata alle importazioni della Cina che risulta ancora essere il fornitore principale. L'UE si trova quindi in una situazione di elevata dipendenza e, secondo i dati *Eurostat* riferiti all'anno 2023 (*Eurostat, 2024*), ha importato, nello stesso anno, terre rare pari a 18.300 tonnellate (-0,5% rispetto al 2022) di valore pari a 123,6 milioni di euro (-15,2% rispetto al 2022) con un prezzo medio delle materie importate pari a 6,8 euro/kg. Le esportazioni nel medesimo anno sono state invece di circa 5.600 tonnellate (-18,7% rispetto al 2022) per un valore di 102,3 milioni di euro (-27,8% rispetto al 2022) con un prezzo medio delle materie esportate pari a 18,4 euro/kg. Le esportazioni europee sono perlopiù dovute a due fattori, da un lato una parte di queste deriva dalla lavorazione di terre rare importate e la riesportazione dei materiali raffinati, dall'altro vi sono dei paesi, come l'Estonia, che, seppur in piccol parte, possiedono giacimenti e impianti per la raffinazione di queste materie. La problematica che però più si evidenzia dai dati *Eurostat* per l'anno 2023 è che il 39% delle importazioni in Europa sono provenienti dalla Cina e ciò rende ben evidente quanto ancora l'UE sia dipendente dalla potenza asiatica in questo settore. Per rispondere a questa problematica, negli ultimi anni, l'UE ha messo in atto delle strategie per andare a ridurre la dipendenza esterna; le due principali azioni riguardano l'*European Raw Materials Alliance* (ERMA) creata nel 2020 e il *Critical Raw Materials Act* varato nel 2023. L'ERMA è un'alleanza che coinvolge oltre 600 organizzazioni di 50 diversi paesi e che va quindi oltre a una semplice alleanza europea; l'obiettivo di questa è andare a minimizzare la dipendenza cinese attraverso la diversificazione delle catene di approvvigionamento e il riciclo dei materiali critici, attraverso la creazione di un'economia circolare con l'obiettivo di ridurre lo spreco e migliorare il recupero di questi elementi. (*European Raw Materials Alliance, 2024*)

Il *Critical Raw Materials Act (CRMA)*, introdotto dalla Commissione Europea, riguarda invece il lato legislativo di questa risposta alla problematica della dipendenza cinese con lo scopo di rafforzare le capacità dell'Europa di estrarre, lavorare, riciclare e diversificare le fonti delle terre rare riducendo così i rischi legati alla dipendenza dalla Cina.

Per far ciò sono stati posti 4 obiettivi di produzione e diversificazione da raggiungere entro il 2030 (*Critical Raw Materials Act, n.d.*):

- Almeno il 10% del consumo annuo dell'UE derivante direttamente da estrazione interna.
- Almeno il 40% delle materie che consuma devono essere lavorate in stabilimenti europei.
- Almeno il 25% delle materie prime utilizzate devono essere derivanti da materiali già utilizzati.
- Nessun paese terzo potrà importare più del 65% di una materia prima così da evitare dipendenze eccessive.

Oltre a porre questi obiettivi, con l'attuazione del CRMA, i paesi dell'UE sono tenuti a sviluppare dei programmi nazionali per ricercare possibili risorse geologiche e, per velocizzare l'iter burocratico sono stati previsti dei tempi per l'autorizzazione ai lavori più brevi (15 mesi per permessi di lavorazione e riciclaggio e 27 mesi per i permessi di estrazione). Altri importanti obiettivi posti dall'atto riguardano poi il rafforzamento degli accordi commerciali espandendo le *partnership* con paesi chiave come gli USA, l'Australia e le nazioni africane e l'utilizzo del programma *Global Gateway* per sviluppare progetti sostenibili nei paesi *partner*. Per garantire poi l'attuazione efficace del CRMA è stato istituito l'*European Critical Raw Materials Board*, composto dagli stati membri dell'unione e dalla Commissione Europea, il quale ha, tra gli altri, il compito di monitorare i progressi in riferimento ai diversi obiettivi, coordinare le diverse iniziative e garantire stabilità attraverso un continuo dialogo con i *partner*. (*Critical Raw Materials Act, n.d.*)

Come detto, quindi, punto chiave della strategia UE è ottenere parziale indipendenza nell'industria delle terre rare attraverso accordi con altre nazioni e soprattutto con la

ricerca dei giacimenti nel proprio territorio. Una possibile svolta è arrivata recentemente con la scoperta, in Norvegia, di un giacimento contenente 8,8 milioni di tonnellate di ossidi di terre rare. (*Rare Earths Norway, 2024*)

Il paese, pur non facendo parte dell'UE, partecipa attivamente all'ERMA e potrebbe così tornare utile nell'affrontare e risolvere questa cruciale problematica europea.

# CAPITOLO 2 - IL RUOLO DELLA NORVEGIA NEL MERCATO DELLE TERRE RARE

Dopo aver analizzato nel capitolo 1 le dinamiche globali che caratterizzano il mercato delle terre rare, tra cui l’egemonia cinese e le recenti strategie di diversificazione attuate dall’EU, è evidente la necessità per quest’ultima di individuare fornitori stabili, affidabili e alternativi così da ridurre il rischio di approvvigionamento. All’interno di questo contesto vi è la Norvegia, la quale, pur non essendo uno dei principali produttori di terre rare, presenta delle importanti caratteristiche geologiche, con un contesto politico-economico che esprime un forte interesse nei confronti del settore estrattivo. Con questo capitolo si propone di andare ad analizzare le strategie con le quali la Norvegia cerca di valorizzare le proprie risorse minerarie e capire, se e come, il paese possa avere un ruolo di spicco all’interno di questo mercato; tutto ciò attraverso un’analisi del potenziale geologico, delle strategie istituzionali attuate e delle opportunità legate a recenti scoperte.

## 2.1 Risorse minerarie norvegesi: potenziale e limiti.

La Norvegia, il cui governo è orientato verso un’importante transizione ecologica, si distingue per caratteristiche geologiche favorevoli che, se valorizzate in maniera sostenibile, potrebbero aiutare l’Europa a combattere la dipendenza cinese. Tutto questo rende il paese un caso interessante da studiare all’interno del sempre più importante dibattito sulle materie prime critiche e in particolare le terre rare.

### 2.1.1 Il potenziale minerario della Norvegia

La Norvegia possiede un’importante potenziale per l’estrazione di minerali contenenti le terre rare, con giacimenti identificati nelle regioni meridionali nella contea di *Telemark*. Le diverse aree geologiche sono state mappate dalla *Norwegian Geological Survey* (NGU) (*Norwegian Mineral Strategy, 2023*) e potrebbero contenere ingenti quantità di minerali, come bastnaesite e monazite, ricchi sia di LREE che di HREE. Questi giacimenti potrebbero, in futuro, giocare un ruolo di prima importanza nel soddisfare la domanda di questi elementi in Europa. La grande quantità di minerali e risorse naturali possedute dal paese sono sicuramente un punto di partenza dal quale costruire, nel futuro più prossimo, una filiera di approvvigionamento sicura per tutta l’industria tecnologica e

dell’energia rinnovabile europea. Questa distribuzione di risorse è rappresentata nella seguente immagine (*Figura 2*), che mostra i principali giacimenti minerari attivi e i progetti avanzati sul territorio norvegese.

*Figura 2 "Distribuzione delle miniere attive e dei progetti minerari avanzati in Norvegia"* Fonte: Geological Survey of Norway (NGU) e Directorate for Mineral Management (DMF), 2023.



## 2.1.2 Le sfide geologiche nell’estrazione di terre rare

Nonostante il grande potenziale, la Norvegia deve affrontare un’importante sfida riguardante la concentrazione di questi minerali. Infatti, nonostante questi giacimenti siano promettenti per le terre rare che si potrebbero ottenere, la concentrazione dei minerali da cui queste si possono ottenere è inferiore se confrontata soprattutto con la Cina. Una concentrazione inferiore richiede delle tecniche tecnologicamente più avanzate e conseguentemente più costose, con la Norvegia che dovrà quindi investire ingenti risorse affinché le REE vengano estratte dalla monazite e dalla bastnaesite. Un’ulteriore difficoltà scaturisce poi direttamente da questo problema; infatti, mettere in atto una produzione su larga scala, potrebbe essere ancora più arduo con queste barriere tecnologiche che possono limitare la competitività del paese con gli altri importanti produttori globali. Un altro ostacolo all’attuazione di progetti minerari, oltre all’aspetto economico, è quello burocratico; infatti, l’iter autorizzativo affinché un progetto venga

messo in atto, quindi il tempo dalla scoperta del giacimento all'inizio della produzione, è in media di 16,5 anni (*International Energy Agency, 2022*), un lasso di tempo molto ampio per un'industria che si sta sviluppando a velocemente e che necessariamente dovrà essere diminuito nel futuro più prossimo.

### 2.1.3 Politiche ambientali e sostenibilità dell'industria mineraria

La Norvegia è uno dei paesi più legati alle tematiche ambientali, adottate in modo rigoroso, e promosse con particolare attenzione nel campo dell'estrazione mineraria con l'obiettivo di ridurre quanto più possibile l'impatto ecologico. L'importanza di riuscire a sviluppare delle pratiche sostenibili, all'interno dell'industria mineraria, senza andare a compromettere la qualità dell'ambiente, è fortemente evidenziato dalla *Norwegian Mineral Strategy*, la quale enfatizza, inoltre, l'importanza di investire in tecnologie che migliorino l'efficienza dell'intero iter estrattivo. La stessa *Norwegian Mineral Strategy* afferma infatti di voler sviluppare l'industria mineraria più sostenibile al mondo, puntando sull'economia circolare, trasparenza e riduzione delle emissioni. Tutte le operazioni di *mining* sono regolamentate in modo tale che le compagnie siano tenute ad attuare delle pratiche sostenibili, limitando l'utilizzo di sostanze chimiche inquinanti e la creazione di rifiuti. Inoltre, è adottato in Norvegia il *Towards Sustainable Mining* (TSM), un sistema canadese (*UNEP, 2020*), il quale prevede che tutti i siti minerari del paese facciano delle autovalutazioni periodiche, successivamente valutate da soggetti esterni, riguardanti la sicurezza, la biodiversità, la gestione dell'ambiente e le relazioni con le comunità. Con queste azioni è consentito, all'industria del paese, di svilupparsi senza andare ad intaccare la biodiversità e a ridurre futuri impatti ambientali ponendo contemporaneamente attenzione agli interessi della comunità autoctona dei *Sámi*.

### 2.1.4 Il potenziale dell'estrazione mineraria sottomarina

Nel contesto norvegese sempre più importanza è data allo sfruttamento delle risorse che giacciono sui fondali marini. La *Norwegian Mineral Strategy 2023* ha individuato l'estrazione mineraria marina come uno dei settori emergenti che potrebbero contribuire al raggiungimento dell'obiettivo di contribuire all'autonomia strategica europea nell'approvvigionamento di queste materie prime critiche. Le risorse presenti in quantità rilevanti nei fondali marini comprendono zinco, cobalto, oro, ferro e nichel, i quali potrebbero andare ad integrare le risorse già individuate ed estratte sulla terraferma. Le

attività estrattive marine sono però sottoposte a importanti regolamentazioni e disciplinate dal *Seabed Minerals Act* (*Seabed Minerals Act, 2020*) il quale, vieta estrazioni minerarie in aree marine non ufficialmente aperte a questa tipologia di attività. Oltre ciò, è cruciale il coinvolgimento e la partecipazione dei privati nell’effettuare mappature e raccogliere quanti più dati possibili con una successiva dimostrazione della redditività delle risorse individuate e del rispetto dei criteri di sostenibilità e responsabilità ambientale imposti. Questa cautela da parte del governo norvegese nell’implementare questa tipologia di progetti è giustificata da importanti segnali di contaminazione individuati all’interno degli ecosistemi presenti sui fondali marini norvegesi. È stata infatti evidenziata, all’interno di alcuni molluschi prelevati in Norvegia meridionale, la presenza e l’accumulazione di terre rare. (*Castro et. Al., 2023*)

La presenza di questi elementi all’interno di questi molluschi evidenzia un’importante esposizione ambientale in corso. Alla luce di questi risultati, l’attuazione di progetti estrattivi marini risulterà più ardua del previsto con un processo di sviluppo che dovrà essere incentrato sulla prudenza e sulla ricerca, con la partecipazione pubblica che avrà un ruolo cruciale.

### 2.1.5 L’integrazione della Norvegia nella filiera europea delle terre rare

L’importanza della Norvegia per le terre rare è un concetto legato fortemente alla filiera europea di approvvigionamento con il paese che sta provando ad integrarsi con il sistema europeo così da rendere sicura la fornitura delle terre rare. Questo concetto è sottolineato dalla *Norwegian Mineral Strategy*, evidenziando come sia importante sviluppare questo tipo di risorse all’interno del paese per rafforzare l’approvvigionamento dei paesi membri dello Spazio Economico Europeo. Ciò è dimostrato anche nei fatti con la partecipazione attiva da parte della Norvegia all’ERMA (*European Raw Materials Alliance, 2024*) a conferma dell’impegno che quest’ultima sta dimostrando. Nonostante le difficoltà evidenziate in cui potrebbe incorrere il paese nello sviluppo di quest’industria, l’impegno nello sviluppo sostenibile e la cooperazione con l’UE permette alla Norvegia di essere un Paese con un’importanza strategica cruciale. La recente scoperta nella regione di Fen, nel sud del paese, di un promettente giacimento minerario potrebbe ulteriormente consolidare la posizione all’interno del mercato delle REE.

## 2.2 Scoperta del giacimento di Fen nella contea meridionale di Telemark

### 2.2.1 Il contesto geologico e la riscoperta del sito

Il complesso minerario di Fen è situato nella contea di Telemark e rappresenta oggi uno dei siti più importanti in Europa grazie alla presenza di terre rare. L'area in cui si trova il deposito è situata nella Norvegia meridionale a circa 120 km da Oslo ed è caratterizzata dalla presenza di una massa intrusiva carbonatica formatasi circa 580 milioni di anni fa. (*Rare Earths Norway, 2022*)

Formazioni di questo genere sono piuttosto rare a livello mondiale ma hanno una grande rilevanza strategica perché a questi sono associate alte concentrazioni di materie prime critiche; questi depositi hanno altresì acquisito importanza strategica perché rappresentano una delle principali fonti di REE di origine non cinese. Agli esperti di geologia, la zona di Fen è nota da parecchi decenni ma, l'interesse industriale è una vicenda più recente e sviluppatasi grazie ad alcune campagne esplorative sistematiche condotte da società private come *Rare Earths Norway* e *REE Minerals*, entrambe supportate dal *Norway Geological Survey*. Queste indagini hanno condotto a una rivalutazione del potenziale estrattivo del deposito, certificato da due importanti standard internazionali: il *Joint Ore Reserves Committee (JORC)* e il *National Instrument 43-101 (NI43-101)*. (*Schiellerup, 2024*)

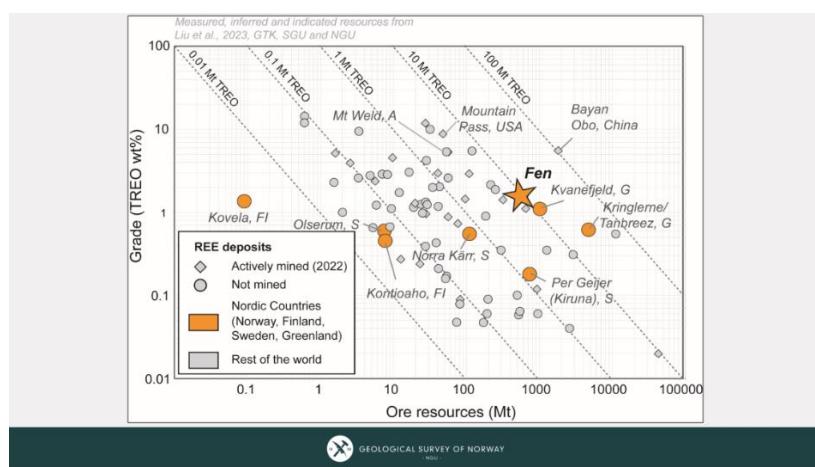
Con queste certificazioni è aumentata l'attrattività del progetto per gli investitori industriali e istituzionali. La rivalutazione del sito della Fen, inoltre, si colloca perfettamente all'interno del quadro della strategia mineraria europea, in un contesto in cui vi è una domanda crescente di materiali critici necessari per la transizione energetica e digitale. Nel contesto europeo, la presenza di un giacimento così importante, all'interno di un paese membro dello Spazio Economico Europeo (SEE) e quindi allineato con tutti gli standard europei, costituisce un'importantissima ed essenziale risorsa geopolitica e industriale. Dal punto di vista strategico, la localizzazione del giacimento offre alla Norvegia un significativo vantaggio competitivo perché, l'accesso diretto a una risorsa mineraria critica permette al paese di posizionarsi come un fornitore affidabile all'interno delle catene del valore europee. A tutto ciò si aggiunge inoltre un contesto politico stabile

e un'elevata qualità delle infrastrutture logistiche con centri di separazione e raffinazione presenti in prossimità del deposito di Fen il quale, con tutte queste caratteristiche favorevoli, è adatto allo sviluppo di un vero e proprio distretto industriale delle terre rare.

## 2.2.2 Dimensioni, composizione mineralogica e rilevanza strategica del giacimento

Le stime più recenti confermano che il giacimento minerario di Fen è il più grande deposito di REE, sia in termini di volume che in termini di concentrazione degli elementi, nell'Europa continentale (*Figura 3*). Sono due le principali stime effettuate recentemente; la prima nella quale, secondo la società *Rare Earths Norway* e tenendo conto delle linee guida JORC, è stimata una presenza di 559 milioni di tonnellate di risorse con una concentrazione di terre rare pari all'1,57%. La seconda stima invece, effettuata da *REE Minerals* e seguendo le linee guida NI43-101, indica un valore inferiore, ma pur sempre considerevole nel panorama europeo, pari a 95 milioni di tonnellate di risorse con una concentrazione di terre rare pari all'1,28%. (*Schiellerup, 2024*)

*Figura 3 "Confronto tra i principali giacimenti di terre rare per concentrazione (%TREO) e dimensione (milioni di tonnellate di risorse)." Fonte: H. Schiellerup, Geological Survey of Norway (NGU), presentazione alla Camera dei deputati – Commissione Affari Esteri, 18 dicembre 2024. Dati elaborati da Liu et al. (2023), Geological Survey of Finland (GTK), Geological Survey of Sweden (SGU) e NGU.*



Nonostante queste stime possano sembrare in contraddizione, così non è; questo perché entrambe rispecchiano risultati ottenuti con diverse metodologie di valutazione ma convergono alla stessa conclusione, sottolineando ancora una volta il potenziale di questo deposito e dell'impatto che può avere sul mercato delle terre rare europeo. Tuttavia, la

profondità – oltre 1 km – e la dimensione del deposito implicano un impatto ambientale significativo, sia in termini di uso del suolo sia di scarti di lavorazione, di cui dovrà esser tenuto conto nell’evoluzione del progetto.

Dal punto di vista mineralogico, il giacimento di Fen è caratterizzato dalla presenza di elementi dotati di un’elevata importanza a livello industriale, tra i quali abbiamo il neodimio (Nd), il praseodimio (Pr) e il terbio (Tb). Tutti questi ricoprono un ruolo cruciale nella produzione dei magneti permanenti presenti all’interno di applicazioni ad alto tasso tecnologico. Il valore di questo giacimento è dunque elevato ed è anche riconosciuto dalla *Norwegian Mineral Strategy* che lo definisce come il più grande deposito di terre rare in Europa. La presenza, poi, a circa 40 km dal giacimento, dell’impianto di separazione REEtec (*REEtec, n.d.*), offre un’importante opportunità di integrazione verticale a livello locale con una conseguente riduzione dei costi logistici, in linea con quanto sottolineato da *McKinsey* riguardo alla necessità dei produttori di materie prime di integrarsi nelle catene del valore attraverso *partnership* strategiche e investimenti *downstream*.  
*(McKinsey & Company, 2022)*

### 2.2.3 Rilevanza strategica nella competizione globale sulle terre rare

Nell’attuale contesto, in cui la transizione energetica e digitale è il principale obiettivo, il giacimento di Fen rappresenta un’opportunità senza precedenti per l’Europa. La stima delle risorse all’interno del giacimento, prodotta da *Rare Earths Norway*, è di circa 559 milioni di tonnellate con concentrazione media di 1,57% di ossidi di terre rare, equivalenti a circa 8,8 milioni di tonnellate di ossidi, rappresenta una quantità sufficiente ad andare a coprire un’importante quota della domanda industriale europea per i prossimi decenni. L’importanza strategica del deposito, ricco di neodimio e disproprio, aumenta andando ad analizzare il panorama in cui ci troviamo; nell’attuale contesto; per la domanda globale di disproprio è prevista una crescita fino al 268.3% entro al 2030 rispetto al livello del 2016 e nello stesso arco temporale la previsione dell’aumento della domanda di neodimio è pari al 199.2%. *(Zhou et al., 2017)*

Considerate quindi queste previsioni, Fen, rappresenta una grande opportunità per rafforzare la filiera europea e potrebbe rappresentare un punto di svolta rispetto alla storica dipendenza cinese in questa industria.

#### 2.2.4 Struttura industriale e attori coinvolti

Lo sviluppo del giacimento di Fen è gestito da due aziende principali: *Rare Earths Norway* e *REE Minerals* le quali, come già detto, operano, nelle loro campagne esplorative, secondo due differenti standard internazionali il JORC e il NI43-101. Elemento distintivo di questo deposito minerario è la possibilità che tutti i processi possano essere integrati verticalmente grazie alla vicinanza tra questo e l'impianto di separazione e lavorazione REEtec, situato a *Heroya* a circa 35 km dal giacimento. Quest'ultima si presenta come un'importantissima infrastruttura per la filiera europea, con una capacità di produzione di circa 720 tonnellate annue di ossidi di NdPr e sostenuta da ingenti investimenti. Infatti, per la costruzione di questo complesso, sono stati raccolti da investitori privati 1,2 miliardi di corone norvegesi (*REEtec, n.d.*) più un ulteriore investimento, pari a 400 milioni di corone norvegesi, effettuato dalla compagnia statale svedese LKAB (*LKAB, 2024*) in un'ottica di cooperazione dei paesi scandinavi nel settore delle REE. In contemporanea allo sviluppo di questo impianto, *Rare Earths Norway* ha annunciato la realizzazione di un impianto pilota nei pressi del giacimento. L'obiettivo di questo progetto è di testare sia tecnologie estrattive che di trattamento delle risorse in scala ridotta e al contempo può favorire il radicamento territoriale del progetto favorendo sinergie con le comunità locali e con il tessuto imprenditoriale presente all'interno della municipalità. L'azienda ha previsto che l'investimento da effettuare nel futuro più prossimo è di circa 10 miliardi di corone norvegesi con l'obiettivo di iniziare la fase estrattiva entro il 2030. (*Rare Earths Norway, 2024*)

Questo investimento permetterebbe a REN di andare a soddisfare circa il 10% della domanda europea di terre rare, in linea con gli obiettivi dell'UE delineati all'interno del CRMA.

#### 2.2.5 Sfide sistemiche e prospettive industriali

Il progetto del deposito di Fen, seppur promettente, si inserisce all'interno di un settore caratterizzato da numerose criticità sistemiche. Tra queste, la prima da considerare è,

come visto nel capitolo precedente, la struttura altamente concentrata del mercato delle terre rare dimostrato dal valore dell'HHI pari a 5.250. Una configurazione del mercato di questo tipo implica fragilità per tutti gli attori esterni alla Cina, i quali sono quindi maggiormente esposti a rischi sia di natura geopolitica che industriale come l'instabilità dei prezzi o la mancanza di potere contrattuale. All'interno di questo contesto, il modello della miniera di Fen è ambizioso ma allo stesso tempo molto complesso. Da un lato la possibilità di sfruttare l'integrazione verticale rappresenta un'innovazione all'interno del contesto europeo, dall'altro lato però vi sono degli importanti rischi economici. Secondo *McKinsey*, l'industria mineraria è un settore a lungo ciclo e *capital intensive* a causa del bisogno di ingenti investimenti iniziali per le infrastrutture e le autorizzazioni. Inoltre, questo settore è caratterizzato da fenomeni strutturali come colli di bottiglia, dovuti alla limitazione della capacità di lavorazione, volatilità dei prezzi, legata a dinamiche geopolitiche, e lunghi *lead time*, cioè molto tempo tra l'iniziazione dei progetti e la loro piena operatività. Nel contesto del progetto sul deposito di Fen queste dinamiche assumono particolare importanza. Come sottolineato da *McKinsey*, se da un lato, a causa della transazione energetica, sta aumentando la domanda di materiali strategici come le terre rare, dall'altro l'offerta fa fatica a adeguarsi a causa dei fenomeni strutturali elencati in precedenza. Se non dovesse esserci coordinazione ed equilibrio tra domanda ed offerta potrebbero presentarsi tensioni sul mercato con annessi aumenti dei prezzi di questi materiali critici. Esempio utile per comprendere meglio le dinamiche di mercato è quello del cobalto; l'aumento dei prezzi, registrato in particolare nel 2018, ha fatto sì che si sviluppassero soluzioni chimiche alternative all'interno delle batterie. (*McKinsey & Company, 2022*)

Nonostante la sostituibilità a livello tecnologico delle terre rare sia decisamente più limitata, potrebbero emergere pressioni simili anche su elementi come il neodimio e il disproprio, con effetti potenzialmente rilevanti sia sulla loro domanda che sull'organizzazione di tutte le filiere industriali che ne fanno uso. Il progetto di Fen quindi si posiziona in una zona critica perché, mentre da un lato si pone come possibile soluzione per l'Europa dalle importazioni extra-UE, dall'altro si trova in un contesto in continua evoluzione pieno di insidie e incertezze.

L'analisi svolta accerta ulteriormente il ruolo strategico del giacimento di Fen nel costruire un'autonomia industriale, nel settore delle terre rare, all'interno del continente

europeo. Vi è una combinazione tra risorse geologicamente rilevanti, infrastrutture emergenti e posizione favorevole che permette di porre le basi per un'industria ad alto tasso tecnologico. Il successo di questo progetto dipenderà però dalla capacità di affrontare tutte le differenti criticità strutturali. Se sarà sostenuto da una strategia industriale coerente, Fen potrà rappresentare un importante punto di riferimento per la costruzione di nuove filiere europee delle terre rare.

# **CAPITOLO 3 – ANALISI ECONOMICO- QUANTITATIVA DEL GIACIMENTO DI FEN E IMPLICAZIONI PER L’INDUSTRIA EUROPEA DELLE TERRE RARE.**

Con il presente capitolo, si propone di valutare il potenziale strategico del giacimento di Fen e l'impatto di questo nel contesto europeo delle terre rare e sul mercato globale. Attraverso un'analisi prospettica dei ricavi e del ritorno sull'investimento è analizzata la capacità del progetto di contribuire in maniera concreta alla riduzione della dipendenza dell'UE da fornitori esterni e al rafforzamento di una catena di approvvigionamento europea.

## **3.1 Quantificazione delle risorse e vita utile del giacimento**

### **3.1.1 Stima del volume estraibile di ossidi di terre rare**

Il giacimento di Fen, situato nella contea di Telemark in Norvegia sud-orientale, è attualmente considerato il più grande deposito di terre rare conosciuto in Europa. Secondo le prime stime preliminari effettuate nel 2024 da *Rare Earths Norway* (REN), redatte in collaborazione con *WSP Norge* e conformi allo standard JORC, le risorse minerarie totali ammontano a circa 559 milioni di tonnellate con una concentrazione media di 1,57% di ossidi di terre rare (TREO). (*Rare Earths Norway & WSP Norge, 2024*)

Utilizzando questa percentuale si può andare quindi a calcolare il volume di terre rare potenzialmente presenti all'interno del giacimento.

Quantità TREO = 0,0157 x 559.000.000 = 8.768.300 tonnellate di TREO.

Tuttavia, non può essere recuperato tutto il contenuto minerale; il report di REN stima un tasso di recupero intorno al 70% sulla base di test tecnici ancora in corso.

Per fornire una migliore visione, possiamo altresì considerare un tasso potenziale di recupero dell'85%, in linea con la letteratura tecnica (*Talens Peirò & Villalba Méndez, 2013*) e ipotizzando miglioramenti tecnologici.

Quantità TREO (70%) = 8.768.300 x 0,70 = 6.150.410 tonnellate

Quantità TREO (85%) = 8.768.300 x 0,85 = 7.468.355 tonnellate

Nel proseguo dell'analisi verranno considerati entrambi gli scenari andando ad evidenziare l'elasticità delle stime in funzione dell'efficienza estrattiva. Questa composizione conferma ulteriormente l'importanza strategica del giacimento data l'importanza delle terre rare magnetiche per la produzione di tecnologie critiche.

### 3.1.2 Composizione del giacimento: focus sulle terre rare magnetiche

Il valore strategico di un giacimento di terre rare dipende non solo dalla quantità totale di TREO, ma anche dalla qualità di questi. Le terre rare magnetiche, principalmente neodimio (Nd) e praseodimio (Pr), entrambe appartenenti alla famiglia delle terre rare leggere (LREE), sono di cruciale importanza sia per la transazione energetica che digitale poiché impiegate all'interno di magneti permanenti ad alte prestazioni che possiamo trovare all'interno di veicoli elettrici, turbine eoliche e dispositivi elettronici. (*Ganguli & Cook, 2018*)

Come detto, lo 0,26% del materiale presente all'interno del deposito di Fen è rappresentato da Nd e Pr e, rapportando questo valore all'1,57% relativo alla concentrazione di TREO del giacimento, equivale a circa il 17% del totale ((0,26/1,57) = 16,56%). dei TREO presenti nel complesso di Fen.

In termini quantitativi, considerando i valori di TREO recuperabili stimati nel paragrafo precedente, la quantità di terre rare magnetiche recuperabili può essere stimata tra:

REE magnetiche (70%) = 6.150.410 x 0,17 = 1.045.570 tonnellate

REE magnetiche (85%) = 7.468.355 x 0,17 = 1.269.620 tonnellate

Questa disponibilità risulta un caso eccezionale all'interno del panorama occidentale andando a mettere ulteriormente in luce l'importanza strategica del giacimento di Fen nel rafforzare la stabilità della catena di approvvigionamento europea per le terre rare.

### 3.1.3 Stima della vita utile operativa: scenari produttivi e *benchmark* globali

La vita utile di un giacimento rappresenta la sua durata operativa ed è un indicatore rilevante per la valutazione economica di un progetto minerario. La vita utile non dipende unicamente dal volume di risorse estraibile, bensì bisogna considerare altri fattori tra cui: i tassi annui di produzione, l'efficienza del recupero e la configurazione del sistema produttivo. Il volume netto di TREO recuperabili nel giacimento di Fen, in base al tasso di recupero considerato, compreso tra il 70% e l'85%, varia tra 6,15 e 7,47 milioni di tonnellate. Per andare però a calcolare una stima veritiera su quella che potrà essere la vita utile dobbiamo andare a confrontare i dati ipotizzati con dei dati realistici di progetti già attivi. Il progetto già attivo, preso in considerazione, è quello relativo al giacimento di *Mount Weld* in Australia, gestito dalla compagnia mineraria *Lynas*, e considerato uno dei siti più avanzati per l'estrazione di terre rare al di fuori della Cina. (*Lynas Rare Earths, n.d.*)

Secondo le stime più recenti del *Lynas Report 2024*, le riserve minerarie aggiornate ammontano a circa 2 milioni di tonnellate di TREO con una produzione, per l'anno considerato, pari a 10.908 tonnellate, di cui 5.655 tonnellate di Nd e Pr. Nonostante vi sia già un'infrastruttura esistente e consolidata, *Lynas* utilizza una strategia produttiva prudente in relazione alla quantità di riserve disponibili. Nel caso del giacimento di Fen, in assenza di una filiera mineraria preesistente, appare dunque necessario evitare sovrastime. Di seguito si propongono quindi tre scenari graduati e coerenti con le capacità tecniche attese che saranno ripresi anche nel paragrafo successivo:

- Scenario prudente → 5.000 tonnellate/anno di TREO
- Scenario intermedio → 10.000 tonnellate/anno di TREO
- Scenario ottimistico → 15.000 tonnellate/anno di TREO

Possiamo altresì stimare la vita utile delle componenti Nd e Pr (*Tabella 3*) così da isolare il potenziale produttivo caratterizzato da un importante valore strategico:

*Tabella 3 “Stima della vita utile associata alla componente Nd-Pr del giacimento di Fen in diversi scenari produttivi considerando i due diversi tassi di recupero (70% e 85%)”*

		NdPr (70%)	NdPr(85%)
<b>Vita utile componente Nd-Pr</b>		1.045.570	1.269.620
Scenario	Output TREO (t)	NdPr (t)	Vita utile TREO
Prudente	5.000	850	<b>1230,08</b>
Intermedio	10.000	1700	<b>615,04</b>
Ottimistico	15.000	2550	<b>410,02</b>

I valori molto elevati ottenuti delle vite utili stimate sono da ricondurre all'elevatissima ampiezza del giacimento rispetto alla produzione annuale prevista. Senza un'elevata pressione estrattiva, impossibile a causa di limiti strutturali e vincoli ambientali, il sito di Fen potrebbe adottare una strategia graduale che gli permetterebbe di ottenere una posizione stabile pluridecennale all'interno delle catene di approvvigionamento europee. Dunque, solamente con un approccio prudente e progressivo si potrà convertire l'elevato potenziale del giacimento in produzione sostenibile e duratura andando così a costituire una riserva strategica flessibile secondo le evoluzioni della domanda.

### 3.2 Proiezioni economiche: ricavi, investimenti e *break even*

#### 3.2.1 Simulazione dei ricavi annui in diversi scenari di prezzo e output

Andare a stimare i ricavi che il giacimento di Fen riuscirebbe a generare rappresenta un passaggio chiave per la valutazione della sua sostenibilità economica e del suo contributo potenziale alla comunità europea. La simulazione proposta è basata su 3 differenti scenari produttivi (prudente, intermedio e ottimistico) incrociati con un'analisi di sensitività rispetto ai prezzi di mercato delle terre rare magnetiche (Nd e Pr) che costituiscono il 17% del totale dei TREO presenti nel giacimento. L'analisi proposta si concentra su questi due elementi perché rappresentano la componente più rilevante dal punto di vista economico

all'interno del gruppo delle REE e sono inoltre caratterizzate da un prezzo di mercato significativamente più elevato rispetto alle altre terre rare leggere.

Per ciascuno scenario è stato calcolato il ricavo annuo derivante dalla vendita del solo contenuto di Nd e Pr utilizzando la seguente formula:

$$\text{RICAVO Nd-Pr} = \text{Output TREO annuo (t)} \times 17\% \times P \text{ Medio NdPr (USD/Kg)} \times 1.000$$

La moltiplicazione finale per 1.000 è resa necessaria per andare a convertire le tonnellate in chilogrammi poiché il prezzo di riferimento degli elementi è espresso in USD/Kg e, senza questa conversione le unità di misura non sarebbero coerenti.

I tre diversi livelli di *output* utilizzati per la simulazione rispecchiano tre diversi scenari:

- Scenario prudente → 5.000 tonnellate/anno di TREO
- Scenario intermedio → 10.000 tonnellate/anno di TREO
- Scenario ottimistico → 15.000 tonnellate/anno di TREO

Gli *output* sono stati deliberatamente scelti su una scala contenuta considerando diversi fattori. A differenza di siti minerari già consolidati come quello di *Mount Weld* che, nel 2024, ha prodotto circa 10.900 tonnellate di REO (*Lynas*, 2024), il giacimento di Fen si trova attualmente in una fase di sviluppo preliminare senza impianti industriali operativi. Ipotizzare dunque *output* di 5.000, 10.000 e 15.000 tonnellate annue permette di modellare scenari più verosimili e coerenti con un avvio graduale della produzione e con le necessità ambientali di un progetto situato in un paese caratterizzato da forti norme ambientali.

La simulazione dei ricavi (*Tabella 4*) si basa su tre ipotesi di prezzo medio per il Nd e il Pr, espresse in dollari USA per chilogrammo (USD/kg). I valori selezionati sono i seguenti:

- 35 USD/kg → scenario ribassista
- 44 USD/kg → scenario intermedio (prezzo medio 2024)
- 75 USD/kg → scenario rialzista

Il prezzo medio di 44 USD/kg è indicato all'interno dell'*Annual report* 2024 di *Lynas*. Lo scenario ribassista di 35 USD/kg simula una riduzione di circa il 20% rispetto al livello attuale e, questa flessione, è coerente con la volatilità che si è registrata negli ultimi anni

nel mercato. Infatti, considerando il livello del prezzo medio per Nd e Pr nel 2023, pari a 60,4 USD/kg, in un solo anno vi è stata una contrazione del prezzo del 27%. Lo scenario rialzista di 75 USD/kg invece è giustificato dall'andamento storico dei prezzi registrato nel *Lynas Annual Report 2022*. In quell'anno, il prezzo del NdPr sul mercato cinese è passato da 64,7 USD/kg a giugno 2021 a 124,0 USD/kg a giugno 2022 andando a registrare un incremento di quasi il 100% in dodici mesi. Questa oscillazione conferma ulteriormente la volatilità strutturale del mercato delle terre rare, esposto a fattori di natura geopolitica, industriale e ambientale. L'utilizzo di 75 USD/kg rappresenta un'ipotesi prudente per uno scenario di mercato favorevole visti i precedenti prezzi raggiunti. La scelta dei dati dei report *Lynas* come unici riferimenti è dovuta al fatto che questi rappresentano uno dei pochi casi reali, stabili e documentati nel settore delle terre rare magnetiche e ciò consente di basare la simulazione su valori osservabili e non teorici.

*Tabella 4 “Proiezione dei ricavi annui in USD per il contenuto NdPr del giacimento Fen”*

Prezzi (USD/kg)

Scenario	Output TREO(t)	NdPr (t)	\$ 35,00	\$ 44,00	\$ 75,00
Prudente	5.000	850	<b>\$ 29.750.000,00</b>	<b>\$ 37.400.000,00</b>	<b>\$ 63.750.000,00</b>
Intermedio	10.000	1700	<b>\$ 59.500.000,00</b>	<b>\$ 74.800.000,00</b>	<b>\$ 127.500.000,00</b>
Ottimistico	15.000	2550	<b>\$ 89.250.000,00</b>	<b>\$ 112.200.000,00</b>	<b>\$ 191.250.000,00</b>

La tabella mostra i ricavi potenziali derivanti dalla vendita della quota di NdPr (17% del contenuto di TREO nel giacimento di Fen) nei tre differenti scenari sopra elencati e considerando i tre diversi livelli di prezzo. L'analisi rivela due importanti relazioni lineari:

- linearità della crescita dei ricavi rispetto all'*output*; a parità di prezzo (per esempio consideriamo 44 USD/kg), il raddoppio dell'*output* da scenario prudente a

scenario intermedio comporta un raddoppio dei ricavi. Allo stesso modo un aumento dell'*output* del 50% da uno scenario intermedio a ottimistico genera un incremento dei ricavi del 50%.

- linearità tra prezzo e ricavi; a parità di *output*, i ricavi variano in modo direttamente proporzionale al prezzo; ad esempio, nello scenario intermedio, un aumento del prezzo da 44 a 75 USD/kg (+70%) comporta un incremento proporzionale dei ricavi da 74,8 milioni a 127,5 milioni (+70%)

Nonostante la simulazione si sia concentrata soltanto sulle terre rare magnetiche, che rappresentano il 17% di TREO presenti nel giacimento di Fen, il restante 83% è composto da altre terre rare leggere come lantanio (La), cerio (Ce), samario (Sm) e gadolinio (Gd).  
*(Rare Earths Norway & WSP Norge, 2024)*

Questi elementi, nonostante un valore di mercato più basso rispetto a Nd e Pr, sono largamente utilizzati all'interno di applicazioni industriali come batterie, catalizzatori e dispositivi ottici. (Ganguli & Cook, 2018)

Sulla base del report 2024 di *Lynas*, questi elementi possono generare fino al 30-40% dei ricavi totali nonostante il loro valore sia inferiore. Per andare a stimare il contributo economico che questi elementi possono avere nel caso del giacimento Fen, consideriamo un valore medio di mercato di 5 USD/kg coerenti con i dati riportati dal *Mineral Commodity Summaries 2025* dello *U.S Geological Survey*.

Andando ad applicare questo valore al contenuto stimato di terre rare non magnetiche nei tre scenari produttivi simulati precedentemente, si ottengono i seguenti ricavi annui (*Tabella 5*):

*Tabella 5 “Stima dei ricavi annui derivanti dalle terre rare non magnetiche nel giacimento di Fen in diversi scenari produttivi considerando il prezzo medio di 5 USD/kg.”*

Scenario	Output TREO (t)	REE non magnetiche (t)	Prezzo (USD/kg)
			\$ 5,00
Prudente	5.000	4150	<b>\$ 20.750.000,00</b>
Intermedio	10.000	8300	<b>\$ 41.500.000,00</b>
Ottimistico	15.000	12450	<b>\$ 62.250.000,00</b>

Con questi valori si dimostra come, nonostante il prezzo delle REE non magnetiche sia di molto inferiore rispetto a quelle magnetiche, queste possono contribuire in modo rilevante alla redditività totale del progetto.

Per andare però a valutare la reale sostenibilità del giacimento di Fen, è necessario altresì considerare anche i costi operativi, gli investimenti iniziali e la redditività attesa.

### 3.2.2 Analisi del ROI

Le simulazioni effettuate hanno mostrato che il giacimento di Fen possiede un importante potenziale economico ma, per valutarne la sostenibilità, è reso necessario confrontare i ricavi attesi con i costi di investimento. A questo fine, diventa necessario andare a stimare il ritorno sull’investimento (ROI), calcolato come rapporto tra i ricavi annui stimati e il capitale inizialmente impiegato.

Prendendo in considerazione i dati rilasciati da *Rare Earths Norway*, l’investimento iniziale previsto per l’iniziazione delle attività estrattive ammonta a circa 10 miliardi di corone norvegesi (*Rare Earths Norway, 2024*) equivalenti a 960.000.000 USD. Il progetto della compagnia prevede inoltre il collegamento con l’impianto di raffinazione *REEtec*,

situato nelle vicinanze del giacimento, il che consentirebbe un risparmio significativo sui costi di trasporto. Per rendere l'analisi più chiara, nella tabella seguente viene calcolato il ROI lordo utilizzando i ricavi stimati ottenuti nei tre diversi scenari (prudente, intermedio e ottimistico) analizzati nel paragrafo precedente. Il prezzo di riferimento utilizzato per calcolare i ricavi NdPr è di 44 USD/kg cioè il prezzo medio risultante dal *Lynas Annual Report 2024*. Sulla base di questi valori è stato quindi calcolato il ROI annuo lordo considerando l'investimento iniziale fisso pari a 960 milioni di USD. (*Tabella 6*)

*Tabella 6 “Simulazione dei ricavi totali annui e del ROI lordo del giacimento di Fen per tre differenti scenari produttivi.”*

Scenario	Output TREO (t)	NdPr (t)	REE non magnetiche (t)	Ricavi NdPr (\$)	Ricavi REE non magnetiche (\$)	Ricavi totali (\$)	ROI annuo lordo
Prudente	5.000	850	4150	\$ 37.400.000,00	\$ 20.750.000,00	\$ 58.150.000,00	<b>6,06%</b>
Intermedio	10.000	1700	8300	\$ 74.800.000,00	\$ 41.500.000,00	\$ 116.300.000,00	<b>12,11%</b>
Ottimistico	15.000	2550	12450	\$ 112.200.000,00	\$ 62.250.000,00	\$ 174.450.000,00	<b>18,17%</b>

Il ROI riportato all'interno della tabella è da considerarsi lordo perché non sono considerati tutti i costi operativi annuali; si tratta quindi di una stima preliminare per confrontare la potenziale sostenibilità dei diversi livelli produttivi. L'analisi dei tre differenti scenari mostra chiaramente come la redditività del progetto sia direttamente legata all'*output* di TREO. Nello scenario prudente, infatti, con una produzione complessiva di 5.000 tonnellate, il ROI si attesta al valore di 6,06% e la sostenibilità dell'investimento sarebbe difficile da garantire. Al contrario, la situazione cambia considerando gli altri due scenari; nello scenario intermedio, il ROI aumenta a 12,11% indicando una prospettiva di rientro nel medio periodo. Nello scenario ottimistico, invece, il ROI arriva a 18,17% indicando un progetto caratterizzato da elevata attrattività

economica e in ottime condizioni di capacità produttiva. Pur trattandosi di stime preliminari e senza considerare i costi operativi, l'analisi del ROI lordo sottolinea ulteriormente che il giacimento di Fen può risultare economicamente sostenibile solamente a partire da livelli produttivi consistenti possibili solamente con il consolidamento di una filiera industriale efficiente.

### 3.3 Impatto sistemico del giacimento di Fen sul mercato e sulla strategia europea

#### 3.3.1 Riduzione della concentrazione globale e impatto sull'HHI

Il mercato globale delle terre rare è caratterizzato da una struttura quasi-monopolistica con un'elevata concentrazione dell'offerta in un unico paese, la Cina. Come mostrato nel Capitolo 1, infatti, secondo i dati dello USGS 2025, la sola Cina rappresenta circa il 68,5% della produzione mondiale di REE mentre, i successivi tre produttori (USA, Myanmar, Australia) posseggono poco più del 22%, con il restante dei paesi che detengono una quota marginale della produzione globale. Questa struttura del mercato ha determinato un valore dell'indice *Herfindahl-Hirschman* (HHI) di circa 5.250 indicando l'elevatissima concentrazione del mercato.

Per valutare l'impatto potenziale dell'ingresso del giacimento norvegese di Fen sul grado di concentrazione del mercato globale, si propone di andare ad aggiornare la tabella presentata nel Capitolo 1 con l'introduzione di una simulazione relativa alla Norvegia, stimando una produzione annua di 10.000 tonnellate di TREO, corrispondente allo scenario intermedio analizzato nel paragrafo 3.2. (*Tabella 7*)

*Tabella 7 “Simulazione della distribuzione produttiva globale delle REE con inclusione della Norvegia; Fonte: USGS 2025. Per la voce “Norvegia” è stata utilizzata una proiezione modellata sulla base dello scenario intermedio analizzato nel paragrafo 3.2.”*

Paese	Produzione mineraria	Riserve	% Produzione mineraria	% Riserve
USA	45.000	1.900.000	11,14%	1,91%
Australia	13.000	5.700.000	3,22%	5,72%
Brasile	20	21.000.000	0,00%	21,07%
Myanmar	31.000	0	7,67%	0,00%
Canada	0	830.000	0,00%	0,83%
Cina	270.000	44.000.000	66,84%	44,15%
Groenlandia	0	1.500.000	0,00%	1,51%
India	2.900	6.900.000	0,72%	6,92%
Madagascar	2.000	0	0,50%	0,00%
Malesia	130	0	0,03%	0,00%
Nigeria	13.000	0	3,22%	0,00%
Russia	2.500	3.800.000	0,62%	3,81%
Sud Africa	0	860.000	0,00%	0,86%
Tanzania	0	890.000	0,00%	0,89%
Thailandia	13.000	4.500	3,22%	0,00%
Vietnam	300	3.500.000	0,07%	3,51%
Altri	1.100	0	0,27%	0,00%
<b>NORVEGIA</b>	<b>10.000</b>	<b>8.768.300</b>	<b>2,48%</b>	<b>8,80%</b>
<b>Totale mondiale</b>				
(arrotondato)	403.950	99.652.800	100,00%	100,00%

La metodologia seguita per calcolare l’HHI è la medesima utilizzata nel Capitolo 1, dove l’indice è determinato sommando i quadrati delle quote di mercato espresse in forma decimale. In questa nuova configurazione del mercato, l’indice si attesta su un valore di 0,469, ovvero 4.690 su scala 10.000. Questo valore è in lieve calo rispetto al valore del medesimo indice calcolato nel Capitolo 1 ( $4920-4690=230$ ). Nonostante, quindi, il mercato resti decisamente concentrato, questa riduzione offre un primo risultato di deconcentrazione consequenziale all’ingresso potenziale del giacimento di Fen. L’introduzione della Norvegia, con una quota di mercato stimata del 2,48% della

produzione globale, rappresenta un importante esempio di come l'attivazione di nuovi attori possa ridurre la dipendenza dalla Cina. Se il progetto di Fen dovesse riuscire a raggiungere lo scenario ottimistico (15.000 tonnellate annue di TREO), la quota di mercato aumenterebbe ulteriormente riducendo altresì l'HHI. Nonostante ciò, questo scenario non è stato approfondito poiché si basa su un livello ottimo teorico e non ancora supportato da infrastrutture operative. L'analisi si è concentrata sullo scenario intermedio perché più realistico nel medio termine e coerente con la situazione di inizializzazione del progetto e con i vincoli ambientali norvegesi. Tuttavia, nonostante la maggior prudenza, anche lo scenario intermedio dimostra come l'attivazione del giacimento di Fen possa avere un impatto significativo per un mercato più diversificato e competitivo, contribuendo alla costruzione di un'autonomia strategica europea.

### 3.3.2 Contributo strategico del giacimento di Fen alla domanda europea

Il giacimento di Fen rappresenta dunque un'opportunità concreta per rafforzare l'approvvigionamento europeo di terre rare strategiche, in particolare neodimio (Nd) e praseodimio (Pr), entrambi utilizzati nella produzione di magneti permanenti per veicoli elettrici, turbine eoliche e tecnologie digitali. (*Ganguli & Cook, 2018*)

Secondo i dati forniti dal *Joint Research Centre* della Commissione Europea, che presenta due diversi scenari, in uno scenario ad alta domanda (HDS), la domanda totale di Nd e Pr per l'UE e il Regno Unito, nel 2030, potrebbe raggiungere le 54.000 tonnellate (43.891 t di Nd e 10.117 t di Pr). Nello scenario caratterizzato da bassa domanda (LDS), invece, la domanda complessiva si attesterebbe a 21.000 tonnellate. (*Tabella 8*) (*European Commission, JRC, 2020*)

*Tabella 8 “Dati previsionali estratti da European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2020): Forecast of rare earths supply and demand - wind energy and e-mobility. European Commission, Joint Research Centre (JRC)”*

Paesi	Settore	Materiale	Scenario	Variabile	Unità	2025	2026	2027	2028	2029	2030
EU 27 + UK	Tutti	Nd	LDS	Annual demand	t/yr	14835,6	15306,7	15786,7	16275,8	16774,2	<b>17243,9</b>
EU 27 + UK	Tutti	Nd	HDS	Annual demand	t/yr	27337,8	30147,2	33173,6	36438,2	39963,9	<b>43891,3</b>
EU 27 + UK	Tutti	Pr	LDS	Annual demand	t/yr	3460,4	3574,0	3689,5	3807,0	3926,6	<b>4038,8</b>
EU 27 + UK	Tutti	Pr	HDS	Annual demand	t/yr	6300,9	6946,9	7643,2	8394,7	9207,0	<b>10117,3</b>

Sulla base delle simulazioni effettuate all'interno del paragrafo 3.2, considerando lo scenario intermedio (10.000 t di TREO annui di cui 17% NdPr), il giacimento di Fen potrebbe produrre annualmente 1.700 tonnellate di NdPr contribuendo a soddisfare parzialmente la domanda europea. Considerando lo scenario HDS, la domanda che andrebbe a soddisfare si attesterebbe a circa il 3% ( $1.700 / 54.000 \times 100 = 3,15\%$ ) mentre, prendendo in considerazione lo scenario LDS, la domanda soddisfatta dal giacimento aumenterebbe fino a circa l'8% ( $1.700 / 21.300 \times 100 = 7,98\%$ ). Il contributo del giacimento di Fen, dunque, pur non risolvendo completamente il problema della dipendenza europea, acquista un importantissimo valore strategico perché rappresenta uno dei pochi progetti con un importante potenziale industriale. Inoltre, l'attivazione del giacimento, aiuterebbe l'UE ad avvicinarsi a due obiettivi strategici stabiliti nel *Critical Raw Materials Act*:

- Almeno il 10% del consumo annuo dell'UE derivante direttamente da estrazione interna.
- Almeno il 40% delle materie che consuma devono essere lavorate in stabilimenti europei.

Tutto ciò, fa di Fen, non solo un attore utile per diversificare l'offerta globale, ma anche un importante progetto per concretizzare l'attuazione della strategia europea sulle materie prima critiche.

L'analisi condotta nel capitolo evidenzia dunque come, il giacimento di Fen, considerando uno scenario intermedio, possa contribuire sia a generare un ritorno economico positivo e contemporaneamente a ridurre, seppur leggermente, la concentrazione globale di mercato. Inoltre, nonostante non sia sufficiente a coprire tutto il fabbisogno dell'UE, rappresenta un tassello di fondamentale importanza per la costruzione di una filiera europea.

### 3.4 Integrazione dei criteri ESG e sostenibilità del progetto

Dimensione rilevante per la valutazione complessiva del progetto di Fen è senz'altro quella riguardante l'integrazione dei criteri ESG (*Environmental, Social, Governance*), considerati oggi fondamentali nella definizione della sostenibilità di un'iniziativa

estrattiva. Il giacimento di Fen, pur presentando un ampio potenziale strategico in materia di terre rare, deve necessariamente tenere conto della crescente pressione normativa, finanziaria e sociale connessa alla sostenibilità ambientale e sociale delle attività estrattive. In particolar modo, il rispetto degli standard ambientali norvegesi ed europei, le aspettative della comunità locale dei *Sámi* e l'adozione di pratiche industriali sostenibili, sono fattori che possono incidere in modo significativo sui tempi, sui costi di implementazione e sull'accesso ai finanziamenti pubblici e privati.

La conformità ai criteri ESG non è quindi solo un vincolo, ma una condizione necessaria per attirare investimenti, ridurre il rischio reputazionale e garantire la sostenibilità a lungo termine dell'iniziativa. Alla luce di ciò, la valutazione economica del progetto norvegese deve basarsi su un equilibrio tra efficienza produttiva, consenso sociale e rispetto degli standard ambientali.

# Conclusione

Il giacimento norvegese di Fen rappresenta un'opportunità strategica rilevante per l'Europa in un contesto in cui la disponibilità di terre rare è sempre più un fattore determinante per la sovranità tecnologica ed energetica. Nonostante la Norvegia non faccia parte dell'Unione Europea, la sua appartenenza allo Spazio Economico Europeo e la partecipazione attiva in iniziative europee, come l'*European Raw Materials Alliance*, rendono il suo coinvolgimento funzionale al raggiungimento degli obiettivi europei in materia di approvvigionamento sicuro e sostenibile di terre rare.

L'analisi economico-quantitativa condotta ha evidenziato come, anche in uno scenario produttivo intermedio, il giacimento di Fen sia in grado di generare un importante volume di ricavi e di contribuire alla domanda europea di terre rare magnetiche, in particolare neodimio (Nd) e praseodimio (Pr), elementi chiave per la transizione *green* e digitale. L'attivazione del progetto, inoltre, contribuirebbe alla riduzione dell'attuale indice di *Herfindahl-Hirschman*, segnalando così il suo potenziale nel riequilibrare, almeno parzialmente, la struttura di quasi-monopolio del mercato globale dominato dalla Cina.

Tuttavia, considerando una proiezione simile, non si può ignorare una riflessione sulle filiere industriali europee. Attualmente l'Europa si trova in una situazione di difficoltà non solo per la scarsità di risorse primarie critiche, ma anche per la carenza di infrastrutture nella fase *downstream*, ovvero nelle attività di lavorazione, raffinazione e integrazione delle terre rare nei processi industriali, ancora fortemente dipendenti da operatori extra-UE. In questo contesto, il progetto di Fen appare fortemente legato sia all'andamento della domanda che alla capacità del continente di sviluppare una filiera integrata e competitiva. La redditività del progetto dipenderà, infatti, dall'accesso a clienti stabili e da politiche industriali in grado di incentivare il *reshoring*.

In parallelo, la sostenibilità del progetto deve essere anche valutata in termini ambientali e sociali. L'adesione ai criteri ESG costituisce una condizione imprescindibile per ottenere legittimità e per rispondere alle aspettative delle comunità locali. Inoltre, l'adeguamento agli stringenti standard ambientali norvegesi, comporta sfide in termini di costi e tempi, ma al contempo rappresenta un'opportunità per fare del progetto di Fen un punto di riferimento nell'estrazione responsabile.

In conclusione, Fen non è la soluzione definitiva al problema della dipendenza europea dalle importazioni di terre rare, ma rappresenta un primo passo verso un nuovo paradigma industriale. La riuscita del progetto dipenderà dalla capacità di costruire un'infrastruttura integrata, di sviluppare mercati interni in grado di assorbire la produzione, e di mantenere coerenza tra ambizione strategica, sostenibilità e realismo industriale. Se tali condizioni saranno soddisfatte, con cooperazione tra istituzioni, imprese e territori, il progetto norvegese potrà ricoprire un ruolo trainante nella trasformazione delle politiche sulle materie prime critiche.

# Bibliografia e sitografia

About REEtec. <https://www.reetec.no/about>

Castro, L., Farkas, J., Jenssen, B. M., Piarulli, S., & Ciesielski, T. (2023). Biomonitoring of rare earth elements in Southern Norway: Distribution, fractionation, and accumulation patterns in the marine bivalves *Mytilus* spp. and *Tapes* spp.

Critical Raw Materials Act. (n.d.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-rare-materials/critical-rare-materials-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-rare-materials/critical-rare-materials-act_en)

European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2020): Forecast of rare earths supply and demand - wind energy and e-mobility. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/aa1fc9e1-360d-478e-a6da-51b092f30d32>

European Raw Materials Alliance (ERMA). (2024, January 4). Network - European Raw Materials Alliance (ERMA). <https://erma.eu/network/>

European Raw Materials Alliance. (n.d.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-rare-materials-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-rare-materials-alliance_en)

Europe's largest deposit of rare earth elements discovered at Fen, Norway. (2024, June 6). REE. <https://rareearthsnorway.com/europe-s-largest-deposit-of-rare-earth-elements-discovered-at-fen-norway>

Eurostat. (2024, November 12). Trade in rare earth elements decreased in 2023. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/products-eurostat-news/-/ddn-20241112-1>

FIRESTONE, M. D., & GAROFALO, J. (2022). An analysis of the current global market for rare earth elements. University of Wyoming, School of Energy Resources.

Ganguli, R., Cook, D.R. Rare earths: A review of the landscape. MRS Energy & Sustainability 5, 6 (2018)

Henrik Schiellerup (2024), Raw material activities in Norway with emphasis on rare earth elements, Geological Survey of Norway, presentazione alla Camera dei Deputati italiana – Commissione Affari Esteri, 17 dicembre 2024

International Energy Agency (2022), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

LKAB. (2024, February 28). LKAB new main owner in REEtec AS, building rare earths industry. <https://lkab.com/en/press/lkab-becomes-largest-owner-in-reetec-as-builds-a-strong-nordic-industry-for-rare-earth-elements/>

Ltd, S. . C. (2022, February 10). Metodo di preparazione delle terre rare <https://it.sscmaterials.com/news/preparation-method-of-rare-earth-purification-55824499.html>

Lynas Rare Earths. <https://lynasrareearths.com/>

Lynas. (2022). Lynas Annual Report 2022. <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/annual-reports/>

Lynas. (2024). Lynas Annual Report 2024. <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/annual-reports/>

Mancheri, N. A., Sprecher, B., Bailey, G., Ge, J., & Tukker, A. (2018). Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources Conservation and Recycling*, 142, 101–112

Massari, S., & Ruberti, M. (2012). Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38(1), 36–43.

McKinsey & Company (2022), The raw-materials challenge: How the metals and mining sector will be at the core of enabling the energy transition, p. 9. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-raw-materials-challenge-how-the-metals-and-mining-sector-will-be-at-the-core-of-enabling-the-energy-transition>

Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, Seabed Minerals Act (2020)

Norwegian Ministry of Trade, Industry and Fisheries, Norwegian Mineral Strategy 2023

Rare Earths Norway & WSP Norge, Fen Mineral Resource Statement Summary, Technical Memorandum No. 70121448-100-TM-RevA, giugno 2024.  
[https://rareearthsnorway.com/uploads/assets/70121448-100-TM-RevA-REN\\_MRE\\_Statement\\_One\\_Pager\\_landscape\\_signed.pdf](https://rareearthsnorway.com/uploads/assets/70121448-100-TM-RevA-REN_MRE_Statement_One_Pager_landscape_signed.pdf)

REEtec raises NOK 1200 million for first industrial plant. (n.d.).  
<https://www.reetec.no/artikler/reetec-raises-nok-1200-million-for-first-industrial-plant>

Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G. Material and Energy Requirement for Rare Earth Production. JOM 65, 1327–1340 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0719-8>

The European Critical Raw Materials Board. (n.d.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-rare-materials/critical-rare-materials-act/board\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-rare-materials/critical-rare-materials-act/board_en)

The Fen Carbonatite Complex. (2022, November 24). REE.  
<https://rareearthsnorway.com/the-fen-carbonatite-complex>

Tipi di Metodi di estrazione. (n.d.). In Cummins Inc.  
<https://www.cummins.com/it/engineering/mining/types-of-mining>

U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2020>

U.S. Geological Survey, 2025, Mineral commodity summaries 2025 (ver. 1.2, March 2025): U.S. Geological Survey, 212 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2025>

UNEP (2020), Managing Environmental Risks of Rare Earth Extraction

V. Balaram, 2022. "Sources and applications of rare earth elements", Environmental Technologies to Treat Rare Earth Element Pollution: Principles and Engineering, Arindam Sinharoy, Piet N.L. Lens

Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 7(11), 203.  
<https://doi.org/10.3390/min7110203>