

Beanspruchungen von Gashochdruckleitungen bei Sub-Zero-Betrieb und Vorstellung konstruktiver Lösungen zur Entlastung der Leitungen

Von R. Ferrari¹⁾

1. Problemstellung

Der Auslegungsdruck und der Durchmesser einer Gashochdruckleitung hängen vom Transportbedarf sowie von anderen wirtschaftlichen Überlegungen ab. Der Gastransportbedarf ändert sich mit der Gasnachfrage bedingt durch die Jahreszeiten in der Regel zyklisch. Dabei können auf Grund der Änderung der Betriebsparameter in Abschnitten der Gasleitung Betriebszustände eintreten, in denen die Gastemperatur fortlaufend unter 0 °C liegt. In dieser Phase des sogenannten Sub-Zero-Betriebs bildet sich um die eingeedete Leitung herum im Boden ein Frostmantel, dessen Dicke vom zeitlichen Verlauf der Gas- und Bodentemperatur, der Überdeckung und weiteren Faktoren abhängt. Jede Sub-Zero-Phase endet bei steigenden Gastemperaturen mit einer Tauphase, bei der der Frostmantel um die Leitung von innen her auftaut.

Verläuft ein eingeedeter Gasleitungsabschnitt mit derartigen Betriebsbedingungen durch einen frostgefährdeten Boden (z. B. Klei), so ist für die Leitung während der Tauphase mit einer signifikanten Änderung der Lagerungsbedingungen zu rechnen. Auf Grund von experimentellen Untersuchungen [1] konnte nachgewiesen werden, dass in einem frostgefährdeten Boden die axiale Reibung als Lagerungsbedingung zwischen Leitung und Boden in der Tauzone nicht gesichert angesetzt werden kann, bzw. vollständig verloren geht. Diese Änderung der Lagerungsbedingungen führt insbesondere in Bogenbereichen zu größeren Zusatzbeanspruchungen aus Umlenkkraften infolge Innendruck und aus Temperaturzwängungen angrenzender Leitungsabschnitte. Für solche Zusatzbeanspruchungen ist eine Gashochdruckleitung, die im Regelfall für den Hauptlastfall Innendruck ausgelegt wurde, nicht bemessen.

Weitere Zusatzbeanspruchungen ergeben sich in solchen Gasleitungsabschnitten mit

¹⁾ Dipl.-Ing. Roberto Ferrari, Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover

wechselnden Böden unterschiedlicher Frostempfindlichkeit durch Frosthebung. Die im Leitungsverlauf sich ändernden Frosthebungsmaße führen zu lokalen Biegebeanspruchungen der Leitung.

Bei der Untersuchung der maßgebenden Beanspruchungen in den Leitungsbögen im Tautzustand sind in der Regel zwei Gruppen von Bögen zu unterscheiden: Horizontalbögen und Vertikalbögen. Wegen der begrenzten Erdüberdeckung einer Leitung unterscheiden sie sich im Wesentlichen in ihrer jeweils wirksamen horizontalen bzw. vertikalen lateralen Bettung im Boden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Zusatzbeanspruchungen in Bögen mit zunehmendem Richtungsänderungswinkel und abnehmendem Biegeradius wachsen. Die maßgebenden Leitungsbereiche im Tautzustand sind in der Regel bei den Horizontalbögen zu suchen.

Zu der hier umrissenen Problemstellung sind in den in Deutschland und in Europa gültigen Bemessungsnormen keine konkreten Vorgaben, bzw. nur allgemeine Hinweise zu finden. Im Anhang D der DIN EN 1594 ist zum Thema Frosthub unter D.4 folgende Anmerkung zu finden *„Neben dem Frosthub können ggf. andere Mechanismen auftreten, wie die Verringerung der Bodensteifigkeit bei Auftauen des Bodens und Frosthub“*.

Zur Untersuchung langer Leitungsabschnitte erweist es sich als zweckmäßig, die Zusatzbeanspruchungen in den Horizontal- und Vertikalbögen und die Zusatzbeanspruchung aus Frosthebung mit weitestgehend getrennten Modellen unabhängig voneinander zu untersuchen.

2. Leitungsbeanspruchungen

Der zu untersuchende Gasleitungsabschnitt unterliegt im Zusammenhang mit dem Sub-Zero-Betrieb folgenden drei Hauptlasten:

- Innendruck: Nenndruck PN / Design Pressure DP bzw. Betriebsdruck PB / Maximum Operation Pressure MOP,
- Zwängungen aus Temperaturänderungen,
- Frosthebung.

Weitere Zusatzlasten aus anderen Einflüssen in signifikanter Größenordnung sind, wenn vorhanden, selbstverständlich mit zu berücksichtigen.

Für den Innendruck ist im allgemeinen Fall der Nenndruck PN zu Grunde zu legen. Wenn für den Leitungsabschnitt auf Grund der Leitungsparameter, z. B. Abstand zur vorherigen Verdichterstation, sichergestellt ist, dass ein bestimmter Betriebsdruck nicht überschritten wird, so kann zur Spannungsanalyse auch dieser angesetzt werden, allerdings dann nur für temporäre Bewertungen.

Bei Temperaturbeanspruchungen ist die Einbautemperatur der Gashochdruckleitung während der Bauphase zu berücksichtigen. Temperaturänderungen in der Leitung gegenüber der Einbautemperatur führen zu Längenänderungen und damit zu Zwängungsbeanspruchungen in Längsrichtung der Leitung. Die Leitungstemperatur wird im Wesentlichen durch die Gastemperatur bestimmt. Für die Spannungsnachweise sind in der Regel Temperaturerhöhungen maßgebend. Dementsprechend sind die maximalen Betriebstemperaturen zu ermitteln, die unmittelbar nach dem Auftauzustand und während der Dauer des totalen Reibungsverlustes zwischen Rohr und Boden auftreten. Für die rechnerische Temperaturänderung ergeben sich hieraus Werte in der Größenordnung zwischen 0 °C bis + 10 °C.

Die Größe der Zusatzbeanspruchungen der Bögen aus Innendruck und Temperatur werden durch Interaktion zwischen Leitung und Boden über den wesentlichen Parameter der lateralen Bettungssteifigkeit beeinflusst. Bettungssteifigkeiten und -kapazitäten hängen von folgenden Parametern ab:

- Bodenart des Oberbodens und des Baugrunds,
- Leitungsgrabenverfüllung,
- Überdeckungshöhe der Leitung,
- Frostmanteldicke,
- Rohrdurchmesser.

Für die zu untersuchenden Leitungsabschnitte muss ein qualifiziertes Bodengutachten erstellt werden, das auf Grundlage von Bodensondierungen und von geomechanischen Modellen Kraftverschiebungskurven für die Leitungsbettung liefert. Je nach Untersuchungsstufe kann es sich um lineare, bilineare oder nichtlineare Bettungskurven handeln. In Abbildung 1 sind exemplarisch die Kurven für eine nichtlineare Bettung der Leitung im Klei für unterschiedliche Überdeckungshöhen dargestellt. Für die Spannungsanalyse wird eine multilineare Approximation verwendet.

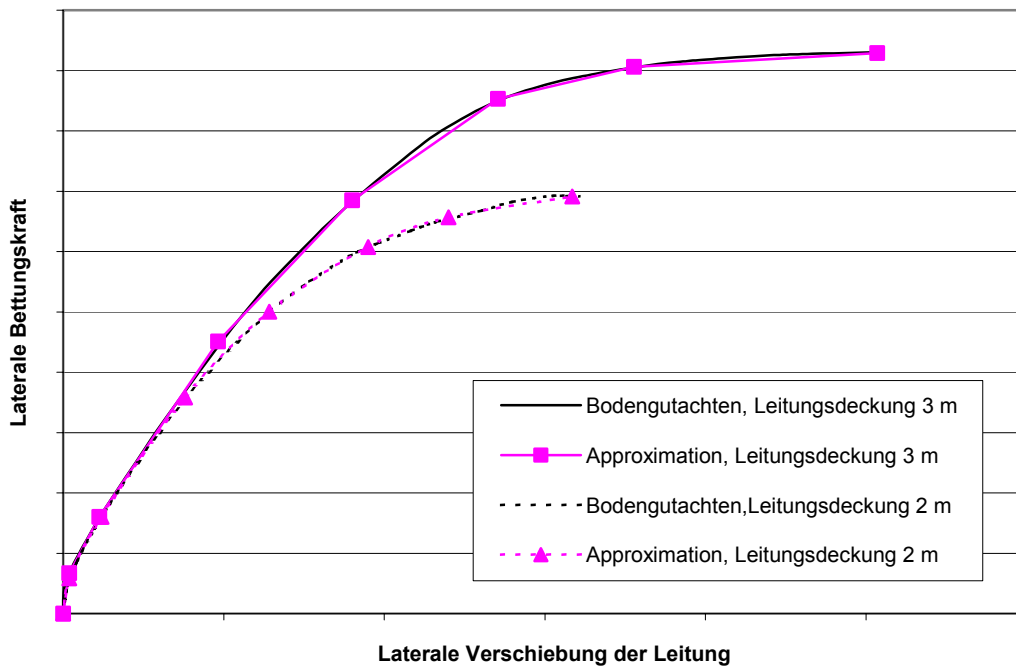


Abbildung 1: Lateralbettung einer Leitung DN 900 im Klei, Grundlegende Beziehung Bettungskraft – Lateralverschiebung der Leitung

Während einer Sub-Zero-Phase kann es abhängig von dem umgebenden Bodenmaterial zu Volumenausdehnungen des Bodens und zu Frosthebungen kommen. Übergangsbereiche von Leitungen in frostgefährdeten Böden zu weniger bzw. nichtfrostgefährdeten Böden mit unterschiedlichen Frosthebungsmaßen können große lokale Biegebeanspruchungen hervorrufen. Bei der Ermittlung des Frosthebungsmaßes ist zu beachten, dass es bei wiederholten Sub-Zero-Phasen von Jahr zu Jahr zu einer Kumulierung der Frosthebung kommen kann. Die Untersuchung muss durch ein qualifiziertes Bodengutachten erfolgen.

Materialermüdung im Zusammenhang mit einem zyklischen Sub-Zero-Betrieb spielt in der Regel keine Rolle.

3. Untersuchung von Horizontalbögen

Das statische Rechenmodell zur Untersuchung der Horizontalbögen baut auf den Grundlagen der Finite-Element-Methode auf und ist auf die Bettungsverhältnisse der Leitung im Auftauzustand abgestimmt. Im Wesentlichen wird ein zweidimensionales Stabwerksmodell mit allen Horizontalbögen generiert. Die vereinfachende Abbildung der dreidimensionalen Realität in ein zweidimensionales Modell für die horizontale Ebene ist für weite Bereiche des Leitungsabschnitts zulässig, wenn relativ geringe Höhenunterschiede in der Größenordnung 1 m bis 2 m mit Richtungsänderungswinkeln kleiner 10° in der vertikalen Ebene auftreten. In der unabhängigen Untersuchung der Vertikalbögen wird zudem aufgezeigt, wie groß der Einfluss der Vertikalbögen auf die globale Verschiebung der Horizontalbögen ist.

Bei größeren Höhenunterschieden in der Leitung, bei denen Vertikalbögen mit Biegewinkel größer 10° , möglicherweise als Warmbogen, eingesetzt werden, sind auch diese bei der Analyse der Horizontalbögen separat durch Einbau einer lokalen vertikalen Ebene zu modellieren. Vertikalbögen, die im 2D-Modell nicht modelliert werden, werden hinsichtlich ihrer axialen Widerstandskraft durch Ersatzfedern ersetzt, sofern Sie nicht vernachlässigbar sind. Die Modellierung der Leitungsabschnitte erfolgt mit Stabelementen, die speziell zur Spannungsanalyse von Druckleitungen entwickelt wurden. Diese Elemente können Spannungserhöhungsfaktoren und Flexibilitätscharakteristiken von Bögen berücksichtigen.

Die Modellierung der lateralen Leitungsbettung im Boden erfolgt durch nichtlineare Feder-elemente, die die multilineare Approximation der Bettung genau nachbilden. Dadurch ist eine realitätsnahe Modellierung der Bettung möglich. In Abbildung 1 ist exemplarisch die laterale Bettung einer Leitung in einem Klei in Abhängigkeit der Überdeckung dargestellt.

Bei der Berechnung werden die zuvor genannten Hauptlasten angesetzt. Da bei den Bodenparametern immer mit einer Bandbreite zu rechnen ist, erfolgt die Berechnung in Form einer Parameterstudie mit Variation der Bettung. Ermittelt werden die Axial- und Lateralverschiebungen sowie die Längs- und Vergleichsspannungen in den Bogenbereichen. In Abbildung 2 (links) ist exemplarisch der berechnete Verlauf der maximalen Vergleichsspannung dargestellt.

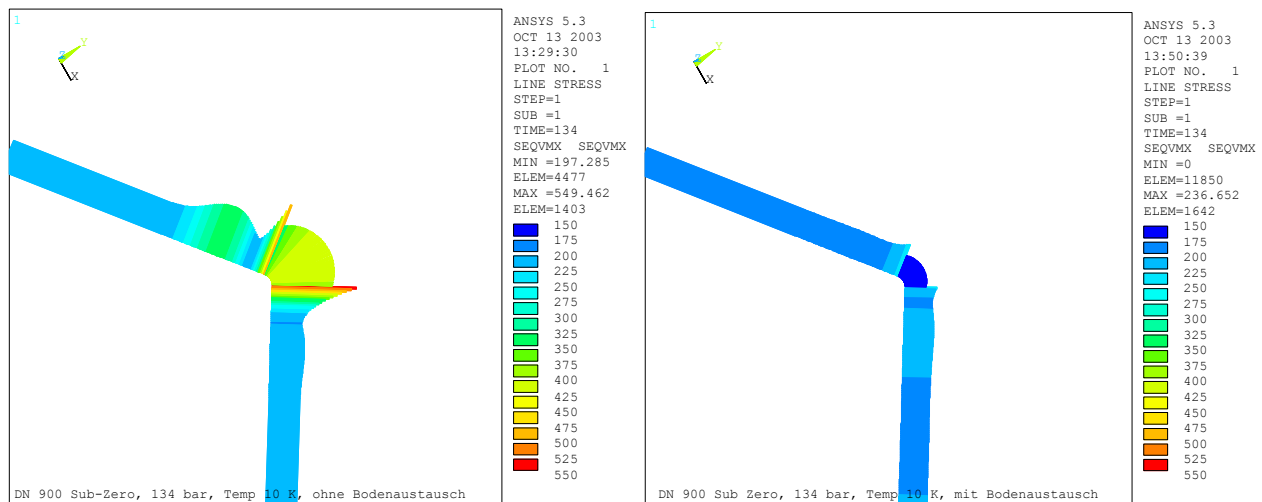


Abbildung 2: Analyse der Horizontalbögen: Exemplarische Darstellung der maximalen Vergleichsspannungen in N/mm^2 für vorhandene Leitung (links) und mit Sicherung durch Bodenaustausch (rechts)

Ergeben die ersten Berechnungsschritte Leitungsabschnitte mit unzulässigen Beanspruchungen, so sind hier Sicherungsmaßnahmen vorzusehen. Die Sicherung erfolgt in der Nähe durch abschnittswise Austausch des frostgefährdeten Bodens gegen einen spezifizierten Boden. Mit den Spezifikationen soll gewährleistet werden, dass auch im Auftauzustand ein gesicherter Mindestwert der Mantelreibung zwischen Leitung und Boden vorhanden. Hinweise zur konstruktiven Ausführung sind dem Kapitel 6 zu entnehmen. In den Abschnitten, in denen diese Sicherungsmaßnahme vorgesehen ist, wird im Berechnungsmodell entsprechend eine axiale Bettung zusätzlich angesetzt. Der Kraftverschiebungslauf ist in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt.

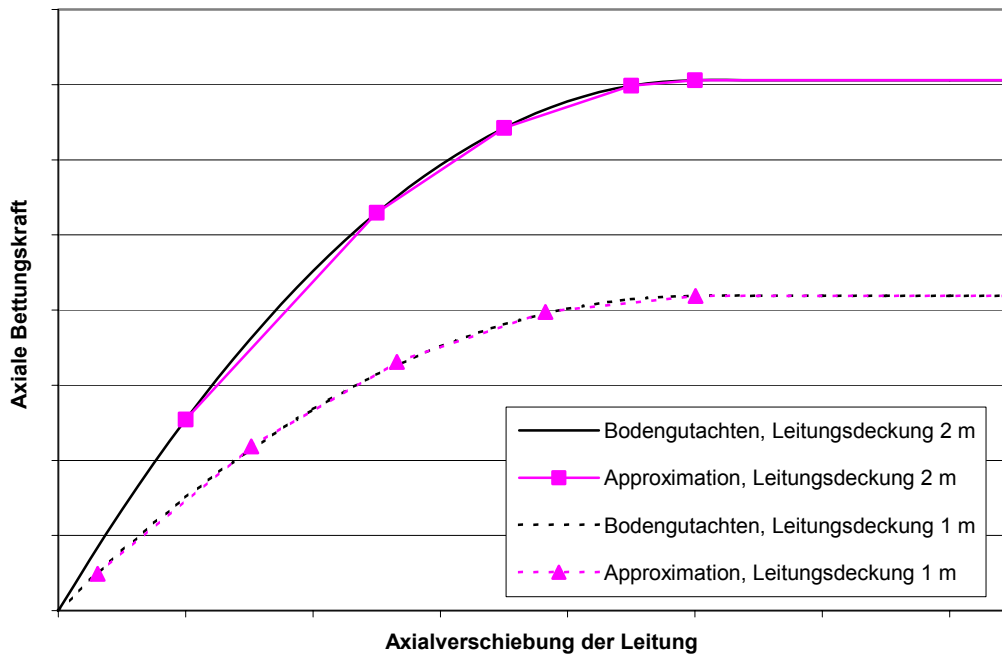


Abbildung 3: Axiale Bettung einer Leitung DN 900 in einem spezifizierten Boden, Grundlegende Beziehung Bettungskraft – Leitungsverschiebung

Analog zur lateralen Bettung wird auch hier eine multilineare Approximation verwendet. Die Wirksamkeit des Bodenaustauschs wird durch die reduzierten Vergleichspannungen in Abbildung 2 (rechts) verdeutlicht. In Abbildung 4 sind exemplarisch Leitungsverschiebungen für den Fall ohne und mit Bodenaustausch dargestellt.

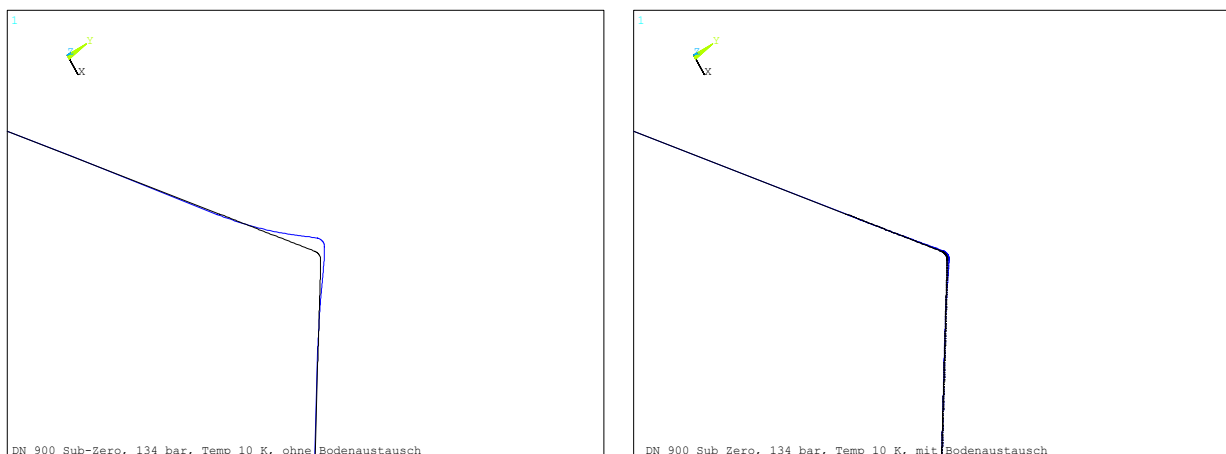


Abbildung 4: Leitungsverschiebungen im Auftauzustand ohne und mit Sicherungsmaßnahme, Verschiebungsmaße axial 615 mm bzw. 117 mm, lateral 779 mm bzw. 131 mm (Darstellung 5-fach überhöht)

Da die Anordnung eines Bodenaustausches zu größeren Systemsteifigkeiten führt, werden hierdurch Beanspruchungen in den benachbarten Bögen beeinflusst. Zur Untersuchung sind hierzu weitere Berechnungsläufe notwendig, in denen Lastumlagerungen untersucht werden und ggf. die Anordnung der Sicherungsmaßnahmen optimiert werden.

4. Untersuchung von Vertikalbögen

Wie die Spannungsanalyse der Horizontalbögen zeigt, ergeben sich für Bögen mit geringen Richtungsänderungswinkeln auch nur geringe Zusatzspannungen. Damit ist bei den hier betrachteten Vertikalbögen nicht von einem Spannungsproblem auszugehen.

Entscheidend ist hier der große Unterschied in der vertikalen Bettung für Leitungsver-schiebungen nach oben und nach unten, bedingt durch die begrenzte Erdüberdeckung der Leitung. Damit sind, bedingt durch axiale Kräfte und durch Umlenkkräfte, an vertikalen Oberbögen (VOB) möglicherweise große Verschiebungen zu erwarten, die die Bettungs-kapazität überschreiten. Bei der Analyse der Vertikalbögen steht also das Verformungsproblem im Vordergrund.

Bei dem statischen Rechenmodell handelt es sich um ein zweidimensionales FE-Modell, das einen maßgebenden Leitungsabschnitt in der vertikalen Ebene abbildet. Die Grund-geometrie ist in Abbildung 5 dargestellt, der Übersicht halber ohne Felderelemente für die vertikalen Bettung.

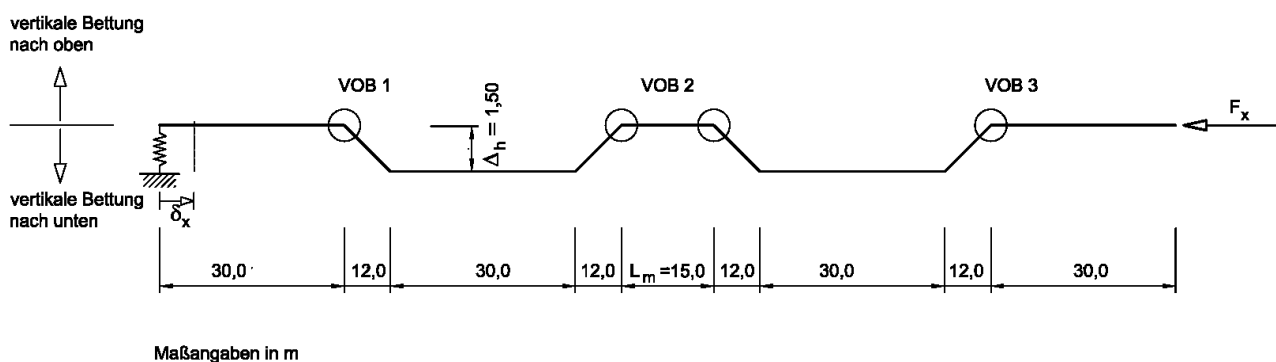


Abbildung 5: Statisches Modell zur Untersuchung der Vertikalbögen

In einer Parameterstudie werden alle wesentlichen Modellparameter variiert. Das Modell ist durch folgende Größen und Parameter charakterisiert:

- Höhendifferenz des Etagenwechsels,
- Abstand zwischen zwei vertikalen Oberbögen,
- Axialkräfte,
- Axiale Zwängungen,
- Vertikale Bettungssteifigkeiten.

Grundgrößen der Axialkräfte und axialen Zwängungen kommen aus der Analyse der Horizontalbögen. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind exemplarisch die Zusammenhänge zwischen vertikaler Aufwärtsverschiebung in den entsprechenden Oberbögen und den Axialkräften und den axialen Zwängungen dargestellt.

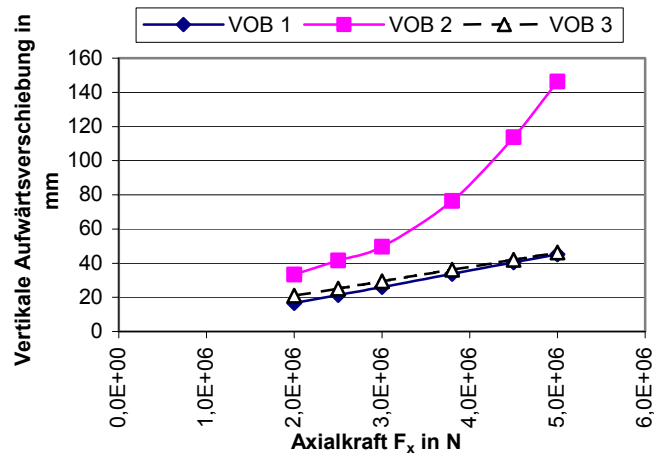


Abbildung 6: Vertikale Aufwärtsverschiebung von vertikalen Oberbögen (VOB) in Abhängigkeit der Axialkraft, exemplarischer Verlauf

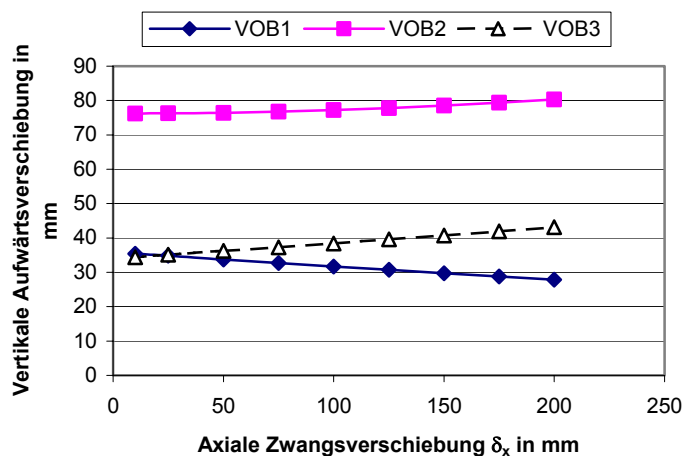


Abbildung 7: Vertikale Aufwärtsverschiebung von vertikalen Oberbögen (VOB) in Abhängigkeit der Axialzwängung, exemplarischer Verlauf

Wie zu erwarten, zeigt sich, dass bei Axialkräften im Gegensatz zu den Zwängungen ab einer bestimmten Größenordnung eine überproportionale Zunahme der Aufwärtsverschiebungen auftreten kann, da es sich um nachgeführte Lasten handelt. Ähnliche signifikante Zusammenhänge bei den Axialkräften ergeben sich im Zusammenhang mit den vertikalen Bettungssteifigkeiten nach oben.

Im Ergebnis dieser Untersuchung lässt sich feststellen, in welcher Bandbreite mit Aufwärtsverschiebungen im Bereich vertikaler Oberbögen zu rechnen ist und ob bei bestimmten Überdeckungshöhen die Gefahr von kumulierten Aufwärtsbewegungen besteht. In den letztgenannten Fällen sind Sicherungsmaßnahmen durch Verankerung, Anordnung von Betonreitern etc. vorzusehen.

5. Untersuchung der Frosthebung

Zur Untersuchung der Frosthebung kann unabhängig von den anderen Untersuchungen ebenfalls ein eigenständiges statisches Modell verwendet werden. Dieses Modell berücksichtigt den Übergang der Bettung einer Gashochdruckleitung zwischen einem frostgefährdeten und nicht frostgefährdetem Boden. Ein solches Modell ist exemplarisch in Abbildung 8 dargestellt.

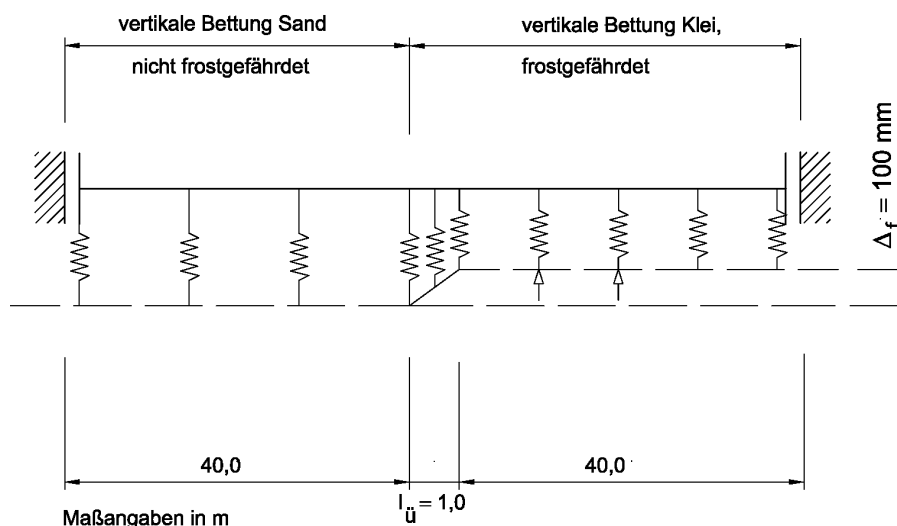


Abbildung 8: Exemplarische Darstellung statisches Modell zur Analyse der Frosthebung

Entsprechend der Untersuchung der Vertikalbögen wird auch hier die vertikale Bettung der Leitung durch nichtlineare Federn modelliert. Zugrunde gelegt werden hier Bettungsansätze des Bodengutachters entsprechend der zwei aufeinander treffenden Bodentypen.

Die Untersuchung erfolgt in Form von Parameterstudien mit Variation der folgenden Parameter:

- Kumuliertes Frosthebungsmaß
- Vertikale Bettung nach oben für die einzelnen Bodentypen
- Länge des Übergangsbereiches zwischen den Bodentypen

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind exemplarisch die axialen Zusatzspannungen in Abhängigkeit des kumulierten Frosthebungsmaßes und der vertikalen Bettung nach oben in einem nicht frostgefährdeten Boden dargestellt.

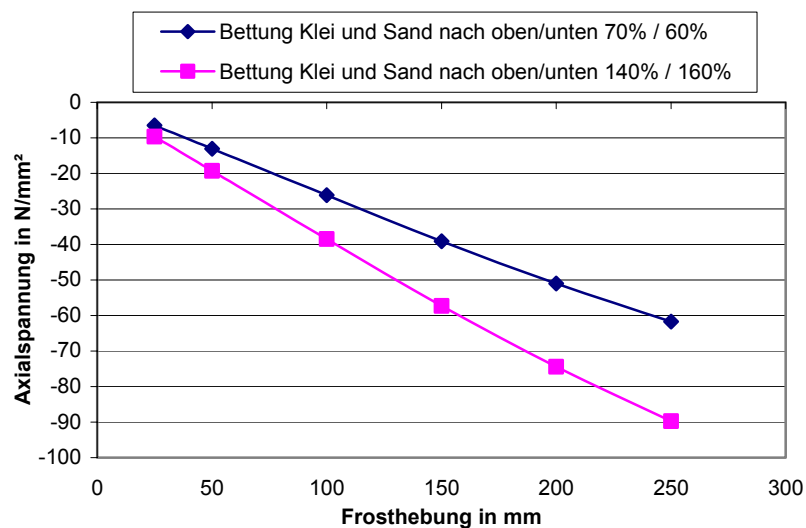


Abbildung 9: Exemplarische Darstellung der axialen Zusatzspannungen infolge Frosthebung in Abhängigkeit des kumulierten Frosthebungsmaßes, exemplarischer Verlauf

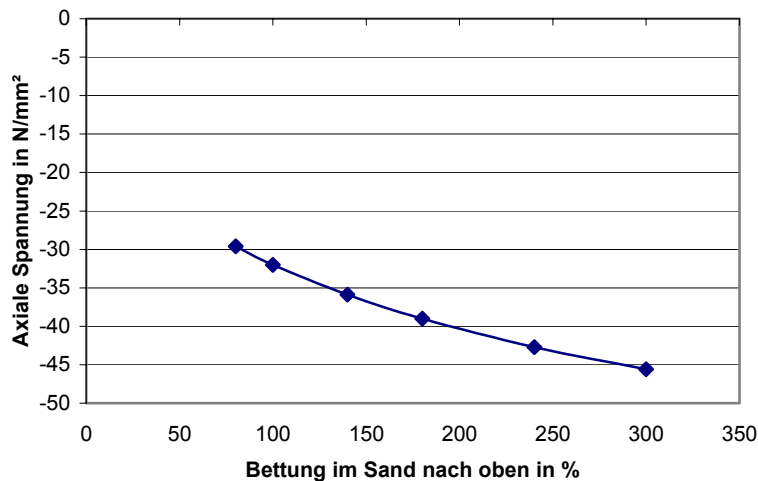


Abbildung 10: Exemplarische Darstellung der axialen Zusatzspannungen infolge Frosthebung in Abhängigkeit der vertikalen Bettung nach oben im Sand

Die Zusatzspannungen sind mit den Ergebnissen der anderen Untersuchungsteile zu superponieren und auf Einhaltung der Grenzwerte hin zu überprüfen. Die Identifizierung des Bodenwechsels im Verlauf der Leitung kann für einen gesamten Leitungsabschnitt sehr aufwändig sein. Deshalb ist es sinnvoll, die Einflüsse aus Frosthebung in geraden Leitungsteilen und in der Nähe von Bögen einzeln zu untersuchen. Unter Umständen kann dies ergeben, dass Bodenuntersuchungen hinsichtlich Frostgefährdung auf maßgebende Horizontalbögen beschränkt werden können.

6. Konstruktive Lösungen zur Entlastung der Leitung

Leitungsbereiche, die im kritischen Auftauzustand Überbeanspruchungen durch die elastische Grenze hinaus erfahren, sind durch Sicherungsmaßnahmen zu entlasten. Geeignet sind hierzu Maßnahmen, die in der Nähe der überbeanspruchten Stelle auch im kritischen Auftauzustand Axialkräfte in der Leitung aufnehmen können und sicher in den angrenzenden Boden abtragen. Eine geeignete Sicherungsmaßnahme ist hier der abschnittsweise Austausch des frostgefährdeten Bodens gegen einen spezifizierten Kies. Dieser Kies gewährleistet auch im kritischen Auftauzustand einen gesicherten Mindestwert für die axiale Bettung der Leitung und Übertragung der Axialkräfte und Zwängungen in den anstehenden Boden. Zur Ermittlung der Spezifikation wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt [1]. Hierbei wurden auch die Bettungsansätze für ein

geomechanisches Modell ermittelt, die in das Modell zur Untersuchung der Horizontalbögen und zur Bemessung des Bodenaustausches einfließen.

Bei den Ansätzen ist zu berücksichtigen, in welcher Form der Bodenaustausch erfolgen soll. Aus baupraktischen Gründen kann es sinnvoll sein, diesen Bodenaustausch bis zur Leitungssohle zu begrenzen, so dass diese nicht komplett freigelegt werden muss. Das Beispiel einer baupraktischen Umsetzung für eine solche Variante ist in Abbildung 11 dargestellt.

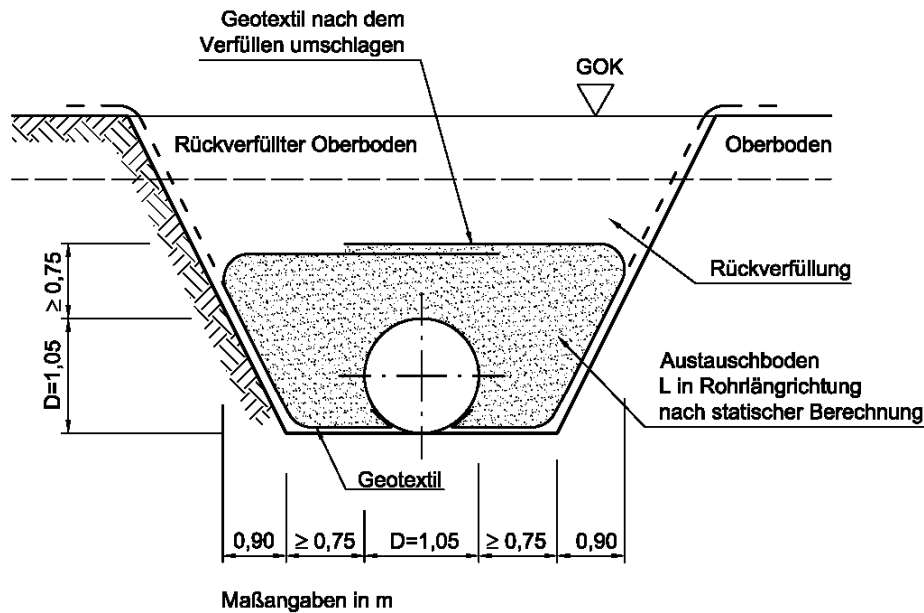


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung eines Bodenaustausches im Querschnitt

Der Bodenkörper ist mit einem Geotextil zu umschließen. Dadurch soll verhindert werden, dass über durchströmendes Wasser Schlämmkorn in den Austauschboden eingebracht wird und damit die Spezifikationen verändert werden. Die Bemessung des Bodenkörpers erfolgt hinsichtlich der zu erwartenden Frostmanteldicke und unter Einbeziehung von konstruktiven Sicherheiten. Die Abmessungen in Leitungslängsrichtung werden in den zuvor genannten statischen Untersuchungen bemessen.

Randbedingungen bei der Anordnung ergeben sich aus konstruktiven Mindestabständen von 10 m zu Bogenenden und zu Gräben.

7. Schlussfolgerungen

Es ist aufgezeigt worden, dass für Gashochdruckleitungen, die temporär mit Gastemperaturen unter 0 °C betrieben werden und durch frostgefährdete Böden verlaufen, mit Zusatzbeanspruchungen zu rechnen ist, die durch eine Regelbemessung nach gültigen Vorschriften nicht von vornherein abgedeckt sind. Unzulässige Zusatzbeanspruchungen können jedoch durch einen gezielten Bodenaustausch vermieden werden. Die Bemessung der Sicherungsmaßnahmen erfolgt mit dem vorgestellten Untersuchungskonzept. So können durch begrenzte Baumaßnahmen bestehende Leitungen, die durch entsprechende Änderungen der Betriebsbedingungen betroffen sind, nach Durchführung der Maßnahmen weiterbetrieben werden.

Ebenfalls interessant ist das Nachweisverfahren für den Entwurf und die Konstruktion von Neuleitungen, deren Trassen durch frostgefährdete Böden verlaufen und die entsprechenden Betriebsbedingungen unterliegen. Durch punktuelle Anordnung von spezifiziertem Boden als Rohrgrabenverfüllung kann gewährleistet werden, dass eine Rückverfüllung des übrigen Rohrgrabens in weiten Bereichen der Leitung mit dem anstehenden, frostgefährdeten Boden erfolgen kann. Dies trägt wesentlich zu einer wirtschaftlichen Errichtung der geplanten Leitung bei.

Literatur

- [1] H. Harder: Reibungskapazität der Kontaktfläche zwischen auftauendem Boden und Gashochdruckleitung nach Dauerfroststeinwirkung, Vortrag zur Themengruppe „Erdgastransport bei Gastemperaturen unter 0 Grad Celsius – Grundlagen – Rohrbelastung – Lösungsvorschläge“, 18. Rohrleitungsforum 2004 in Oldenburg