



Dynamische Verbindung

Verlegung eines HDÜ-Seekabels zur schwimmenden Öl- und Gasplattform Gjøa

ERIK ERIKSSON, MARC JEROENSE, MAGNUS LARSSON-HOFFSTEIN, CLAES SONESSON, KNUT-ARIL FARNES (STATOIL), ROLF OVE RÅD (STATOIL), KARL ATLE STENEVIK (STATOIL) – Die Suche nach neuen Öl- und Gaslagerstätten führt den Menschen zunehmend in geografisch abgelegene und schwer zugängliche Gebiete. Die „Gjøa“ ist eine schwimmende Öl- und Gasplattform, die in 380 m tiefen Gewässern vor der norwegischen Küste operiert. Zur Versorgung der Plattform mit Strom von der Küste wurde ein 98 km langes 123-kV-Drehstromkabel in Wassertiefen von bis zu 540 m verlegt. Eine der größten Herausforderungen, die das Projekt so einzigartig machen, lag im „dynamischen“ Abschnitt des Kabels, der vom Meeresboden zur schwimmenden Plattform hinaufreicht und sowohl extremen Umweltbedingungen als auch den Bewegungen der Plattform standhalten muss.

Titelbild

Das Seekabel auf der Trommel des Verlegeschiffs



liche Kabellänge bereitzustellen, wird der untere Teil des Kabels von 73 in gleichen Abständen angeordneten Auftriebskörpern → 7 in einer sogenannten Lazy-Wave-Konfiguration angehoben → 2.

Auslegung des Kabels

Ein wichtiger Teil der Auslegungsarbeiten für das dynamische Kabel bestand in der Bestimmung der Ermüdungslebensdauer. Dieser Prozess umfasste drei Komponenten → 3.

- Globale Analyse
- Lokale Analyse
- Ermüdungsprüfung

Globale Analyse

Die mechanische Belastung des dynamischen Kabels hängt von mehreren Parametern ab. Dazu gehören die Bewegung der Plattform, die Wasserströmungen, der Meeresbewuchs und die Konfiguration des Kabels → 2.

Um die Reaktion des Kabels auf Translation, Krafteinwirkung, Biegung usw. zu analysieren, wurde das Kabel unter Verwendung globaler Eigenschaften wie Gewicht, Durchmesser, Axialkraft, Verbiegung und Torsionssteifigkeit als eindimensionaler Strang modelliert. Die Konfiguration wurde in einem iterativen Verfahren, z. B. durch Auswahl der Position, Größe und Anzahl der Auftriebseinheiten, optimiert.

Die Axialkraft und Verbiegung des Kabels wurden unter extremen Umweltbedingungen analysiert. Ein Beispiel für eine typische extreme Bedingung ist eine 100-Jahreswelle in Verbindung mit einer 10-Jahresströmung. Auch unter solchen Bedingungen müssen die Verbiegung und Axialkräfte innerhalb der Auslegungsgrenzen bleiben.

Parallel dazu wurde eine Störungsanalyse hinsichtlich möglicher Kollisionen mit benachbarten Steigleitungen und Unterwasserinfrastrukturen durchgeführt, die unter allen Umständen vermieden werden sollten.

Lokale Analyse und Schätzung der Lebensdauer

Ein dynamisches Kabel ist ein komplexes Gebilde aus verschiedenen Komponenten und Materialien. Generell gibt es mehrere Möglichkeiten zur Modellierung eines solchen Kabels auf lokaler Ebene. Gängige

Das Projekt hat das Wissen und die Fähigkeiten von zwei Branchen zusammengeführt, die normalerweise weitgehend getrennt voneinander agieren.

Methoden sind die Finite-Elemente-Modellierung und die analytische Modellierung. Im Falle der Gjøa-Plattform wurde ein konservatives analytisches Modell verwendet.

Zur Bestimmung der Lebensdauer des Kabels wurde die Spannung in ermüdungskritischen Komponenten errechnet. Diese hängt von mehreren Faktoren, u. a. von der

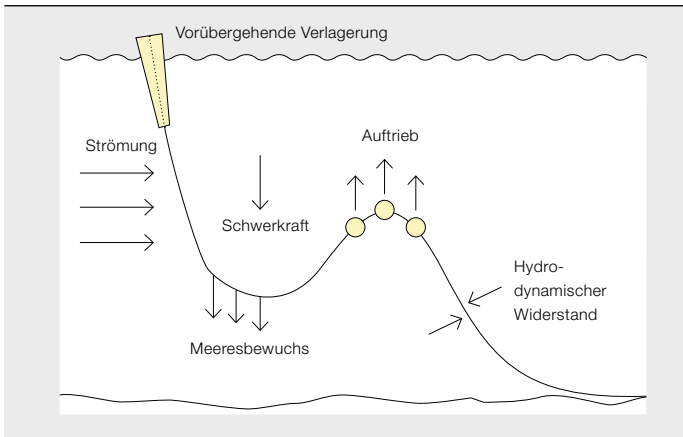
Die Gjøa-Plattform befindet sich westlich des Sognefjords vor der norwegischen Küste, rund 100 km nordwestlich des Industriehafens Mongstad. Die von Statoil entwickelte und gebaute Plattform wird zurzeit von GDF SUEZ E&P Norge AS betrieben. Das von der schwimmenden Plattform geförderte Öl und Gas wird über Pipelines nach Mongstad und St. Fergus in Schottland geleitet.

Ursprünglich sollte sich die Plattform mithilfe eines eigenen Gasturbinenkraftwerks selbst mit Strom versorgen. Um den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren, entschied man sich jedoch dafür, den Strom von Land zu beziehen (der norwegische Energiemix hat einen hohen Anteil an Wasserkraft). Der geschätzte Stromverbrauch der Plattform beträgt 25 bis 30 MW im Durchschnitt und 40 MW in Spitzenzeiten.

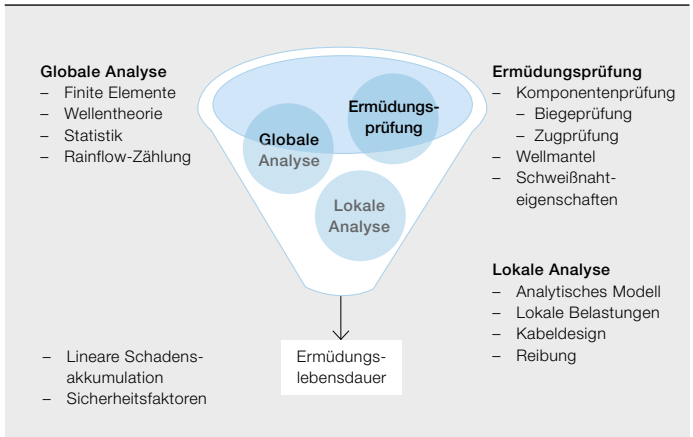
Eigenschaften der Kabelverbindung

Die Verbindung zur Plattform besteht aus einem 98,5 km langen statischen Kabel, das auf dem Meeresboden verläuft, und einem 1,5 km langen dynamischen Kabelabschnitt, der vom Meeresboden zur schwimmenden Plattform hinaufreicht → 2. Das dynamische Kabel muss die horizontale und vertikale Bewegung der Plattform einschließlich eines seitlichen Radius von 75 m zulassen. Um die dafür erforderliche zusätz-

1 Einflussfaktoren auf die mechanische Belastung des dynamischen Kabels



2 Konzeptioneller Ansatz zur Bestimmung der Ermüdungslebensdauer



4 Das Kabel unter Wasser



Biegung und Reibung zwischen den einzelnen Komponenten, ab.

Auf der Grundlage dieser Analyse wurde die Lebensdauer mithilfe der Methode der linearen Schadensakkumulation für die identifizierten ermüdungskritischen Komponenten berechnet. Die errechnete Lebensdauer des Kabels betrug über 35 Jahre bei einem Sicherheitsfaktor von sechs.

Ermüdungsprüfung

Ziel der Ermüdungsprüfung ist die Erstellung eines sogenannten Wöhler-Diagramms (S-N-Kurve) zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der zyklischen Wechselbeanspruchung (S) und der Anzahl der Zyklen (N) bis zum Bruch für die identifizierten ermüdungskritischen Komponenten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die radiale Wassersperre (geschweißter Kupfermantel) des Kabels gelegt.

Komponenten des Kabelsystems

Versteifungselement

Die stärksten Belastungen im Hinblick auf axiale Kräfte und Verbiegung wirken am oberen Ende des Kabels. Hier wurde ein 8 m langes Versteifungselement (Bending Stiffener) montiert → 10.

Statisches Kabel

Das statische Kabel ist ein dreiphasiges 115-kV-Kabel mit massiven Kupferleitern mit einem Querschnitt von je 240 mm². Um ein Eindringen von Wasser zu verhindern, sind die Leiter von einem Bleimantel umgeben. Da die Ummantelung anders als beim dynamischen Kabel keinen wiederkehrenden mechanischen Kräften standhalten muss, wurde statt Kupfer (wie beim dynamischen Kabel) Blei gewählt. Unter der Ummantelung befindet sich ein halbleitendes Zwischenband, um ein Eindringen von

Wasser in Längsrichtung zu verhindern (halbleitend, um Ladeströme im Blei auszugleichen). Als mechanischer Schutz ist die Metallummantelung von einem Polyethylenmantel umgeben. Im Zwischenraum zwischen den drei Hauptadern verläuft ein Glasfaserkabel mit 48 Fasern. Die Armierung besteht aus zwei Schichten verzinktem Stahldraht. Um eine verwindungsfreie und dennoch feste Struktur zu erreichen, sind die Schichten in entgegengesetzter Richtung gewickelt und durch ein Polsterband getrennt. Zum Schutz gegen Korrosion sind die Drähte mit einem Bitumengemisch bestrichen. Der Außenmantel besteht aus zwei Schichten Polypropylengarn, wobei die innere Schicht mit einem Bitumengemisch imprägniert ist.

Dynamisches Kabel

Das dynamische Kabel → 5 ist ein dreiphasiges 115-kV-Kabel mit einem Leiterquerschnitt von je 300 mm². Die WIG¹-geschweißte Ummantelung besteht aus gewelltem Kupfer und verfügt über eine doppelte Armierung, um das Eindringen von Wasser zu verhindern und die notwendige Beständigkeit gegen mechanische Ermüdung während der erwarteten Lebensdauer des Kabels von über 35 Jahren mit einem Sicherheitsfaktor von sechs zu gewährleisten. Die Ummantelung ist außerdem in der Lage, einphasigen Erdschlussströmen standzuhalten. Die Leiter sind gemäß IEC 60228 verseilt und kompaktiert. Der Leiterquerschnitt des dynamischen Kabels ist größer als der des statischen Kabels, weil das dynamische Kabel im Versteifungselement an seinem oberen Ende thermischen Einschränkungen unterliegt. Die Leiter sind in Längsrichtung durch eine Polymermasse wasserdicht versiegelt. In einem der Zwischenräume verläuft ein Glasfaserkabel mit 46 Singlemode- und zwei Multimode-

5 Aufbau des dynamischen Kabels





Fasern. Die Multimode-Fasern können zur Überwachung der Temperatur des dynamischen Kabels genutzt werden. Um das Verhältnis von Gewicht zu Durchmesser zu erhöhen, wurden in zwei der Zwischenräume Bleistäbe integriert. Ein Polyethylenmantel umschließt die verzinkten Drähte und schützt diese gegen Abrieb.

Reparaturmuffe

Sollte der dynamische Kabelabschnitt einmal beschädigt werden, wird dieser wahrscheinlich vollständig ausgetauscht. Für den längeren statischen Abschnitt ist eine Reparaturmuffe im Lieferumfang enthalten. Der elektrische Teil der Reparaturmuffe besteht aus drei vorgefertigten Kautschukkörpern (einer für jede Phase), die jeweils von einer hermetisch verschlossenen Ummantelung umgeben sind. Zusätzlich gibt es eine Muffe für das Glasfaserkabel. Eine feste Außenhülle dient als mechanischer Schutz und zur Übertragung mechanischer Kräfte.

Flexible Muffe

Die flexible Muffe verbindet das dynamische und das statische Kabel und besteht aus:

- drei flexiblen, vergossenen Muffen für die drei Leiter, jeweils umgeben von einem Bleimantel, der an die Metallummantelungen der Kabel gelötet wird,
- einer Muffe für das Glasfaserkabel,
- einer Armierung

Qualifizierung

Im Rahmen des Qualifizierungsprozesses wurden verschiedene Prüfungen, z.B. gemäß Electra 171 und IEC 60840, durchgeführt. Da diese Art von Prüfung recht bekannt ist, soll im Folgenden die weniger bekannte Flexibilitätssprüfung (Flextest) beschrieben werden.

Ein Flextest simuliert die Ermüdung des Kabels im Laufe seiner Lebensdauer durch

zunehmende Biegebeanspruchungen über einen kürzeren Zeitraum. Im Rahmen dieser Prüfung wurde ein Originalabschnitt des dynamischen Seekabels zwei Millionen Zyklen bei konstanter axialer Belastung ausgesetzt. Die verwendeten Lasten wurden auf der Grundlage der oben beschriebenen globalen Analyse errechnet.

Die Prüfung des Kabelabschnitts erfolgte auf einem Prüfstand, wobei das Versteifungselement und die Kabelbefestigung (Hang-Off) für den Test montiert wurden. In der Prüfanordnung wurde das Prüfmuster horizontal montiert, wobei das normalerweise oben liegende Ende mit einer Schwingvorrichtung und das andere Ende mit einem servohydraulischen 500-kN-Zugaktuator verbunden wurde. Eine elektrische Messung (Teilentladung und Leiterwiderstand) der Kabeladern vor und nach der Prüfung ergab keinerlei Hinweise auf Degradation. Eine Sichtprüfung und Untersuchung der Adern mit einer Penetrationsflüssigkeit bestätigte, dass in der Kupferummantelung keine Risse aufgetreten waren.

Seeerprobung

Da das Kabel mit einem neuen Verlegeschiff und Verlegesystem installiert werden sollte, wurde vor der eigentlichen Verlegung eine Erprobung auf See durchgeführt. Zu den Aufgaben gehörten:

- die Verifizierung der Verfahren zur Installation der VIV-Strakes² zur Unterdrückung wirbelinduzierter Schwingungen, der Auftriebskörper und zur Handhabung des steifen Kabelendes (ein steifes Rohr auf dem Kabel diente hierbei zur Simulation des Versteifungselements und der Befestigungsvorrichtung),
- die Verifizierung der Kabelverlegung in tiefen Gewässern unter den entsprechenden Bedingungen (Nordsee im Frühjahr).



Die Erprobungen verliefen zufriedenstellend – es waren nur leichte Veränderungen an einigen mechanischen Teilen des Verlegesystems erforderlich.

Fußnote

- 1 WIG = Wolfram-Inertgasschweißen



Das Gjøa-Projekt verbindet innovative Entwicklungsarbeit mit konsequentem Engineering in einer Umgebung, die keinen Raum für Fehler lässt.

Die Erprobungen verliefen zufriedenstellend, und es waren nur leichte Veränderungen an einigen mechanischen Teilen des Verlegesystems erforderlich. Außerdem stellte die Seerprobung eine wertvolle Trainingsmöglichkeit für die Verlegemannschaft dar.

Das Kabellegeschiff

Der Transport und die Installation des Kabels wurden vom Kabellegeschiff North Ocean 102 (Ladefähigkeit 5.800 t) durchgeführt. Das gesamte Kabel einschließlich des statischen und dynamischen Abschnitts wurde in einer Länge verlegt.

Dazu wurde das Kabel auf eine rotierende Trommel gewickelt → 8. Um das Kabel bei einer signifikanten Wellenhöhe von 4 m verlegen zu können, wurde eigens für das Projekt ein System zur Kompensation des Seegangs (Heave Compensated Chute, HCC) entwickelt, das die dynamische Zugspannung beim Verlegen des Kabels reduziert. Darüber hinaus wurde das Schiff mit zwei Spannvorrichtungen mit einer Zugkraft von 120 t ausgestattet → 6. Das Versteifungselement und die Befestigungsvorrichtung wurden bereits im Voraus montiert und oben auf dem Karussell gelagert.

Während des Beladens wurden an Bord des Schiffs temporäre Abschlüsse am Ende des dynamischen Kabels montiert. Zur Prüfung des gesamten Kabels nach dem Verlegen wurde jede Phase an eine gasisolierte Schaltkammer angeschlossen.

Kabelverlegung

Die gesamte Streckenlänge des Kabels von Mongstad → 8 bis zur Gjøa-Plattform betrug 98 km. Die Verlegearbeiten waren mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden. Dazu gehörten:

- die Anlandung des Kabels an der Küste von Mongstad,
- die Verlegung des Kabels einschließlich der VIV-Strakes an den steilen Unterwasserklippen vor Mongstad,
- die Verlegung des Kabels durch ein exponiertes Seegebiet,
- die Verlegung des Kabels in Wassertiefen von bis zu 540 m,
- die kontinuierliche Überwachung der Verlegung mithilfe eines ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugs (ROV),
- die sichere Handhabung und Entladung des Versteifungselements sowie der vorinstallierten Einzugsvorrichtung (Pull-In) und Befestigungsvorrichtung,
- die Installation von 73 permanenten Auftriebskörpern für die Lazy-Wave-Konfiguration,
- die Lagerung des dynamischen Kabelendes einschließlich der Auftriebskörper und der vorinstallierten Einzugs- und Befestigungsvorrichtung auf dem Meeresboden.

Rund 0,3 km vor der Küste von Mongstad verläuft eine Unterwasserklippe, die so steil ist, dass das Kabel mit beträchtlichen freien Spannweiten verlegt werden musste. Um die Gefahr von wirbelinduzierten Schwin-



gungen (Vortex-Induced Vibrations, VIV) zu reduzieren, wurde das Kabel mit sogenannten VIV-Strakes versehen. Außerdem wurden die freien Spannweiten durch Stein-schüttungen verringert.

Nach der Verlegung des dynamischen Kabelendes (einschließlich der Auftriebskörper) wurden das Versteifungselement sowie die Einzugs- und die Befestigungsvorrichtung bis zum Hochziehen des Kabels zur Plattform für etwa drei Monate auf dem Meeresboden abgelegt.

Die gesamte Streckenlänge des Kabels von Mongstad bis zur Gjøa-Plattform betrug 98 km.

Test vor und nach der Verlegung

Am Kabelende wurden sämtliche Glasfasern durch Fusionsspleißen zu einzelnen Schleifen verbunden. Dies ermöglichte eine kontinuierliche OTDR3-Messung während der Kabelverlegung, die von der Unterstation in Mongstad aus durchgeführt wurde.

Unmittelbar nach der Platzierung der flexiblen Übergangsmuffe auf dem Meeresboden und der Installation der Auftriebskörper wurde eine elektrische Prüfung durchgeführt.

Einholen und Anschluss

Vor dem Einziehen wurde das auf dem Meeresboden abgelegte Kabel angehoben und die Einzugsvorrichtung mit der Seilwinde der Plattform verbunden. Anschließend wurde die vorinstallierte Kabelbefestigung zum Gegenstück auf der Plattform gezogen und das Kabel gesichert → 9.

Nach dem Einziehen wurde die Armierung des dynamischen Kabels entfernt, und die Phasenleiter und Glasfaserkabel wurden angeschlossen. Die Abschirmungen der Phasen und die Ummantelung des Glasfaserkabels wurden mit einer Erdungs-schiene verbunden.

Ein erfolgreicher Abschluss

Das Gjøa-Projekt verbindet innovative Entwicklungsarbeit mit konsequentem Engineering in einer Umgebung, die keinen Raum für Fehler lässt. Es handelt sich um die erste Kabelverbindung dieser Art zu einer schwimmenden Plattform. Das Projekt hat das Wissen und die Fähigkeiten von zwei Branchen zusammengeführt, die normalerweise weitgehend getrennt voneinander agieren: die Öl- und Gasindustrie und die Hochspannungskabelindustrie. Das Ergebnis ist eine Energieversorgung, die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beiträgt.



Der vorliegende Artikel ist eine verkürzte Version eines Beitrags, der von den Autoren anlässlich der JICABLE11 im Juni 2011 in Paris unter dem Titel „HVAC Power Transmission to the Gjøa Plattform“ vorgestellt wurde. Ein ähnlicher Beitrag wurde im Rahmen der CIGRE 2010 veröffentlicht.

Erik Eriksson

Marc Jeroense

Magnus Larsson-Hoffstein

Claes Sonesson

ABB AB, High Voltage Cables

Karlskrona, Schweden

claes.sonesson@se.abb.com

erik.x.eriksson@se.abb.com

magnus.larsson-hoffstein@se.abb.com

marc.jeroense@se.abb.com

Knut-Aril Farnes

Rolf Ove Råd

Karl Atle Stenevik

StatOil AS, Stavanger, Norwegen

kafa@statoil.com

rora@statoil.com

katst@statoil.com

Fußnoten

- 2 Ein Strake ist ein Element zur Verbesserung der aerodynamischen (oder in diesem Fall hydrodynamischen) Eigenschaften einer Oberfläche.
- 3 OTDR = Optical Time-Domain Reflectometer (optisches Zeitbereichsreflektometer)