



# Technisches Update aus Geretsried

## Was wir entwickelt haben, was wir gelernt haben und wie es weitergeht

*Von Matt Toews, Mitgründer und Chief Technology and Operating Officer bei Eavor*

*In den letzten Jahren waren wir die meiste Zeit mit der Entwicklung unseres Projekts beschäftigt, anstatt viel zu reden. Aktuell befindet sich Eavor im Übergang von der Technologieentwicklung hin zu einer groß angelegten Kommerzialisierung als Technologielizenzgeber: Und da ist es an der Zeit, etwas mehr über unser Geschäft zu erzählen. Die vorliegende ausführliche Analyse leitet diesen Wandel ein.*

*Der vorliegende und alle folgenden Artikel beschäftigen sich mit der Konstruktion dieses Projekts, mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen, der Entwicklung dieser Technologie, der Vermarktung unseres Produkts und mit unserem Grund zu glauben, dass das Konzept des geschlossenen Geothermie-Systems in das globale Energiesystem der Zukunft passt. Unser Ziel dabei ist es, eine technische und kommerzielle Perspektive zu vermitteln, die auf Erfahrungen aus erster Hand beruht.*

*Dieses technische Update hat das Projekt in Geretsried zum Schwerpunkt: was wir technisch erreicht haben, mit welchen Herausforderungen wir konfrontiert waren und warum wir glauben, dass dieses Projekt die Zukunft der Geothermie auch in kommerzieller Hinsicht wesentlich verändert.*

### **Kurzfassung**

Die Technologie von Eavor ist das, was viele als den „heiligen Gral“ der Energie bezeichnen würden: eine Technologie, die wettbewerbsfähig, sicher, geografisch skalierbar, regelbar, lokal verfügbar und kohlenstoffarm ist – und das alles gleichzeitig.

Und diese Technologie funktioniert: Das haben wir bereits mit dem ersten Loop in Geretsried unter Beweis gestellt. Für Fernwärmeanwendungen oder in bestimmten Energiemärkten kann sie heute wettbewerbsfähig eingesetzt werden. Und unsere Vision

„Geothermie überall“ (<75 US-Dollar/MWh Stromkosten in durchschnittlichen geothermischen Gradienten) treiben wir entschlossen voran, indem wir die typische Lernkurve weiterverfolgen und den Ausbau des Eavor-Loop™ noch weiter in die Tiefe verlagern.

## Was wir tun und warum

Die Welt hat einen wachsenden Bedarf an Energiesystemen, die sicher, skalierbar, regelbar, lokal verfügbar und kohlenstoffarm sind – und das alles gleichzeitig. Und auch wenn dies eine zentrale Herausforderung für unsere Gesellschaft ist, gibt es nur sehr wenige Technologien, die realistisch alle diese Anforderungen gleichzeitig erfüllen können.

Eavor ist eine davon. Wir haben es uns zum Ziel gesetzt, saubere geothermische Energie fast überall bereitzustellen.

Unser Ansatz basiert auf einem standardisierten geothermischen Kreislaufsystemen (dem sogenannten „Eavor-Loop™“), das nicht auf seltene geologische Hotspots, durchlässige Reservoirs oder hydrothermale Ressourcen angewiesen ist. Stattdessen fungiert ein Eavor-Loop™ als großflächiger unterirdischer Wärmetauscher, im Grunde ein unterirdischer Heizkörper, der tief in der Erdkruste hineingebaut wird.

Der wichtige Unterschied besteht hierbei darin, dass das System in einem breiten Spektrum geologischer Bedingungen funktioniert, die in weiten Teilen der Welt und nicht nur an außergewöhnlichen Geothermie-Standorten vorherrschen.

Das schafft auch ganz andere Möglichkeiten zur Vermarktung. Dieselbe Kerntechnologie kann von Fernwärmeanlagen für kleine Gemeinden bis hin zu Multi-Gigawatt-Projekten für Industrieanlagen und Rechenzentren eingesetzt werden.

Ebenso wichtig ist, dass die Technologie viele der Einschränkungen vermeidet, denen andere großtechnische Energielösungen unterliegen. Hier kommen nicht dieselben regulatorischen Bedenken oder Anliegen von Interessengruppen zum Tragen wie bei SMR-Kernkraftwerken. Wir sind nicht auf Fracking angewiesen. Der Wasserverbrauch ist sehr gering. Die Oberflächenlandnutzung ist begrenzt. Wir verwenden keine Seltenerdmetalle. Wir haben keinen laufenden Brennstoffbedarf. Die Lieferkette ist vollständig in Nordamerika, Europa und Japan verankert.

Das Zusammenspiel dieser Eigenschaften verschafft uns eine technologische Vorreiterrolle. Das entspricht genau den Anforderungen des Marktes – sei es für kritische Fernwärmeinfrastrukturen oder für die Grundlastversorgung der deutschen Gesellschaft, Strom für Japan oder Strom für globale Rechenzentren. In vielerlei Hinsicht ist die Eavor-

Technologie mit der Fusionsenergie vergleichbar, mit einem entscheidenden Unterschied: Die Technologie von Eavor ist heute einsetzbar.

Solche Behauptungen rufen natürlich Skepsis hervor, und das zu Recht. Mehrere Artikel und Analysen haben sich an einer Bewertung der Technologie und Wirtschaftlichkeit von Eavor versucht – oft ohne Zugang zu den zugrunde liegenden technischen, kommerziellen oder sonstigen relevanten Informationen in diesem Kontext. Wir hoffen, dass dieses breit angelegte Update nützliche Informationen zur Erstellung künftiger Analysen liefert.

Hierbei sollte man sich drei Hauptfragen stellen. Das vorliegende Update geht ausführlich auf die erste Frage ein, während die zweite und dritte Frage nur kurz angerissen werden (weitere Updates zu diesen Fragen folgen).

1. Funktioniert die Technologie?
2. Wie hoch sind die Energiekosten heute und wie werden sie sich in Zukunft entwickeln?
3. Kann Eavor realistischerweise in globalem Maßstab eingesetzt werden?

Kurz gesagt:

1. **Ja.** Wir haben die Einsatzfähigkeit der Kerntechnologie bereits in größerem Umfang unter Beweis gestellt. Jedes von uns gebohrte Lateralpaar hat die gleiche Größe für große kommerzielle Projekte. Das System funktioniert.
2. **Aus wirtschaftlicher Perspektive sind wir bereits wettbewerbsfähig.** Das gilt im europäischen Fernwärmemarkt sowie in bestimmten Strommärkten mit hohen Gradienten, basierend auf der Leistung der letzten beiden in Geretsried gebohrten Lateralpaare. Durch die Nutzung der Lernkurve (Wrightsches Gesetz) und die Weiterentwicklung der bestehenden Tiefbohrtechnologie haben wir eine klare Perspektive, um *in durchschnittlichen geothermischen Gradienten überall wettbewerbsfähig zu sein (weniger als 75 US-Dollar/MWh Strompreis).*
3. **Ja, indem wir die bestehenden Lieferketten und ein globales Partnernetzwerk nutzen.** Eine der wichtigsten Voraussetzungen dafür ist das Geschäftsmodell von Eavor zur Lizenzierung von Technologien. Indem wir mit Partnern von Weltrang zusammenarbeiten, können wir vorhandene globale Kapazitäten, Lieferketten und betriebliches Fachwissen nutzen, anstatt zu versuchen, alles selbst aufzubauen.

## Funktioniert die Technologie?

### Projektübersicht Geretsried

Geretsried ist unser erstes Eavor-Loop™ -Projekt im kommerziellen Maßstab. Es befindet sich auf dem Gelände eines gescheiterten konventionellen Geothermieprojekts in Bayern. Bei früheren Bohrungen wurde versucht, heißes Wasser aus dem Untergrund zu gewinnen, wobei sich herausstellte, dass das Gestein zwar „heiß, aber trocken“ war. Das ist ein entscheidender Vorteil der Eavor-Loop™ -Technologie, da sie geothermische Energie in Gebieten gewinnt, wo dies bisher als unmöglich galt (oder sich in diesem Fall als unmöglich erwiesen hat).

Geretsried ist unser „FOAK“-Projekt (First-of-a-kind = das Erste seiner Art). FOAK ist ein Begriff aus der Clean-Tech-Branche, der die sehr schwierige Herausforderung beschreibt, das erste Projekt mit einer neuen Technologie zu finanzieren und umzusetzen. Dieses Unterfangen ist kapitalintensiv, und allein die Größenordnung bringt bei neuen Technologien schon ihre eigenen Schwierigkeiten mit sich.

Zuvor hatten wir bereits „Eavor-Lite“ gebaut, ein Demonstrationsprojekt als Machbarkeitsnachweis in Alberta, Kanada. Geretsried bringt das System als FOAK-Feldumsetzung in den kommerziellen Maßstab.

Geretsried war ursprünglich für vier Eavor-Loops™ mit jeweils 12 Lateralpaaren von ca. 6 km Länge ausgelegt, woraus sich eine gesamtheitliche Aufschlusslänge im Wärmereservoir von ca. 72 km ergibt. Diese Eavor-Loops™ sollten die umliegenden Gemeinden mit Wärme und Strom versorgen. Wie bereits bekannt gegeben, wurde das Projekt für eine elektrische Nennleistung von 8,2 MW (64 MW thermisch) ausgelegt, und die Oberflächenanlage wurde entsprechend konzipiert.

Die von den Eavor-Loops™ erzeugte Wärme wird entweder an das Kraftwerk oder an Fernwärmeabnehmer weitergeleitet. In den ersten Jahren wird die gesamte aus der Erde gewonnene Wärme in das ORC-Kraftwerk geleitet und in Strom umgewandelt. Die Wärme aus dem Projekt wird schließlich an verschiedene Abnehmer verkauft, darunter auch die Gemeinde Geretsried. Fernwärmeversorgungsunternehmen übernehmen jedoch in der Regel keine Errichtung kritischer Infrastrukturen mit neuen Technologien, die nicht risikoreduziert sind. Daher kommt dem Machbarkeitsnachweis der Technologie und der Risikoreduzierung der „Ressource“ im Rahmen eines FOAK-Loops auch eine so große Bedeutung zu.

Geretsried dient drei strategischen Zielen, die im Folgenden beschrieben werden. Sie wurden alle erreicht.

Zielsetzung	Ergebnisse
<p>1. Machbarkeitsnachweis der Technologie in einem sinnvollen Ausmaß</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrungen in &gt;8 km MD-Tiefe unter Verwendung der proprietären Eavor-Link™ Active Magnetic Ranging-Technologie (AMR)</li> <li>• Aktiv gekühlte Bohrwerkzeuge mit proprietärem isoliertem Bohrgestänge</li> <li>• Abgedichtete Bohrlochwände mit dem proprietären Rock-Pipe™-System</li> <li>• Mehrere Ablenkeile gesetzt und wieder ausgebaut</li> <li>• Erwartete Wärmeleistung erreicht und Strom erfolgreich erzeugt</li> </ul>
<p>2. Aufzeigen des Einstiegspunkts der Lernkurve für den europäischen Wärmemarkt</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unter Berücksichtigung von Bohrleistung und -kosten der letzten beiden Lateralpaare können wir heute auf dem europäischen Wärmemarkt wettbewerbsfähig agieren.</li> </ul>
<p>3. Nachweis der Dynamik der Lernkurve durch wiederholte Ausführung</p> <p>Dies ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zur allgemeinen Marktreife aller neuen Technologien (z. B. Schiefergas/-öl, Windkraft, Photovoltaikzellen, Batterien usw.).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wir stießen zunächst auf etliche Herausforderungen. Diese konnten wir schließlich bewältigen und eine deutliche Leistungsverbesserung nachweisen, indem wir die Zeit/Kosten für das letzte Lateralpaar um 70 % im Vergleich zum Durchschnitt der ersten vier Paare reduzierten.</li> <li>• Auf diese Weise haben wir unter Beweis gestellt, dass wir ein Lateralpaar in einem Durchgang von Anfang bis Ende bohren können.</li> <li>• Nachweis der Fähigkeit, tiefer/in heißeren Schichten bohren zu können</li> </ul>

## Durchführung von Bohrungen: Überwindung von Herausforderungen und Aufzeigen der Lernkurve

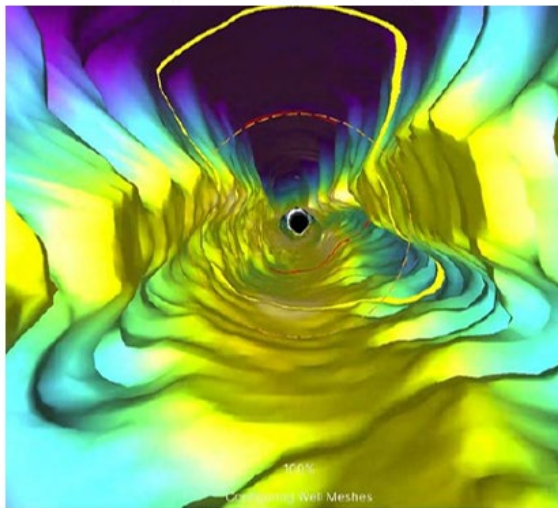
In Geretsried gab es eine Reihe von wesentlichen Herausforderungen, die alle gelöst wurden und den Verlauf der Lernkurve aufzeigten.

### Bohrlochreinigung und Bohrlochstabilität

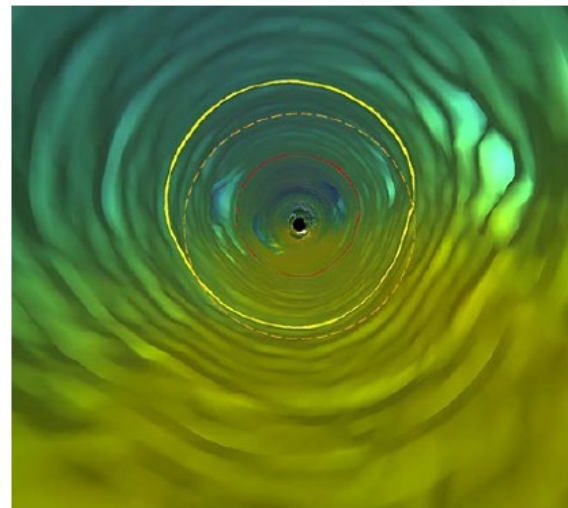
Das ursprüngliche Bohrspülungssystem wurde auf Basis erfolgreicher konventioneller Geothermiebohrungen in Süddeutschland ausgelegt, war jedoch für bestimmte

Eigenschaften der Karbonatformationen, auf die wir in den Lateralen stießen, nur bedingt geeignet – insbesondere im Hinblick auf schwache Schichtgrenzen, Herausforderungen bei der Bohrlochreinigung und das daraus resultierende Risiko eines Feststeckens des Bohrgestänges. All diese Faktoren beeinträchtigten die Leistung in der Frühphase des Projekts. Für dieses Problem gab es eine pragmatische Lösung: Wir stellten auf ein technisch angepasstes Bohrspülungssystem um, das für die Formation besser geeignet ist. Dieses wird ab sofort als Standardfall für künftige Loops dienen. Nach dieser Änderung konnte das Problem der Bohrlochinstabilität entschärft werden, wie die nachstehenden Bohrloch-Imaging-Logs zeigen.

**Borehole shape in early laterals pairs**

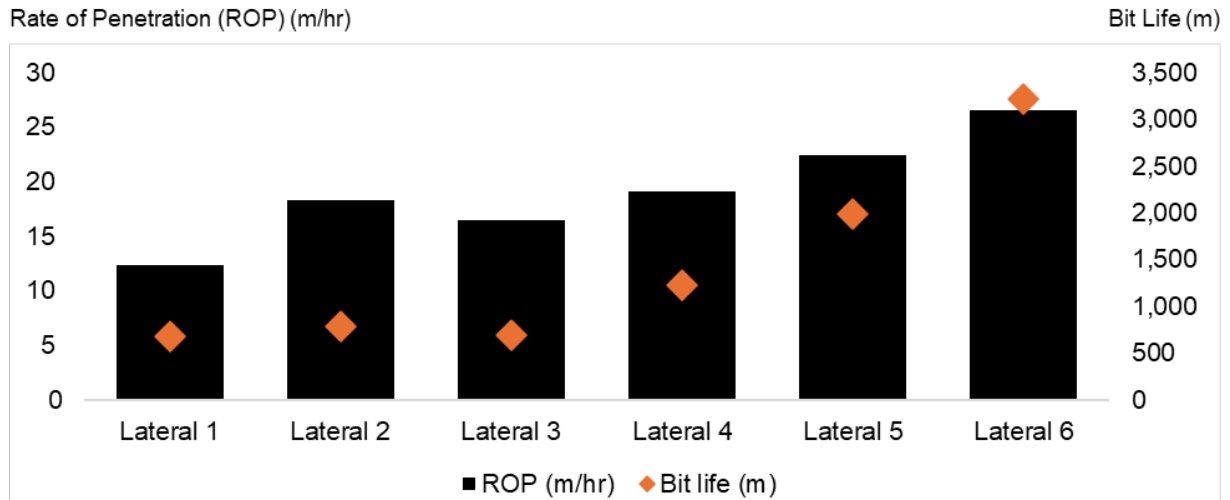


**Borehole shape after mud system change**



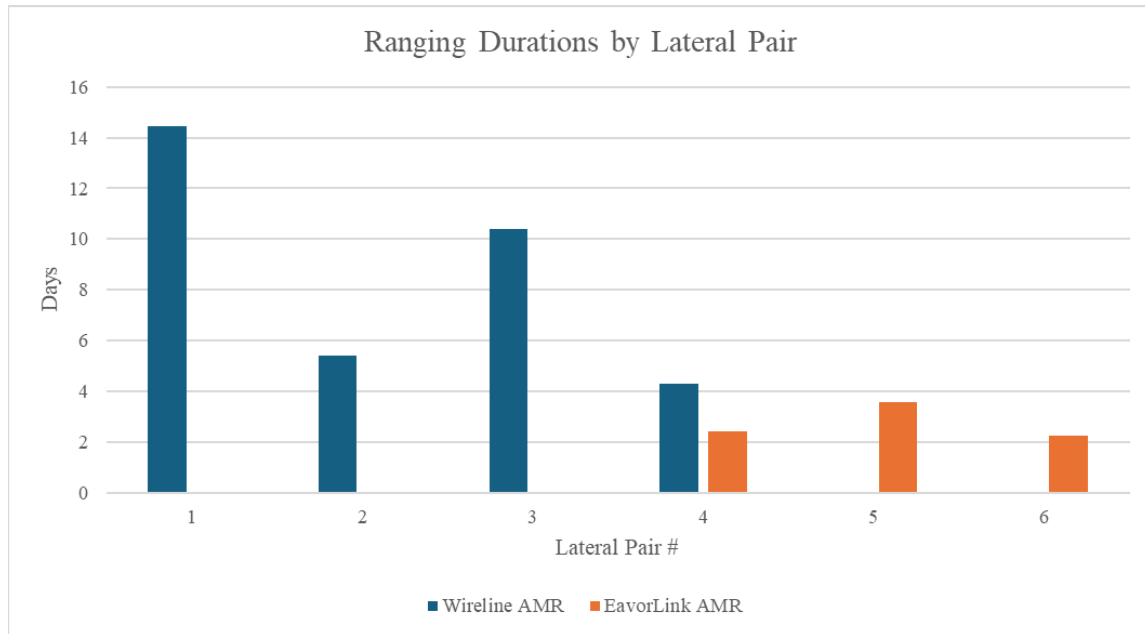
### Extreme Bohrdynamik und Dysfunktion

Die Kombination aus tief liegendem, hartem Gestein, langen Lateralen, hoher Reibung und schwierigen Bohrlochbedingungen führte zu starken Erschütterungen, Vibrationen und Drehmomentstörungen. Dies verlangsamte nicht nur den Bohrfortschritt, sondern beschädigte auch die Werkzeuge, verkürzte die Standzeit der Meißel und erhöhte die Anzahl der Male, die das Bohrgestänge aus dem Loch herausgezogen werden musste. Im weiteren Projektverlauf verbesserten wir das Design des Meißels und der Bohrlochsohlen-Garnitur, passten die Bohrparameter an, änderten das Spülungssystem, optimierten die Schmierfähigkeit und die Bohrlochreinigung und setzten Werkzeuge zur Minderung der Bohrdynamik ein. Diese Änderungen führten zu einem besseren Bohrfortschritt, längerer Haltbarkeit der Meißel und weniger Bohrstörungen bei späteren Bohrungen. Letztendlich konnten wir die Bohrung des letzten Lateralpaares in einem einzigen Durchgang pro Bohranlage durchführen.



### Arbeitsablauf an Bohrlochschnittpunkten

Zwei lange, horizontal verlaufende Bohrungen in einer gemessenen Tiefe von 8.000 Metern von der Oberfläche aus miteinander zu verbinden, ist kein triviales Unterfangen, insbesondere angesichts der Positionsunsicherheiten, die bei Bohrungen mit großer Reichweite auftreten. Viele Branchenbeobachter und -kenner behaupteten, es sei unmöglich, ein solches Vorhaben wiederholt und sicher durchzuführen. Uns ist es jedoch gelungen, alle sechs Lateralpaare planmäßig zusammenzuführen. Zu Beginn des Projekts setzten wir eine kabelgebundene magnetische Abstandsmessung ein, um die Bohrlöcher miteinander zu verbinden. Dieser Arbeitsablauf funktionierte zwar, war aber zeitaufwändig, komplex und sehr teuer. Als das Team mit der Zeit an Selbstvertrauen gewann, ging die Zahl der Abstandsmessungen deutlich zurück. Mit dem Einsatz der Eavor-Link™ AMR-Technologie gelang es uns, die Lernkurve weiter abzuflachen. Dabei handelt es sich um ein aktives magnetisches Entfernungsmesssystem, das in die Bohrgarnitur (BHA) integriert ist und Entfernungsmessung während des Bohrens ermöglicht, ohne dass die Bohrungen dabei für die Kabelführung unterbrochen werden müssen. Das Ergebnis war eine drastische Verkürzung der Zeitspanne für die Abstandsmessung und die Zusammenführung (der sogenannten „Ranging-Dauer“). Gleichzeitig konnten Kosten und Komplexität eines kabelgebundenen Systems eliminiert werden, wobei bei allen sechs Lateralpaaren die Herstellung einer Verbindung dennoch direkt im ersten Versuch gelang.



### Hydraulische Kommunikation zwischen den beiden Bohranlagen durch zuvor gebohrte Lateralpaare

Diese Herausforderung war bei weitem die schwierigste. Nach dem Abzweigen (Sidetracking) des zweiten Lateralpaares wurde die hydraulische Kommunikation (Flüssigkeitsstrom) zwischen den beiden Bohrtürmen gemessen. Die Ursache war eine unzureichende Zementierung der beiden verrohrten „Stammbohrungen“, die die Bildung eines signifikanten ringförmigen Flüssigkeitskanals hinter der Verrohrung begünstigte, wodurch alle Lateralpaare miteinander verbunden wurden. Die Flüssigkeit konnte nun ungehindert durch die zuvor gebohrten Lateralen bis zur anderen Bohranlage fließen.

Für den effizienten Ausbau eines Eavor-Loops™ müssen zwei Bohranlagen parallel arbeiten; jedes Lateralpaar wird gleichzeitig von zwei Anlagen gebohrt und verbunden, wobei mit dem untersten Lateral begonnen und der Vorgang dann nach oben hin fortgesetzt wird. Jedes zuvor gebohrte Lateralpaar soll zum nächsten abgedichtet (hydraulisch isoliert) werden. Letzteres wird lochaufwärts (in Richtung der Oberfläche innerhalb der verrohrten Hauptbohrlöcher) gebohrt. Durch eine unzureichende Isolierung des Zements hinter der Verrohrung kam es jedoch zu einer hydraulischen Verbindung zwischen den beiden Bohrlochsystemen/Bohrtürmen. Von diesem Moment an konnten sich Druck, Schlamm und Bohrklein ungehindert zwischen den Einlass- und Auslassstrukturen durch die zuvor gebohrten Lateralpaare bewegen.

Dadurch hat sich das gesamte Ausführungsmodell verändert. Anstatt mit zwei Bohranlagen gleichzeitig zu arbeiten (wie beim ersten Lateralpaar), mussten wir die Bohrung zuerst mit

einer Bohranlage und dann mit der anderen vornehmen. Allein dadurch verdoppelte sich der Zeit- und Kostenaufwand. Darüber hinaus konnte die mit Bohrklein versetzte Bohrflüssigkeit in die bereits gebohrten Lateralpaare eindringen. Aufgrund der sich daraus ergebenden Auswirkungen auf Bohrdauer und Projektkosten, haben wir uns dazu entschieden, Loop 1 nach sechs gebohrten und durchteuften Lateralpaaren abzuschließen, anstatt mit dem ursprünglichen Design mit 12 dieser Schleifen fortzufahren.

Durch das Problem der hydraulischen Kommunikation konnte die mit Bohrklein versetzte Bohrflüssigkeit in die zuvor gebohrten Lateralpaare zurückfließen, wodurch sich Bohrklein in den horizontalen Bohrlöchern ablagerte. Nachdem wir alle sechs Lateralpaare gebohrt hatten, führten wir eine Reihe von Durchflussprüfungen in Kombination mit Logging-Werkzeugen für Temperatur- und Produktionsaufzeichnungen durch. Bei fast allen Lateralpaaren (fünf von sechs) – mit Ausnahme des zuletzt gebohrten Paares – lagerte sich Bohrklein/Schlamm ab. Auf Basis mehrerer hochgradig gesicherter technischer Indikatoren – darunter das nach dem Spülen der Laterale an der Oberfläche aufgefangene Material sowie die durch Bohrloch-Imaging-Logs gemessene Qualität der Bohrlöcher – sind wir zuversichtlich, dass die Hauptursache ein Rückfluss von Bohrspülung und Bohrklein durch den hydraulischen Fließweg im Zement war. Wir konnten drei dieser fünf gefährdeten Paare spülen, was durch die Produktionsprotokolle bestätigt wurde. Mittlerweile arbeiten vier Lateralpaare wie erwartet. Wir haben jedoch beschlossen, die beiden zuerst gebohrten Paare nicht zu säubern, da die damit verbundenen Kosten und der Zeitaufwand zu hoch waren.

Das war das größte Hindernis bei diesem Projekt und die wesentlichste Herausforderung, die es zu bewältigen galt. Die Ursache war eine für die Komplexität dieser Anwendung ungeeignete Planung und Ausführung des Zementiervorgangs (Zementierung zwischen Stahlrohr und Bohrloch).

Die Lösung liegt in diesem Fall nicht in einer neuen Technologie, sondern in der Anwendung von bewährten Zementierungsverfahren, die für diese multilaterale Bohrlocharchitektur geeignet sind. Diese Änderungen werden bei allen künftigen Loop-Entwürfen berücksichtigt. Darüber hinaus werden sich diese kritischen Erkenntnisse auch in einer Lernkurve manifestieren, die sich loopübergreifend anwenden lässt.

## **Produktionsleistung den Erwartungen entsprechend**

### **Thermische Produktion: der Eavor-Loop™**

In geothermischen Systemen mit geschlossenem Kreislauf, wie einem Eavor-Loop™, dominiert die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung. Nach dem Fourierschen Gesetz

verhält sich die Wärmeübertragung in die Bohrlöcher proportional zur Oberfläche, die für die Wärmeübertragung zur Verfügung steht (siehe „A“ in der nachstehenden Gleichung). Da vier Lateralpaare zur Strömung beitragen, würden wir etwa  $4/12 = 33\%$  der Wärmeübertragung und -produktion im Vergleich zum ursprünglichen Entwurf mit 12 Lateralpaaren erwarten.

$$\dot{Q} = \frac{\kappa \cdot A \cdot \Delta T}{L}$$

*Gleichung 1: Einfaches Fouriersches Gesetz (1D-Ansatz)*

Die Produktion von Loop 1 liegt derzeit bei 8,5 MWth, was genau den Erwartungen entspricht. Es sei daran erinnert, dass die ursprüngliche Nennkapazität des Projekts 64 MWth für vier Eavor-Loops™ mit jeweils 12 Lateralpaaren (insgesamt 48) betrug. Das entspricht 1,3 MWth pro Lateralpaar. Derzeit produzieren wir mehr als 2 MWth pro Lateralpaar. Diese Menge wird allerdings nach fünf Jahren auf 1,3 MWth sinken, was die Grundlage dieser Nennkapazität war.

Die Produktion der durchströmten Lateralpaare stimmt mit der verbundenen Exposition des Wärmereservoirs überein – der Eavor-Loop™ funktioniert wie vorgesehen. Das ist ein wichtiges Ergebnis: Wir haben die Wärmeleistung vor der Bohrung (vor der Investition) vorhergesagt, und die Leistung entspricht dieser Vorhersage. Loop 1 ist nicht voll ausgebaut, aber die Produktionsleistung entspricht den Erwartungen für diese Größe.

### Stromproduktion: der Wärmemotor

In Geretsried haben wir ein ORC-Kraftwerk (Organic Rankine Cycle) gebaut (geliefert von unserem Partner Turboden), das für einen Auslegungspunkt bei etwa  $\frac{3}{4}$  der thermischen Gesamtkapazität des Projekts optimiert ist (um die Wärme zu berücksichtigen, die in das Fernwärmenetz eingespeist und an der ORC-Anlage vorbeigeleitet wird). Theoretisch hängt der ORC-Wirkungsgrad nur von der Temperatur der Wärmequelle (Wasser aus dem Eavor-Loop™) und der Wärmesenke (Umgebungsluft) ab. In der Praxis verzeichnen diese Anlagen jedoch erhebliche Effizienzverluste, wenn sie unterhalb ihres Auslegungspunktes betrieben werden, selbst wenn sich die Temperatur der Wärmequelle oder -senke nicht ändert. Bei jedem ORC-Kraftwerk gibt es im Auslegungspunkt einen optimalen Betriebsbereich („Sweet Spot“), an dem optimale Umwandlungswirkungsgrade erzielt werden können. Wenn die Werte unter diesem Auslegungspunkt liegen, ist die Umwandlungseffizienz schlechter. Die nachstehende Abbildung veranschaulicht diese Beziehung für die ORC-Anlage in Geretsried bei „durchschnittlichen“ Umgebungstemperaturen.

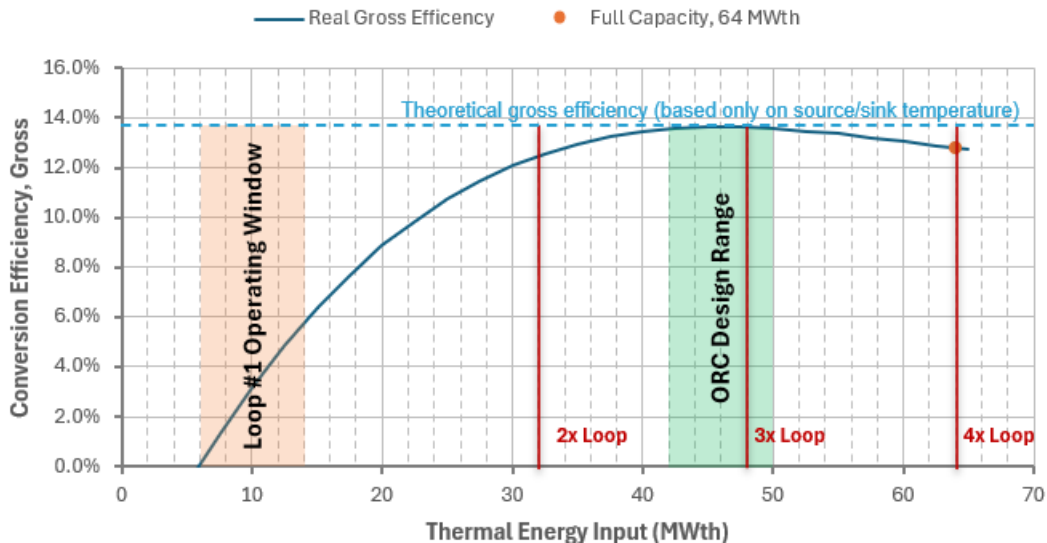


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Teillastverhaltens des ORC-Kraftwerks in Geretsried

Unser derzeitiger Betrieb von Loop 1 ist auf der linken Seite dieser Kurve angesiedelt, da das Kraftwerk für nur einen Loop überdimensioniert ist. Gemessen an der durchschnittlichen thermischen Leistung seit der Inbetriebnahme – 11,8 MWth – beträgt der Umwandlungswirkungsgrad etwa 4,3 %. Natürlich ist dieser im Winter höher und im Sommer niedriger. Obwohl dieser Wert relativ gering ist, ist er in Hinblick auf die Größe von Loop 1 sogar noch etwas besser als erwartet. Das bedeutet, dass das ORC-Kraftwerk wie vorgesehen funktioniert, wenn die Wärmeproduktion mit zusätzlichen Loops steigt.

### Leckage

Das Rock-Pipe-System wurde erfolgreich bei allen gebohrten Lateralpaaren eingesetzt. Die Technologie funktioniert nachweislich wie vorgesehen. Während der Ausführung wurden Feldtests durchgeführt (ähnlich einer Bohrloch-Drucktransienten-Analyse im Lagerstätten-Management), um die Dichtungsleistung von Rock-Pipe zu bestätigen. Rock-Pipe-Anwendungen konnten die Permeabilität in der Nähe des Bohrlochs um mehr als eine Größenordnung reduzieren. Dies hat zu einer betrieblichen Leckagerate geführt, die zwischen 0,5 und 2 % des Umlaufdurchsatzes liegt, was der erwarteten Projektleistung entspricht.

Da wir bereits Eavor-Loops™ planen, die in tieferes Grundgebirge mit deutlich geringerer Matrixdurchlässigkeit gebohrt werden, werden die betrieblichen Leckageraten für die nächste Generation von Eavor-Loops™ etwa ~0,1 % des Durchsatzes betragen: eine weitere Größenordnung niedriger als das, was wir in Geretsried beobachten.

## Wie hoch sind die Energiekosten heute und in welche Richtung entwickeln sie sich?

Lassen Sie uns nun kurz einen Blick auf die Energiekosten und unsere Sichtweise auf das Potenzial für zukünftige Kostensenkungen werfen.

Die wichtigste Kennzahl für Energieerzeugungstechnologien sind die Energiekosten, die in der Regel als „Stromgestehungskosten“ (LCOE) bezeichnet werden, wobei die Energie in Wärme- oder Stromeinheiten gemessen werden kann. Diese Stromgestehungskosten berücksichtigen Investitionskosten (Capex), Betriebskosten (Opex), die Lebensdauer der Anlage und die Kapitalkosten.

$$\text{Levelized Cost of Energy} = \frac{\text{Discounted (CAPEX + OPEX)}}{\text{Discounted Energy Sales}}$$

*Gleichung 2: Die Stromgestehungskosten ergeben sich aus dem Verhältnis zwischen den Projektkosten und den Energieverkäufen (abgezinst mit der Zeit zu den Kapitalkosten).*

### Wie hoch sind die Energiekosten heute?

Der nächste Loop beginnt nicht bei Null – er übernimmt alle Verbesserungen, die wir bei Loop 1 gelernt haben. Das ist der Verlauf einer jeden Lernkurve. Die ersten Einheiten tragen die Kosten für die Bewältigung von Herausforderungen. Spätere Einheiten zeigen, was aus dem Prozess werden kann, wenn die wichtigsten Lektionen gelernt wurden. Das gilt für Schiefergestein, Windkraft, Solarenergie, Batterien, alle Arten der Fertigung und die meisten industriellen Technologien, die ihre Kosten durch Wiederholung senken konnten.

Ohne das Problem der hydraulischen Kommunikation, das uns zu aufeinanderfolgenden Bohrungen zwang und unter Anwendung aller aus Loop 1 gewonnenen Erkenntnisse, erwarten wir, dass zukünftige horizontale Lateralpaare in etwa drei Wochen pro Paar fertiggestellt werden können – wobei noch erhebliche weitere Verbesserungen möglich sind. Dies führt zu Wärmegestehungskosten, die für die Fernwärme bei durchschnittlichen geothermischen Gradienten (30 °C/km) im Vergleich zu anderen Energiesystemen oder Alternativen in Europa wettbewerbsfähig sind. (Da sich Eavor und unsere Partner derzeit in Gesprächen im Hinblick auf viele Projekte in Europa befinden, können wir aktuell keine genauen Zahlen bekannt geben). Darüber hinaus besitzt diese Technologie auch die entscheidenden Merkmale lokaler Energiesicherheit, ist zu 100 % kohlenstofffrei, kommt ohne Fracking aus, hat einen geringen Wasserverbrauch und bietet langfristige Planbarkeit.

Dabei muss man sich vor Augen führen, dass dies alles auf einem weltweiten durchschnittlichen geothermischen Gradienten basiert und nicht auf einem seltenen Hotspot, wie man ihn manchmal im Westen der USA, in Island usw. finden kann.

## Wohin geht die Reise?

Grundsätzlich gibt es 4 Möglichkeiten, die Stromgestehungskosten zu senken (siehe Gleichung 2): Senkung der Investitionskosten, Steigerung des Energieabsatzes, Senkung der Betriebskosten oder Senkung der Kapitalkosten. Wenn wir all dies zusammennehmen, haben wir eine klare Perspektive auf Werte von unter 75 US-Dollar/MWhe (elektrisch) *bei durchschnittlichen geothermischen Gradienten* – und das mit einem System, dessen Funktionsfähigkeit wir bereits in der Praxis in nennenswertem Maßstab nachgewiesen haben.

### CAPEX

Bei einem Eavor-Loop™ werden die Investitionskosten von der Bohrleistung dominiert. Wir wissen, wie ein Eavor-Loop™ gebaut wird, und haben die Anfänge einer steilen Lernkurve unter Beweis gestellt. Wir haben bereits ein Lateralpaar von Anfang bis Ende in Sedimentgestein, einschließlich Abstandsmessung und Bohrungszusammenführung, in einem einzigen Durchgang gebohrt. Aber es gibt noch viel Raum für Verbesserungen. Einige Beispiele für die wichtigsten Eingangsparameter, welche die Bohrkosten beeinflussen, sind nachfolgend beschrieben. „NOAK“ ist ein Branchenbegriff für „nth of a kind“ (das n-te seiner Art) und bezeichnet den Punkt, an dem die Lernkurve nach vielen errichteten Eavor-Loops™ fortschreiten kann.

Parameter	Aktueller Wert	Potenzieller NOAK-Wert	Nachweise
Bohrfortschritt (ROP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 m/h, nachgewiesen in Geretsried (Sedimentgestein)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;40 m/h in Sedimentgestein</li> <li>• 30 m/h in Grundgestein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Öl- und Gasbohrungen in Nordamerika erreichen Bohrfortschritte von &gt;40 m/h</li> <li>• Neuere Bohrungen in hartem Gestein (z. B.: Colorado, Utah, New Mexico usw.) zeigen, dass Bohrfortschritte von 30 m/h erreichbar sind.</li> </ul>
Meißellaufstrecke (m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-2 Durchgänge pro Lateral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einmal-Durchgänge in Lateralen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei 3 der letzten 4 Laterale in Geretsried (Sedimentgestein)</li> </ul>

	<p>(Sedimentgestein)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Angenommene Laufstrecke pro Meißel von &lt;600 m im Grundgestein</li> </ul>	<p>(Sedimentgestein)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.500 m im Grundgestein</li> </ul>	<p>wurde der Lateral bereits in einem einzigen Durchgang gebohrt.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neuere Bohrungen in hartem Gestein (z. B.: FORGE und Fervo in Utah) erreichen bereits Meißellaufstrecken von &gt;800 m, und die Werte verbessern sich kontinuierlich weiter.</li> </ul>
Ein-/Ausbaugeschwindigkeit (Trip Speed)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 350 m/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 800 m/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchschnittliche Ein-/Ausbaugeschwindigkeit (Trip Speed) von 750 m/h bei Bohrungen in den USA nachgewiesen</li> </ul>
Ablenkungszeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 Tage in Geretsried nachgewiesen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Tage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Tage in einem vertikalen Eavor-Bohrloch in hartem Gestein nachgewiesen</li> </ul>
Dauer von Abstandsmessung/Bohrungszusammenführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Tage in Geretsried nachgewiesen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Tag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klare Perspektive zur Reduzierung der Abstandsmessung mit Eavor-Link™ AMR</li> </ul>

## Energieabsatz

Der Schlüssel zur Steigerung der Stromerzeugung ist einfach: in tieferen und heißeren Schichten bohren. Das bedeutet in der Regel, im Grundgebirge zu bohren. In tieferen Schichten zu bohren ist im Grunde der größte Hebel, um letztendlich „Geothermie überall“ zu Kosten von unter 75 US-Dollar/MWh zu realisieren, ohne auf seltene geothermische Hotspots angewiesen zu sein.

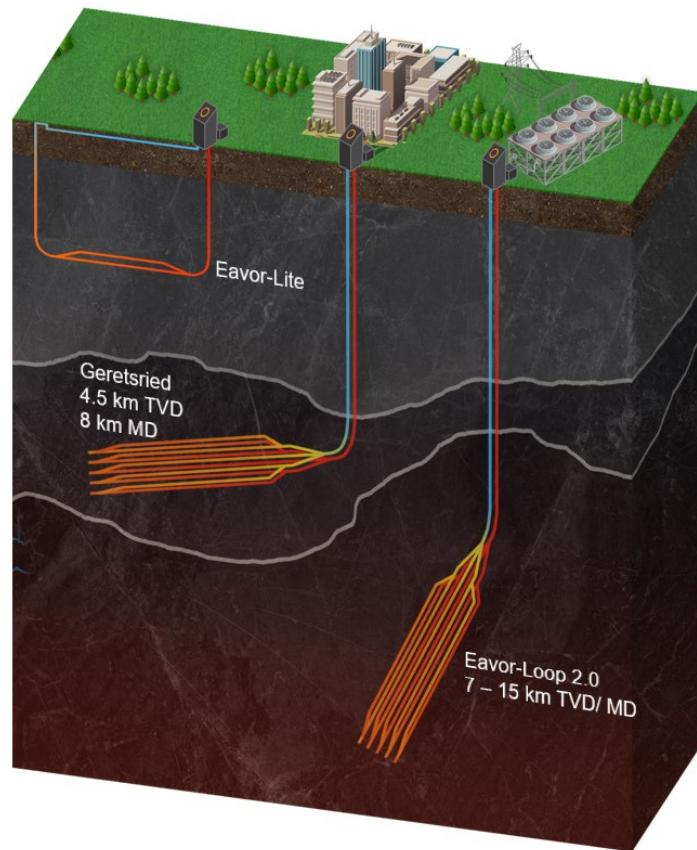
Wenn das Eavor-Loop™ -System in kristallinem Grundgestein zum Einsatz kommt, wird es als „Eavor-Loop™ 2.0“ bezeichnet.

Aus bohrtechnischer Sicht handelt es sich um die gleiche Bohrweise wie in Geretsried, allerdings in härterem Granit- oder Grundgestein. Eavor und unsere Entwicklungspartner setzen sich aktiv dafür ein, Projekte sowohl für den Fernwärme- als auch für den Strommarkt unter Verwendung der Eavor-Loop™ 2.0-Konfiguration voranzutreiben.

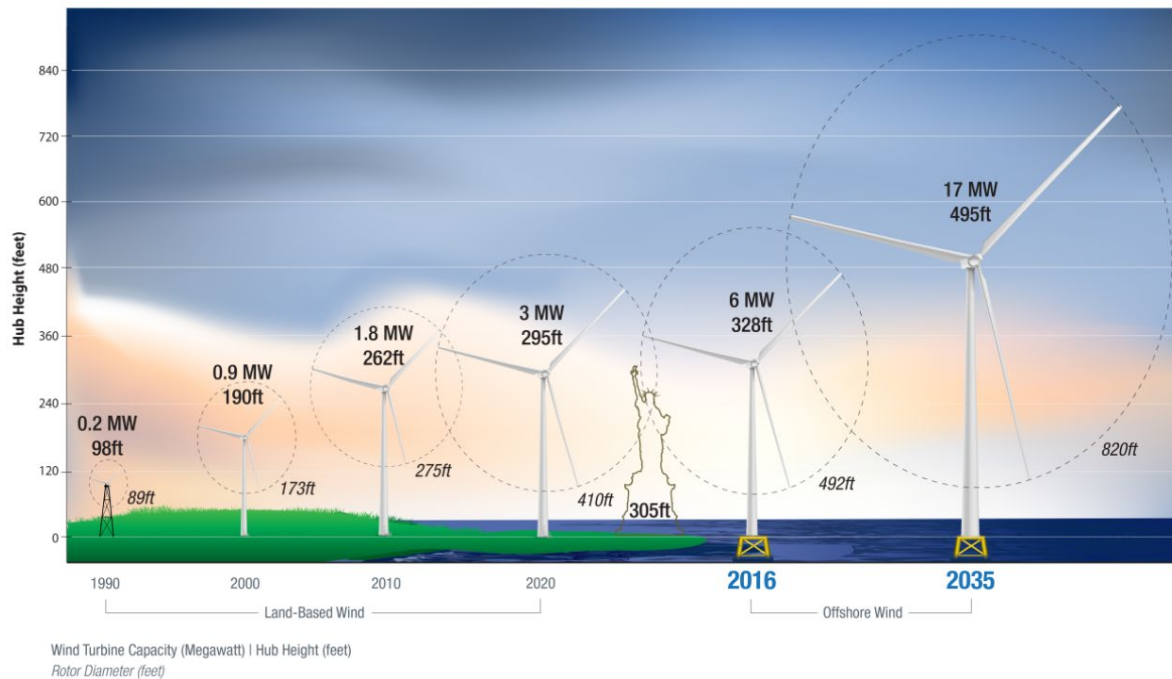
Die Tiefe ist ein Kontinuum. Die gemessene Tiefe (*MD = measured depth*) unseres ersten Loops betrug bereits 8 km. Die folgenden Loops in Geretsried werden immer länger und in tieferen und heißeren Schichten angesiedelt sein. Die gleiche schrittweise Entwicklung in

die Tiefe gilt auch für künftige Eavor-Loops™. Wenn wir weiter in die Tiefe gehen, steigt auch der Output exponentiell. Bei einem Gradienten von 30 °C/km beträgt die Leistung eines Loops in 15 km Tiefe beispielsweise 20 MWe – verglichen mit 2 MWe in Geretsried.

Beim Erreichen von Tiefen unter etwa 9 km TVD (*true vertical depth*) stößt die derzeitige Bohrtechnik an ihre Grenzen. Um wesentlich tiefer bohren zu können, bauen Eavor und unsere Partner an einem Bohrsystem, das die vorhandene Technologie nutzt, aber für den Bau von Eavor-Loops™ in diesen Tiefen optimiert ist. Wir sind gerade mit dem Aufbau dieses Systems beschäftigt, das in ein paar Jahren im Feld einsatzbereit sein wird.



Mit der schrittweisen Weiterentwicklung der Technologie kann auch die Tiefe nach und nach gesteigert werden. Man hat diese Dynamik bereits bei der Windkraft erlebt. Sobald die anfänglichen Herausforderungen überwunden sind und sich das System in sinnvollem Umfang bewährt hat, wird es vergrößert.



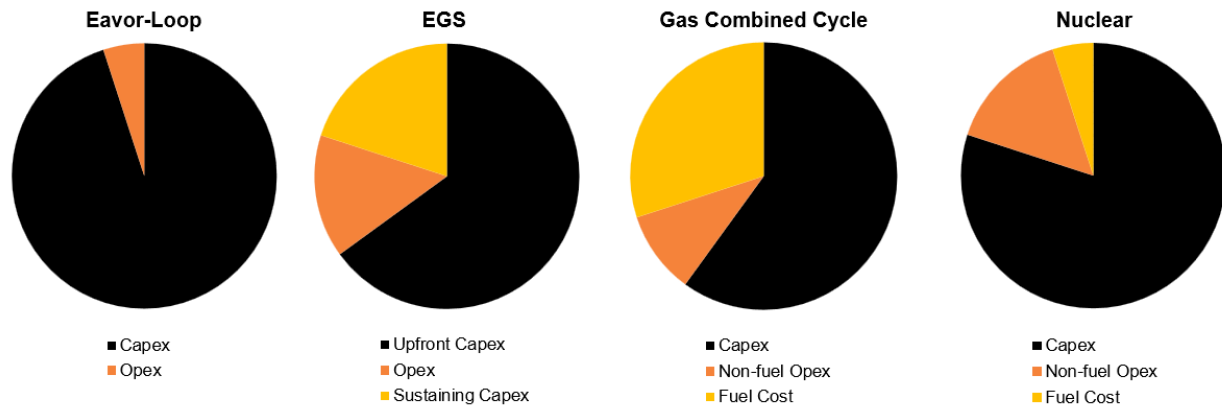
U.S. Department of Energy (21. August 2024) Darstellung der zunehmenden Turbinenhöhen und Rotorblattlängen im Laufe der Zeit [Infografik] [Wind Turbines: the Bigger, the Better](#)

## OPEX

Aufgrund der Langlebigkeit des geschlossenen Kreislaufs sowie der Tatsache, dass es weder ein Heißwasserreservoir noch bewegliche Pumpen gibt, entfallen viele der größten Budgetposten, die bei der traditionellen Geothermie erforderlich sind. Es fallen weder wiederkehrende Investitionen noch Kosten für die Installation oder den Austausch von Pumpen an, es gibt keinen Eigenbedarf der Pumpen und keine Probleme mit Ablagerungen oder der Verstopfung der Reservoirs usw. Daher weisen Eavor-Loops™ mit rund 5 % der Stromgestehungskosten (LCOE) deutlich geringere Betriebskosten auf als viele andere Technologien, was in dieser Hinsicht nahe an Wind- und Solarenergie heranreicht.

In den nachstehenden Daten wird der Beitrag zu den Stromgestehungskosten von Investitions- und Betriebskosten verschiedener regelbarer Technologien verglichen. Daraus ergibt sich, dass a) die Kapitaleffizienz eine schlechte Kennzahl ist, um Technologien für ein bestimmtes Projekt zu vergleichen, da es dem Endnutzer tatsächlich auf den Energiepreis und nicht auf die Kapitaleffizienz ankommt. b) es kaum Spielraum gibt, um die

Stromgestehungskosten durch eine Senkung der Betriebskosten des Eavor-Loops™ weiter zu reduzieren. c) sich daraus Auswirkungen auf die Kapitalkosten und die Projektstruktur ableiten lassen.



**Beitrag von Betriebs- und Investitionskosten für verschiedene regelbare Technologien.** Quellen: Eavor - interne Schätzungen auf Basis der Geretsried-Daten; EGS - auf Basis der S1-Unterlagen von Fervo; Gas – Lazard LCOE+ 2025; Kernkraft – OECD Nuclear Energy Agency.

### Kapitalkosten

Der letzte Faktor, der sich auf die Stromgestehungskosten auswirkt, sind die Kapitalkosten. Diese haben große Auswirkungen auf die Stromgestehungskosten, insbesondere bei Systemen, bei denen ein hoher Prozentsatz der Stromgestehungskosten auf Investitionskosten entfällt, wie z. B. bei der Kernkraft oder dem Eavor-Loop™. Zu Beginn sind die Kapitalkosten für alle neuen Technologien hoch. Wenn Projekte ins Laufen kommen und die Ausführung standardisierter und vorhersehbarer wird, sinken auch die Kapitalkosten.

Bei Eavor-Loops™ liegt das Risiko fast ausschließlich in der Bauphase. Ist der Loop erst einmal gebaut, ist er über lange Zeiträume (30 bis 100 Jahre) sehr berechenbar und wartungsarm. Das Ressourcenrisiko ist weitgehend ausgeschaltet, vor allem, sobald der erste Loop erst einmal gebaut ist. Daher werden Projekte nach dem kommerziellen Inbetriebnahmedatum (COD) in der Regel auf eine hohe Fremdkapitalquote umfinanziert. Die Projektstruktur nach der kommerziellen Inbetriebnahme orientiert sich am ehesten an ausgereiften Energietechnologien, die sich im Besitz von Versorgungsunternehmen oder Infrastrukturinvestoren befinden und von diesen betrieben werden.

## Kann Eavor weltweit skalieren?

Die letzte Frage, die uns in der Regel gestellt wird, lautet: Wie kann das Unternehmen Projekte über mehrere Kontinente und in verschiedenen Jurisdiktionen weltweit skalieren? Mehr dazu in Kürze. Hier gehen wir nur kurz auf diese Frage ein.

Es war schon immer die Strategie von Eavor, sich im Laufe der Zeit zu einem Technologie-Lizenzierungsmodell hinzubewegen – und das bereits seit dem ersten Pitch-Deck im Jahr 2018. Unser Geschäftsmodell besteht nun aus mehreren Elementen:

- Lizenz-Technologie
- Bereitstellung von spezifischen Dienstleistungen im Zusammenhang mit Eavor-Loop™:
  - Engineering und technische Dienstleistungen (wir haben spezielles Know-how und Software entwickelt)
  - Nach der endgültigen Investitionsentscheidung (FID) erbringen wir bestimmte spezialisierte Bohrloch- und Baudienstleistungen direkt selbst.
  - Wir erbringen bestimmte operative Dienstleistungen
- Eavor wird bei bestimmten Projekten weiterhin selbst finanziell involviert sein; das offensichtlichste Beispiel hierfür ist Geretsried, wo wir als Projektentwickler agieren.

Die Vorteile dieses Modells bestehen darin, dass es kapitalschonend ist, eine höhere Gewinnspanne aufweist und wir die Fähigkeiten von Weltklasse-Partnern (sowohl im operativen als auch im finanziellen Bereich) für eine globale Skalierung nutzen können. Der größte Nachteil (für Eavor) ist der Kontrollverlust. Dieses Modell erfordert auch, dass wir uns unsere Stellung im Zentrum eines Ökosystems erhalten, und beinhaltet daher Eintrittsbarrieren wie:

- Ein Netz von Patenten sowohl auf der Ebene des geothermischen Systems als auch auf der Ebene der Komponenten
- Eine Reihe von exklusiven Handelsvereinbarungen mit Lieferanten, Technologiepartnern und Entwicklern
- Fachwissen, Know-how und Daten
- Mit der Zeit sammeln wir mehr Daten, gewinnen weitere Erfahrungen, technologische Fortschritte und Partner. Das Produkt wird also umso wertvoller, je mehr Nutzer es annehmen.

## **Künftiges Geschäftsmodell in Geretsried**

Eavor bleibt dem Projekt in Geretsried zusammen mit unseren Partnern voll verpflichtet. Es handelt sich um ein strategisches Projekt, das die Einführung unserer Technologie auf dem europäischen Markt unterstützt und zu einer Kostenreduzierung führt, die auf Projekte in aller Welt übertragen werden kann. Als Projektentwickler arbeiten wir mit Lieferanten, Partnern, Investoren und Wärmeabnehmern zusammen, um das Projekt zu verbessern – wir freuen uns schon auf den weiteren gemeinsamen Weg. Wir werden weitere Informationen über das Projekt bekannt geben, sobald sie verfügbar sind.

## **Fazit**

In Geretsried haben wir bewiesen, dass die Eavor-Loop™ -Technologie funktioniert. Wir haben horizontale Abschnitte im kommerziellen Maßstab in Tiefen von über 8 km MD gebohrt und miteinander verbunden, eine thermische Produktion im Einklang mit den Vorhersagen erzielt, Strom wie erwartet erzeugt und den Beginn der Lernkurve demonstriert, die die zukünftige Wirtschaftlichkeit der Technologie untermauert.

Das Projekt hat uns auch gezwungen, schwierige Probleme in der Praxis zu lösen. Einige dieser Herausforderungen waren bei einem FOAK-Projekt zu erwarten. Andere waren es nicht. Aber genauso reifen industrielle Technologien: indem sie in großem Maßstab auf Einschränkungen stoßen, diese lösen und die Leistung durch Wiederholung systematisch verbessern. Genau das ist in Geretsried geschehen.

Um auf die drei oben genannten Schlüsselfragen zurückzukommen:

### **Funktioniert die Technologie?**

Ja. Das Projekt in Geretsried hat die angestrebten Ziele erreicht.

### **Wie hoch sind die Energiekosten heute und in welche Richtung entwickeln sie sich?**

Bereits heute ist die Wirtschaftlichkeit auf den europäischen Fernwärme- und bestimmten Strommärkten wettbewerbsfähig. Noch wichtiger ist, dass wir nun über einen klaren technischen und operativen Pfad hin zu erheblichen künftigen Kostensenkungen verfügen – und zwar durch Fortschritte entlang der Lernkurve sowie durch Loops in tieferen und heißeren Schichten.

### **Kann Eavor weltweit skalieren?**

Ja. Die Technologie ist speziell auf skalierbare industrielle Prozesse und bestehende globale Lieferketten zugeschnitten. In Verbindung mit einem lizenzbasierten

Geschäftsmodell und starken strategischen Partnern schafft dies einen realistischen Weg zur Einführung auf mehreren Kontinenten und Energiemärkten.

Eavor-Loop™ kann das liefern, was der Markt wirklich will: Energiesysteme, die gleichzeitig sicher, regelbar, skalierbar, lokal verfügbar und CO<sub>2</sub>-arm sind.

Geretsried war der erste Beweis für diese Theorie. Aber wir sind noch lange nicht am Ende. In der nächsten Phase geht es darum, das Gelernte anzuwenden, die Leistung durch Wiederholung zu steigern, in tieferen und heißeren Schichten zu bohren und die Technologie global zu skalieren. Das ist erst der Anfang.