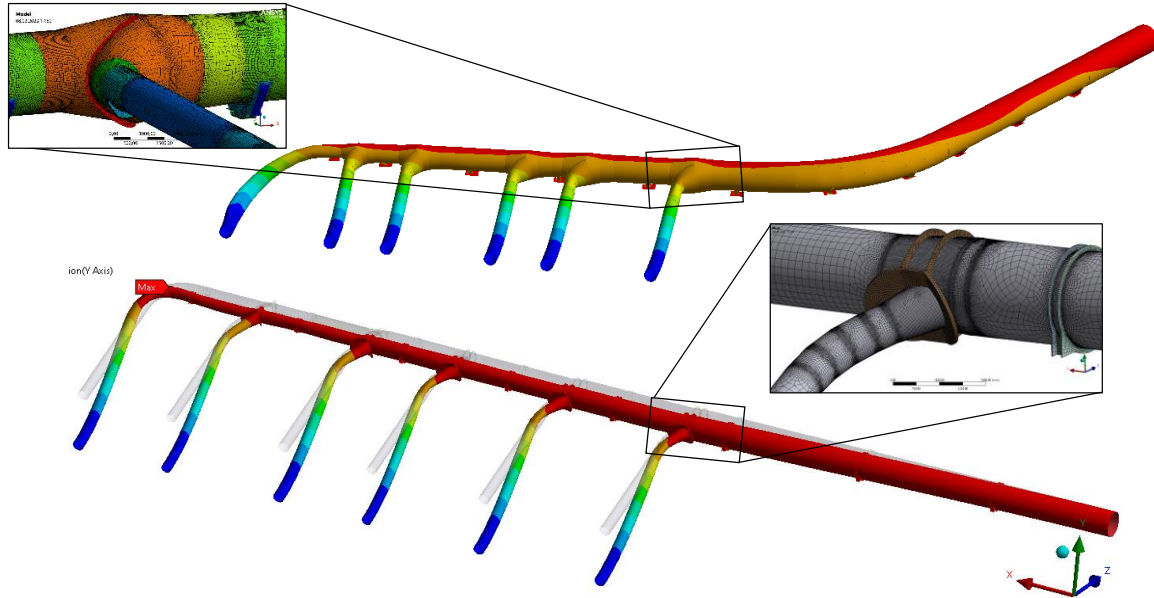
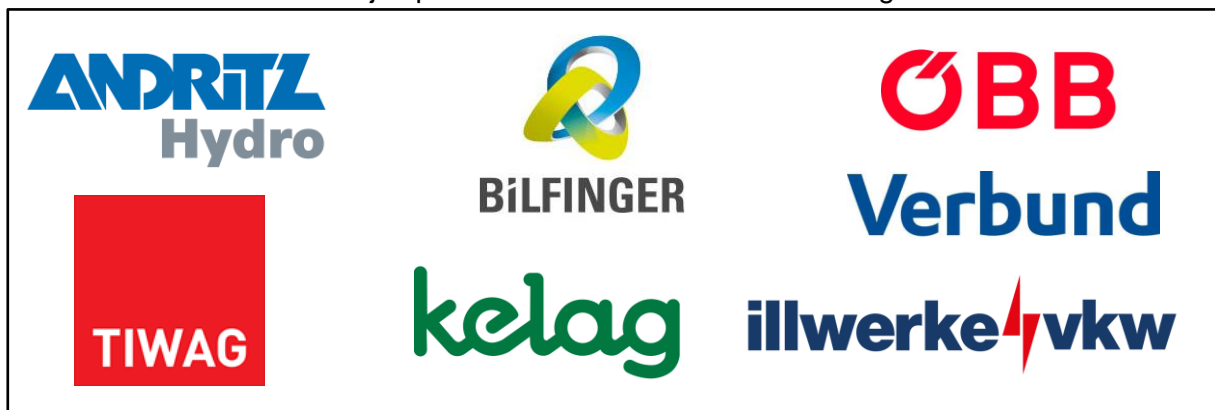


Trag- und Verformungsverhalten von Verteilrohrleitungen



Projektpartner mit finanzieller Unterstützung:



Dieser Fachbeitrag enthält einen Überblick zum kürzlich abgeschlossenen zweijährigen Forschungsprojekt „Trag- und Verformungsverhalten von Verteilrohrleitungen“, das federführend von der TU Graz, Institut für Stahlbau bearbeitet wurde.

Dieses Forschungsprojekt – Akronym Verhalten VRL, Proj. Nr. F0999 897732 (2. Forschungsjahr) und F0999 887067 (1. Forschungsjahr) – wurde abgeschlossen zwischen der Österreichischen Forschungsgesellschaft mbH (FFG) als Fördergeberin (etwa 60 Prozent der Gesamtprojektkosten) und Oesterreichs Energie Forschung & Innovation als Dachverband. Die Projektabwicklung erfolgte seitens der TU Graz sowie sieben weiteren Vertragspartnern, die etwa 40 Prozent der Mittel bereitstellten. Es waren dies VERBUND Hydro GmbH, TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG, Illwerke vkw AG, ANDRITZ Hydro GmbH, ÖBB -Infrastruktur AG, Bilfinger Industrial Services GmbH und die KELAG – Kärntner Elektrizitäts Aktiengesellschaft.

Nachfolgend werden die Hauptergebnisse dieses Forschungsprojektes dargestellt, die eine Zusammenfassung des umfassenden Gesamtberichts [1] darstellen, der für die Projektpartner erstellt wurde.

Projektüberblick – Hintergründe und Ziele

a) *Hintergründe zum Forschungsprojekt*

Am unteren Ende der stählernen Druckrohrleitung eines (Pump-)Speicherkraftwerkes sind in der Regel mehrere Rohrverzweigungen („Abzweiger“) angeordnet, welche das Triebwasser auf mehrere Turbinen bzw. Pumpen aufteilen. Dieses Verzweigungssystem, ausgehend von einem Hauptstrang in einzelne Abzweigröhre, wird als Verteilrohrleitung (VRL) bezeichnet. Diese VRL stellt den höchstbeanspruchten Teil der gesamten Druckrohrleitung dar, denn am unteren Rohrende herrschen die größten Innendruckbelastungen. Deren konstruktiver Ausbildung kommt auch deshalb eine große Bedeutung zu. Einerseits in Hinblick günstiger Strömungsverhältnisse und damit möglichst geringer hydraulischer Verluste sowie andererseits in Hinblick der Beschränkung lokaler Beanspruchungsspitzen und Spannungsfelder, bedingt durch die komplexe Rohrstruktur im Abzweigerbereich.

Beispielhaft für die komplexe Geometrie einer Verteilrohrleitung im Bereich der Abzweiger, zeigt Bild 1a ein Beispiel einer Bestandsanlage mit 6 Stichleitungen (im Bildhintergrund ist eine weitere VRL erkennbar). Dabei sind auch die Lagersockel erkennbar, auf der die frei liegende VRL aufliegt. Häufig werden im Abzweigerbereich, im Verschneidungsbereich der einzelnen Rohre, auch äußere Blechverstärkungen ausgeführt („Sicheln“, „Kragen“, vgl. Bild 2).

Im Bereich der Verteilrohrleitungen liegen aufgrund der hohen lokalen Beanspruchungen auch größere Rohrwanddicken vor. Um diese nach oben zu beschränken, werden häufig hochfeste Stähle eingesetzt (Festigkeitsklassen in der Regel bis S690). Die komplexe Rohrgeometrie, gemeinsam mit den erhöhten Wanddicken, führt zu einer Vielzahl an Schweißnähten im Abzweigerbereich und damit zu deutlich erhöhten Fertigungskosten, gegenüber der freien Rohrstrecke.

Die hohen Investitionskosten von VRL bedingen das Anstreben einer Gesamtlebensdauer von zumindest 100 Jahren. Eine große Herausforderung dabei stellt mitunter auch die geänderte Betriebsführung bei Bestandsanlagen dar. Heute und in Zukunft werden Pumpspeicherkraftanlagen wesentlich flexibler betrieben in Hinblick der Energiewende mit primär erneuerbarer Energie, mit häufigerem Umschalten von Turbinen- auf Pumpbetrieb, sodass dem Betriebsfestigkeitsnachweis (Versagensform Materialermüdung) eine zentrale Rolle zukommt bei der Beurteilung der verfügbaren Restlebensdauer von Bestandsanlagen.

a.)



b.)

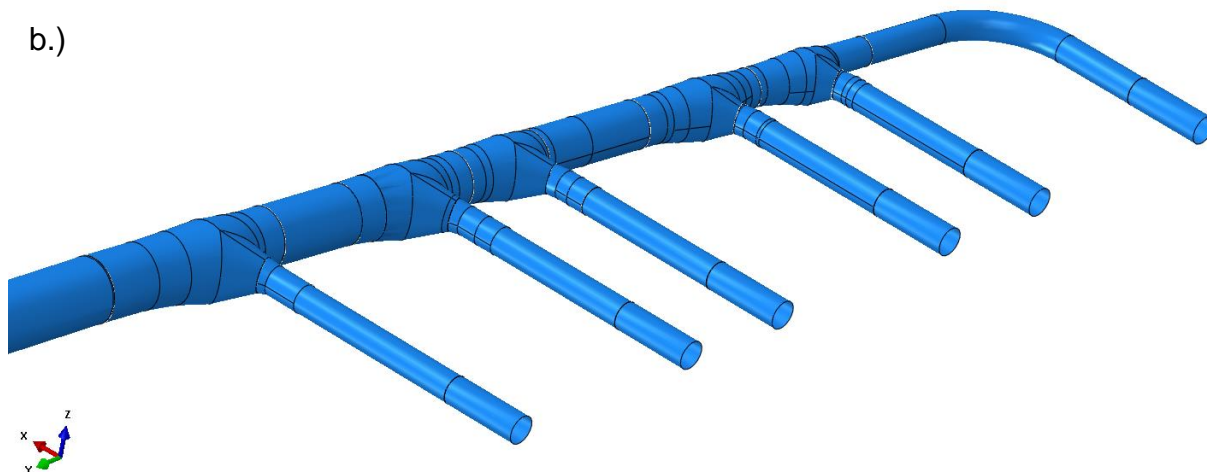


Bild 1 Beispiel einer frei verlegten Verteilrohrleitung mit 6 Stichleitungen; a.) VRL in der Natur, b.) räumliches 3-D Modell der Verteilrohrleitung

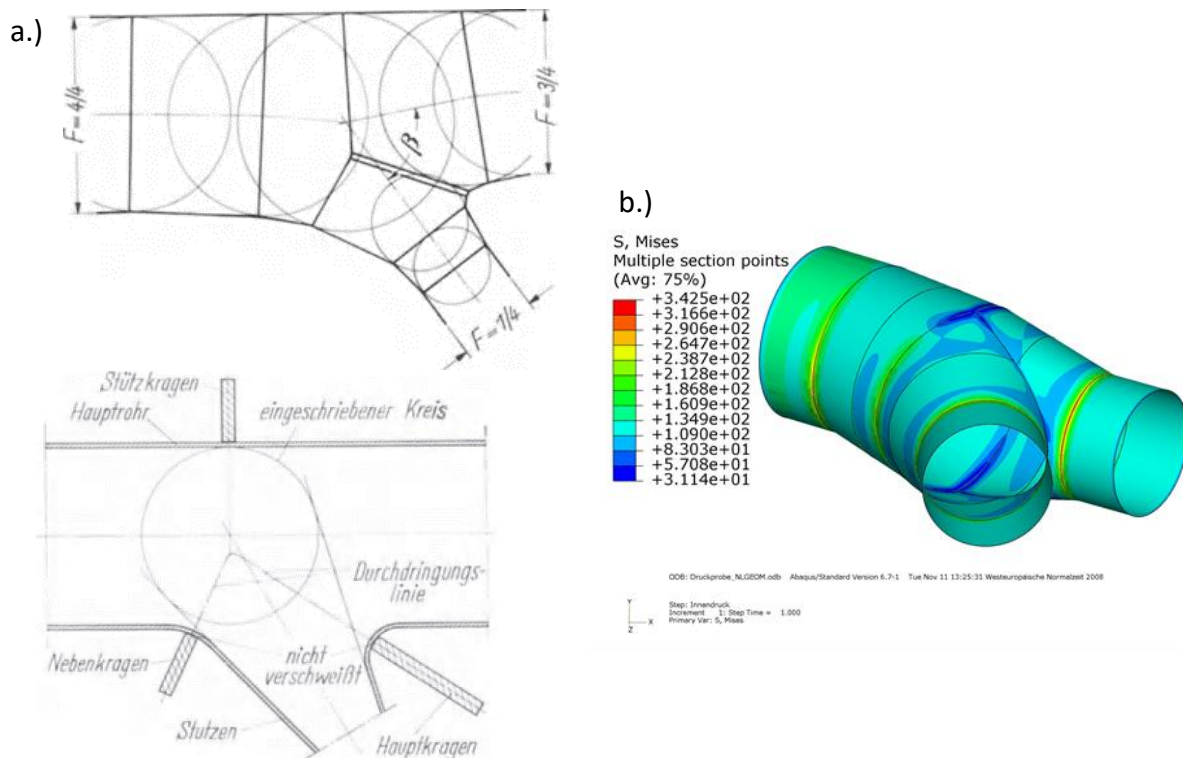


Bild 2 a.) Ausbildung einzelner Abzweiger und mögliche lokale Verstärkungen (aus [2]);
b.) lokale Spannungsberechnung an einem einzelnen Abzweiger

b) Defizite des Wissens zum Verhalten von VRL

Es ist verwunderlich, dass bis dato systematische Untersuchungen zur realitätsnahen Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Verteilrohrleitungen fehlen – auch bei alleiniger Betrachtung des elastischen Verhaltens. Einzig zur Geometrie von VRL im Abzweigerbereich gibt es einige Forschungsarbeiten, die sich jedoch mit den hydraulischen Eigenschaften und Verbesserungen der Durchströmungseigenschaften von Verteilrohrleitungen beschäftigen. Darüber hinaus beschränkten sich die bisherigen Untersuchungen auf einzelne Druckrohrverzweigungen (z. B. Hosenrohre, einzelne Abzweiger) und deren Spannungs- und Verformungsberechnungen [3].

Ein wesentlicher Grund für dieses Forschungsprojekt ist daher, dass keine Forschungsarbeiten zu Verteilrohrleitungen bekannt sind, die die System- und Spannungsberechnung am räumlichen Gesamtmodell beinhalten und damit das Trag- und Verformungsverhalten beurteilen lassen. Dies gilt sowohl für den rein elastischen Bereich mit seinen zutreffenden Steifigkeiten, als auch für mögliche plastischen Tragreserven, die ebenfalls unbekannt sind. Letztere spielen aber gerade bei der Beurteilung von Bestandsanlagen, insbesondere beim Auftreten unplanmäßiger Setzungen bei Lagerpunkten, eine sehr große Rolle.

Zusätzlich spielen heutzutage erhöhte Ermüdungsbeanspruchungen, durch die einleitend erwähnte geänderte Betriebsweise bei Druckrohrleitungen, eine wesentlich größere Rolle, insbesondere bei darauf nicht ausgelegte Bestandsanlagen. Dies ist insbesondere bei Pumpspeichieranlagen feststellbar, da erst in der jüngeren Vergangenheit der stark fluktuierende Strompreis und die Förderung erneuerbarer Energien eine Betriebsweise mit deutlich erhöhten Ermüdungsbeanspruchungen bedingt, durch das häufige Umschalten zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb. Davon sind vor allem die Verteilrohrleitungen betroffen,

denn kurz vor dem Krafthaus sind die Druckschwankungen und damit die Ermüdungsbeanspruchungen am größten.

c) Stand der Technik

Die Berechnung und Bemessung von Verteilrohrleitungen selbst ist nicht in Normenwerken geregelt, wobei jedoch der aktuelle Eurocode für Stahlbau oft als Basis herangezogen wird. Dabei dient der Eurocode EN 1993-1-1 [4] als Grundlage. Da die VRL eine Schalenkonstruktion darstellt, wird nach dem heutigen Stand der Technik häufig Eurocode EN 1993-1-6 [5] angewendet. Ergänzend wird in der Praxis oft auch EN 13445-3 [6] (Unbefeuerte Druckbehälter Teil 3: Konstruktion; frühere AD 2000 – Merkblätter) angewendet.

Zur Beurteilung des Tragverhaltens von Verteilrohrleitungen ist folgende Differenzierung der Spannungen ganz wesentlich. In der EN 1993-1-6 wird zwischen Primär- (Haupt-)spannungen und Sekundär- (Neben-)spannungen unterschieden. Primärspannungen entstehen aus „nachdrängenden“ Lasten, welche beim Ansteigen zum Versagen führen, wie zum Beispiel infolge der Innendruckbelastung und der Wasserlast. An Bauteilen mit alleinigen Primärspannungen sind keine plastischen Reserven nutzbar. Sekundärspannungen sind solche, die bis zum Erreichen der Fließgrenze ansteigen und darüber hinaus durch plastische Verformungen abgebaut werden können. Dies sind zum Beispiel Zwangsbeanspruchungen aus Temperatur, Querkontraktion oder Setzungen. Auch Biegespannungen aufgrund von Randstörungen bei Zylinderschalen (z. B. aufgeschweißte Ringe, Segmentknicke) gehören dazu. Für diese Sekundärspannungen können die plastische Tragreserven ausgenutzt werden.

Bei der Statischen Berechnung von Verteilrohrleitungen in der Praxis erfolgt die Differenzierung hinsichtlich Primär- und Sekundärspannungen meist nur indirekt, auf Basis einer linear elastischen Systemberechnung. Die Membranspannungen der einzelnen Rohrbleche werden dabei als Primärspannungen betrachtet und beim diesbezüglichen Spannungsnachweis werden höhere Sicherheitsfaktoren gefordert, gegenüber dem Nachweis mit den Gesamtspannungen, die auch die Biegespannungen an den Blechen miteinfassen.

Hinsichtlich Materialermüdung (Betriebsfestigkeitsnachweis) werden nach Stand der Technik die Ermüdungsfestigkeitsnachweise nach Eurocode EN 1993-1-9 [7] zugrunde gelegt, wobei meist jedoch nur das Nennspannungskonzept angewendet wird. In [7] sind zwar auch die Ermüdungsfestigkeitsnachweise des Strukturspannungskonzepts angeführt, jedoch ohne Hinweise zur Spannungsberechnung selbst sowie zum Einfluss der Blechdicke auf die Ermüdungsfestigkeit.

Die zutreffende Vorgehensweise nach dem Strukturspannungskonzept beim Ermüdungsnachweis von VRL soll im Zuge dieses Forschungsprojektes erarbeitet werden.

Die resultierenden Beanspruchungszustände einer Verteilrohrleitung sind komplex und setzen sich meist aus mehreren Einzelbelastungen bzw. Einwirkungen zusammen:

- Eigengewicht der Verteilrohrleitung (Stahleigengewicht plus Wasserlast der gefüllten Leitung)
- Innendruckbelastung aus dem Betrieb p_i
- Innendruckschwankungen aus der Betriebsführung Δp_i ; daraus resultieren Ermüdungsbeanspruchungen $\Delta \sigma_i$ (primär in Rohrumfangsrichtung)
- Längskraftbeanspruchungen N aufgrund von Deckeldruckkräften (infolge Verschlussorganen vor Turbinen oder Pumpen)

- Zwangsbeanspruchungen aus Temperaturänderungen ΔT sowie aus der Querkontraktion (behinderte Längsdehnungen des Rohres, aufgrund von Umfangsdehnungen infolge Innendruck)
- Zwangsbeanspruchungen aus Auflagersetzungen

Viele der heutigen Bestandsanlagen sind auf Basis einer elastischen 1D-Systemberechnung ausgelegt (Modellierung als Stabtragwerk, aber oft mit Berücksichtigung der Besonderheiten für den Rohrleitungsbau: z. B. Verminderung der Biegesteifigkeiten von Rohrkrümmern durch Abplattung → Karman Zahl [8]), oft ergänzt durch lokale 3D FE-Modelle für die einzelnen Abzweiger (vgl. Bild 2b). Bei älteren Bestandsanlagen wird hingegen das lokale Tragverhalten im Abzweiger nur näherungsweise erfasst – ohne eigene FE-Modelle.

d) Wesentliche Ziele im Forschungsprojekt

Folgende Ziele wurden daher für dieses Forschungsprojekt definiert:

- Tieferes Verständnis für das reale Trag- und Verformungsverhalten von stählernen Verteilrohrleitungen, sowohl im linear – elastischen Bereich, wie auch im Traglastbereich (Ausnutzung des plastischen Materialverhaltens von Stahl)
- Aufzeigen von plastischen Systemreserven, gegenüber aktueller, linear-elastischer statisch-konstruktiver Auslegung
- Vergleiche der bisherigen Auslegung von VRL, auf Basis einer Systemberechnung an 1-D Stabtragwerken und lokalen Modellen der einzelnen Abzweiger, mit einer durchgängigen 3-D Modellierung
- Darstellung der Reserven der Ermüdungstragfähigkeit, durch Einbeziehung aktueller numerischer Berechnungsmethoden (z. B. Strukturspannungskonzept) zur Bewältigung zukünftiger, höherer Belastungskollektive – insbesondere bei Bestandsanlagen
- Aufzeigen von kritischen Bereichen von Verteilrohrleitung, für gezieltes Monitoring an Bestandsanlagen
- Studie des Tragverhaltens bei unplanmäßigen Zwangsbeanspruchungen, infolge: i.) Auflagersetzungen bei Rohrsätteln, ii.) Krafthaussetzungen (Setzungen an den Enden der Stickleitungen), vgl. Bild 1

Anzumerken ist, dass dieses Projekt nur freiliegende Verteilrohrleitungen behandelt hat, welche nicht einbetoniert sind, sondern in gewissen Abständen auf Rohrsätteln aufgelagert werden (vgl. Bild 1). Die Ergebnisse können jedoch auch auf einbetonierte VRL übertragen werden, da auch bei deren Auslegung die Betonummantelung üblicherweise unberücksichtigt bleibt.

Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojektes

Nachfolgend werden einige erwähnenswerte Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt dargestellt, die durchaus als „Highlights“ angesehen werden können und auch sehr erfreuliche Ergebnisse für die Projektpartner darstellen.

Dies deshalb, da sich zeigte, dass stählerne VRL unerwartet hohe plastische Systemreserven aufweisen. Daher können die bisher als sehr kritisch angesehenen Lageretzungen im Bereich von VRL nun günstiger beurteilt werden. Eine realitätsnahe Beurteilung der Ermüdungsgefährdung mit dem Strukturspannungskonzept erlaubt auch eine Fokussierung auf wenige maßgebende Bereiche bei Bestandsanlagen, in Hinblick eines gezielten Monitorings.

a) Untersuchte repräsentative Verteilrohrleitungen

Da die heutige stahlbauliche Auslegung von stählernen Verteilrohrleitungen nahezu immer noch so erfolgt wie in der älteren Vergangenheit, erfolgte die Auswahl von zwei bestehenden repräsentativen VRL, zur umfassenden Analyse des Trag-, Verformungs- und Ermüdungsverhaltens.

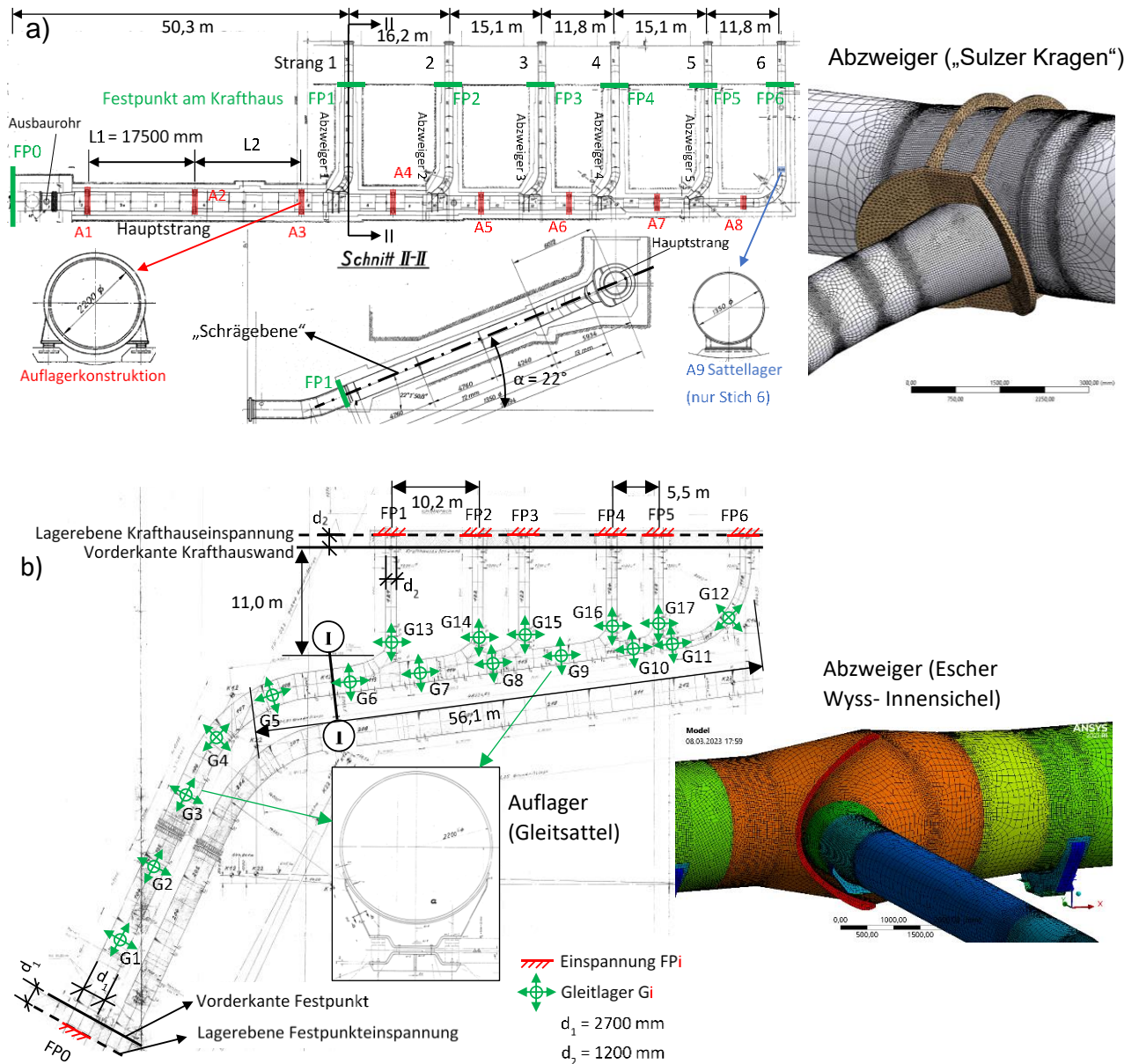


Bild 3: Anlageverhältnisse mit Bezeichnungen und statischem System für: a) VRL bei KW Rodund, b) VRL bei KW Mayrhofen

Die konstruktive Ausführung der Lagerung der VRL und der Abzweiger stellt Grenzfälle in der Praxis dar, sodass damit die ganze Bandbreite an baupraktischen Ausführungen mitabgedeckt ist.

Bei der VRL bei KW Rodund liegen sehr steife Auflagerkonstruktionen (Ringsteifen bei allen vertikalen Auflagerpunkten, mit Ausnahme des Lagers A9) sowie sehr steife Abzweiger (mit Außenkragen, System Sulzer) vor, wie Bild 3a zeigt. Die Rohrendurchmesser betragen:

- am Hauptstrang: $d_i = 3,10 \div 1,60$ m, - am Einzelstrang: $d_i = 1,35$ bzw. $1,20$ m. Die Schlankheit zwischen den einzelnen vertikalen Auflagerpunkten beträgt $L_i/d_m \approx 5 \div 10$ (L_i = Abstand der einzelnen Lagerpunkte, d_m = mittlerer Rohrdurchmesser). Die Rohrschlankheiten betragen $r/t = 30 \div 60$ bzw. $d/t = 60 \div 120$. Der Bemessungssinnendruck beträgt $p_{id} = 4,19$ N/mm².

Bei der VRL bei KW Mayrhofen, dargestellt in Bild 1a und 3b, liegen im Gegensatz dazu biegeeweiche Auflagerkonstruktionen (nur Sattellager) sowie „biegeeweiche“ Abzweiger (nur Innensicheln, System Escher-Wyss) vor. Die Rohrinne Durchmesser betragen: - am Hauptstrang: $d_i = 2,70 \div 1,70$ m, - am Einzelstrang: $d_i = 1,20$ m. Der Abstand der vertikalen Auflager ist deutlich kleiner, mit Schlankheiten $L_i/d_m \approx 2,6 \div 4,7$. Nur an den Einzelsträngen sind die Schlankheiten etwas höher mit $L_i/d_m \approx 7 \div 10$, wobei jeder Einzelstrang ein zusätzliches vertikales Auflager nahe dem benachbarten Abzweiger aufweist. Die Rohrschlankheiten betragen $r/t = 25 \div 42$ bzw. $d/t = 50 \div 84$. Der Bemessungssinnendruck beträgt $p_{id} = 5,23$ N/mm².

b) Spannungsniveau in der VRL für alleiniges Eigengewicht (Rohrgewicht und Wasserfüllung)

Für die alleinige Eigengewichtsbelastung wirkt die Rohrleitung wie ein Durchlaufträger, der durch die vertikalen Lager gestützt ist. Somit liegt eine Belastung bzw. Beanspruchung in der Vertikalebene der einzelnen Rohrstränge vor, wie Bild 4 für einen Einzelstrang zeigt. Dadurch entstehen Rohrbiegemomente M_x um die horizontale Achse. Wegen der sehr geringen Schlankheiten $L_i/d_m \leq 10$ zwischen den einzelnen Lagerpunkten sind die daraus entstehenden Rohrlängsspannungen σ_x in der Größenordnung von nur etwa $\sigma_{x,g} \approx \pm 30$ N/mm². Auch an den Abzweigern selbst bleibt das Spannungsniveau gering, mit nur lokalen Spannungsspitzen von etwa $\sigma_{mises} \approx 40$ N/mm².

Dieses äußerst geringe Spannungsniveau aus dem alleinigen Eigengewicht ist auch dafür verantwortlich, dass bei zusätzlichem Betriebsinnendruck das Abheben der VRL bei bereits kleinen Setzungen an einzelnen Auflagerpunkten (s. nachfolgender Abschnitt i) für die stählerne VRL selbst unproblematisch ist.

c) Elastischer Beanspruchungszustand in der VRL aus Betriebsinnendruck und Eigengewicht

Aus dem Betriebsinnendruck p_{id} (Bild 5) entstehen primär an jedem Rohrstück der VRL Umfangsspannungen σ_ϕ (Zugspannungen), die einfach mit der „Kesselformel“ nach Gl. (1) ermittelt werden können.

$$\sigma_\phi = p_{id} \cdot \frac{r}{t} = p_{id} \cdot \frac{d}{2 \cdot t} \quad \text{Gl. (1)}$$

mit: d = Rohrdurchmesser, t = Rohrwanddicke, p_{id} = Innendruck

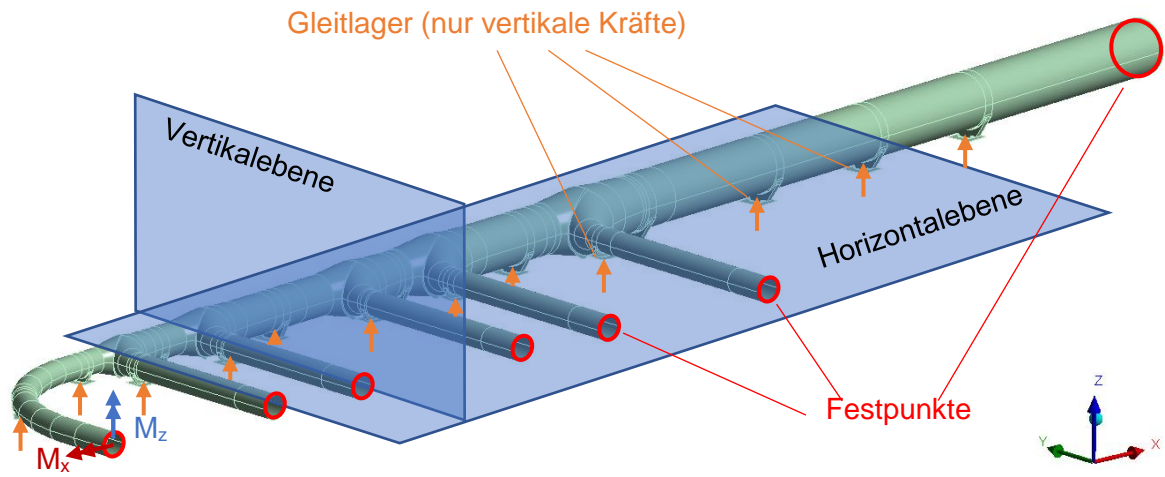


Bild 4: Beispiel einer VRL mit Vertikal- und Horizontalebene zum Zuordnen der Belastungen und Beanspruchungen

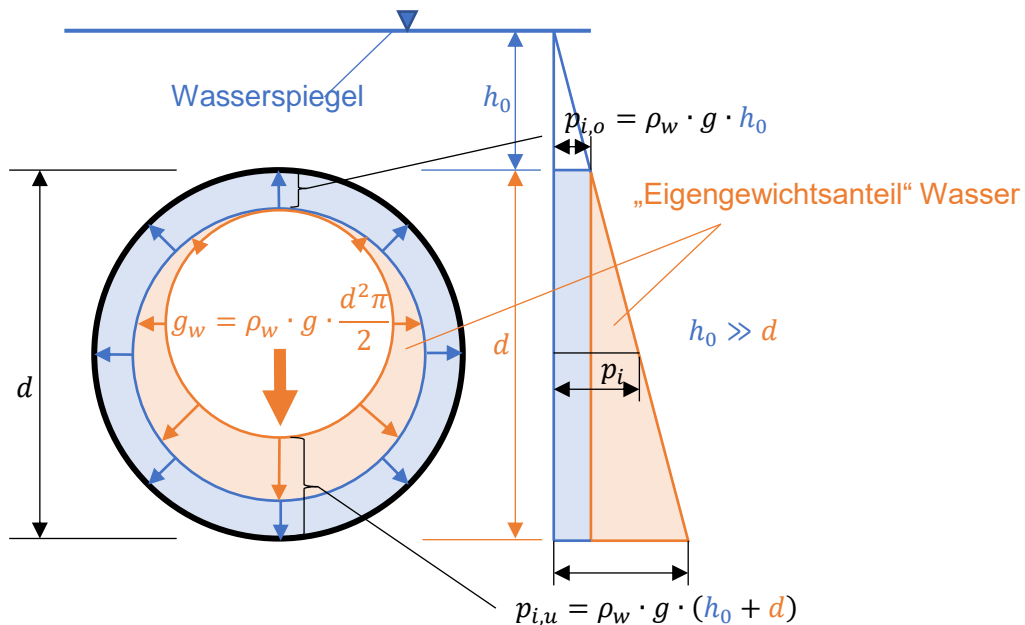


Bild 5: Hydrostatische Druckverteilung in der Rohrleitung

Da die VRL an all ihren Enden (Hauptstrang OW-seitig und alle Einzelstränge) Festpunkte (FP) aufweist (vgl. Bild 3), die eine starre unverschiebliche Endenspannung aller Rohrstränge bewirken, führen die auftretenden Rohrlängsdehnungen (inklusive Querkontraktionswirkung zufolge σ_φ) zu Zwängungsschnittkräften in der Ebene der VRL (das biegesteife Rohrsystem bildet mit den starren Abzweigern ein Rahmensystem in der Horizontalebene der VRL (s. Bild 4). Dies führt zu Normalkräften, Biegemomenten M_z um die vertikale Rohrachse und horizontal gerichteten Querkräften. Bild 6 zeigt beispielhaft den Momentenverlauf aus Betriebsinnendruck für die VRL bei KW Rodund.

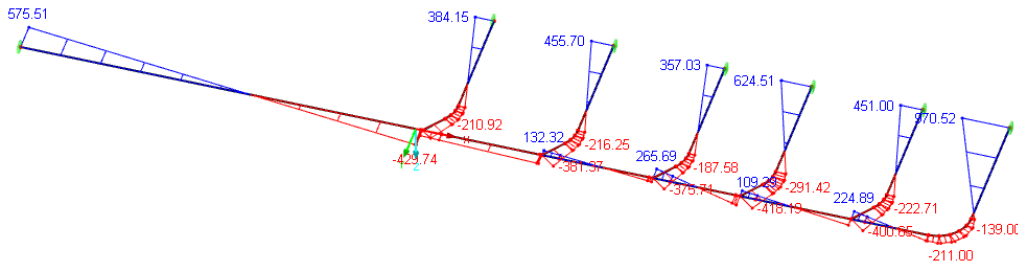


Bild 6: Momentenverlauf an der VRL bei KW Rodund infolge Betriebsinnendruck $p_{id} = 4,19$ N/mm² (Ergebnisse aus Berechnung mit 1D-Stabmodell)

Aus den Biegemomenten entstehen Rohrlängsspannungen σ_x , die jedoch nur einen kleinen Anteil bilden, gegenüber jenen Rohrlängsspannungen aus der dominanten Zugnormalkraft N_i in allen Rohrteilen. Diese Zugnormalkräfte sind nahezu ident zum vollen Deckeldruck $N_{DD,i}$ nach Gl. (2) für jedes Rohrstück i (proportional zum Innendurchmesser d_i), wie die Ergebnisvergleiche in Bild 7 zeigen.

Im Verteilrohrleitungssystem baut sich also, obwohl das Wasser in der Rohrleitung frei fließt und in keinem der Einzelstränge sowie am Hauptstrang ein Verschlussorgan geschlossen ist, an jeder Stelle der Rohrleitung annähernd die Deckeldruckkraft $N_{DD,i}$ auf.

$$N_{DD,i} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} \cdot p_{id} \tag{2}$$

mit: d_i = Rohrinne Durchmesser

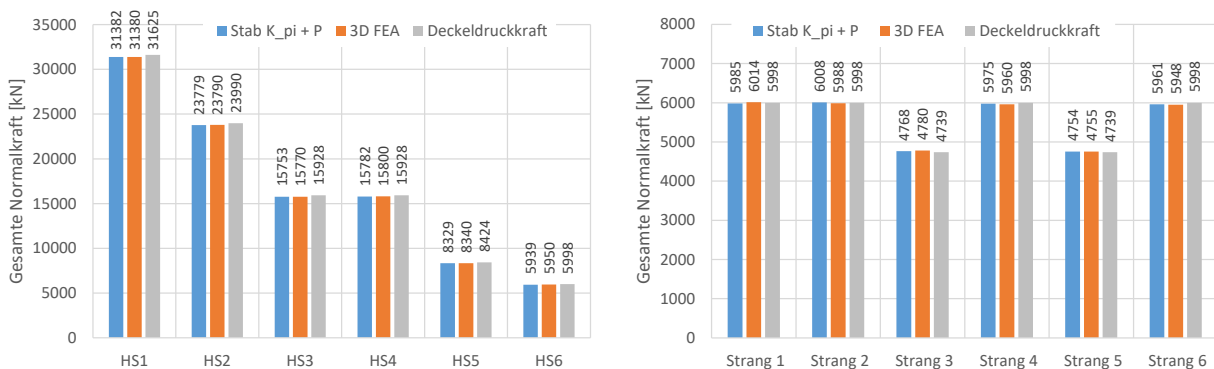


Bild 7: VRL bei KW Rodund, Lastfall alleiniger Innendruck $p_{id} = 4,19$ N/mm² - Normalkräfte in allen Rohrsträngen, im Vergleich zur Deckeldruckkraft N_{DD} (Ergebnisse infolge 1D-Stabmodell sowie 3D-FE-Modell)

Beinahe die gesamte Deckeldruckkraft wird am OW-seitigen Auflagerpunkt (Festpunkt) des Hauptstranges abgetragen, wie in Bild 8 beispielhaft dargestellt ist, da die Stichleitungen relativ lang und nachgiebig in x-Richtung sind.

Die großen Rohrlängskräfte entstehen durch konische Rohre an den Abzweigern sowie durch die einzelnen Rohrkrümmen im Verteilrohrleitungssystem.

Am Hauptstrang entstehen durch die dominanten Zugnormalkräfte in den Rohren überwiegend Verformungen in Rohrlängsrichtung, die kontinuierlich vom Festpunkt zunehmen und in Richtung Unterwasser orientiert sind, wie Bild 9 zeigt.

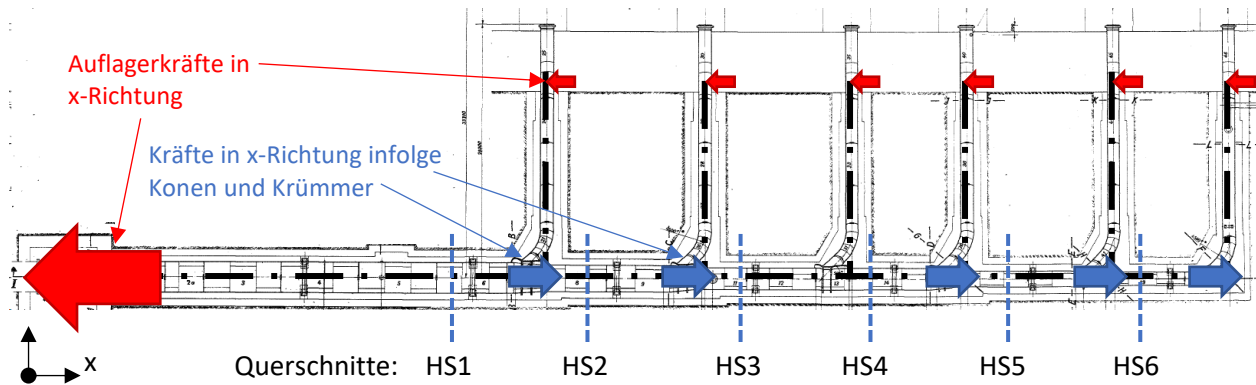
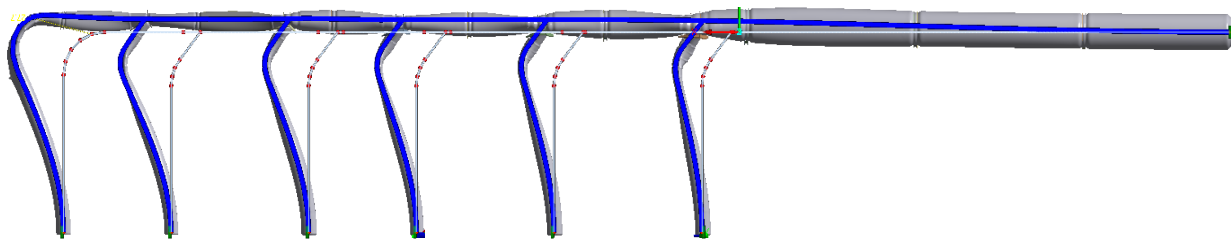


Bild 8: Lastfall Betriebsinnendruck bei der VRL des KW Rodund; Darstellung der Auflagerkräfte in Rohrlängsrichtung des Hauptstranges (x-Richtung)



Verformungen 250-fach überhöht – mit modifizierten Karman-Faktor K_{pi}

Bild 9: Lastfall Betriebsinnendruck bei der VRL des KW Rodund – Verformungen an der VRL (Vergleich Stabmodell „korrekt“ (blau) und 3D-FE-Analyse (grau))

Nachdem festgestellt wurde, dass in jedem Rohrstrang der VRL als Normalkraft annähernd die Deckeldruckkraft $N_{DD,i}$ wirksam ist, erfolgte eine Grundsatzstudie, ob dies auch bei kleineren Abzweigwinkeln ($\alpha < 90^\circ$) der Einzelstränge der Fall ist.

Es wurde der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen ein Rohrknick – bei Variation des Knickwinkels – auf die Höhe der Normalkraft im geschlossenen Rohrsystem mit beidseitigen Festpunkten bei Betriebsinnendruck hat. Der untere Grenzwert der sich einstellenden Zugnormalkraft tritt bei geraden Rohren auf und ergibt sich einzig aus der vollständig behinderten Querkontraktionswirkung zu $N_{rohr} = 0,6 \cdot N_{DD}$. Der obere Grenzwert der sich einstellenden Normalkraft ergibt sich für ein isoliertes abgedeckeltes Rohr zu $N_{rohr} = N_{DD}$. Das Gesamtergebnis der Studie zeigt Bild 10. Man erkennt, dass bereits kleine Knickwinkel $\alpha > 25^\circ$ dazu führen, dass der obere Grenzwert $N_{rohr} = N_{DD}$ erreicht wird. Dies bedeutet, dass auch bei VRL mit Abzweigwinkeln $\alpha < 90^\circ$ gilt: $N_{rohr} \approx N_{DD}$.

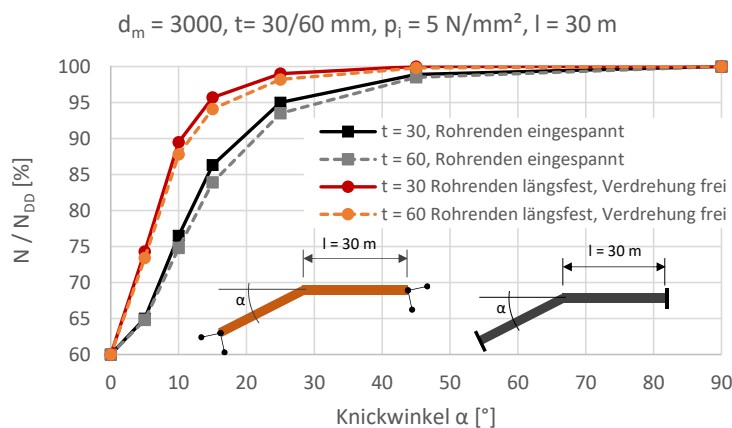


Bild 10: Lastfall Betriebsinnendruck bei geschlossenen Rohrsystemen mit beidseitigen Festpunkten. Einfluss des Knickwinkels und einer allfälligen Endeinspannung auf die Zugnormalkraft N im Rohr (Bezug auf Deckeldruckkraft N_{DD})

d) Zutreffende Vorgehensweise bei der Berechnung mit dem 1D-Stabmodell – Lastfall Bemessungsinnendruck p_{id}

Für Bestandsanlagen liegen in der Regel noch keine 3D-FE-Systemberechnungen für die gesamte VRL vor, da in der Vergangenheit die Rechner- und Speicherkapazität der EDV-Anlagen dies noch nicht zuließen. Daher erfolgte die globale Systemberechnung an einem 1D-Stabmodell und nur für die einzelnen Abzweiger wurden lokale 3D-FE-Modelle erstellt. Im Forschungsprojekt wurde auch die Treffsicherheit der 1D-Stabmodelle untersucht.

Dabei zeigte sich, dass für den Lastfall Bemessungsinnendruck von der üblichen Vorgehensweise in der Stabstatik abgewichen werden muss, um zutreffende Ergebnisse zu erhalten. Dies bedeutet:

- Infolge der Innendruckbelastung p_i muss **eine zusätzliche Stabverlängerung** (ϵ_x nach Gl. (3)) durch die im Verteilrohrleitungssystem zusätzlich wirkende Deckeldruckkraft N_{DD} in der Stab-Statik angesetzt werden. Das heißt, die Zwangsschnittkräfte im Verteilrohrleitungssystem errechnen sich infolge dieser angesetzten Längsdehnung ϵ_x jedes einzelnen Stabes.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \cdot 0,4 \cdot \frac{p_{id} \cdot d}{4 \cdot t} = \frac{0,1 \cdot p_{id} \cdot d}{E \cdot t} \quad \text{Gl. (3)}$$

- Mit Hilfe der Stabwerksberechnung lassen sich nun **Zwangsschnittkräfte** (N_{stab}, M_z, V) am statisch unbestimmten Verteilrohrleitungssystem errechnen, jedoch keine resultierenden Normalkräfte oder Längsspannungen aus der Innendruckbelastung p_{id} selbst.
- Zu der Normalkraft N_{stab} aus der Stab-Statik, muss immer noch die zugehörige **Deckeldruckkraft N_{DD}** nach Gl. (2) **addiert** werden. Die Deckeldruckkraft N_{DD} ist immer eine Zugnormalkraft.
- Die Längsspannungen lassen sich mithilfe der errechneten Stabschnittkräfte bei allen geraden Rohrteilen wie üblich berechnen zu:

$$\sigma_x = \frac{N_{stab} + N_{DD}}{A} \pm \frac{M_z}{W} \quad \text{Gl. (4)}$$

mit: A = Fläche des Rohrquerschnittes; W = elastisches Widerstandsmoment,

Die gleichzeitig auftretenden Umfangsspannungen σ_φ aus dem Bemessungsinnendruck ergeben sich nach Gl. (1).

- Zu beachten ist, dass die Berechnung von zutreffenden Längs- und Umfangsspannungen in: i) Segmentkrümmern, insbesondere mit zusätzlicher Biegebeanspruchung, ii) Abzweigern oder, iii) Auflagerpunkten, deutlich komplexer ist und am zutreffendsten mit einer lokalen 3D-FE-Analyse erfolgen sollte.
- Mit Hilfe der Stabwerksberechnung lassen sich die **Verformungen** der Verteilrohrleitungsachse zutreffend abbilden, wie beispielhaft Bild 9 zeigt, wegen der Miterfassung der Deckeldruckkräfte N_{DD} bei der Dehnungsermittlung ϵ_x der einzelnen Stabelemente. Zusätzliche lokale Verformungen (z.B. Abplattung von Querschnittsteilen) können mit Hilfe der Stabwerksberechnung nicht ermittelt werden.
- Auch die Auflagerkräfte an den Festpunkten müssen ergänzt werden durch die jeweils im anschließenden Rohr vorliegenden Deckeldruckkräfte N_{DD} .
- In allen Krümmerebenen der VRL sollte die Biegesteifigkeit des Rohres mit dem Karman-Faktor für die versteifende Innendruckwirkung abgemindert werden (in und aus der Ebene des Krümmers). Ohne die Abminderung der Biegesteifigkeit des Rohres werden die Zwängungsschnittkräfte und Festpunktkräfte in der VRL überschätzt (konservative Ergebnisse).

e) Zutreffende Vorgehensweise bei der Berechnung mit dem 1D-Stabmodell – sonstige Lastfälle

Für die Ermittlung der Zwängungsschnittkräfte zufolge Temperaturänderungen oder Setzungen an den Lagerpunkten ist die übliche Vorgehensweise der Stabstatik zutreffend und liefert hinreichend genaue Ergebnisse, wie beispielhaft Bild 11 für einen Setzungsfall am Einzelstrang zeigt.

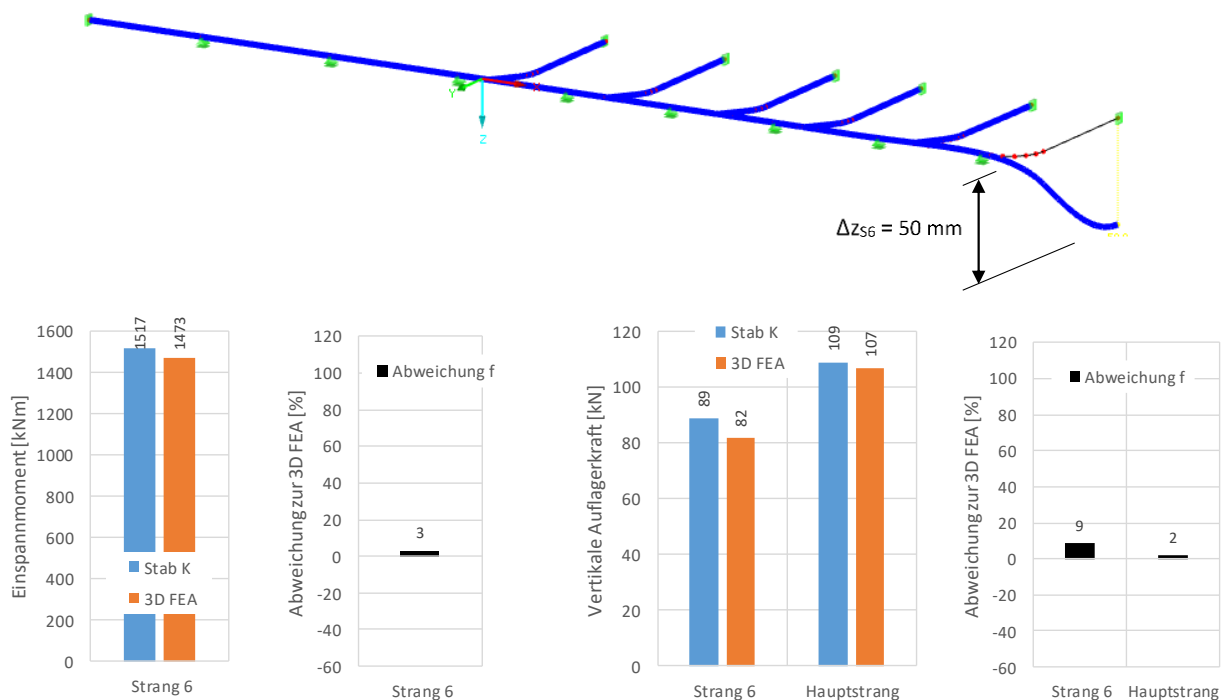


Bild 11: VRL bei KW Rodund, Lastfall alleinige Setzung am Rohrende von Strang 6, $\Delta z = 50 \text{ mm}$; Gesamtverformungen am 1D-Stabmodell und Ergebnisvergleich für Einspannmoment und vertikale Auflagerkräfte mit 3D-FE-Modell

f) Maßgebende kritische Stellen bei VRL für den Ermüdungsnachweis

Beide untersuchten VRL wurden sehr detailliert in Hinblick der maßgebenden Stellen für den Ermüdungsnachweis untersucht, wobei dieser auch immer quantitativ in Form des

Ausnutzungsgrades (AG) ausgewiesen ist. Es wurde bewusst dasselbe Verhältnis zwischen ermüdungswirksamer Druckänderung Δp_i und Bemessungssinnendruck p_{id} gewählt (jeweils $\Delta p_i/p_{id} = 0,12$).

Bei der VRL bei KW Mayrhofen (Bild 3b) wurde bewusst der oberwasserseitige Rohrkrümmer weggelassen, um verallgemeinerungsfähige Aussagen zu erhalten.

Das Gesamtergebnis beider VRL ist in Bild 12 nochmals zusammengefasst und gegenübergestellt. Die ausgewiesenen Ergebnisse gelten für die geometrisch lineare Berechnung. Unter Voraussetzung einer konstanten Wöhlerlinien-Neigung $m = 3$, lassen sich aus dem Vergleich der Ausnutzungsgrade die Erhöhungsfaktoren der Gesamtlebensdauer nach Gleichung (5) abschätzen, bei Bezug der Lebensdauer für AG_{max} .

$$f_{LD} \approx (AG_{max}/AG)^m = (AG_{max}/AG)^3 \quad \text{Gl. (5)}$$

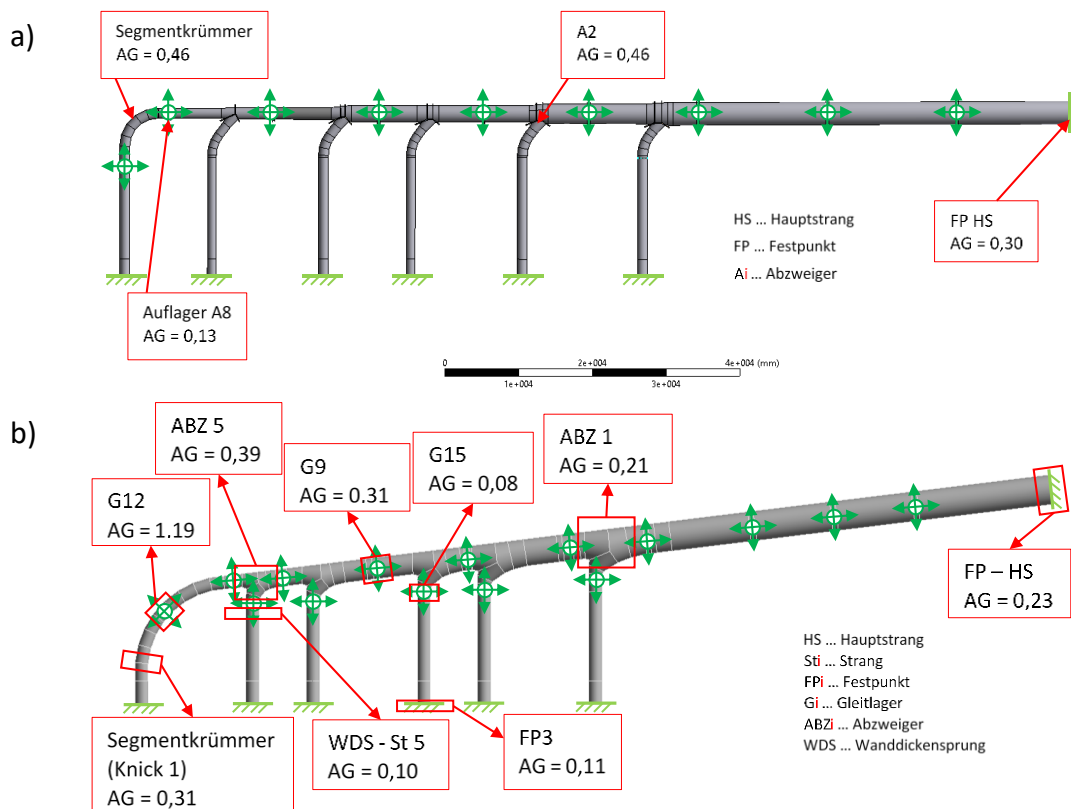


Bild 12: Übersicht der maßgebenden Bereiche für den Ermüdungsnachweis und errechneter Ausnutzungsgrad (AG); a) VRL bei KW Rodund, b) VRL bei KW Mayrhofen

Bei der VRL bei KW Rodund wird die verfügbare Restlebensdauer bestimmt durch den Segmentkrümmer bei Strang 6 und den Abzweiger A2 (jeweils $AG_{max} = 0,46$).

Bei der VRL bei KW Mayrhofen ist mit Abstand die höchste Ermüdungsgefährdung beim Segmentkrümmer von Strang 6. In allen anderen Bereichen sind die Ausnutzungsgrade deutlich kleiner.

g) Abzweiger der Bauform „Sulzer Kragen“ – Besonderheiten für zutreffendes 3D-FE-Modell

Die Idee des Sulzer Kragens (Bild 13) ist, den durch den abzweigenden Strang bedingten Lochausschnitt zu verstärken, sodass die Umfangsspannungen über den Kragen um den Lochausschnitt am Hauptstrang herumgeführt werden und somit die Rohrspannungen reduziert werden. Die beiden zusätzlichen Ringe am Sulzer Kragen, um das Hauptrohr, dienen

zur Lagesicherheit und Stabilisierung des Kragens. Alle außenliegenden Kragenteile sind an die innenliegenden Rohre nur angepasst, aber nicht angeschweißt.

Die Berechnungen infolge ständiger Last und Betriebsinnendruck am Abzweiger der Bauform „Sulzer Kragen“ zeigten, dass die größten von Mises Vergleichsspannungen sowie die größten Hauptspannungen (relevant für den Ermüdungsnachweis) im Bereich des Kragens entstehen. Weiters wurden die Auswirkungen auf die lokalen Spannungen untersucht, wenn der Sulzer Kragen über Reibungskontakt ($\mu = 0,2$) mit dem Rohr gekoppelt ist (der tatsächlichen Ausführung entsprechend) und nicht direkt mit dem Rohr starr verbunden ist. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Spannungsspitzen bei Reibungskontakt ($\mu = 0,2$) um etwa 10 % größer sind als bei starrem Verbundkontakt. Dies bedeutet, dass für die Ermittlung der Strukturspannungen beim Ermüdungsnachweis, der vorliegende Reibungskontakt im 3D-FE-Modell mitabgebildet werden sollte.

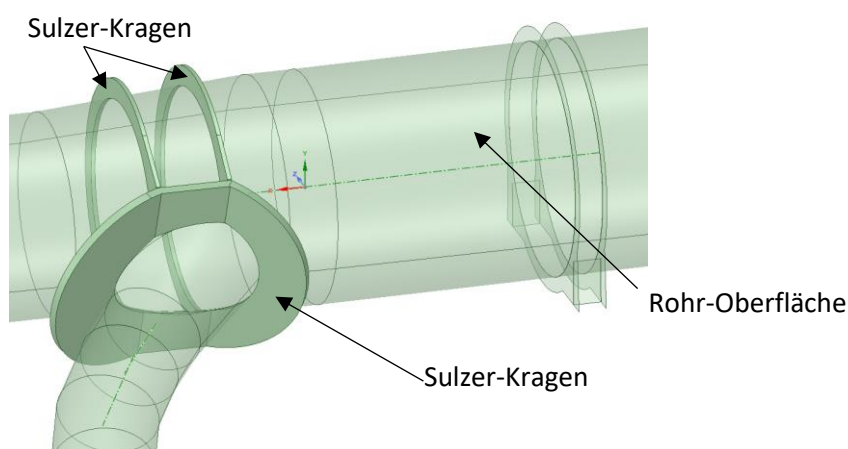


Bild 13: Abzweiger 1 bei der VRL bei KW Rodund; Bauform des Abzweigers mit „Sulzer Kragen“

h) Plastische Tragreserven der VRL unter Eigengewicht und einer gegenüber dem Betriebsinnendruck deutlich erhöhten Innendruckbelastung

Im Zuge der elastisch-plastischen, geometrisch nichtlinearen Berechnungen für die VRL bei KW Rodund und die VRL bei KW Mayrhofen wurde das Eigengewicht (stählerne VRL und Wasserfüllung) aufgebracht und dann anschließend der Innendruck weit über den Bemessungsinndruck weiter gesteigert. Bild 14 fasst die ermittelten, unerwartet hohen plastischen Tragreserven beider VRL zusammen, mit einem Laststeigerungsfaktor gegenüber dem Betriebsinnendruck von zumindest $LF_{pl} = 2,0$. Mit eingetragen sind auch jene Grenzinndrücke, bei denen die isoliert betrachteten einzelnen Rohrstücke der VRL die Fließgrenze infolge σ_φ in Umfangsrichtung erreichen (Werte $p_{i,\varphi,400,min}$ und $p_{i,\varphi,450,min}$ wobei die Zahlenwerte 400 und 450 auf den Nennwert der Fließgrenze f_y des verwendeten Rohrmaterials in N/mm² hinweisen).

Eine Steigerung über diese Werte hinaus, ist an den geraden Rohrstücken unter anderem erklärbar durch die zusätzlich wirkenden günstigen Längszugsspannungen σ_x aus der dominanten Wirkung des Deckeldrucks ($\sigma_\varphi > f_y$ möglich, mit max. $\sigma_\varphi = 1,155 \cdot f_y$, wegen begleitender Zugspannungen σ_x) und durch die vorgegebene Verfestigung der Stahlarbeitslinie (Verfestigung: $E_v = E/100 \rightarrow$ bei 5 % Dehnung entspricht dies einer zusätzlichen Spannung von ca. $\sigma = 105 \text{ N/mm}^2$). Etwas unerwartet ist, dass auch in allen Abzweigern und auch in den Segmentkrümmern eine Steigerung gegenüber den Bezugswerten für das isolierte Rohrstück möglich ist. Die Gründe dafür sind in erster Linie die

plastischen Umlagerungsmöglichkeiten, welche bei geraden Rohrteilen nicht möglich sind, und die sich einstellenden günstigen räumlichen Spannungszustände (Zugspannungen in Längs- und Umfangsrichtung) sowie die geringe angesetzte Wiederverfestigung im Materialmodell.

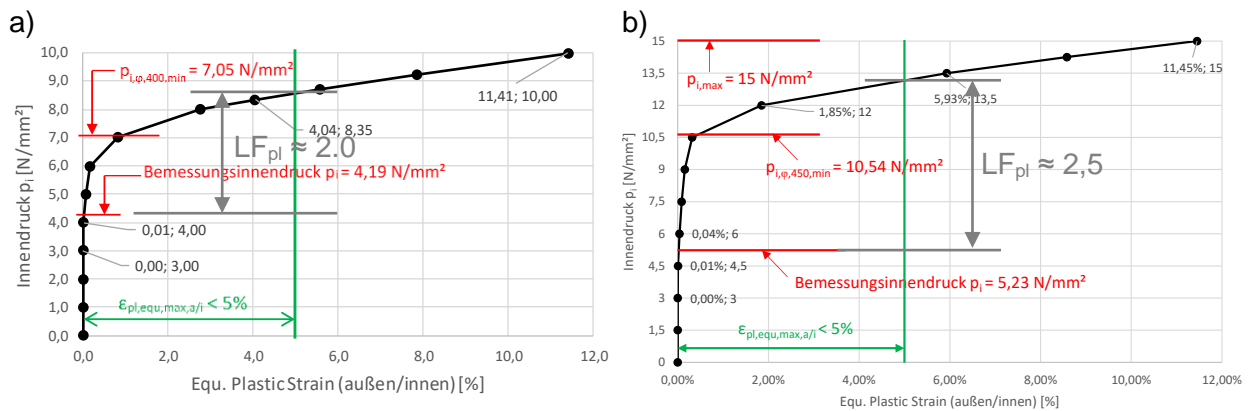


Bild 14: VRL unter Eigengewicht und Innendruck – elastisch-plastisches Tragverhalten bei alleiniger Steigerung des Innendrucks p_i ; a) VRL bei KW Rodund, b) VRL bei KW Mayrhofen

i) Günstiges elastisch-plastisches Tragverhalten der VRL bei Eigengewicht, Innendruck und großen Auflager- bzw. Festpunktsetzungen

Bei allen Setzungsberechnungen wurde von starren Fundamenten und Festpunkten an den nicht von Setzungen betroffenen Auflagerpunkten der VRL ausgegangen, sodass die Berechnungsergebnisse obere Grenzwerte der Zwängungsbeanspruchung an der VRL darstellen, wie auch für die sich neu einstellenden vertikalen Auflager- und Festpunktkräfte. Es wurden, vor allem an den Enden der Einzelstränge, unrealistisch hohe Setzungen angesetzt, um das äußerst günstige Tragverhalten der stählernen VRL aufzuzeigen. Die damit verbundenen, sehr hohen Zunahmen der Festpunktkräfte wurden nicht weiter beurteilt (Tragfähigkeit des Betons).

• **Verhalten bei großen Setzungen an den Enden der Einzelstränge**

Bei der VRL des KW Rodund weisen die Einzelstränge selbst keine zusätzlichen vertikalen Lager auf – dies stellte sich als sehr vorteilhaft heraus, gegenüber der VRL bei KW Mayrhofen, mit zusätzlichen Gleitlagern an den Einzelsträngen (G12 bis G17 in Bild 3b).

Auch sehr große Setzungen von $\Delta z = 300$ mm an der Krafthauswand bei der VRL des KW Rodund führen nur lokal zu zulässigen plastischen Dehnungen ($\epsilon_{\text{equ, pl}} < 2,5$ %), wie beispielhaft in Bild 15 für eine alleinige Setzung am Strang 1 dargestellt. Die dadurch bedingte zusätzliche vertikale Auflagerkraft an benachbarten Auflagerpunkten (gegenüber dem Bemessungswert $A_{v,g+p}$ infolge Eigengewicht (Rohrgewicht, Wasserfüllung) und Innendruck) beträgt jedoch bei Lager A3 bereits +96 %, wie Bild 16 zeigt. Bei Lager A4 ist die Zunahme mit +18 % deutlich geringer.

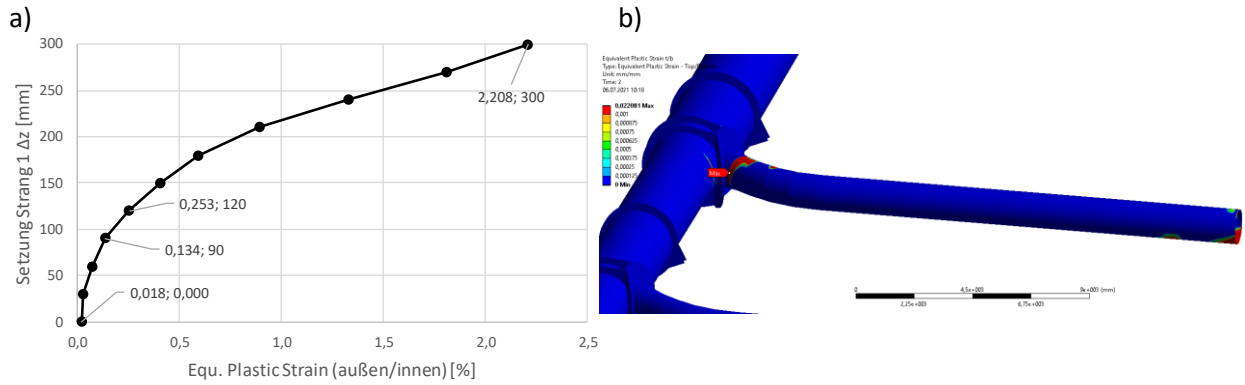


Bild 15: Setzung Δz bei Einzelstrang 1 der VRL bei KW Rodund; a) maximal auftretende plastische Dehnung (außen/innen) $\epsilon_{pl,eq,max}$ in Abhängigkeit von Δz , b) Verlauf der plastischen Dehnungen (außen/innen) $\epsilon_{pl,eq,max}$ für $\Delta z = 300$ mm

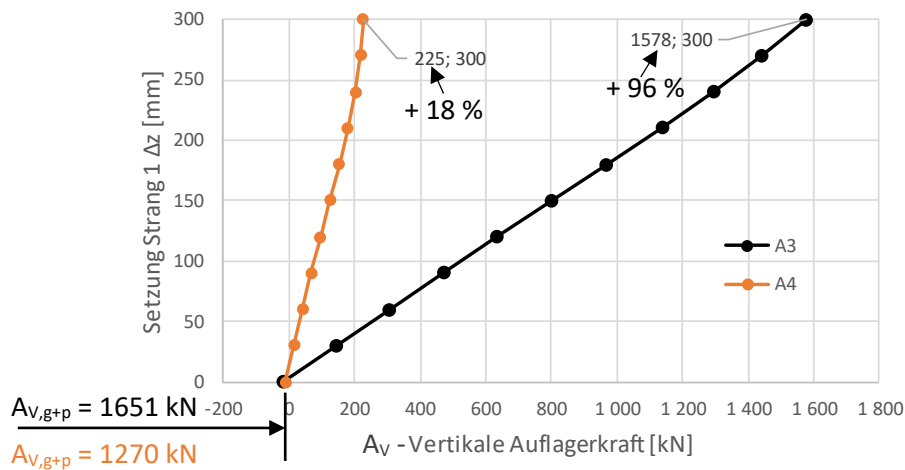


Bild 16: Setzung Δz bei Einzelstrang 1 der VRL bei KW Rodund; Zunahme der vertikalen Auflagerkräfte in den benachbarten Auflagerpunkten

Auch bei der VRL des KW Mayrhofen können sehr große Setzungsmaße Δz von der VRL selbst leicht aufgenommen werden, und es entstehen – ähnlich wie bei der VRL des KW Rodund – nur sehr lokale Bereiche mit plastischen Dehnungen im zulässigen Bereich. Bild 17 zeigt beispielhaft die Setzung am Ende von Strang 1. Mit hervorgehoben ist in diesem Verformungsbild der VRL das zusätzliche Lager G13 an diesem Strang, das nun wie ein Hebelpunkt für den Hauptstrang wirkt. Das Lager G13 bewirkt ein vollständiges Abheben des Hauptstrangs von seinen Lagern und führt zu einer Verzehnfachung der vertikalen Auflagerkraft in G13 bei $\Delta z = 200$ mm, wie Bild 18b zeigt. Nur durch die sehr großzügige Auslegung der Sattellager, Ausführung entsprechend Bild 18a, ist es überhaupt möglich, dass diese Auflagerkraft in den Abzweigstrang eingeleitet werden kann. Deutlich günstigere Verhältnisse liegen vor, wenn das Lager G13 sowie alle anderen vertikalen Lager der Einzelstränge weggelassen werden. Wie Bild 18c zeigt, beträgt für $\Delta z = 200$ nun die maximale Zunahme der vertikalen Auflagerkräfte 89 %, bei Lager G5.

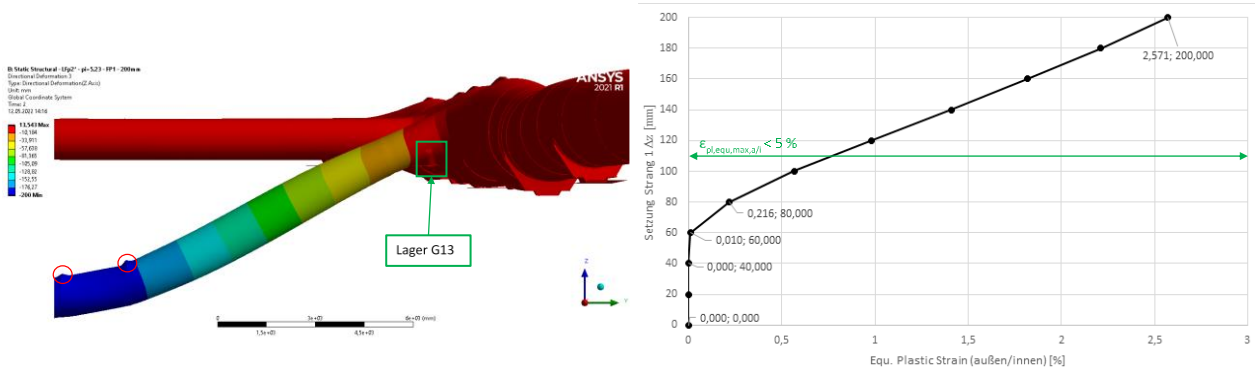


Bild 17: Setzung Δz bei Einzelstrang 1 der VRL bei KW Mayrhofen; a) Verformungsbild der VRL für $\Delta z = 200$ mm, b) maximal auftretende plastische Dehnungen (innen/außen) $\epsilon_{pl,eq,max}$ in Abhängigkeit von Δz

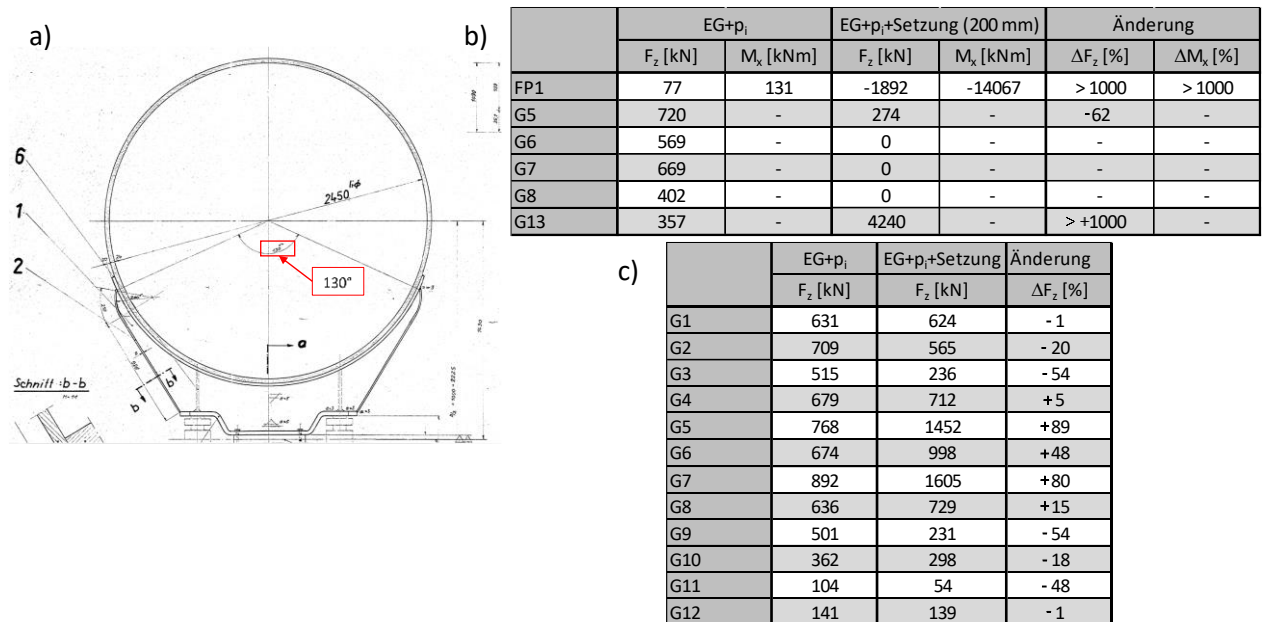


Bild 18: a) Ausführung aller Lagersättel bei der VRL von KW Mayrhofen; Änderungen der vertikalen Auflagerkräfte für eine Setzung $\Delta z = 200$ mm bei Strang 1; b) bei Originalausführung; c) ohne Gleitlager an den Einzelsträngen

• **Verhalten bei Setzungen am Hauptstrang der VRL**

Die große Biegesteifigkeit der VRL (sowohl bei KW Rodund als auch bei KW Mayrhofen) in vertikaler Richtung führt dazu, dass bereits bei geringen Setzungsmaßen Δz an einzelnen Auflagerpunkten des Hauptstrangs, sehr große Zugverankerungskräfte an diesen Lagerpunkten auftreten würden. Die ausgeführten konstruktiven Zuganker sowie auch die geringen Fundamenteigengewichte führen dazu, dass die Zugkräfte an diesen Auflagerpunkten nicht aufnehmbar sind und der Hauptstrang der VRL von diesen setzungsbehafteten Lagern, bereits bei sehr geringen Setzungsmaßen, abhebt (Δz etwa 8 mm bei VRL des KW Rodund, jedoch nur etwa 2 mm bei VRL des KW Mayrhofen).

Um das große Potential von VRL hinsichtlich unplanmäßiger Setzungen aufzuzeigen, wurde auch der äußerst unwahrscheinliche Grenzfall, mit Abheben des Hauptstrangs der VRL an

zwei benachbarten Auflagerpunkten untersucht. Bild 19 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für die VRL bei KW Rodund mit Abheben bei Lager A4 und A5. Ein Abheben findet bei etwa $\Delta z = 30$ mm an beiden Auflagerpunkten statt.

Trotz Abhebens von zwei Auflagerpunkten bleibt die von Mises Vergleichsspannung an der Blechaußenseite, wie Bild 19c zeigt, zur Gänze im elastischen Bereich. Bild 19b zeigt die zugehörige Änderung der vertikalen Auflagerkräfte. Die benachbarten Auflager A3 und A6 erfahren um etwa 130 % höhere vertikale Auflagerkräfte. Auch im Falle der Vorgabe großer Setzungsmulden am Hauptstrang zeigen sich günstigere Verhältnisse, gegenüber dem gerade erläuterten Grenzfall.

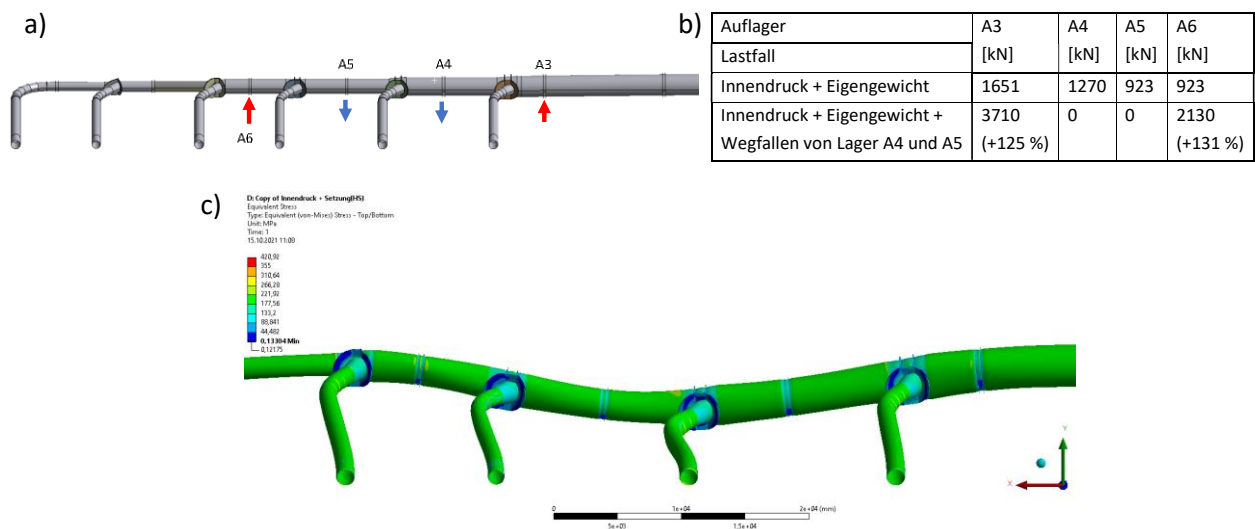


Bild 19: a) VRL bei KW Rodund, Grenzfall des Abhebens des Hauptstrangs an zwei Auflagerpunkten A4 und A5, b) Änderung der vertikalen Auflagerkräfte durch das Abheben von den Lagerpunkten, c) Von Mises Vergleichsspannung an den Blechaußenseiten nach dem Abheben von den Lagern (Lastfall ständige Last inkl. Wasserfüllung und Betriebsinnendruck)

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit und für die großzügige finanzielle Förderung des Projektes. Ein spezieller Dank ergeht an Herrn Apperl, seitens Österreichs Energie Forschung & Innovation, für die organisatorische Abwicklung mit der FFG.

Darüber hinaus ergeht der Dank an die FFG zur Gewährleistung der Finanzmittel im Zuge der Projektfinanzierung als „Collective Research“.

Literaturverzeichnis

- [1] Unterweger H., Ecker A., Langwieser M., Trag- und Verformungsverhalten von Verteilrohrleitungen, Gesamtbericht zum FFG-Projekt F0999 887067 und F0999 897732, 643 Seiten, April 2023
- [2] Druckrohrleitungen neuzeitlicher Wasserkraftwerke; Walter E. Müller, 1968
- [3] Stählerne Druckrohrverzweigungen – Entwurf und Berechnung; Hans Atrops, 1963
- [4] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2014
- [5] ÖNORM EN 1993-1-6 Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen, 2017
- [6] ÖNORM EN 13445-3: Unbefeuerte Druckbehälter Teil 3: Konstruktion, 2015
- [7] ÖNORM EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung, 2013
- [8] Kármán, Th. v.: Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichsrohre. VDI-Z 55 (1911) 1889–1895

Autoren des Beitrages:

Harald Unterweger, geboren 1964, Diplomstudium Bauingenieurwesen, Dissertation und Habilitation an der TU Graz; seit 2011 Leiter des Instituts für Stahlbau der TU Graz.

Alexander Ecker, geboren 1985, studierte Bauingenieurwissenschaften (Fachrichtung konstruktiver Ingenieurbau) an der TU Graz; Dissertation an der TU Graz; seit 2011 wissenschaftlicher Projektmitarbeiter am Institut für Stahlbau der TU Graz.

Martin Langwieser, geboren 1993, studierte Bauingenieurwissenschaften (Fachrichtung konstruktiver Ingenieurbau) an der TU Graz; seit 2020 Universitätsassistent am Institut für Stahlbau der TU Graz.