Nord Stream 2 (Teil 2): Offshore-Pipeline-Verlegung im Anlandebereich sowie Betrachtung der Sicherheitsaspekte

Von Thorsten Gallus und Roberto Ferrari

Der Bau der Nord Stream 2-Pipeline kommt weiter zügig voran, was im Wesentlichen einer ausführlichen und detaillierten Planung zu verdanken ist. Erfahrungen aus dem Nord Stream 1-Projekt konnten verwertet werden und somit kann der Energiebedarf Europas bestimmungsgemäß gedeckt werden. In Teil 1 dieser Veröffentlichung (3R-10-11-2019) wurden die Routenführung zur Pipeline und die verfahrenstechnischen Aspekte ausführlich beschrieben. Teil 2 befasst sich mit dem Landfall und Sicherheitsaspekten.

Routenführung der Nord Stream 2-Pipeline in Deutschland

Die Nord Stream 2-Route orientiert sich stark an einer Parallelführung zur bestehenden Nord Stream-Route. Ein Regelabstand von 1000 m wurde aus bautechnischen Gründen festgelegt. Lediglich im Anlandebereich des Greifswalder Boddens wurde aufgrund der Seebodenbeschaffenheit, der bestehenden Schifffahrtsstraßen, den am Seeboden befindlichen Wracks sowie dem durch das Landesraumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern vorgegebenen Raumordnungskorridor von diesem Abstand und der Parallelführung abgewichen.

Am Eingang zum Greifswalder Bodden kreuzt die Nord Stream 2-Pipeline die sogenannte Boddenrandschwelle. In dem flachen Wasser befindet sich als zusätzliches Hindernis eine aus über 20 Schiffswracks bestehende Barriere. Diese Wracks wurden während des Großen Nordischen Kriegs (1700 – 1721) versenkt, um den Zugang zur Bucht durch feindliche Schiffe zu verhindern. Um die notwendige Baufreiheit für die Nord Stream 2-Pipeline zu schaffen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Kultur und Denkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern (LaKD M-V) die Überreste von zwei Wracks vor den Bauarbeiten geborgen und nach Abschluss der Bauarbeiten wieder nahe ihrer Ursprungslage zurückgebracht.

Umweltfachliche und ökologische Anforderungen innerhalb der Schutzgebiete haben die Planung der Verlegearbeiten maßgeblich bestimmt und technische Aspekte direkt beeinflusst. Aufbauend auf den Erfahrungen von Nord Stream wurden Baumethodik und Installationssequenz festgelegt, um die Umweltauswirkungen möglichst gering zu halten und die Dauer der Bauarbeiten auf das verfügbare Zeitfenster zu beschränken. Im Interesse eines möglichst geringen Eingriffes in das sensible Ökosystem hat sich die Nord Stream 2 AG verpflichtet, mit seeseitigen Bauarbeiten erst nach der Heringslaichzeit im Greifswalder Bodden, am 15. Mai, zu beginnen. Zudem sind innerhalb der FFH-Gebiete alle Offshore-Bauarbeiten bis zum 31. Dezember, abzuschließen ***(Bild 1)***. Im Bereich der Pommerschen Bucht und der

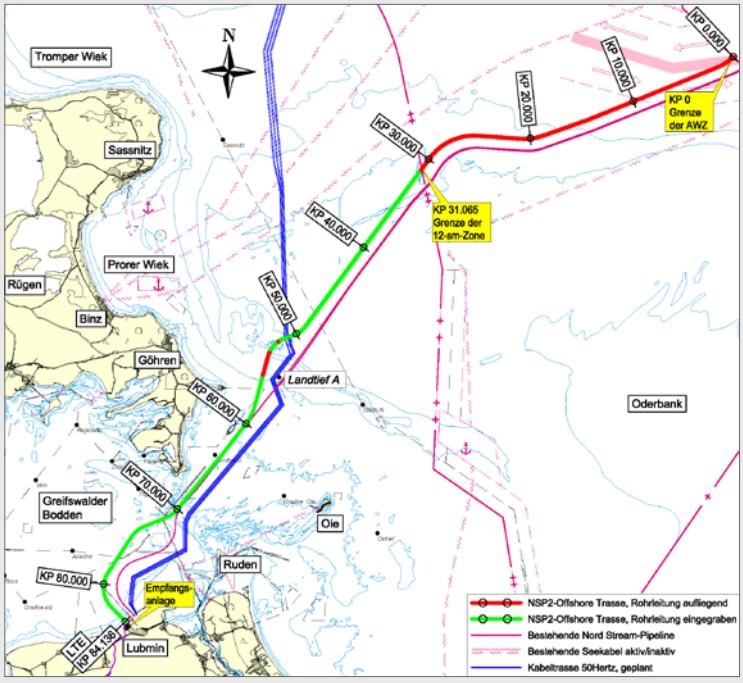

***Bild 1**: Trasse der Nord Stream 2-Pipeline – Bereich des deutschen Landfalls*

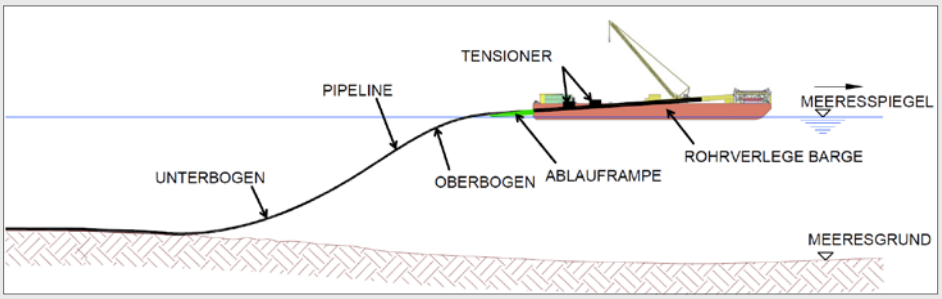

***Bild 2**: Systemskizze „S-Lay"-Pipelineverlegung*

Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurde das Baufenster ebenfalls auf einen Zeitraum zwischen dem 15. Mai und 31. Dezember eingeschränkt.

Bautechnische Aspekte der Nord Stream 2-Pipeline in Deutschland

Der deutsche Routenabschnitt ist mit ca. 84 km zwar einer der kürzesten, mit der Anlandung im Greifswalder Bodden jedoch einer der komplexesten Abschnitte des Nord Stream 2-Projektes.

Während der überwiegende Teil der ca. 1.225 km langen Trasse von Russland nach Deutschland durch zwei große Rohrverlegeschiffe installiert wird, kommen in Deutschland zwei weitere Rohrverleger zum Einsatz, die auf die speziellen Gegebenheiten im Flachwasser zugeschnitten sind. Insgesamt werden so bis zu vier Rohrverleger in Deutschland zum Einsatz kommen:

» Greifswalder Bodden: Castoro 10 (2 x 30 km)
» Pommersche Bucht und AWZ: Audacia (2 x 37,5 km)
» AWZ: Pioneering Spirit und Solitaire (2 x 16,5 km)

In Wassertiefen von weniger als 17,5 m werden die Nord Stream 2-Leitungen im Seeboden eingegraben. Im Bereich des FFH-Gebietes Greifswalder Bodden werden beide Leitungen mit lediglich 4,5 m Abstand in einem gemeinsamen Graben verlegt. Im Bereich der Pommerschen Bucht wird pro Pipelinestrang ein Graben hergestellt. Alle Gräben werden nach erfolgter Verlegung zurückverfüllt. Hieraus ergeben sich umfangreiche Nassbaggerarbeiten und insgesamt werden nahezu 3 Millionen m³ Seeboden aufgenommen, zwischengelagert und wieder zurückverfüllt.

Zur Kreuzung von Strand und Küstenwald im unmittelbaren Anlandebereich von Lubmin wurden zwei 700 m lange Mikrotunnel für den späteren Pipelineeinzug von Land aus Richtung Wasser vorgetrieben.

Bauablauf einer Offshore-Verlegebarge

Bei allen Offshore-Velegearbeiten des Nord Stream 2-Projektes kommen Rohrverleger mit dem sogenannten „S-Lay"-Verfahren zum Einsatz (***Bild 2***). Dieses hat seinen Namen aus dem S-förmigen Profil, das die Rohrleitung während der Verlegung einnimmt und das durch den Rohrverleger kontinuierlich im Rahmen zuvor berechneter Parameter gehalten werden muss.

Die bestimmenden Verlegeparameter im „S-Lay" sind Zugkraft und Radius der Ablauframpe. Letzterer begrenzt geometrisch die Spannungen im Oberbogen, während die Zugkraft den Radius und somit die Spannungen des Unterbogens bestimmt. Alle Parameter sind hierbei maßgeblich durch die Wassertiefe und die Rohrleitungsdaten beeinflusst und können entlang der Route variieren. Die Verlegung auf dem Wasser ist zudem durch die vom Schiff abhängigen Grenzen für Wellenhöhe, Strömungen und Windlast beeinflusst.

Während die großen Verlegeschiffe von Russland nach Deutschland dynamisch positioniert sind und sowohl Zugkraft als auch die Positionierung durch Thruster (Schiffsantrieb) generiert werden, kommt bei den Rohrverlegern im Flachwasser ein klassisches Ankersystem zum Einsatz. Um mit einem Ankersystem zu positionieren, kommen zusätzlich zur Verlegebarge mehrere Ankerschlepper zum Einsatz, die die einzelnen Anker regelmäßig entsprechend dem Fortschritt der Rohrleitungsarbeiten versetzen (***Bild 3***).

Der Rohrleitungsbau auf den Verlegeschiffen findet in der sogenannten „Firing Line", der Produktionsstraße, statt. Hier werden die Rohre vorgerichtet, auf mehreren Stationen entlang der Produktionsstraße verschweißt, geprüft und beschichtet. Im hinteren Drittel der Produktionsstraße befinden sich die Tensioner, große Raupenfahrwerke, die

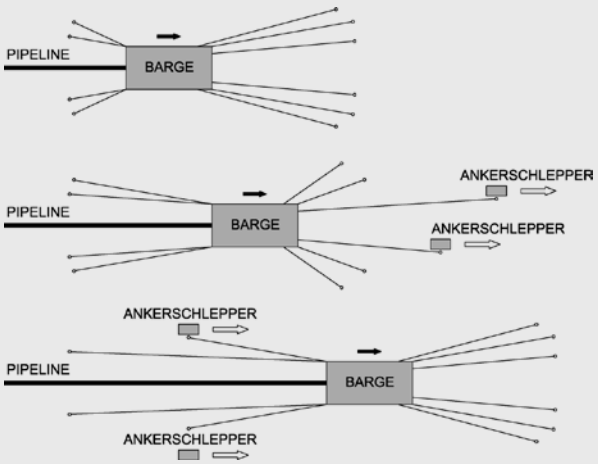

***Bild 3**: Typisches Ankermuster einer geraden Strecke*

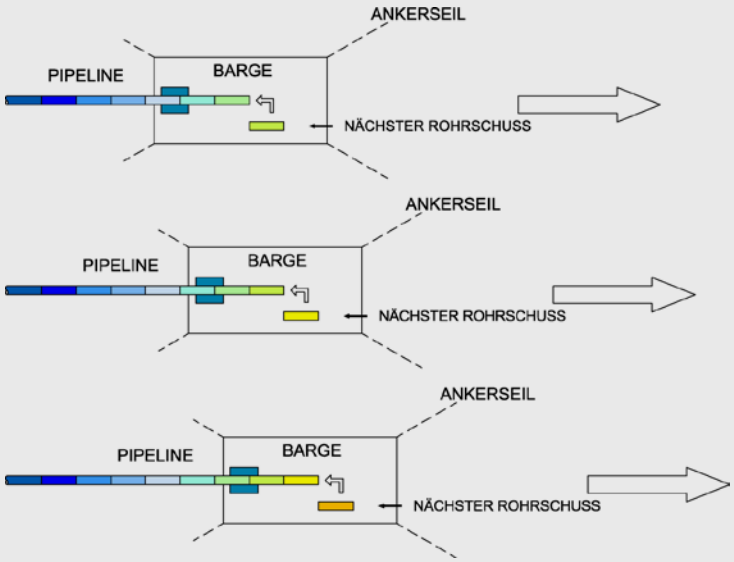

***Bild 4**: Typische Arbeitssequenz eines Rohrverlegers*

die Zugkraft auf das Rohr übertragen. Am Ende der Produktionsstraße, am Übergang zum Wasser befindet sich die Ablauframpe, die aus einer Reihe von höhenverstellbaren Rollen besteht. So wie in der Produktionsstraße Rohr an Rohr verschweißt wird, muss der Rohrverleger jeweils um eine Rohrlänge entlang der Trasse verholen (***Bild 4***, ***Bild 5***).

Installation zweier Mikrotunnel zu Querung des Strandes bei Lubmin

Im Vorfeld der Pipeline-Verlegung im Greifswalder Bodden wurden zwei Mikrotunnel mit je 2 m Außendurchmesser und etwa 700 m Länge vom Gelände der späteren Molchempfangsstation bis etwa 400 m ins Wasser vorgetrieben (***Bild 6***). Der Tunnel unterquert die Gleise der EWN-Werksbahn, eine Straße, einen Lärmschutzwall, die in Betrieb befindlichen Gashochdruckleitungen OPAL und NEL, den Küstenschutzwald und den öffentlichen Strand von Lubmin. Das Tunnelende befindet sich etwa in ca. 2 m Wassertiefe und etwa 5 m Überdeckung.

Die beiden Tunnel wurden parallel von zwei eigenständigen Schächten, mit zwei Vortriebsmaschinen errichtet. Lediglich die Logistik und Spülungsaufbereitung der beiden Tunnelbaustellen wurde kombiniert.

Nachdem die beiden Tunnel errichtet und für den Einzug vorbereitet waren, starteten die Nassbaggerarbeiten, um den Graben für die Pipelineverlegung sowie die Grube zur Bergung der Tunnelbohrmaschinen (TBM) herzustellen. Die TBMs wurden mittels Auftriebskörpern aus der Grube geborgen und in den Hafen Lubmin geschleppt, wo sie von einem Mobilkran geborgen wurden.

***Bild 5**: Schweißarbeiten in der „Firing Line" der Castoro 10*

Verlegung im Greifswalder Bodden mit der Castoro 10

Die Offshore-Velegearbeiten im Greifswalder Bodden wurden zwischen Ende Juli und Anfang November 2018 durch die Verlegebarge Castoro Dieci (C10) ausgeführt. Die C10 hat in dieser Zeit beide Rohre mit Hilfe einer landseitigen Winde in den 700 m langen Mikrotunnel zur Anlandestation eingezogen und anschließend die 2 x 30 km 48"-Leitung in Wassertiefen von 4,5 bis 18 m installiert.

Die C10 (***Bild 7***) wurde auch schon beim Bau der Nord Stream-Leitung eingesetzt und ist aufgrund ihrer geringen Größe und Tiefgangs (37 x 135 m, 4 m Tiefgang) sowie der Fähigkeit, die großen und schweren Rohre der Nord Stream 2-Leitungen (48", ca. 25 t pro Rohr) zu verlegen, eine der wenigen Verlegebargen weltweit, die für den Einsatz in Frage gekommen sind.

Die beiden Pipelines wurden in einem gemeinsamen Graben mit einer Sohlbreite von 8,5 m in geraden und 10,5 m in den kurvigen Abschnitten (Radius ~2500 m) verlegt. Die Breite des Grabens wurde so gewählt, dass die von Nassbaggerarbeiten betroffene Fläche so gering wie möglich ist.

Die Verlegesequenz wurde durch den Einzug in die Mikrotunnel und die engen Kurven der Trassenführung bestimmt. In diesen Kurven wurde immer die innere Leitung zuerst verlegt, um eine Berührung der beiden Pipelines während der Verlegung der zweiten Leitung zu verhindern. Zwecks Kontrolle der Pipelinepositionierung im Graben wurde die C10 ständig durch ein Vermessungsschiff unterstützt. Das schrittweise Fertigstellen beider Leitungen gewährleistete darüber hinaus, dass die Grabenrückverfüllung schneller erfolgen konnte, um die Zeitspanne, in der der Graben offen lag, möglichst kurz zu halten.

Die erzielte Verlegegeschwindigkeit der C10 lag im Maximum bei 120 Rohren (1.460 m) am Tag, durch die komplexe Routenführung, mehrere Verlegeabschnitte und teilweise sehr aufwändige Ankermuster lag die durchschnittliche Verlegeleistung jedoch bei ca. 700 m pro Tag.

Entlang der Route sind neben dem Einzug in die Tunnel zwei weitere Aspekte besonders zu erwähnen: Die Querung der

***Bild 6**: Küstenquerung mittels Mikrotunnel*

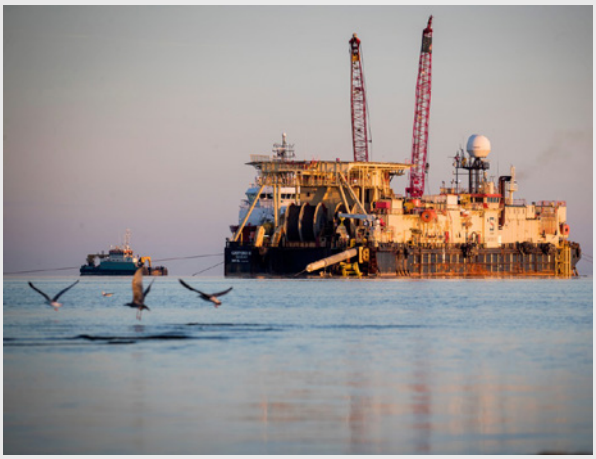

***Bild 7**: Castoro 10 im Greifswalder Bodden – Start des Pipeline-Einzuges*

Boddenrandschwelle, ein Flachwasserbereich mit teilweise weniger als 3 m Wassertiefe und die vorgenannte Schiffssperre (***Bild 8***). In diesem Trassenabschnitt von etwa 2.500 m Länge wurde zusätzlich zum Pipelinegraben ein Zugangskanal für die C10 gebaggert, um die 4,5 m Mindestwassertiefe für die Verlegebarge herzustellen. Dieser Kanal musste aus Umweltgründen auf ein absolutes Minimum an Querschnitt reduziert sein. Die geringe Wassertiefe (nur 0,5 m Kielfreiheit) erforderte ein geeignetes Wetterfenster und vor allem einen ausreichenden Wasserstand. Die historisch wertvollen Wracks der Schiffssperre erforderten sehr komplexe Ankermuster sowie den Einsatz von Schwimmleinen und Auftriebskörpern an den Ankerseilen. Die Anker konnten zudem nur mit kleinen und flachgehenden Ankerschleppern versetzt werden.
Ebenfalls erwähnenswert ist die parallele Lage der in Betrieb befindlichen Nord Stream-Leitung. Diese verläuft über 13 km Trassenlänge in einem Abstand von etwa 100 m und somit im Ankermuster der C10. Die Parallelführung stellte besondere Anforderungen an die Ankerbewegungen und erforderte wiederum Auftriebskörper und Schwimmseilverlängerungen an den Ankerseilen, um sicherzustellen, dass der Seeboden oberhalb der Nord Stream-Pipeline unberührt bleibt.

Verlegung in der Pommerschen Bucht mit der Audacia

Im Bereich der Pommerschen Bucht wurden zwei Pipelinestränge durch das Verlegeschiff Audacia (***Bild 9***) installiert. Die Audacia wurde hierzu mit einem Positioniersystem aus zehn Ankern ausgestattet, um in flachen Bereichen unter 20 m Wassertiefe keine unnötigen Aufwirbelungen am Seeboden durch den Einsatz ihres dynamischen Positionierungssystems zu verursachen.

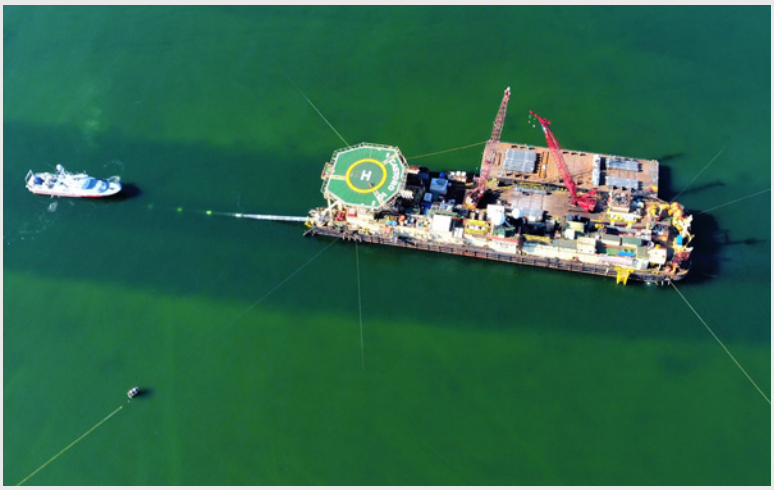

***Bild 8**: Castoro 10 im temporär gebaggerten Zugangskanal der Boddenrandschwelle*

***Bild 9**: Rohrverlegeschiff Audacia*

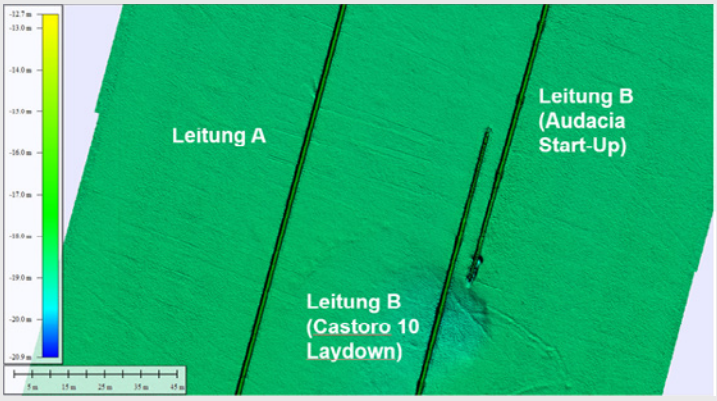

***Bild 10**: Situation bei KP 54.4 nach der Pipelineverlegung in zwei getrennten Abschnitten*

Die Verlegearbeiten begannen an einem durch die Castoro 10 verlegten Strang. Das auf dem Seeboden abgelegte Pipelineende von Leitung A wurde aufgenommen und weiter Richtung Dänemark verlegt. Der Bauablauf gab vor, dass der zweite Strang begonnen werden musste, bevor die Castoro 10 ihren Abschnitt am Seeboden ablegen konnte. Der Audacia-Rohrabschnitt der Leitung B wurde somit ohne Verbindung zum C10-Abschnitt verlegt.

Verbindung zweier Pipelineabschnitte mittels AWTI

Nachdem die Castoro 10 das Ende ihres Abschnittes der Leitung B knapp neben und parallel dem Start des Audacia-Abschnittes der Leitung B abgelegt hat, müssen beide Abschnitte miteinander verbunden werden (siehe ***Bild 10***). Diese Verbindung wird durch einen sogenannten „Above Water Tie-In (AWTI)" hergestellt.

Der AWTI wurde durch die Castoro 10 im Sommer 2019 durchgeführt (***Bild 11***). Die Verlegebarge war dafür mit sechs Hebezeugen entlang ihrer 135 m langen Steuerbordseite ausgestattet. Die beiden Pipelineenden wurden mit jeweils drei Hebezeugen und fünf Auftriebskörpern vom Seeboden bis etwa 2 m über die Wasseroberfläche angehoben, so dass die Enden im Trockenen auf die passende Länge geschnitten und zueinander ausgerichtet werden können. Anschließend werden die Pipelineabschnitte verschweißt. Diese Arbeiten fanden auf einer knapp über Wasseroberfläche ausgeklappten Plattform statt, die ebenfalls seitlich der Castoro 10 angebracht war. Nachdem die Verbindungsnaht geprüft und beschichtet worden war, wurde die nun verbundene Rohrleitung seitlich auf dem Seeboden abgelegt. Die Anschlagpunkte und Auftriebskörper wurden durch Taucher von der Rohrleitung entfernt und in einem späteren Schritt wird noch der Bereich mit mehreren Steinschüttungen am Seeboden in seiner Lage fixiert.

Neben dem AWTI zwischen den Abschnitten der Castoro 10 und Audacia bei KP 54.4 der Leitung B werden in Deutschland zwei weitere AWTIs bei KP 16,5 erforderlich. Hier hat die Audacia die beiden Leitungen im November/Dezember 2018 bereits auf dem Seeboden abgelegt. Die aus Russland kommenden Leitungsstränge werden in der deutschen AWZ jedoch erst später verlegt. Die Verbindungen werden dann ebenfalls durch die Castoro 10 vorgenommen.

Fazit

Die Anlandung der Nord Stream 2-Pipeline im Greifswalder Bodden war mit den umweltfachlichen Anforderungen, der Nähe zu bestehenden Leitungen, den flachen Wassertiefen und nicht zuletzt aufgrund der großen Dimension der zu installierenden Rohrleitungen in der technische Realisierung äußerst anspruchsvoll.

Die Pipelineverlegung benötigte zudem ein nicht weniger aufwändiges und komplexes Nassbaggerprojekt, das zeitlich abgestimmt den Graben vorbereitet und im Nachgang wieder fachgerecht zurückverfüllt hat.

Die Verlegung der Rohrleitung mit insgesamt vier Verlegeschiffen in mehreren Abschnitten und unter-schiedlichen Verlegerichtungen erfordert die Einhaltung von aufeinan-

***Bild 11**: AWTI mit der Castoro 10*

der abgestimmten Bauzeiten. Die späteren Verbindungen dieser Abschnitte erfordern eine separate Mobilisierung von Spezialequipment.

Sicherheitsaspekte bei der Nord Stream 2-Pipeline

Für die Nord Stream 2-Pipeline muss, wie für jede Hochdruckleitung, eine Bemessung durchgeführt werden, bei der die Dimensionierung der Konstruktionselemente und die Materialeigenschaften so festgelegt werden, dass die Beanspruchungen der Konstruktion infolge äußerer Einwirkungen (Spannungen) und die Gebrauchstauglichkeit (Verformungen) sicher aufgenommen werden können.

Mit dem DNVGL-Standard DNVGL-ST-F101 steht ein ausgereiftes und international akzeptiertes Regelwerk zur Verfügung, das speziell für Offshore-Pipelines entwickelt wurde und alle wesentlichen Aspekte der sicheren Auslegung, der Errichtung und des Leitungsbetriebes behandelt. Der DNVGL-Standard ist im deutschen Bereich der Ostsee zusammen mit der DIN EN 14161 anzuwenden. Ein wesentlicher Bestandteil der beiden vorgenannten Regelwerke ist die Bemessung unter Betrachtung von Grenzzuständen und unter Ansatz festgelegter Sicherheitswerte bzw. von Teilsicherheitsfaktoren auf der Lastseite und auf der Widerstandsseite des Materials.

Für die dominierende Einwirkung des Innendrucks erfolgt die Bemessung wie bei allen einschlägigen Vorschriften für Hochdruckleitungen über die Kesselformel. Der Bemessungsansatz unter Anwendung von Formeln mit „festgelegten" Sicherheiten wird auch als „deterministische" Bemessung bezeichnet. Diese Sicherheiten sind nicht mathematisch oder physikalisch ableitbar, sondern werden von den jeweiligen Regelsetzern in Gremien nach Erfahrungswerten festgelegt. In die Festlegung gehen selbstverständlich auch die zu bewertenden Risiken in Form von Fluid-Kategorien und Lokations-Klassen ein. So sind die Sicherheitszahlen für Offshore-Leitungen in der Regel niedriger als für Onshore-Leitungen.

Dass bei Hochdruckleitungen mit der Anwendung der Kesselformel weitere Lasten aus Erdüberdeckung, Verkehr, äußerem Wasserdruck, Zwangsverformung aus Setzung usw. vernachlässigt werden, ist insofern richtig, als diese Zusatzlasten sehr gering sind und im Regelfall unter 5 % der Beanspruchung aus Innendruck liegen. Wenn Zusatzlasten, wie z. B. freie Durchhänge, Wellen, Fischereigeschirr usw., signifikante Werte einnehmen, müssen sie über den üblichen Nachweis der Vergleichsspannungen in das deterministische Bemessungskonzept einbezogen werden.

Auch die Betonummantelung und eine ggf. notwendige Pipelineüberdeckung wird zunächst deterministisch, nämlich zur Sicherung der Lagestabilität der Rohrleitung am Seeboden, ausgelegt.

Über das deterministische Bemessungskonzept hinaus gibt es Einwirkungen, insbesondere unfallbedingte Einwirkungen, die sich sinnvollerweise in diese Bemessungen nicht einbinden lassen. Bei Offshore-Leitungen sind dies z. B.:

- Anprall von Schiffen oder treibenden Objekten (Sinken, auf Grund laufend);
- Ankerkräfte aus Aufprall oder geschlepptem Anker;
- Aufprall von verlorener Schiffsladung, Übungsmunition o. ä.;
- Unvorhergesehene Bewegungen bzw. Rutschungen im Meeresboden;
- Fehlbedienungen.

Würde man eine Offshore-Leitung ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen gegen diese Einwirkungen deterministisch bemessen, so würden sich Wanddicken ergeben, die in der Praxis nicht mehr hergestellt werden können und die lediglich durch einen äußerst selten auftretenden Belastungsfall begründet wären.

Um diesen Fällen gerecht zu werden und ihr Einflusspotenzial einzubeziehen, wird in begründeten Fällen der deterministischen Bemessung die sogenannte probabilistische Bewertung nachgeschaltet. Dieses Vorgehen ist in ***Bild 12*** dargestellt, in dem die probabilistische Bewertung zunächst in Form einer Structural Reliability Analysis (SRA) durchgeführt wird.

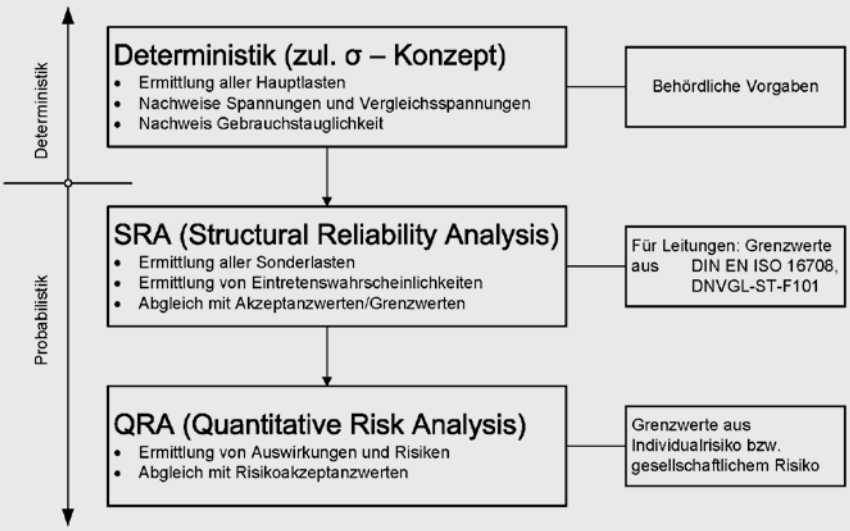

***Bild 12**: Deterministische und probabilistische Sicherheitskonzepte*

Quelle: www.marinetraffic.com

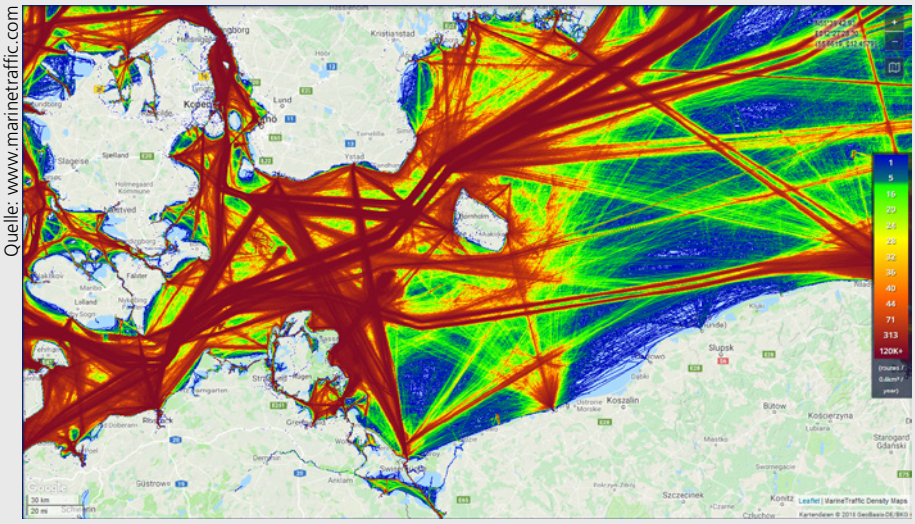

***Bild 13**: Density-Map für den südwestlichen Teil der Ostsee*

In der SRA werden nicht die Auswirkungen, sondern die Eintretenswahrscheinlichkeiten der Sonderbelastungen ermittelt und einem normativen Grenzwert gegenübergestellt. Der Grenzwert berücksichtigt dabei die Auswirkungen implizit über Klassen für Medium, Gebiet und Sicherheit. Werden die Anwendungsgrenzen für den normativen Grenzwert verlassen, besteht in einer weiteren probabilistischen Bewertungsstufe, der Quantitative Risk Analysis (QRA), die Möglichkeit zur Ermittlung des konkreten Risikos, als Verknüpfung aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung. In den weiteren Ausführungen wird ausschließlich die SRA betrachtet. In allen Fällen gilt selbstverständlich, dass die deterministische Auslegung für alle Hauptlasten, insbesondere für den dominierenden Innendruck und die Lagestabilität jederzeit Gültigkeit behält.

Der Standard DNVGL-ST-F101 orientiert sich an ISO 13623 und damit an der Norm DIN EN 14161, die eine modifizierte Fassung der ISO 13623 darstellt. Der DNVGL-Standard erfüllt damit die technischen Anforderungen der DIN EN 14161 an Offshore-Pipelines. Weiterhin stimmt der DNVGL-ST-F101 bezüglich der Auslegung der Rohrleitungstransportsysteme auf Grundlage von Zuverlässigkeitsanalysen mit der DIN EN ISO 16708 überein und konkretisiert darüber hinaus deren Anforderungen an Offshore-Leitungen. Der DNVGL-Standard behandelt somit alle wesentlichen Aspekte von Offshore-Leitungen, wie z. B. Design für Haupt- und Sonderlasten unter Anwendung von deterministischen und probabilistischen Sicherheitskonzepten, Fertigung von Komponenten, Errichtung des Rohrleitungsstranges, Korrosionsschutz, Schwergewichtsumhüllung, Inbetriebnahme, Betrieb- und Außerbetriebnahme usw.

Die genannten Vorschriften erheben den wesentlichen Anspruch, dass mithilfe probabilistischer Untersuchungen und Grenzwertabgleiche die deterministisch für die Hauptlasten festgelegten Konstruktionskennwerte nicht „optimiert", d. h. minimiert, werden dürfen.

Beispiel: Einwirkungen auf die Nord Stream 2 aus Ankerkräften infolge Aufprall oder geschlepptem Anker

Die für das Projekt Nord Stream 2 durchgeführten Prüftätigkeiten für den deutschen Teil der Ostsee haben beispielsweise ergeben, dass als mögliche Einwirkung aus Schiffsverkehr bei einer Notankerung die Sonderlast „Ankerkräfte infolge Aufprall oder geschlepptem Anker" zu betrachten ist. Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die Analyse von Erhebungen des Schiffsverkehrs, im vorliegenden Fall in Form von Daten aus dem Automatic Identification System (AIS) der Internationalen Seeschifffahrt und Statistiken zu Schiffsunfällen im Zuständigkeitsgebiet des WSA Stralsund. Eine exemplarische Darstellung solcher Schiffsverkehrsdaten in Form einer Density-Map findet sich in ***Bild 13***. Deutlich erkennbar sind Vorranggebiete der Schifffahrt bzw. Routen mit hohen Schiffsfrequenzen. Die Kreuzungen solcher Bereiche mit hoher Schifffrequenz mit der NSP2 sind maßgebend für den probabilistischen Nachweis. Für die Bewertung wird die NSP2 dementsprechend in Sektionen unterteilt.

Bei einer differenzierten Betrachtung des Schiffsverkehrs mit Schiffklassen und zugehörigen Ankerklassen sowie mit Berücksichtigung der schützenden Wirkung der Betonummantelung unter Anwendung des Formelwerks der Richtlinie DNVGL-RP-F107 kann gezeigt werden, dass Aufprallereignisse von Ankern auf die Pipeline, die lediglich Beulen erzeugen, deren Tiefe 5 % des Durchmessers der Pipeline nicht überschreiten, aus der probabilistischen Bewertung herausgenommen werden können. Damit wird implizit festgelegt, dass sie in den Bereich der deterministischen Bemessung überstellt werden.

Diese Aufteilung ist nur dann zulässig, wenn nachgewiesen wird, dass die damit verbundenen Beanspruchungen der Gashochdruckleitung nicht zu einem Schaden führen. Zunächst gilt, dass Beulen in Gashochdruckleitungen, die z. B. bei Landleitungen sehr häufig durch Einwirkungen Dritter entstehen, nicht automatisch zur Zerstö-

rung oder Einschränkung der Leitungsintegrität führen. In der DVGW-Regel G 473 ist ebenfalls eine Begrenzung der Beulentiefe festgelegt. Demgegenüber ist der 5-%-Grenzwert konservativ. Dennoch muss dieser Ansatz einer Sicherheitsbetrachtung zugeführt werden.

Im vorliegenden Fall ist bei dieser Vorgehensweise zwischen „innerer und äußerer Sicherheit" zu unterscheiden. Die äußere Sicherheit verlangt, dass unter Beachtung von Beanspruchungen oder Zwangsverformungen die Dichtigkeit und Festigkeit der Gashochdruckleitung erhalten bleibt. Das ist zweifellos der Fall, wenn die Beulentiefe auf die angegebenen 5 % des Durchmessers begrenzt wird. Allerdings kann diese Aussage u. U. nur temporär gültig sein, da im Bereich dieser Zusatzbeanspruchung Ermüdungserscheinungen und andere Werkstoffprobleme langfristig zu Schäden führen können.
Damit wird aufgezeigt, dass der Betreiber der Leitung sich mit der „inneren Sicherheit" befassen muss. Diese innere Sicherheit kann dadurch infrage gestellt sein, dass betriebliche Probleme entstehen (z. B. Molchbarkeit der Leitung) oder langfristig Werkstoffprobleme auftreten können.
Für den Fall des geschleppten Ankers hat sich gezeigt, dass die Klasse der kleinen Anker, die aufgrund ihrer Geometrie sich nicht in der Pipeline verhaken können und über diese hinwegrutschen, ebenfalls aus der probabilistischen Bewertung herausgenommen werden kann. Hieraus ergibt sich für die probabilistische Bewertung der verbleibende Anteil der maßgebenden Ankerklassen, die mit den jeweils aus statistischen Auswertungen ermittelten Häufigkeiten der Schiffüberquerungen der Pipeline berücksichtigt werden. Schließlich ergeben sich für das Szenario schadenswirksamer Berührungen der NSP2 durch Anker Eintrittswahrscheinlichkeiten, die in der Größenordnung von mindestens zwei Zehnerpotenzen unterhalb des Grenzwertes von 10^{-5} pro Jahr und pro km (gem. DNVGL-ST-F101, Tab. 2-5) liegen und damit zulässig und unkritisch sind.
Die Teilung der Ankertreffer in resultierende kleinere Beanspruchungen, die deterministisch behandelt werden, und größere Beanspruchungen, bei denen die Zerstörung der Pipeline nicht auszuschließen ist und die probabilistisch bewertet werden, ermöglicht eine differenzierte und zulässige Bewertung.

Fazit

Die aufgezeigten deterministischen und probabilistischen Sicherheitskonzepte für Hochdruckleitungen ermöglichen eine sichere und wirtschaftliche Leitungsauslegung unter Berücksichtigung aller Haupt- und insbesondere Sonderlasten, die bei ausschließlich deterministischer Auslegung teilweise nicht machbar wäre.

SCHLAGWÖRTER: Structural Reliability Analysis, Zuverlässigkeitsanalyse, Probabilistik, Leitungssicherheit, Risikoanalyse, Leitungsdesign

AUTOREN

Dipl.-Ing. (FH) **THORSTEN GALLUS**
Nord Stream 2 AG, Zug, Schweiz
Tel. +41 41 414 55 25
thorsten.gallus@nord-stream2.com

Dipl.-Ing. **ROBERTO FERRARI**
Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover
Tel. +49 511 28499-0
fer@veenkergmbh.de

Ihr Kontakt zur 3R

Redaktion
Dipl.-Ing. Nico Hülsdau
Telefon + 49 201 82002-33
Telefax + 49 201 82002-40
E-Mail: n.huelsdau@vulkan-verlag.de

Abonnement/Einzelheftbestellungen
Silvia Spies
Telefon + 49 201 82002-14
Telefax + 49 201 82002-34
E-Mail: s.spies@vulkan-verlag.de

Mediaberatung
Anja Vanessa Röttgers
Telefon + 49 201 82002-31
Telefax + 49 201 82002-40
E-Mail: v.roettgers@vulkan-verlag.de

Anzeigenverwaltung
Tanja Schneider
Telefon + 49 201 82002-61
Telefax + 49 201 82002-40
E-Mail: t.schneider@vulkan-verlag.de

Wenn Sie spezielle Fragen haben, helfen wir Ihnen gerne.