

**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES



Michael Eck

Berechnung von erdgebetteten Leitungsrohren

eingereicht als

Diplomarbeit

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Fachbereich Stahl- und Metallbau

Erstprüfer : Prof. Dr.-Ing. Mohsen Rahal

Zweitprüfer : Dipl.-Ing. Mike Röthig (Ingutis GmbH)

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich zunächst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Mohsen Rahal für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während der Diplomarbeit.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Mike Röthig von der Ingutis GmbH für die Bereitschaft, das Amt des Zweitprüfers zu übernehmen.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich meiner langjährigen Lebensgefährtin Franziska und meiner Tochter Pauline aussprechen, ohne deren Kraft, Glauben und Unterstützung hätte ich dieses Ziel nicht verwirklichen können.

Ich möchte mich ebenfalls bei meiner Familie bedanken, die mir in manch schwierigen Zeiten den nötigen Rückhalt gab.

Zu guter Letzt danke ich der Firma Stahl Ehrenfriedersdorf für die Unterstützung, das entgegengebrachte Vertrauen und die gute Zusammenarbeit in all den Jahren.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Bildverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XV
1 Vorstellen des Diplomthemas	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Vorgehensweise	2
2 Berechnung nach ATV-A 127	3
2.1 Boden	3
2.1.1 Bodenkategorien	3
2.1.2 Zonen	4
2.2 Rohrwerkstoffe	5
2.3 Einbaubedingungen	6
2.3.1 Überschüttungsbedingung	6
2.3.2 Einbettbedingungen	7
2.4 Berechnung	7
2.4.1 Wahl der Parameter	8
2.4.1.1 Festlegen der Bodengruppen in den bestimmten Zonen	8
2.4.1.2 Bestimmung des Rohrdurchmessers und der Werkstoffkennwerte	9
2.4.1.3 Bestimmung der Einbaubedingungen	10
2.4.2 Bestimmung der Rechenwerte für die Verformungsmoduln	11
2.4.3 Berechnung der Belastungen	12
2.4.3.1 Berechnung der Erdlast	12
2.4.3.2 Bestimmen der Verkehrslast	13
2.4.3.3 Berechnung der Bodenspannung infolge Verkehrslasten	13
2.4.4 Lastaufteilung	15
2.4.4.1 Einbettbedingung für die Rohrleitung	15
2.4.4.2 Berechnung des wirksamen Verformungsmoduls E_2	16

2.4.4.3	Berechnung der Systemsteifigkeit V_{RB}	16
2.4.4.4	Bestimmen der relativen Ausladung a	19
2.4.5	Umlagerung der Bodenspannungen mit Hilfe der Konzentrationsfaktoren λ	20
2.4.5.1	Berechnung von λ_{max}	21
2.4.5.2	Berechnung von λ_R	21
2.4.5.3	Berechnung von λ_{RG}	24
2.4.6	Druckverteilung am Rohrumfang	26
2.4.6.1	Berechnung der vertikalen Gesamtlast	26
2.4.6.2	Berechnung des Seitendruckes	26
2.5	Berechnung der Schnittkräfte, Spannungen, Dehnungen und Verformungen	28
2.5.1	Ermittlung der Beiwerte m und n für die Schnittkraftberechnung	28
2.5.1.1	Beiwerte für den Scheitel	29
2.5.1.2	Beiwerte für den Kämpfer	29
2.5.1.3	Beiwerte für die Sohle	29
2.5.2	Berechnung der Schnittkräfte	30
2.5.2.1	Berechnung der Schnittkräfte am Scheitel	30
2.5.2.2	Berechnung der Schnittkräfte am Kämpfer	31
2.5.2.3	Berechnung der Schnittkräfte an der Sohle	32
2.5.3	Berechnung der Spannungen aus den ermittelten Schnittkräften	33
2.5.3.1	Berechnung der Korrekturfaktoren α_k	33
2.5.3.2	Berechnung der Spannungen am Scheitel	34
2.5.3.3	Berechnung der Spannungen am Kämpfer	34
2.5.3.4	Berechnung der Spannungen an der Sohle	34
2.5.4	Berechnung der Dehnung aus den ermittelten Spannungen	35
2.5.4.1	Berechnung der Dehnung am Scheitel	35
2.5.4.2	Berechnung der Dehnung am Kämpfer	35
2.5.4.3	Berechnung der Dehnung an der Sohle	35
2.5.5	Berechnung der Verformungen	36
2.5.5.1	Vertikale Rohrverformung	36
2.5.5.2	Horizontale Rohrverformung	36
2.6	Bemessung in Form der maßgebenden Nachweise	37
2.6.1	Spannungs- und Dehnungsnachweis	37
2.6.1.1	Spannungs- und Dehnungsnachweis am Scheitel	37
2.6.1.2	Spannungs- und Dehnungsnachweis am Kämpfer	37
2.6.1.3	Spannungs- und Dehnungsnachweis an der Sohle	37

2.6.2	Nachweis der Verformung	38
2.6.3	Stabilitätsnachweis gegen Beulen	38
3	Berechnung mit Hilfe von Stabwerksprogrammen	40
3.1	Erzeugen des Grundkörpers und Einstellen der Berechnungsparameter	40
3.1.1	Einstellen der Berechnungsparameter	40
3.1.2	Erzeugen des Grundkörpers	41
3.1.3	Einfügen der Belastung	45
3.2	Modell mit Hilfe von Auflagerfedern	49
3.2.1	Setzen der Auflagerfedern	49
3.2.2	Berechnung des mit Auflagerfedern modellierten Rohres	51
3.3	Rohrmodell mit Stabfedern	55
3.3.1	Setzen der Stabfedern	56
3.3.2	Berechnung des mit Stabfedern modellierten Rohres	58
3.4	Rohrmodell mit elastischer Bettung	59
4	Auswertung der Ergebnisse	61
4.1	Auswertung des Rohres 500-10	63
4.2	Auswertung des Rohres 750-10	65
4.3	Auswertung des Rohres 1000-10	67
4.4	Auswertung der Wandstärken 8 und 15 mm	71
5	Berechnungen mit unsymmetrischen Belastungen	73
5.1	Modell mit Ausgangsbelastung	74
5.2	Einfachsymmetrische Belastung	77
5.2.1	Erster Schritt	77
5.2.2	Zweiter Schritt	80
5.2.3	Dritter Schritt	83
5.2.4	Vierter Schritt	86
5.2.5	Fünfter Schritt	89
5.2.6	Auswertung der Ergebnisse	92
5.3	Unsymmetrische Belastung	93
5.3.1	Erster Schritt	94

5.3.2	Zweiter Schritt	97
5.3.3	Dritter Schritt	100
5.3.4	Vierter Schritt	103
5.3.5	Fünfter Schritt	106
5.3.6	Auswertung der Ergebnisse	109
6	Zusammenfassung	111
7	Ausblick	114
8	Literaturverzeichnis	118
9	Selbständigkeitserklärung	119
10	ANHANG:	
	ANHANG A: Berechnung nach ATV-A 127 (Kap. 2)	CD
	ANHANG B: Berechnung mit den Stabwerksmodellen (Kap. 4)	CD
	ANHANG C: Berechnung mit easy pipe (Kap. 4)	CD
	ANHANG D: Berechnung Kapitel 5	CD

Formelzeichen

Variablen	Einheiten	Benennung
a	-	relative Ausladung
a'	-	wirksame relative Ausladung
A	mm ² /mm	Fläche pro Streifenbreite
a _F	-	Korrekturfaktor Straßenverkehrslasten
b	m	Grabenbreite
c...	-	Verformungsbeiwerte
d _a	mm	äußerer Rohrdurchmesser
d _m	mm	mittlerer Rohrdurchmesser
E _B	N/mm ²	Verformungsmodul des Bodens
E _{1...E₄}	N/mm ²	Verformungsmodul der Bodenzone
E ₂₀	N/mm ²	Tabellenwert zur Berechnung von E ₂
E _{RL}	N/mm ²	Langzeitelastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes
F _A , F _E	kN	Hilfslasten
f ₁	-	Reduktionsfaktor für das Kriechen des Bodens
f ₂	-	Abminderungsfaktor für E ₂₀
G _{1...G₄}	-	Bodengruppe
h	m	Überdeckungshöhe über Rohrscheitel
I	mm ⁴ /mm	Trägheitsmoment der Rohrwand pro Streifenbreite
k _{sr}	kN/m ³	Bettungsmodul bei konstant radialer Bettung
K ₁ , K ₂	-	Erddruckverhältnis in den Bodenzonen 1 und 2
K* , K''	-	Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck
K'	-	Beiwert für Verformungen

krit q_v	kN/m ²	kritische vertikale Gesamtlast
M...	kNm/m	Biegemoment
m...	-	Momentenbeiwerte
N...	kN/m	Normalkraft
n...	-	Normalkraftbeiwerte
p, p _V , p _F	kN/m ²	Bodenspannung infolge Verkehrslast
p _E	kN/m ²	Bodenspannung infolge Erdlast
q _h	kN/m ²	horizontale Bodenspannung am Rohr
q _h [*] , q _h ^{''}	kN/m ²	horizontale Bettungsreaktionsdruck
q _v	kN/m ²	vertikale Bodenspannung am Rohr
r _A , r _E	m	Hilfsradien
r _m	mm	mittlerer Rohrradius
s	mm	Wandstärke
S _{Bh}	N/mm ²	horizontale Bettungssteifigkeit
S _{Bv}	N/mm ²	vertikale Bettungssteifigkeit
S ₀ , S _R	N/mm ²	Rohrsteifigkeit
V _{RB}	-	Systemsteifigkeit
V _S	-	Steifigkeitsverhältnis
W	mm ³ /mm	Widerstandsmoment der Rohrwand pro Streifenbreite
2α	Grad	Auflagerwinkel
α _B	-	Abminderungsfaktor
α _{Bi}	-	Faktor für die Berechnung von α _B
α _k	-	Korrekturfaktor für die Krümmung
β	Grad	Böschungswinkel
γ...	-	Sicherheitsbeiwert
γ _B	kN/m ³	Wichte des Bodens
γ _R	kN/m ³	Wichte des Rohrwerkstoffes
Δd _h	mm	Durchmesseränderung horizontal

Δd_v	mm	Durchmesseränderung vertikal
Δf	-	Hilfswert
δ	Grad	Wandreibungswinkel
ϵ_R	-	Rechenwert der Randfasergrenz- dehnung
ζ	-	Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit
$\kappa \dots$	-	Abminderungsfaktor für eine Flächen- last nach der Silotheorie
κ_{v2}	-	Abminderungsfaktor für die kritische Beullast
λ_B	-	Konzentrationsfaktor für die Spannung im Boden neben dem Rohr
λ_{fo}	-	oberer Grenzwert des Konzentrations- faktors
λ_{fu}	-	unterer Grenzwert des Konzentrations- faktors
$\lambda_R, \lambda_{RG}, \lambda_{max}$	-	Konzentrationsfaktor für die Spannung über dem Rohr
$\sigma \dots$	N/mm ²	Spannung
σ_R	N/mm ²	Biegezugfestigkeit des Rohrwerkstof- fes (Rechenwert)
φ'	Grad	innerer Reibungswinkel

Indizes	Benennung
a	außen
g	infolge Eigengewicht
h	horizontal
i	innen
L	Langzeitwert
m	mittlerer
o	oben
u	unten
v	vertikal
erf	erforderlich
vorh	vorhanden

Abkürzungsverzeichnis

ATV-A 127

DA

FEM

4 KT

Richtlinie ATV-DVWK-A 127

Diplomarbeit

Finite-Elemente-Methode

Vierkantprofil

Bildverzeichnis

Bild 1: Darstellung der Zonen sowie die Bezeichnung der Rohrbereiche [ATV-A 127]	4
Bild 2: Graben mit Verbauplatten [ATV-A 127]	10
Bild 3: Graben mit geböschten Wänden [ATV-A 127]	11
Bild 4: Darstellung des Lagerungsfalls 3 [ATV-A 127]	11
Bild 5: Diagramm zur Bestimmung des Abminderungsfaktors α_B für E_2 [ATV-A 127]	15
Bild 6: Lagerungsbedingung von gebetteten Rohren [ATV-A 127]	19
Bild 7: Schema der Spannungsumlagerung [ATV-A 127]	20
Bild 8: Lagerungsfall 3 [ATV-A 127]	26
Bild 9: Darstellung des Seitendruckes in Abhängigkeit des Lagerungsfalles [ATV-A 127]	27
Bild 10: Fenster zur Generierung eines Kreisbogens [RSTAB]	41
Bild 11: Fenster zum Erzeugen eines benutzerspezifischen Querschnittes [RSTAB]	43
Bild 12: Rohrring mit Knoten und Achsenkreuz [RSTAB]	44
Bild 13: Lagerungsfall 1 [ATV-A 127]	46
Bild 14: Lagerungsfall 2; Festes Betonaufleger nur für biegesteife Rohre [ATV-A 127]	46
Bild 15: Lagerungsfall 1 und 3 [ATV-A 127]	47
Bild 16: Lagerungsfall 2 [ATV-A 127]	47
Bild 17: Rohrquerschnitt mit Belastung nach Lagerungsfall 3 [RSTAB]	48
Bild 18: Gemessener Abstand [RSTAB]	50
Bild 19: Gelagertes Rohr ohne Belastung [RSTAB]	51
Bild 20: Auflagermodell nach dem Löschen der ersten Zugfedern [RSTAB]	52
Bild 21: Gelöschte Zugfedern in der Rohrsohle [RSTAB]	53
Bild 22: Überlagerung der Ausgangsform mit der Verformung nach der Berechnung [RSTAB]	54
Bild 23: Modell eines mit Stabfedern gebetteten Rohres [RSTAB]	55
Bild 24: Rohrmodell mit einer Stabfeder und einem Auflager [RSTAB]	56
Bild 25: Fertiges Stabfedermodell [RSTAB]	57
Bild 26: Stabfedermodell mit Überlagerung der Verformung [RSTAB]	58
Bild 27: Elastisch gebettetes Rohr ohne gedrehte Stäbe [RSTAB]	59
Bild 28: Elastisch gebettetes Rohr mit gedrehten Stäben [RSTAB]	60
Bild 29: Anordnung der Stäbe mit Nummerierung [RSTAB]	62
Bild 30: Darstellung der Verformung mit Wirkungsrichtung des Eigengewichtes [RSTAB]	69

Bild 31: Grundsystem mit doppelsymmetrischer Belastung [RSTAB]	74
Bild 32: Darstellung der Verformung durch die doppelsymmetrische Belastung [RSTAB]	75
Bild 33: Darstellung der Auslastung infolge der Spannung [RSTAB]	76
Bild 34: Belastung im 1. Schritt [RSTAB]	77
Bild 35: Verformung nach dem 1. Schritt [RSTAB]	78
Bild 36: Spannungsauslastung nach dem 1. Schritt [RSTAB]	79
Bild 37: Belastung im 2. Schritt [RSTAB]	80
Bild 38: Verformung nach dem 2. Schritt [RSTAB]	81
Bild 39: Spannungsauslastung nach dem 2. Schritt [RSTAB]	82
Bild 40: Belastung im 3. Schritt [RSTAB]	83
Bild 41: Verformung nach dem 3. Schritt [RSTAB]	84
Bild 42: Spannungsauslastung nach dem 3. Schritt [RSTAB]	85
Bild 43: Belastung im 4. Schritt [RSTAB]	86
Bild 44: Darstellung der Verformung nach dem 4. Schritt [RSTAB]	87
Bild 45: Spannungsauslastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]	88
Bild 46: Belastung im 5. Schritt [RSTAB]	89
Bild 47: Darstellung der Verformung nach dem 5. Schritt [RSTAB]	90
Bild 48: Spannungsauslastung nach dem 5. Schritt [RSTAB]	91
Bild 49: Belastung im 1. Schritt [RSTAB]	94
Bild 50: Darstellung der Verformung nach dem 1. Schritt [RSTAB]	95
Bild 51: Spannungsauslastung nach dem 1. Schritt [RSTAB]	96
Bild 52: Belastung im 2. Schritt [RSTAB]	97
Bild 53: Verformung nach dem 2. Schritt [RSTAB]	98
Bild 54: Spannungsauslastung nach dem 2. Schritt [RSTAB]	99
Bild 55: Belastung im 3. Schritt [RSTAB]	100
Bild 56: Verformung nach dem 3. Schritt [RSTAB]	101
Bild 57: Spannungsauslastung nach dem 3. Schritt [RSTAB]	102
Bild 58: Belastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]	103
Bild 59: Verformung nach dem 4. Schritt [RSTAB]	104
Bild 60: Spannungsauslastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]	105
Bild 61: Belastung im 5. Schritt [RSTAB]	106
Bild 62: Verformung nach dem 5. Schritt [RSTAB]	107
Bild 63: Spannungsauslastung nach dem 5. Schritt [RSTAB]	108
Bild 64: Einfachsymmetrische Belastung [RSTAB]	111

Bild 65: Unsymmetrische Belastung Gesamtdrehmoment = 0 [RSTAB]	112
Bild 66: Unsymmetrische Belastung die ein Drehmoment erzeugt [RSTAB]	113
Bild 67: Modell mit je 2 Stabfedern pro Bettungslager [RSTAB]	114
Bild 68: Darstellung der Kraftkomponenten [RSTAB]	115
Bild 69: Mögliche Verformung bei torsionsbelasteten Rohr [RSTAB]	116
Bild 70: Spannungsauslastung bei torsionsbelasteten Rohr [RSTAB]	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodengruppen mit spezifischen Kennwerten nach [ATV-A 127]	8
Tabelle 2: Faktoren für die Erdlastberechnung	10
Tabelle 3: Stoßbeiwerte	14
Tabelle 4: Beiwerte für das Erddruckverhältnis K_2	18
Tabelle 5: Verformungsbeiwerte [ATV-A 127]	22
Tabelle 6: Momenten- und Normalkraftbeiwerte	28
Tabelle 7: Auswertung Rohr 500-10	64
Tabelle 8: Auswertung Rohr 750-10	66
Tabelle 9: Auswertung Rohr 1000-10	68
Tabelle 10: Auswertung der Wandstärken 8 und 15 mm	71
Tabelle 11: Darstellung der Ergebnisse aus Kapitel 5.2	92
Tabelle 12: Spannungen infolge der Reduzierung von q_{v_unten}	109

1 Vorstellen des Diplomthemas

Ziel der Diplomarbeit ist es, mit Hilfe von Stabwerksprogrammen eine elastische Bettung von erdverlegten Rohren zu simulieren, die eine korrekte Berechnung der Leitungsrohre ohne Einschränkungen gewährt. Bei einer erdbebeteten Rohrleitung übernimmt die Erde die Auflagerreaktionen, jedoch kann sie nur Druckkräfte aufnehmen. Deshalb ist es notwendig, dass man bei der elastischen Bettung im Berechnungsprogramm die Zugfedern ausschalten kann, weil sonst die Ergebnisse fehlerhaft ausgegeben werden. Dafür stehen drei Möglichkeiten zur Disposition. Die erste Methode ist die, mit Hilfe von Auflagerfedern die Erdbettung zu simulieren. Die Auflagerfedern nehmen dabei Zug- und Druckkräfte auf, wobei die Auflagerfedern mit den Zugkräften dann manuell gelöscht werden müssen. Für viele Anwender besteht der Vorteil selbst zu entscheiden, welche Federn gelöscht werden. Bei der zweiten Methode handelt es sich um Stäbe, die als Federn definiert werden. Hier kann man bei vielen Stabwerksprogrammen zwischen Zug- und Druckfedern unterscheiden. Dadurch besteht die Möglichkeit die Zugfedern zu deaktivieren. Es gibt aber auch Stabwerksprogramme die eine solche elastische Bettung bereits integriert haben, doch nur bei den wenigsten kann man die Wechselwirkung zwischen Zug- und Druckfedern ausschalten. Die dritte Möglichkeit sind Stabwerksprogramme mit elastischer Bettung und Deaktivierung von Zug- oder Druckfedern. Alle drei Methoden werden bezüglich der Verwendbarkeit untersucht.

1.1 Problemstellung

In erster Linie werden erdverlegte Rohre nach ihrem Verformungsverhalten in biegeeweiche und in steife Rohre unterteilt. Während steife Rohre die gesamte Belastung aufnehmen und der Boden nur als Auflager dient, kommt es bei biegeweichen Rohren zu einer Interaktion zwischen der Erdumgebung und dem Rohr.

Diese Wechselwirkung gilt es im Stabwerksprogramm mit zu berücksichtigen und zu simulieren. Diese Boden-Rohr-Interaktion wird durch folgende Einflüsse bestimmt:

- Rohr- und Grabenabmessung (sowie Form)
- Art und Größe der Belastung
- Rohrmaterial und Bodeneigenschaften
- Lagerungsart
- Verdichtungsgrad des Bodens

Es gibt unterschiedliche Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Rohrspannung und der Rohrverformung. In Deutschland wird in der Regel die ATV-DVWK-A 127 (ATV-A 127) „Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen“ verwendet. Trotzdem ist das Anwendungsgebiet beschränkt oder es entstehen zu anderen Berechnungsmethoden im Ergebnis größere Abweichungen. Da die Finite-Elemente-Methode (FEM) noch nicht in allen Ingenieurbüros eingesetzt wird, soll in dieser Diplomarbeit mit Hilfe eines einfachen Stabwerkprogramms die Berechnung durchgeführt werden.

1.2 Vorgehensweise

In den folgenden Kapiteln werden Berechnungen für biegeeweiche Rohre nach ATV-A 127 mit zwei Modellen verglichen, die eine elastische Bettung simulieren sollen. Hierzu kommt das Programm von R-Stab® in der Version 5 zur Anwendung. Des Weiteren wird dann das gleiche Modell mit einer außergewöhnlichen Belastung versehen, die mit Hilfe der neueren Version 7 von R-Stab® überprüft wird. In der neuen Version kann die elastische Bettung unter Ausschluss von Zugfedern realisiert werden. Die Berechnungen erfolgen statisch und ohne Wasserfüllung oder Innendruck. Diese weiteren Lastfälle mit Rohrbefüllung erhöhen den Berechnungsaufwand, haben aber keine Relevanz bezüglich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Berechnungsmodellen.

2 Berechnung nach ATV-A 127

Die Richtlinie ATV-A 127 gilt für die statische Berechnung von erdverlegten Abwasserkanälen und -leitungen und ist in folgende Berechnungsschritte untergliedert:

1. Bestimmung der Boden- und Verfüllungsmaterialkennwerte
2. Bestimmung der Rohrabmessung und des Rohrwerkstoffkennwerte
3. Bestimmung der Einbau- und Bettungsbedingungen
4. Berechnung der Belastungs- und Druckverteilung am Rohr
5. Berechnung der Schnittkräfte, Spannungen, Dehnungen und Verformungen
6. Bemessung der maßgebenden Nachweise

2.1 Boden

Der Boden bildet im Prinzip das Fundament der erdverlegten Rohrleitungen und übernimmt die Auflagereaktionen. Folgende Bodenarten können durch die Kategorien unterschieden werden. Die Kurzzeichen in den Klammern sind nach DIN 18196 angegeben.

2.1.1 Bodenkategorien

In der ATV-A 127 werden die Böden in die folgenden vier Gruppen eingeteilt.

Gruppe 1: Nichtbindige Böden (GE, GW, GI, SE, SW, SI)

Gruppe 2: Schwachbindige Böden (GU, GT, SU, ST)

Gruppe 3: Bindige Mischböden, Schluff (schluffiger Sand und Kies, bindiger steiniger Verwitterungsboden) (\overline{GU} , \overline{GT} , \overline{SU} , \overline{ST} , UL, UM)

Gruppe 4: Bindige Böden (z.B. Ton) (TL, TM, TA, OU, OT, OH, UA)

2.1.2 Zonen

Weiterhin werden die Bereiche um das Rohr in vier Zonen eingeteilt:

- Zone E1: Überschüttung über dem Rohrscheitel
- Zone E2: Leitungszone seitlich des Rohres
- Zone E3: Anstehender Boden neben dem Graben bzw. eingebauter Boden neben der Leitungszone
- Zone E4: Boden unter dem Rohr

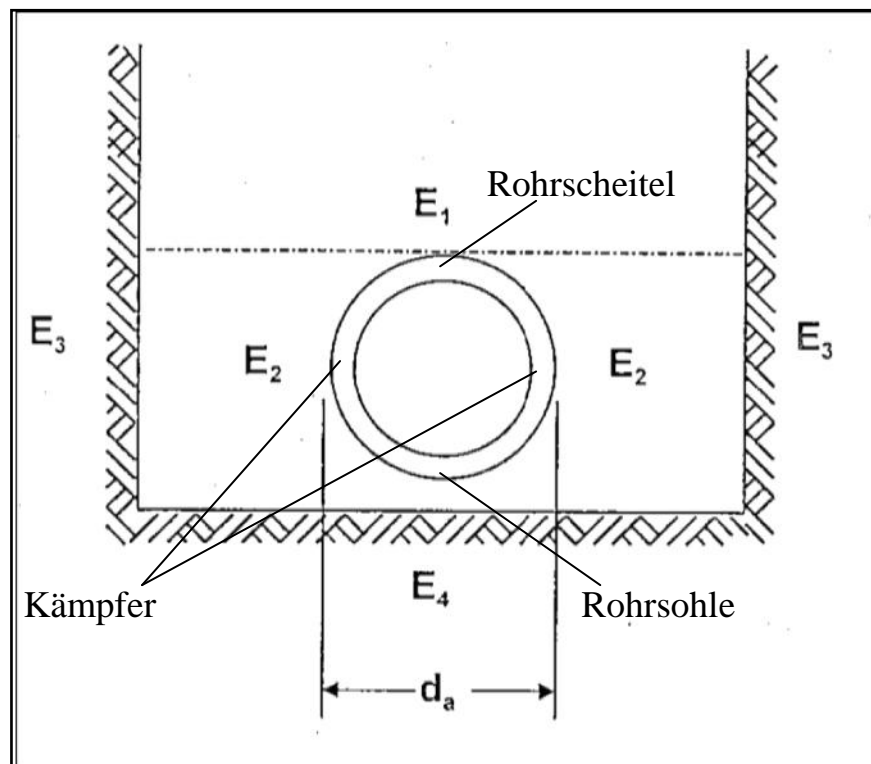


Bild 1: Darstellung der Zonen sowie die Bezeichnung der Rohrbereiche
[ATV-A 127]

2.2 Rohrwerkstoffe

Die für die Dimensionierung maßgebenden Kennwerte der verschiedenen Rohrwerkstoffe folgen unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten. Sie werden insbesondere beeinflusst durch Alterung, Zeitstandverhalten, Schwellbelastung und Temperatur.

Diese Einflüsse sind für den Bemessungszeitraum durch folgende Randbedingungen zu berücksichtigen, die jedoch nicht immer alle maßgebend sein müssen [ATV-A 127]:

- Alterung: 50 Jahre
- Zeitstandverhalten: 50 Jahre
- Schwellbelastung: $\geq 2 \times 10^6$ Lastwechsel
- Temperatur längerfristig: 20 ° C
- Temperatur kurzfristig
(entsprechend einem
Zeitraum von 2 Jahren
in 50 Jahren):
 - DN \geq 400: 45 ° C
 - DN > 400: 35 ° C

2.3 Einbaubedingungen

Die Einbaubedingungen stellen einen wesentlichen Bestandteil für die Boden-Rohr-Interaktion und für die folgende Berechnung dar. Die Bilder 2 und 3 zeigen mögliche Einbaubedingungen.

2.3.1 Überschüttungsbedingung

Bei der Grabenverfüllung oberhalb der Leitungszone wird in vier Überschüttungsbedingungen A1 bis A4 unterschieden.

Diese Gliedern sich wie folgt [ATV-A 127]:

- A1: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenfüllung (ohne Nachweis des Verdichtungsgrades); gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau).
- A2: Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Kanaldielen, die erst nach der Verfüllung gezogen werden. Verbauplatten oder -geräte, die bei der Verfüllung des Grabens schrittweise entfernt werden. Unverdichtete Grabenverfüllung. Einspülen der Verfüllung (nur geeignet bei Böden der Gruppe G1).
- A3: Senkrechter Verbau des Rohrgrabens mit Spundwänden, Leichtspundprofilen, Holzbohlen, Verbauplatten oder -geräten, die erst nach dem Verfüllen gezogen werden.
- A4: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenfüllung mit Nachweis des nach ZTVE-StB erforderlichen Verdichtungsgrades. Gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau). Die Überschüttungsbedingung A4 ist nicht anwendbar bei Böden der Gruppe G4.

2.3.2 Einbettbedingungen

Für die Einbettung in der Leitungszone wird ebenfalls in vier Einbettungsbedingungen B1 bis B4 unterschieden.

Eingeteilt wird in [ATV-A 127]:

- B1: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden bzw. lagenweise in der Dammschüttung verdichtete Einbettung (ohne Nachweis des Verdichtungsgrades); gilt auch für Trägerbohlwände (Berliner Verbau).
- B2: Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Kanaldielen, die bis zur Grabensohle reichen und erst nach der Verfüllung und Verdichtung gezogen werden, Verbauplatten und -geräte unter der Voraussetzung, dass die Verdichtung des Bodens nach dem Ziehen des Verbaus erfolgt.
- B3: Senkrechter Verbau innerhalb der Leitungszone mit Spundwänden oder Leichtspundprofilen und Verdichtung gegen den Verbau, der bis unter die Grabensohle reicht.
- B4: Lagenweise gegen den gewachsenen Boden bzw. lagenweise in der Dammschüttung verdichtete Einbettung mit Nachweis des nach ZTVE-StB erforderlichen Verdichtungsgrades. Die Einbettungsbedingung B4 ist nicht anwendbar bei Böden der Gruppe G4.

2.4 Berechnung

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Berechnung anhand der Richtlinie ATV-A 127. Um die notwendigen Berechnungsschritte für veränderliche Rohrdurchmesser und Wandstärken führen zu können, wurde ein Berechnungsalgorithmus mit dem Programm Mathcad® erstellt. Der Berechnungsalgorithmus nach ATV-A 127 wird anhand eines Beispiels demonstriert.

2.4.1 Wahl der Parameter

Die Wahl der Parameter beginnt mit der Untersuchung der örtlichen Gegebenheiten, in der die Rohrleitung verlegt werden soll. Falls noch keine Bodenkennwerte vorliegen, müssen dafür Bodenproben entnommen und analysiert werden. Auf diese Weise kann man Bodenart und -gruppen bestimmen. Für die durchzuführende Vergleichsberechnung wird eine Bodengruppe angenommen.

2.4.1.1 Festlegen der Bodengruppen in den bestimmten Zonen

- Zone E1 → Bodengruppe G1
- Zone E2 → Bodengruppe G1
- Zone E3 → Bodengruppe G1
- Zone E4 → Bodengruppe G1
- Verdichtung → $D_{PR} = 90\%$

aus der Bodengruppe G1 ergeben sich nach Tabelle 1:

- die Wichte des Bodens: $\gamma_B := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
- der innerer Reibungswinkel: $\psi' = 35^\circ$
- der Reduktionsfaktor: $f_1 = 1$
(für das Kriechen)

Tabelle 1: Bodengruppen mit spezifischen Kennwerten nach [ATV-A 127]

Gruppe	Wichte	Wichte unter Auftrieb	Innerer Reibungswinkel	Verformungsmodul E_B in N/mm^2 bei Verdichtungsgrad D_{Pr} in %						Exponent in Gl. (3.02)	Reduktionsfaktor für das Kriechen
				85	90	92	95	97	100		
	γ_B	γ_B'	ϕ'							z	f_1
	kN/m^3	kN/m^3	$^\circ$	85	90	92	95	97	100	-	-
G1	20	11	35	2 ²⁾	6	9	16	23	40	0,4	1,0
G2	20	11	30	1,2	3	4	8	11	20	0,5	1,0
G3	20	10	25	0,8	2	3	5	8	13	0,6	0,8
G4	20	10	20	0,6	1,5	2	4	6	10	0,7	0,5

2.4.1.2 Bestimmung des Rohrdurchmessers und der Werkstoffkennwerte

- mittlerer Durchmesser: $d_m = 500 \text{ mm}$
- Wandstärke: $s = 10 \text{ mm}$
- Form: Rundrohr
- Material: Stahl aus S 235JR

Durch die Materialauswahl ergeben sich folgende Widerstandsgrößen.

→ Wichte: $\gamma_{\text{R}} = 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

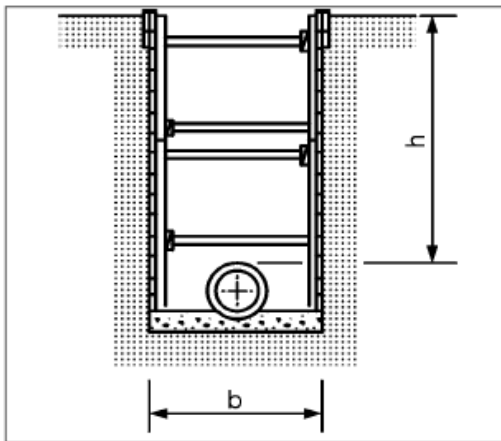
→ E-Modul: $E_{\text{RL}} = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

→ Biegezugfestigkeit: $\sigma_{\text{RL}} = 336 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

→ Sicherheitsfaktoren: $\text{erf}_{\gamma_{\text{Bruch}}} = 1.5$ (gegen Bruch)
 $\text{erf}_{\gamma_{\text{inst}}} = 2.5$ (gegen Instabilität)

2.4.1.3 Bestimmung der Einbaubedingungen

In diesem Kapitel wird die Grabengeometrie festgelegt. Das heißt, es müssen die Grabenhöhe, die Grabenbreite und der Grabenwinkel bestimmt werden.



- Grabenhöhe: $h = 3.0 \text{ m}$
- Grabenbreite: $b = 1.6 \text{ m}$

Bild 2: Graben mit Verbauplatten
[ATV-A 127]

Aufgrund der angenommenen Überschüttungsbedingung A2 ergeben sich nach Tabelle 2:

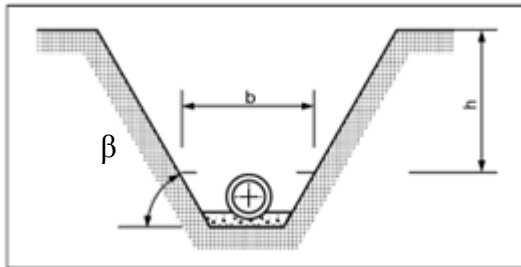
→ Erddruckverhältnis: $K_1 = 0.5$

→ Wandreibungswinkel: $\delta = 1/3 \varphi'$ (2.01)

Tabelle 2: Faktoren für die Erdlastberechnung

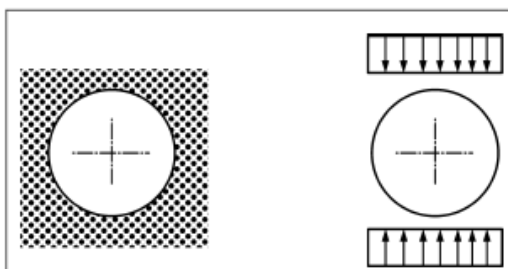
Überschüttungs- bedingung	K_1	δ
A1	0,5	$\frac{2}{3} \varphi'$
A2	0,5	$\frac{1}{3} \varphi'$
A3	0,5	0
A4	0,5	φ'

Im Bild 3 wird eine mögliche Grabenform mit den Punkten, zur Bestimmung der Höhe und Breite, dargestellt.



- Grabenwinkel: $\beta = 90^\circ$

Bild 3: Graben mit geböschten Wänden
[ATV-A 127]



- Auflagerwinkel: $2\alpha = 180^\circ$
- Lagerungsfall: $LF = 3$

Bild 4: Darstellung des Lagerungsfalls 3
[ATV-A 127]

2.4.2 Bestimmung der Rechenwerte für die Verformungsmoduln

Gewachsene Böden haben in der Regel Verdichtungsgrade von $D_{Pr} = 90\% - 97\%$. Die zugehörigen Werte E_3 können Tabelle 1 entnommen werden. Bei Einbau des ausgehobenen Bodens in der Leitungszone entsprechend DIN EN 1610 soll $E_3 = E_{20}$ angesetzt werden. Wenn der ausgehobene Boden nur als Überschüttung eingebaut wird, soll $E_3 = E_1$ angesetzt werden, sofern nicht im Einzelfall ein höherer Verdichtungsgrad für E_3 nachgewiesen wird. In der Regel kann bei Verlegung im Damm $E_1 = E_{20} = E_3$ gesetzt werden. Bei Böden (Lockergestein) wird $E_4 = 10 \times E_1$ angenommen, sofern im Einzelfall keine genaueren Angaben vorliegen. Bei Gründung auf Fels (Festgestein) kann E_4 wesentlich größer sein.

Tabelle 1: Bodengruppen mit spezifischen Kennwerten nach [ATV-A 127]

Gruppe	Wichte	Wichte unter Auftrieb	Innerer Reibungswinkel	Verformungsmodul E_B in N/mm^2 bei Verdichtungsgrad D_{Pr} in %						Exponent in Gl. (3.02)	Reduktionsfaktor für das Kriechen
	γ_B	γ_B'		φ'	85	90	92	95	97		
	kN/m^3	kN/m^3	$^\circ$							-	-
G1	20	11	35	2 ²⁾	6	9	16	23	40	0,4	1,0
G2	20	11	30	1,2	3	4	8	11	20	0,5	1,0
G3	20	10	25	0,8	2	3	5	8	13	0,6	0,8
G4	20	10	20	0,6	1,5	2	4	6	10	0,7	0,5

Somit ergeben sich aus Tabelle 1 mit G1 und $D_{PR} = 90\%$ folgende Werte für die Verformungsmoduln:

$$\rightarrow \quad \underline{E_B = E_3 = E_1 = E_{20} = 6 \frac{N}{mm^2}} \quad (2.02)$$

$$\rightarrow \quad E_4 = E_1 \cdot 10 \quad \underline{E_4 = 60 \frac{N}{mm^2}} \quad (2.03)$$

2.4.3 Berechnung der Belastungen

2.4.3.1 Berechnung der Erdlast

$$\kappa := \frac{1 - e^{-\frac{2 \cdot h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan(\delta)}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan(\delta)} \quad \rightarrow \quad \underline{\kappa = 0.829} \quad (2.04)$$

$$p_E := \kappa \cdot \gamma_B \cdot h \quad \rightarrow \quad \underline{p_E = 49.75 \frac{kN}{m^2}} \quad (2.05)$$

2.4.3.2 Bestimmen der Verkehrslast

Für die Berechnung wurde hier die Verkehrslast des Regelfahrzeuges SLW 60 gewählt. Je nachdem wo die Rohrleitung verlegt wird, muss man bestimmte Verkehrslasten mit einbeziehen, wie z.B. Eisenbahnverkehrslasten oder Flugzeugverkehrslasten unter Flughäfen.

Regelfahrzeug SLW 60:

- Gesamtmasse → 600 kN

Hilfslasten und Hilfsradien:

- $F_A = 100 \text{ kN}$
- $F_E = 500 \text{ kN}$
- $r_A = 0.25 \text{ m}$
- $r_E = 1.82 \text{ m}$

2.4.3.3 Berechnung der Bodenspannung infolge Verkehrslasten

$$p_F := \frac{F_A}{r_A^2 \cdot \pi} \cdot \left[1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r_A}{h} \right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right] + 3 \cdot \frac{F_E}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{r_E}{h} \right)^2} \right]^{\frac{5}{2}} \quad (2.06)$$

$$p_F = 17.377 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$a_F := 1 - \frac{0.9}{0.9 + \frac{4 \cdot \left(\frac{h}{m}\right)^2 + \left(\frac{h}{m}\right)^6}{1.1 \cdot \left(\frac{d_m}{m}\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (2.07)$$

$$\underline{a_F = 0.99919}$$

$$p := a_F \cdot p_F \quad \rightarrow \quad \underline{p = 17.363 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \quad (2.08)$$

Anhand des Stoßbeiwertes φ der Tabelle 3 erhöht sich die Bodenspannung p_v wie folgt:

Tabelle 3: Stoßbeiwerte

Regelfahrzeug	φ
SLW 60	1,2
SLW 30	1,4
LKW 12	1,5

$$\rightarrow p_v := \psi \cdot p \quad (2.09)$$

$$\rightarrow \underline{p_v = 20.836 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}$$

2.4.4 Lastaufteilung

2.4.4.1 Einbettbedingung für die Rohrleitung

Für die Berechnung wurde in diesem Fall die Einbettbedingung B 2 gewählt. Aus der Einbettbedingung B 2 ergibt sich:

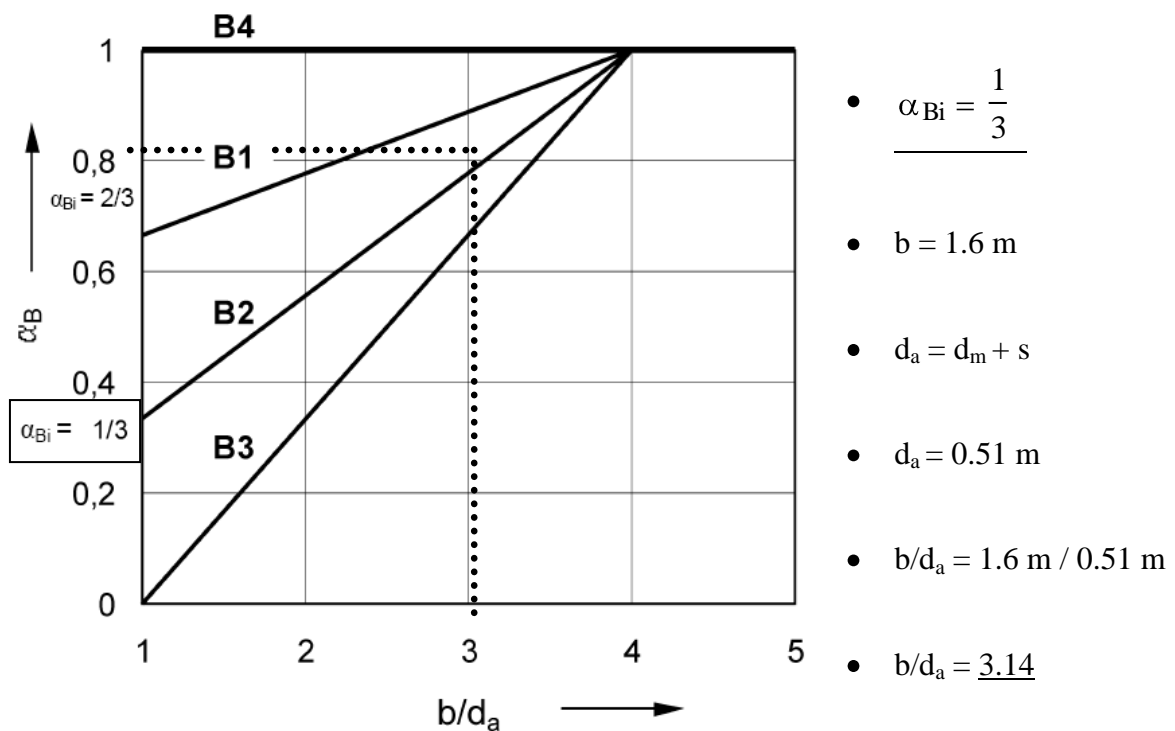


Bild 5: Diagramm zur Bestimmung des Abminderungsfaktor α_B für E_2 [ATV-A 127]

$$\alpha_B = 1 - \left(4 - \frac{b}{d_a}\right) \cdot \frac{1 - \alpha_{Bi}}{3} \leq 1 \quad (2.10)$$

$$\underline{\alpha_B = 0.808 \leq 1}$$

Berechnung zur Kontrolle des Ablesewertes aus Bild 5.

2.4.4.2 Berechnung des wirksamen Verformungsmoduls E_2

$$f_2 = 1.0 \quad (\text{kein Grundwasser}) \quad (2.11)$$

$$E_2 := f_1 \cdot f_2 \cdot \alpha_B \cdot E_{2c} \quad \rightarrow \quad \underline{E_2 = 4.85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.12)$$

2.4.4.3 Berechnung der Systemsteifigkeit V_{RB}

Je nach Zusammenwirken von Rohrsteifigkeit und Bodenverformung werden Rohre als biegeweich oder biegesteif bezeichnet.

Biegesteif sind Rohre, bei denen die Belastung keine wesentlichen Verformungen hervorruft und damit keine Auswirkung auf die Druckverteilung hat. ($V_{RB} > 1$)

Demzufolge werden Rohre als biegeweich eingestuft, deren Verformung die Belastung und Druckverteilung wesentlich beeinflusst, da der Boden Bestandteil des Tragsystems ist. ($V_{RB} \leq 1$)

$$V_{RB} := \frac{8 \cdot S_0}{S_{Bh}} \quad S_{Bh} := 0.6 \cdot \zeta \cdot E_2 \quad S_0 := \frac{E_{RL} \cdot I}{d_m^3}$$

$$\Delta f := \frac{\frac{b}{d_a} - 1}{0.982 + 0.283 \cdot \left(\frac{b}{d_a} - 1 \right)} \Delta f \leq 1.667 \quad (2.13)$$

$$\underline{\Delta f = 1.347}$$

$$\zeta := \frac{1.667}{\Delta f + \left| 1.667 - \Delta f \right| \cdot \frac{E_2}{E_3}} \quad \rightarrow \quad \underline{\zeta = 1.038} \quad (2.14)$$

Berechnen der horizontalen Bettungssteifigkeit:

$$S_{Bh} := 0.6 \cdot \zeta \cdot E_2 \quad \rightarrow \quad \underline{S_{Bh} = 3.021 \frac{N}{mm^2}} \quad (2.15)$$

Bei glattwandigen Rohren gilt:

$$S_R := \frac{E_{RL}}{12} \cdot \left(\frac{s}{r_m} \right)^3 = \frac{E_{RL} \cdot I}{r_m^3} \quad (2.16)$$

nach I umgestellt ergibt sich:

$$I := \frac{s^3}{12} \quad \rightarrow \quad \underline{I = 83.333 \frac{mm^4}{mm}} \quad (2.17)$$

Berechnen der Rohrsteifigkeit:

$$S_0 := \frac{E_{RL} \cdot I}{d_m^3} \quad \rightarrow \quad \underline{S_0 = 0.14 \frac{N}{mm^2}} \quad (2.18)$$

Somit ergibt die Systemsteifigkeit:

$$V_{RB} := \frac{8 \cdot S_0}{S_{Bh}} \quad \rightarrow \quad \underline{V_{RB} = 0.371} \quad (2.19)$$

Aus der Systemsteifigkeit V_{RB} und der Bodengruppe G1 ergibt sich der Faktor K_2 für das Erddruckverhältnis neben dem Rohr.

Tabelle 4: Beiwerte für das Erddruckverhältnis K_2

1	2	3
Boden	K_2	
Gruppe	$V_{RB} > 1$	$V_{RB} \leq 1$
G1	0,5	0,4
G2	0,5	0,3
G3	0,5	0,2
G4	0,5	0,1
Bettungsreaktionsdruck	$q_h^* = 0$	$q_h^* > 0$

$$V_{RB} \leq 1 \text{ und Bodengruppe G1} \quad \rightarrow \quad K_2 = 0.4$$

2.4.4.4 Bestimmen der relativen Ausladung a

Aufgrund der im Bild 6 dargestellten Lagerungsarten, ergibt sich für den Fall (1) eine relative Ausladung von $a = 1,0$.

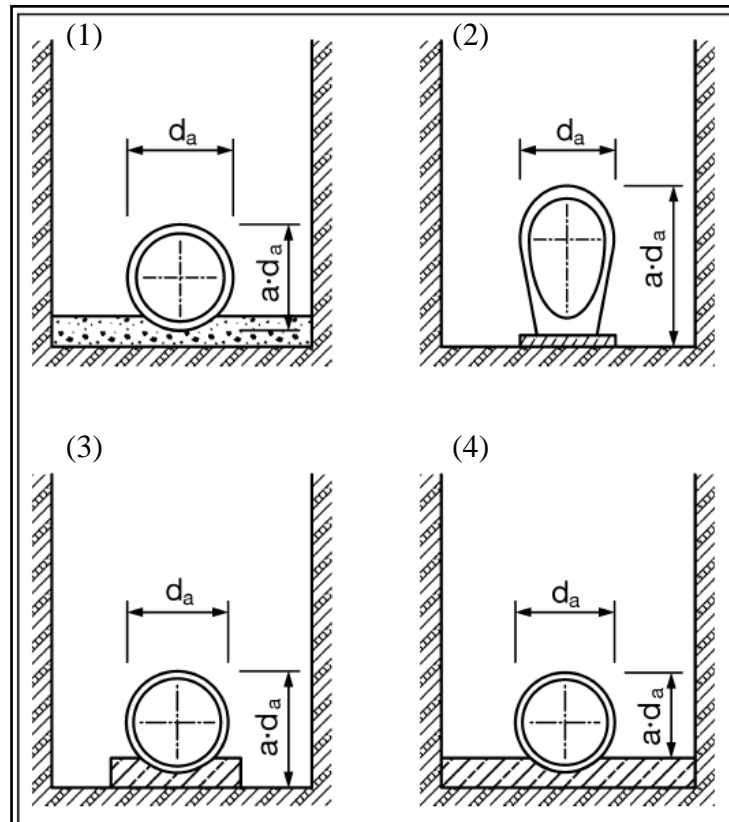


Bild 6: Lagerungsbedingung von gebetteten Rohren
[ATV-A 127]

Daraus kann die wirksame relative Ausladung a' berechnet werden.

$$a' := a \cdot \frac{E_1}{E_2} \quad (2.20)$$

$$\underline{a' = 1.237}$$

2.4.5 Umlagerung der Bodenspannungen mit Hilfe der Konzentrationsfaktoren λ

Infolge der unterschiedlichen Verformungsfähigkeiten des Rohres und des umgebenden Bodens lagern sich die nach Abschnitt 2.4.3.3 errechneten mittleren Bodenspannungen um. Das Maß dieser Umlagerung wird durch die Konzentrationsfaktoren λ_R für die Spannung über dem Rohr und λ_B für die Spannung im Boden neben dem Rohr angegeben.

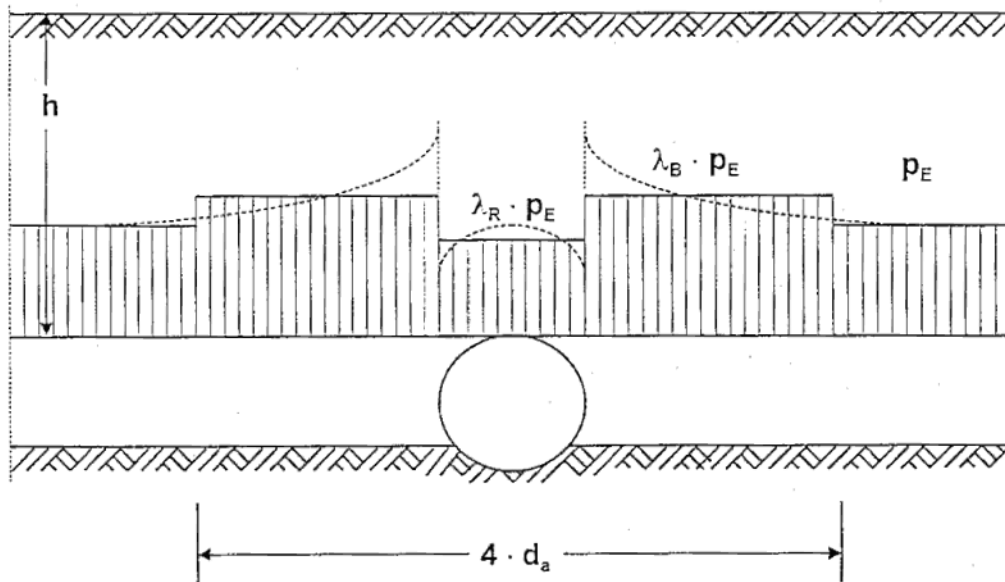


Bild 7: Schema der Spannungsumlagerung [ATV-A 127]

2.4.5.1 Berechnung von λ_{\max}

Der maximale Konzentrationsfaktor λ_{\max} wird wie folgt berechnet und muss in den Grenzen $1 \leq \lambda_{\max} \leq 4$ liegen:

$$\lambda_{\max} := 1 + \frac{\frac{h}{d_a}}{\frac{3.5}{a'} + \frac{2.2}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0.25)} + \left[\frac{0.62}{a'} + \frac{1.6}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0.25)} \right] \cdot \frac{h}{d_a}} \quad (2.21)$$

$$\underline{\lambda_{\max} = 1.846}$$

2.4.5.2 Berechnung von λ_R

Der Konzentrationsfaktor λ_R ist abhängig vom Größtwert λ_{\max} , vom Steifigkeitsverhältnis V_S sowie von der wirksamen relativen Ausladung a' und vom Erddruckverhältnis K_2 . Es müssen die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sein, um die Verformungsbeiwerte für die Biegemomente nutzen zu können.

1. Bedingung:

$$\frac{I}{A \cdot r_m^2} < 0.001 \quad \rightarrow \quad \frac{I}{A \cdot r_m^2} = \underline{0.000133} < 0.001 \quad (2.22)$$

Wobei mit A die Querschnittfläche von dem Rohrstreifen gemeint ist. Die Rohrstreifenbreite wird mit 1mm angenommen.

Somit ergibt sich für:

$$A = s \cdot 1 \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad \rightarrow \quad \underline{A = 10 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}} \quad (2.23)$$

2. Bedingung:

$$\frac{I}{A \cdot r_m^2} \cdot \kappa_Q < 0.001 \quad \rightarrow \quad \frac{I}{A \cdot r_m^2} \cdot \kappa_Q = \underline{0.00016} < 0.001 \quad (2.24)$$

Weil die Querschnittfläche A rechteckig ist, gilt für:

$$\kappa_Q = 1.2$$

Somit sind diese Bedingungen erfüllt und es gelten die Verformungsbeiwerte für die Biegemomente aus der folgenden Tabelle 5.

Tabelle 5: Verformungsbeiwerte [ATV-A 127]

Auflager- winkel	vertikal				horizontal			
	$c_{v,qv}$	$c_{v,qh}$	$c_{v,w}$	c_{v,qh^*}	$c_{h,qv}$	$c_{h,qh}$	$c_{h,w}$	c_{h,qh^*}
60°	-0,1053	+0,0833	-0,0637	+0,0640	+0,1026	-0,0833	+0,0611	-0,0658
90°	-0,0966		-0,0550		+0,0956		+0,0541	
120°	-0,0893		-0,0477		+0,0891		+0,0476	
180°	-0,0833		-0,0417		+0,0833		+0,0418	

Der Auflagerwinkel 2α beträgt 180° (der Asterisk (*) wurde durch einen doppel Prime (") ersetzt)

Aus Tabelle 5 kann man folgende Verformungsbeiwerte entnehmen.

Vertikal:

- $c_{v,qv} = -0.0833$
- $c_{v,qh} = 0.0833$
- $c_{v,qh}'' = 0.064$

Der Beiwert $C_{v,w}$ wird nicht benötigt, weil der Lastfall Wasserfüllung nicht berücksichtigt wird.

Horizontal:

- $c_{h,qv} = 0.0833$
- $c_{h,qh} = -0.0833$
- $c_{h,qh}'' = -0.0658$

Infolgedessen kann man den Reaktionsdruckbeiwert $K^* = K''$ berechnen.

$$K'' := \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh}''} \quad \rightarrow \quad \underline{K'' = 0.191} \quad (2.25)$$

Das Steifigkeitsverhältnis V_S unter Berücksichtigung des horizontalen Bettungsreaktionsdruckes wird wie folgt berechnet:

$$V_S := \frac{8 \cdot S_0}{|c_{v''}| \cdot S_{Bv}} \quad (2.26)$$

$$S_{Bv} := \frac{E_2}{a} \quad \rightarrow \quad \underline{S_{Bv} = 4.85 \frac{N}{mm^2}} \quad (2.27)$$

$$c_{v''} := c_{v,qv} + c_{v,qh}'' \cdot K'' \quad \rightarrow \quad \underline{c_{v''} = -0.071} \quad (2.28)$$

$$V_S := \frac{8 \cdot S_0}{|c_{v''}| \cdot S_{Bv}} \quad \rightarrow \quad \underline{V_S = 3.249} \quad (2.26)$$

Bei einem Auflagerwinkel von $2\alpha = 180^\circ$ wird der Verformungsbeiwert $K' = 1$ gesetzt, somit ist der Konzentrationsfaktor λ_R berechenbar.

$$\lambda_R := \frac{\lambda_{\max} \cdot V_S + a' \cdot \frac{4K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\lambda_{\max} - 1}{a' - 0.25}}{V_S + a' \cdot \frac{3 + K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\lambda_{\max} - 1}{a' - 0.25}} \quad \rightarrow \quad \underline{\lambda_R = 1.475} \quad (2.29)$$

2.4.5.3 Berechnung von λ_{RG}

Wird die folgende Bedingung erfüllt.

$$1 \leq b/d_a \leq 4 \quad \rightarrow \quad 1 \leq 3.14 \leq 4$$

So kann für den Konzentrationsfaktor λ_{RG} im Graben mit geringerer Breite folgende Annahme getroffen werden:

$$\lambda_{RG} := \frac{\lambda_R - 1}{3} \cdot \frac{b}{d_a} + \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad \rightarrow \quad \underline{\lambda_{RG} = 1.338} \quad (2.30)$$

Es muss überprüft werden, ob λ_{RG} in den Grenzen von

$$\lambda_{fu} \leq \lambda_{RG} \leq \lambda_{fo} \text{ liegt.}$$

Somit wird λ_{fu} wie folgt berechnet:

$$\lambda_{fu} := \frac{1 - e^{-2 \cdot \frac{h}{d_a} \cdot K_1 \cdot \tan(\delta_{fu})}}{2 \cdot \frac{h}{d_a} \cdot K_1 \cdot \tan(\delta_{fu})} \quad (2.31)$$

$$\underline{\lambda_{fu} = 0.239}$$

mit ($\delta_{fu} = 35^\circ =$ Reibungswinkel

$\psi' = 35^\circ$ aus Bodengruppe G1)

Für die angenommene Grabenhöhe gilt $h \leq 10$ m, somit kann die Gleichung (2.32) verwendet werden.

$$\lambda_{fo} = 4 - 0.15 \times h \quad \rightarrow \quad \underline{\lambda_{fo} = 3.55} \quad (2.32)$$

$$\lambda_{fu} \leq \lambda_{RG} \leq \lambda_{fo} \quad \rightarrow \quad 0.239 \leq \lambda_{RG} \leq 3.55$$

λ_{RG} befindet sich in den Grenzen von λ_{fu} und λ_{fo} , deshalb gilt für λ_B folgende Formel:

$$\lambda_B := \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad \rightarrow \quad \underline{\lambda_B = 0.842} \quad (2.33)$$

2.4.6 Druckverteilung am Rohrumfang

Die Druckverteilung am Rohrumfang ist abhängig von der Ausbildung des Auflagers, von der Verfüllung in der Leitungszone sowie vom Verformungsverhalten des Rohres. Die angegebenen vereinfachten Druckverteilungen sind typisch für die im Kanalbau üblichen Einbaubedingungen.

Wie Bild 7 zeigt, wird die Auflast unabhängig von der Art des Einbaus und für alle Rohrarten vertikal gerichtet und rechteckförmig angenommen.

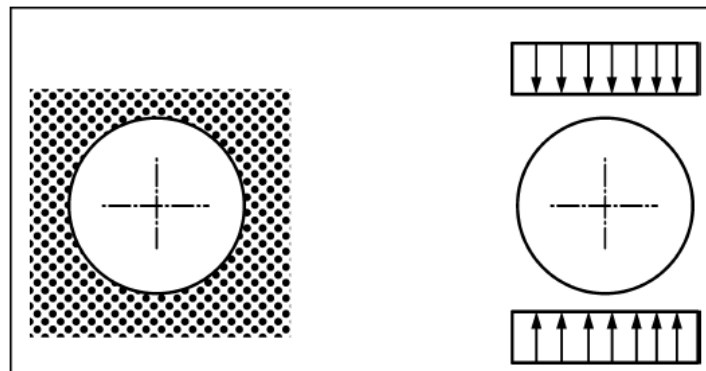


Bild 8: Lagerungsfall 3 [ATV-A 127]

2.4.6.1 Berechnung der vertikalen Gesamtlast

$$q_v := \lambda_{RG} \cdot p_E + p_v \quad \rightarrow \quad \underline{q_v = 87.408 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \quad (2.34)$$

2.4.6.2 Berechnung des Seitendruckes

Der Seitendruck auf die Rohrleitung setzt sich zusammen aus dem Anteil q_h infolge vertikaler Erdlast und gegebenenfalls dem Bettungsreaktionsdruck q_h^* infolge Rohrverformung. Bei kleinen Überdeckungshöhen im Verhältnis zum Rohrdurchmesser kann auch mit dem in der Tiefe zunehmenden (trapezförmigen) Seitendruck gerechnet werden.

Der aus der Rohrverformung resultierende Bettungsreaktionsdruck q_h^* wird in Form einer Parabel mit dem Öffnungswinkel 120° angesetzt (siehe Bild 9).

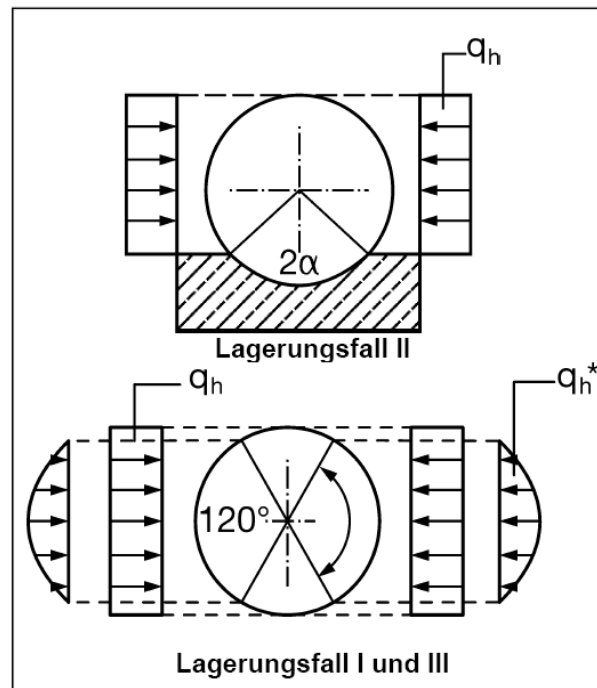


Bild 9: Darstellung des Seitendruckes in Abhängigkeit des Lagerungsfalles [ATV-A 127]

$$q_h := K_2 \cdot \left(\lambda_B \cdot p_E + \gamma_B \cdot \frac{d_a}{2} \right) \quad \rightarrow \quad \underline{q_h = 17.329 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \quad (2.35)$$

$$q_h'' := \frac{c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h}{V_{RB} - c_{h,qh''}} \quad \rightarrow \quad \underline{q_h'' = 12.011 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} \quad (2.36)$$

2.5 Berechnung der Schnittkräfte, Spannungen, Dehnungen und Verformungen

2.5.1 Ermittlung der Beiwerte m und n für die Schnittkraftberechnung

Die Momentenbeiwerte m und die Normalkraftbeiwerte n sind für die verschiedenen Lagerungsfälle in der folgenden Tabelle 6 angegeben. Die Beiwerte gelten nur für die Kreisform mit über den Umfang konstanter Wanddicke.

Tabelle 6: Momenten- und Normalkraftbeiwerte

Lagerungsfall/ 2α	Schnittstelle	Momentenbeiwerte					Normalkraftbeiwerte				
		m_{qv}	m_{qb}	m^*_{qb}	m_z m'_z	m_w m'_w	n_{qv}	n_{qb}	n^*_{qb}	n_z n'_z	n_w n'_w
I/60°	Scheitel	+0,286	-0,250	-0,181	+0,459 +0,073	+0,229 +0,073	+0,080	-1,000	-0,577	+0,417 +0,066	+0,708 +0,225
	Kämpfer	-0,293	+0,250	+0,208	-0,529 -0,084	-0,264 -0,084	-1,000	0	0	-1,571 -0,250	+0,215 +0,068
	Sohle	+0,377	-0,250	-0,181	+0,840 +0,134	+0,420 +0,134	-0,080	-1,000	-0,577	-0,417 -0,066	+1,292 +0,411
I/90°	Scheitel	+0,274	-0,250	-0,181	+0,419 +0,067	+0,210 +0,067	+0,053	-1,000	-0,577	+0,333 +0,053	+0,667 +0,212
	Kämpfer	-0,279	+0,250	+0,208	-0,485 -0,077	-0,243 -0,077	-1,000	0	0	-1,571 -0,250	+0,215 +0,068
	Sohle	+0,314	-0,250	-0,181	+0,642 +0,102	+0,321 +0,102	-0,053	-1,000	-0,577	-0,333 -0,053	+1,333 +0,424
I/120°	Scheitel	+0,261	-0,250	-0,181	+0,381 +0,061	+0,190 +0,061	+0,027	-1,000	-0,577	+0,250 +0,040	+0,625 +0,199
	Kämpfer	-0,265	+0,250	+0,208	-0,440 -0,070	-0,220 -0,070	-1,000	0	0	-1,571 -0,250	+0,215 +0,068
	Sohle	+0,275	-0,250	-0,181	+0,520 +0,083	+0,260 +0,083	-0,027	-1,000	-0,577	-0,250 -0,040	+1,375 +0,438
III/180°	Scheitel	+0,250	-0,250	-0,181	+0,345 +0,055	+0,172 +0,055	0	-1,000	-0,577	+0,167 +0,027	+0,583 +0,186
	Kämpfer	-0,250	+0,250	+0,208	-0,393 -0,063	-0,196 -0,063	-1,000	0	0	-1,571 -0,250	+0,215 +0,068
	Sohle	+0,250	-0,250	-0,181	+0,441 +0,070	+0,220 +0,070	0	-1,000	-0,577	-0,167 -0,027	+1,417 +0,451

Vorzeichen: Moment + Zug auf Rohriinnenseite Normalkraft + Zug
 - Zug auf Rohraußenseite - Druck

Lagerungsfall 3; Auflagerwinkel 180° (der Asterisk (*) wurde durch einen doppel Prime (") ersetzt)

2.5.1.1 Beiwerte für den Scheitel

Momentenbeiwerte:

$$m_{qvs} = 0.25$$

$$m_{qhs} = -0.25$$

$$m''_{qhs} = -0.181$$

$$m_{gs} = 0.345$$

Normalkraftbeiwerte:

$$n_{qvs} = 0$$

$$n_{qhs} = -1$$

$$n''_{qhs} = -0.577$$

$$n_{gs} = 0.167$$

2.5.1.2 Beiwerte für den Kämpfer

Momentenbeiwerte:

$$m_{qvk} = -0.25$$

$$m_{qhk} = 0.25$$

$$m''_{qhk} = 0.208$$

$$m_{gk} = -0.393$$

Normalkraftbeiwerte:

$$n_{qvk} = -1$$

$$n_{qhk} = 0$$

$$n''_{qhk} = 0$$

$$n_{gk} = -1.571$$

2.5.1.3 Beiwerte für die Sohle

Momentenbeiwerte:

$$m_{qvso} = 0.25$$

$$m_{qhso} = -0.25$$

$$m''_{qhso} = -0.181$$

$$m_{gso} = 0.441$$

Normalkraftbeiwerte:

$$n_{qvso} = 0$$

$$n_{qhso} = -1$$

$$n''_{qhso} = -0.577$$

$$n_{gso} = -0.167$$

2.5.2 Berechnung der Schnittkräfte

2.5.2.1 Berechnung der Schnittkräfte am Scheitel

- vertikale Belastung:

$$M_{qvs} := m_{qvs} \cdot q_v \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{qvs} = 1.366 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.37)$$

$$N_{qvs} := n_{qvs} \cdot q_v \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{qvs} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.38)$$

- horizontale Belastung: (Seitendruck)

$$M_{qhs} := m_{qhs} \cdot q_h \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{qhs} = -0.294 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.39)$$

$$N_{qhs} := n_{qhs} \cdot q_h \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{qhs} = -4.698 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.40)$$

- horizontaler Bettungsreaktionsdruck infolge von Erdlasten:

$$M'_{qhs} := m''_{qhs} \cdot q_h \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M'_{qhs} = -0.148 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.41)$$

$$N''_{qhs} := n''_{qhs} \cdot q_h \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N''_{qhs} = -1.889 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.42)$$

- Belastung durch das Eigengewicht:

$$M_{gs} := m_{gs} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{gs} = 0.017 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.43)$$

$$N_{gs} := n_{gs} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{gs} = 0.032 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.44)$$

- Gesamtsummen von M und N:

$$\Sigma M_s := M_{qvs} + M_{qhs} + M'_{qhs} + M_{gs} \quad \rightarrow \quad \underline{\Sigma M_s = 0.941 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.45)$$

$$\Sigma N_s := N_{qvs} + N_{qhs} + N''_{qhs} + N_{gs} \quad \rightarrow \quad \underline{\Sigma N_s = -6.554 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.46)$$

2.5.2.2 Berechnung der Schnittkräfte am Kämpfer

- vertikale Belastung:

$$M_{qv_k} := m_{qv_k} \cdot q_v \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad M_{qv_k} = -1.366 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad (2.47)$$

$$N_{qv_k} := n_{qv_k} \cdot q_v \cdot r_m \quad \rightarrow \quad N_{qv_k} = -21.852 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.48)$$

- horizontale Belastung: (Seitendruck)

$$M_{qh_k} := m_{qh_k} \cdot q_h \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad M_{qh_k} = 0.294 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad (2.49)$$

$$N_{qh_k} := n_{qh_k} \cdot q_h \cdot r_m \quad \rightarrow \quad N_{qh_k} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.50)$$

- horizontaler Bettungsreaktionsdruck infolge von Erdlasten:

$$M''_{qh_k} := m''_{qh_k} \cdot q_h \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad M''_{qh_k} = 0.17 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad (2.51)$$

$$N''_{qh_k} := n''_{qh_k} \cdot q_h \cdot r_m \quad \rightarrow \quad N''_{qh_k} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.52)$$

- Belastung durch das Eigengewicht:

$$M_{gk} := m_{gk} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad M_{gk} = -0.019 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad (2.53)$$

$$N_{gk} := n_{gk} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad \rightarrow \quad N_{gk} = -0.302 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.54)$$

- Gesamtsummen von M und N:

$$\Sigma M_k := M_{qv_k} + M_{qh_k} + M''_{qh_k} + M_{gk} \quad \rightarrow \quad \Sigma M_k = -0.921 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad (2.55)$$

$$\Sigma N_k := N_{qv_k} + N_{qh_k} + N''_{qh_k} + N_{gk} \quad \rightarrow \quad \Sigma N_k = -22.154 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.56)$$

2.5.2.3 Berechnung der Schnittkräfte an der Sohle

- vertikale Belastung:

$$M_{qvso} := m_{qvso} \cdot q_v \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{qvso} = 1.366 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.57)$$

$$N_{qvso} := n_{qvso} \cdot q_v \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{qvso} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.58)$$

- horizontale Belastung: (Seitendruck)

$$M_{qhso} := m_{qhso} \cdot q_h \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{qhso} = -0.294 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.59)$$

$$N_{qhso} := n_{qhso} \cdot q_h \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{qhso} = -4.698 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.60)$$

- horizontaler Bettungsreaktionsdruck infolge von Erdlasten:

$$M''_{qhso} := m''_{qhso} \cdot q_h'' \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M''_{qhso} = -0.148 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.61)$$

$$N''_{qhso} := n''_{qhso} \cdot q_h'' \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N''_{qhso} = -1.889 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.62)$$

- Belastung durch das Eigengewicht:

$$M_{gso} := m_{gso} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad \rightarrow \quad \underline{M_{gso} = 0.021 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.63)$$

$$N_{gso} := n_{gso} \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad \rightarrow \quad \underline{N_{gso} = -0.032 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.64)$$

- Gesamtsummen von M und N:

$$\Sigma M_{so} := M_{qvso} + M_{qhso} + M''_{qhso} + M_{gso} \quad \rightarrow \quad \underline{\Sigma M_{so} = 0.945 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}} \quad (2.65)$$

$$\Sigma N_{so} := N_{qvso} + N_{qhso} + N''_{qhso} + N_{gso} \quad \rightarrow \quad \underline{\Sigma N_{so} = -6.619 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} \quad (2.66)$$

2.5.3 Berechnung der Spannungen aus den ermittelten Schnittkräften

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \alpha_k$$

$$W := \frac{s^2}{6} \quad \rightarrow \quad \underline{W = 16.667 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}} \quad (2.67)$$

2.5.3.1 Berechnung der Korrekturfaktoren α_k

Die Korrekturfaktoren α_{ka} und α_{ki} dienen der Berücksichtigung der Krümmung der äußeren bzw. inneren Randfaser.

$$\alpha_{ki} := 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{r_m} \quad \text{oder} \quad \frac{3 \cdot d_i + 5s}{3 \cdot d_i + 3s} \quad \rightarrow \quad \underline{\alpha_{ki} = 1.0133} \quad (2.68)$$

$$\alpha_{ka} := 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{r_m} \quad \text{oder} \quad \frac{3 \cdot d_i + s}{3 \cdot d_i + 3s} \quad \rightarrow \quad \underline{\alpha_{ka} = 0.9867} \quad (2.69)$$

2.5.3.2 Berechnung der Spannungen am Scheitel

$$\sigma_{\text{Scheitel}}^i := \frac{\Sigma N_s}{A} + \frac{\Sigma M_s}{W} \cdot \alpha_{ki} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Scheitel}}^i = 56.53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.70)$$

$$\sigma_{\text{Scheitel}}^a := \frac{\Sigma N_s}{A} - \frac{\Sigma M_s}{W} \cdot \alpha_{ka} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Scheitel}}^a = -56.34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.71)$$

2.5.3.3 Berechnung der Spannungen am Kämpfer

$$\sigma_{\text{Kämpfer}}^i := \frac{\Sigma N_k}{A} + \frac{\Sigma M_k}{W} \cdot \alpha_{ki} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Kämpfer}}^i = -58.202 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.72)$$

$$\sigma_{\text{Kämpfer}}^a := \frac{\Sigma N_k}{A} - \frac{\Sigma M_k}{W} \cdot \alpha_{ka} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Kämpfer}}^a = 52.297 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.73)$$

2.5.3.4 Berechnung der Spannungen an der Sohle

$$\sigma_{\text{Sohle}}^i := \frac{\Sigma N_{so}}{A} + \frac{\Sigma M_{so}}{W} \cdot \alpha_{ki} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Sohle}}^i = 56.808 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.74)$$

$$\sigma_{\text{Sohle}}^a := \frac{\Sigma N_{so}}{A} - \frac{\Sigma M_{so}}{W} \cdot \alpha_{ka} \quad \rightarrow \quad \underline{\sigma_{\text{Sohle}}^a = -56.62 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad (2.75)$$

2.5.4 Berechnung der Dehnung aus den ermittelten Spannungen

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{s}{2r_m^3 \cdot 8S_0} \cdot \left(\frac{s \cdot N}{6} \pm M \cdot \alpha_k \right)$$

2.5.4.1 Berechnung der Dehnung am Scheitel

$$\varepsilon_{\text{Scheitel}} := \frac{|\sigma_{\text{Scheitel}}|}{E_{\text{RL}}} \quad \rightarrow \quad \underline{\varepsilon_{\text{Scheitel}} = 0.027 \%} \quad (2.76)$$

2.5.4.2 Berechnung der Dehnung am Kämpfer

$$\varepsilon_{\text{Kämpfer}} := \frac{|\sigma_{\text{Kämpfer}}|}{E_{\text{RL}}} \quad \rightarrow \quad \underline{\varepsilon_{\text{Kämpfer}} = 0.028 \%} \quad (2.77)$$

2.5.4.3 Berechnung der Dehnung an der Sohle

$$\varepsilon_{\text{Sohle}} := \frac{|\sigma_{\text{Sohle}}|}{E_{\text{RL}}} \quad \rightarrow \quad \underline{\varepsilon_{\text{Sohle}} = 0.027 \%} \quad (2.78)$$

2.5.5 Berechnung der Verformungen

2.5.5.1 Vertikale Rohrverformung

Entsprechend der Druckverteilung am Rohrumfang nach Lagerungsfall I oder III kann die vertikale Durchmesseränderung Δdv infolge äußerer Lasten nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\Delta dv := \frac{2 \cdot r_m}{8 \cdot S_0} \cdot \left(c_{v,qv} \cdot q_v + c_{v,qh} \cdot q_h + c_{v,qh''} \cdot q_h'' \right) \quad (2.79)$$

$$\underline{\Delta dv = -2.18 \text{ mm}}$$

2.5.5.2 Horizontale Rohrverformung

Analog der Gleichung für die vertikale Verformung (2.79) gilt für die horizontale Durchmesseränderung folgende Gleichung:

$$\Delta dh := \frac{2 \cdot r_m}{8 \cdot S_0} \cdot \left(c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h + c_{h,qh''} \cdot q_h'' \right) \quad (2.80)$$

$$\underline{\Delta dh = 2.17 \text{ mm}}$$

2.6 Bemessung in Form der maßgebenden Nachweise

2.6.1 Spannungs- und Dehnungsnachweis

Wenn $\text{vorh}_\gamma \geq \text{erf}_\gamma = 1.5$ ist, so gilt der Nachweis als erfüllt.

$$\boxed{\gamma = \frac{\sigma_R}{\sigma} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon}}$$

2.6.1.1 Spannungs- und Dehnungsnachweis am Scheitel

$$\gamma_{\text{Scheitel}} := \frac{\sigma_{\text{RL}}}{|\sigma_{\text{Scheitel}}|} \quad \rightarrow \quad \underline{\gamma_{\text{Scheitel}} = 5.944} \geq 1.5 \quad (2.81)$$

2.6.1.2 Spannungs- und Dehnungsnachweis am Kämpfer

$$\gamma_{\text{Kämpfer}} := \frac{\sigma_{\text{RL}}}{|\sigma_{\text{Kämpfer}}|} \quad \rightarrow \quad \underline{\gamma_{\text{Kämpfer}} = 5.774} \geq 1.5 \quad (2.82)$$

2.6.1.3 Spannungs- und Dehnungsnachweis an der Sohle

$$\gamma_{\text{Sohle}} := \frac{\sigma_{\text{RL}}}{|\sigma_{\text{Sohle}}|} \quad \rightarrow \quad \underline{\gamma_{\text{Sohle}} = 5.916} \geq 1.5 \quad (2.83)$$

2.6.2 Nachweis der Verformung

Für biegeweiche Rohre ist der Verformungsnachweis zu führen. Dabei wird die vertikale Durchmesseränderung mit dem zulässigen Wert $\delta_{v, zul}$ verglichen. Der zulässige Wert ist abhängig von der Lage der Rohrleitung. So darf z.B. $\delta_{v, zul}$ unter den Gleisen der Deutschen Bahn AG nur 2 % betragen, sowie die maximale Verformung nur 10 mm. In der Regel gilt für Rohrleitungen unter Straßen eine maximale Formänderung von 6 %. Wenn diese jedoch in begründeten Einzelfällen überschritten werden, ist der Nachweis zu führen, dass $\gamma \geq 5 \times \text{erf } \gamma$ ist. Sollte dies ebenfalls nicht der Fall sein, muss ein nichtlinearer Nachweis geführt werden, wobei die maximale Formänderung 9 % betragen darf.

$$\delta_{v..zul} := 6\%$$

$$\delta_{v..vorh} := \frac{|\Delta dv|}{2 \cdot r_m} \quad \rightarrow \quad \underline{\delta_{v..vorh} = 0.44 \%} \quad (2.84)$$

$$\text{Auslastung} := \frac{\delta_{v..vorh}}{\delta_{v..zul}} \quad \rightarrow \quad \underline{\text{Auslastung} = 7.3 \%} \quad (2.85)$$

2.6.3 Stabilitätsnachweis gegen Beulen

Die folgenden Beziehungen gelten unter der Bedingung konstanter radialer Bettung. Eine tangentielle Bettung wird vernachlässigt.

Zunächst ist die kritische Beullast q_v mit dem Abminderungsfaktor K_{v2} wie folgt zu ermitteln. Der Abminderungsfaktor soll die elastisch-plastischen Stoffgesetze des Bodens und eventuelle Vorverformungen berücksichtigen.

Die kritische Beullast ist abhängig von der Systemsteifigkeit V_{RB} nach Gleichung (2.19).

$$\kappa_{v2} := x + 0.36 \cdot (\log(V_{RB}) + 4) \leq 0.9 \quad (2.86)$$

(mit $x = 0.52$ für $\psi' = 35^\circ$ aus Bodengruppe G1)

$$\kappa_{v2} = 1.84 > 0.9 \quad \rightarrow \quad \underline{\kappa_{v2} = 0.9}$$

Ist V_{RB} nach Gleichung (2.19) ≤ 0.1 , so wird die kritische Beullast wie folgt berechnet:

$$\text{krit_}q_v := 2 \cdot \kappa_{v2} \cdot \sqrt{8 \cdot S_0 \cdot S_{Bh}} \quad \text{für } V_{RB} \leq 0.1 \quad (2.87)$$

Andernfalls wird die kritische Beullast dann nach Gleichung (2.88) ermittelt:

$$\text{krit_}q_v := \kappa_{v2} \cdot \left(3 + \frac{1}{3 \cdot V_{RB}} \right) \cdot 8 \cdot S_0 \quad \text{für } V_{RB} > 0.1 \quad (2.88)$$

$$\rightarrow \quad \underline{\text{krit_}q_v = 3.93 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$$

Der Nachweis gegen Beulen gilt als erfüllt, wenn $\text{vorh_}\gamma \geq \text{erf_}\gamma = 2.5$ ist.

$$\gamma_{\text{Beul}} := \frac{\text{krit_}q_v}{q_v} \quad \rightarrow \quad \underline{\gamma_{\text{Beul}} = 44.965 \geq 2.5} \quad (2.89)$$

3 Berechnung mit Hilfe von Stabwerksprogrammen

In Kapitel 3 werden die Vorgehensweisen dargestellt, um eine elastische Bettung von erdverlegten Rohrleitungen zu simulieren. Die Kennwerte und Kenngrößen, wie z.B. die Belastung, das Bettungsmodul und so weiter, werden hierbei aus der Berechnung nach der ATV-A 127 aus Kapitel 2 entnommen. Somit kann die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse garantiert werden.

3.1 Erzeugen des Grundkörpers und Einstellen der Berechnungsparameter

3.1.1 Einstellen der Berechnungsparameter

In den Simulationsprogrammen sind die Einheiten für die Ergebnisberechnung in der Regel auf Kilonewton (kN) und Meter (m) voreingestellt. Diese Einheiten sollte man entweder auf Newton (N) und Millimeter (mm) umstellen oder die Anzahl der Nachkommastellen der Berechnungsgrößen erhöhen. In dieser Diplomarbeit (DA) werden Ergebnisse mit vier Nachkommastellen geführt, wenn mit Kilonewton (kN) und Meter (m) gerechnet wird. Dies verhindert, dass eventuell fehlerhafte Berechnungsergebnisse ausgegeben werden. Grund dafür ist, dass die maßgebende Spannung durch die Momente mitbestimmt wird. Sind die Momente auf kN/m eingestellt, rundet das Programm die Ergebnisse auf und man erhält einen zu hohen Spannungswert. Deshalb sollte man vor Beginn der Simulationsaufgabe die Parameter sorgfältig prüfen und gegebenenfalls, wie beschrieben, modifizieren.

3.1.2 Erzeugen des Grundkörpers

Fast alle Stabwerksprogramme verfügen über ein sogenanntes "Raster", welches man auf der Arbeitsebene ein- oder ausblenden kann. Bei manchen Programmen ist die Wahl des Rastertyps möglich ("Kartesisch" oder "Polar"). Für die Erzeugung des Grundkörpers in dieser DA ist es von Vorteil, mit dem polaren Koordinatensystem zu arbeiten. In der Regel kann man ebenfalls die Rasterabstände einstellen.

Der Grundkörper ist üblicherweise komfortabel und schnell zu erzeugen. Die meisten Programme bieten eine Strukturgenerierung an, in der Strukturgeometrien graphisch gestützt erstellt werden können (siehe Bild 10).

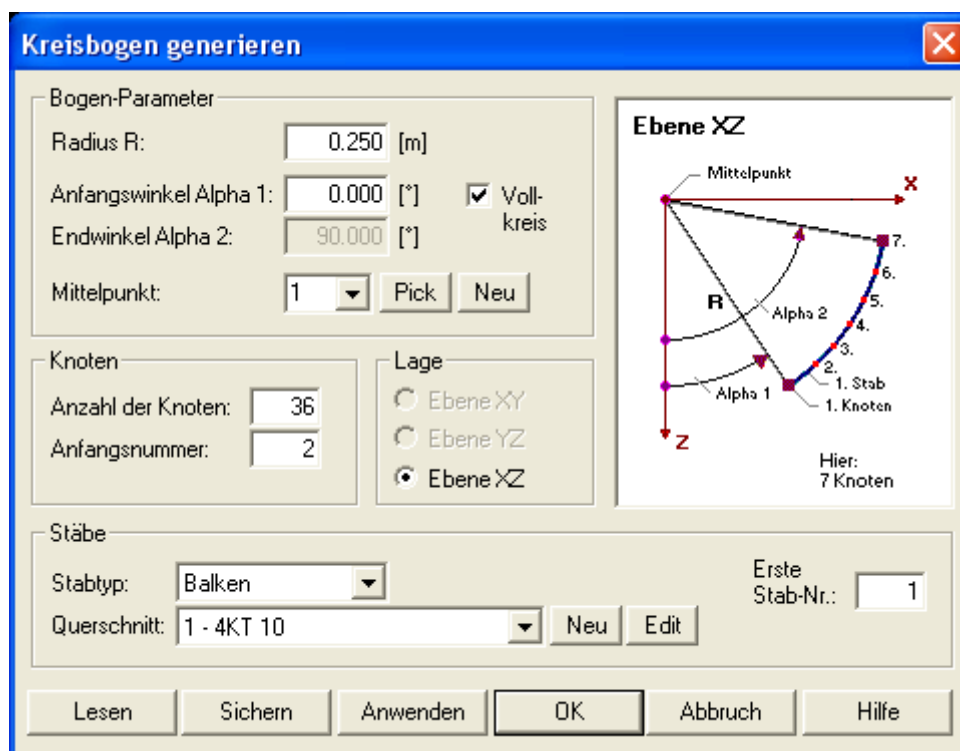


Bild 10: Fenster zur Generierung eines Kreisbogens [RSTAB]

Es wird empfohlen, mit dem Setzen eines Mittelpunktknottens zu beginnen, da man diesen eventuell für bestimmte Messungen (z.B. Winkelmessungen) benötigt. Des Weiteren ist es vorteilhaft, den Mittelpunkt des Rohres auf den Koordinaten-Nullpunkt zu setzen, das wird später bei der Eingabe der Belastung Vorteile bringen.

In der ATV-A 127 wird darauf hingewiesen, dass der Winkel zwischen den Knotenpunkten $\leq 10^\circ$ sein sollte. Während der Untersuchungen wurde dabei festgestellt, dass die 10° -Teilung für Rohre mit einem Durchmesser ≤ 1 m die günstigste und von der Genauigkeit vollkommen ausreichend ist. Die Unterschiede befinden sich im ersten Nachkommabereich bei N/mm². Wenn allerdings Rohre mit sehr großen Durchmessern berechnet werden müssen, sind die kleineren Winkelteilungen besser. Die Anzahl der Knoten auf dem Rohrumfang kann man wie folgt berechnen:

$$X_{\text{Knoten}} := \frac{360^\circ}{10^\circ} \quad (3.01)$$

Somit ergibt die Anzahl der Knoten nach Gleichung (3.01) für eine 10° -Winkelteilung:

$$\underline{X_{\text{Knoten}} = 36}$$

Die Anzahl der Knoten, in diesem Falle 36, sollte immer ein Vielfaches von vier sein. Dadurch liegt immer ein Knoten auf dem Hauptachsensystem, wie später im Bild 12 zu sehen ist. Das hat den Vorteil, dass die Verformung infolge der Verschiebung dieser vier Knoten genau bestimmt wird und keine Interpolation des Programmes vorliegt. Daraus ergeben sich die möglichen Winkel von 10° ; 5° und 2.5° .

Für die einzelnen Stäbe, die den Rohrring ergeben, sollte im Programm der Stabtyp "Balken" ausgewählt werden. Der Querschnitt des Balkens ist abhängig von der Wandstärke des Rohres, die simuliert werden soll. Für diese Simulation eignen sich besonders Walzprofilarten nach DIN 1017. Viele Programme haben eine Materialbibliothek integriert, in der verschiedene Material- (S235 bzw. S355) und Profilarten zur Auswahl stehen. Die eventuell vorhandenen Stabstahl-Walzprofile, z.B. der Flachstahl oder die Vierkant-Profile, eignen sich gut für die Simulation.

Dabei stellt die Materialdicke des Flachstahles die Wandstärke s des Rohres dar. Die Stabbreite ist hierbei von geringer Bedeutung. Man muss aber beachten, dass die Belastung einer Flächenlast auf die Stabbreite in eine Streckenlast umgerechnet werden muss. In der Theorie, wie auch in dieser DA, wird eine Wandstärken von $s = 10$ mm ausgewählt.

Das hat den Vorteil, dass man die Belastung einfacher umrechnen kann. Für die Wandstärke von $s = 10$ mm kann ein Profilquerschnitt des Balkentyps 4KT 10 aus der Programmbibliothek ausgewählt werden. In der Praxis können die realen Rohrwandstärken durch Fertigungstoleranzen variieren. Um diese möglichen Schwankungen zu berücksichtigen, können benutzerspezifische Querschnitte im Programm erzeugt werden. Dabei müssen, wie im Bild 11 zu sehen, Breite und Dicke durch den Benutzer eingegeben werden. Das Programm berechnet die Widerstandsgrößen des erstellten Rechteckprofils automatisch.

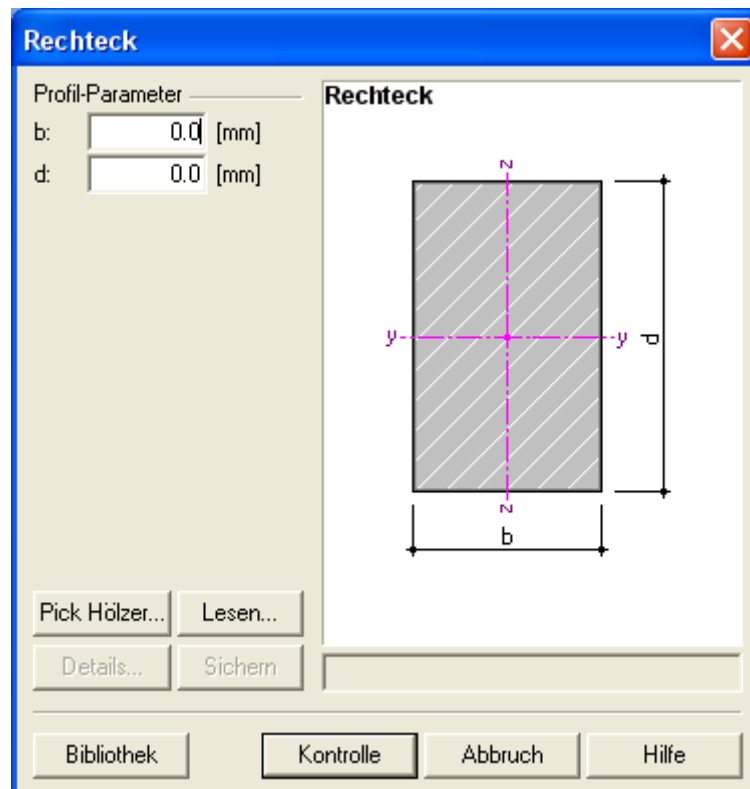


Bild 11: Fenster zum Erzeugen eines benutzerspezifischen Querschnittes [RSTAB]

Die Breite b im Bild 11 entspricht am Rohr der Streifenbreite und die Höhe d entspricht der Wandstärke s . Die Streifenbreite muss man selbst festlegen. Die Streifenbreite wird in dieser DA mit 10 mm festgelegt. Es ergibt sich also für die weitere Betrachtung ein Balken mit quadratischem Querschnitt von 10 x 10 mm.

Hat man die Generierung des Grundkörpers fertiggestellt, muss die Form des dargestellten Querschnittes wie im Bild 12 zu sehen sein.

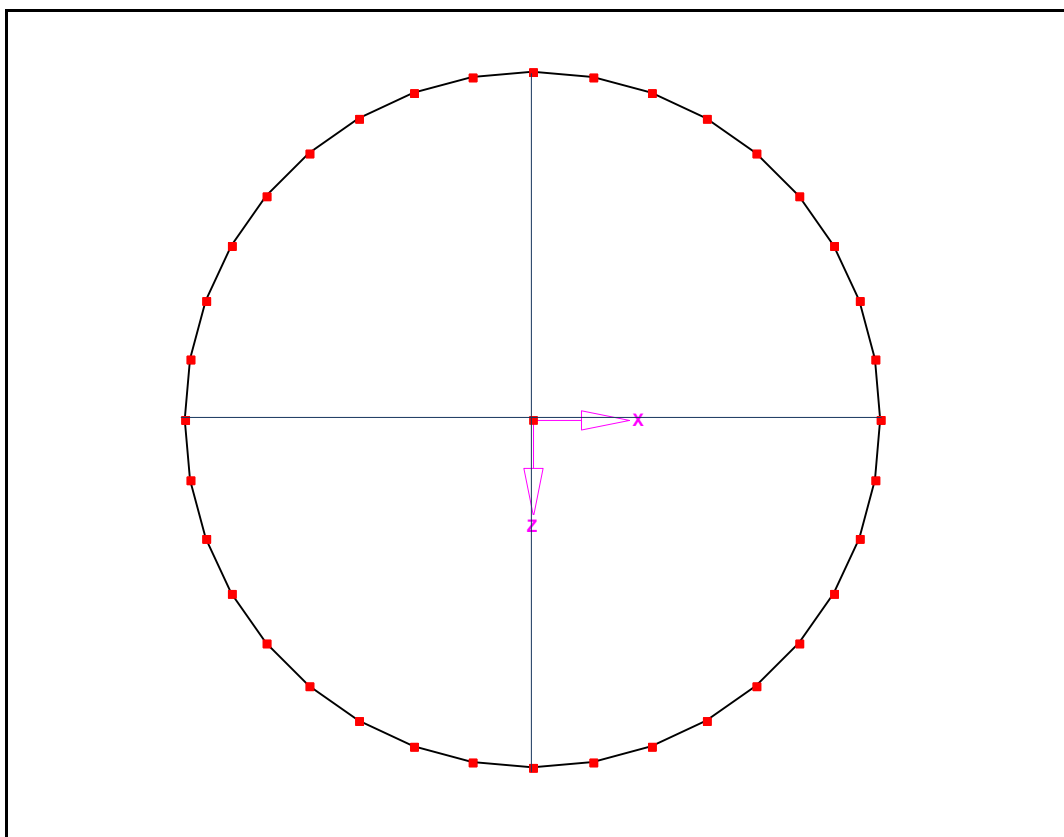


Bild 12: Rohring mit Knoten und Achsenkreuz [RSTAB]

3.1.3 Einfügen der Belastung

Die Art und Größe der Belastung wird nach der ATV-A 127 bestimmt, dabei wird in der ATV-A 127 hingewiesen, dass die Belastung mit γ -fachen Lasten anzusetzen sind. Während der Untersuchungen und Berechnungen wurde festgestellt, dass die Ergebnisse immer um den Faktor γ abwichen. In dieser DA werden die Belastungen deshalb ohne den Faktor γ angesetzt.

Im Weiteren sollte darauf geachtet werden, dass das Eigengewicht des Rohrquerschnittes vom Programm mit berücksichtigt wird. Es ist nicht ausschlaggebend, aber man erhält sonst geringe Abweichungen im Ergebnis. Einige Programme berechnen die Streckenlast über die gewählte Stabbreite selbständig, aber im Allgemeinen muss man den Wert der Streckenlast q_{v_SL} eingeben. Dazu ist es notwendig, dass die errechnete Flächenlast q_v [in kN/m^2] auf eine Streckenlast umgerechnet wird. Dies geschieht indem man q_v mit der gewählten Stabbreite (Rohrstreifenbreite) multipliziert, wie in Gleichung (3.02) dargestellt:

$$q_{v_SL} := q_v \cdot B_{\text{Stab}} \quad (3.02)$$

Dieser Wert wird in die vorgesehene Eingabemaske eingetragen. Bei der Eingabe ist auf das Vorzeichen der Belastung zu achten, welches die Wirkungsrichtung angibt. Die Kraft muss immer in Richtung des zu bemessenden Rohres wirken (siehe Bild 17).

Wenn in der Berechnung nach ATV-A 127 (Kapitel 2.4.6) der Lagerungsfall 3 gewählt wurde, ist die vertikale Belastung über dem gesamten Rohr für q_v (oben und unten) gleich groß.

Sollte man den Lagerungsfall 1 oder 2 gewählt haben, so wird die Belastung durch den Erddruck q_{v_unten} in Abhängigkeit vom Auflagerwinkel, wie im Bild 13 und 14 zu sehen ist, angesetzt.

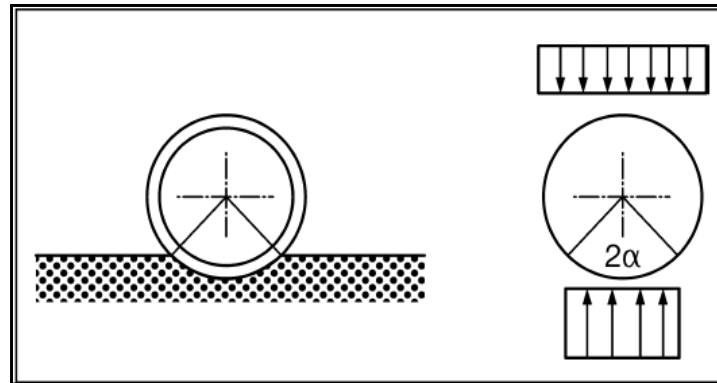


Bild 13: Lagerungsfall 1 [ATV-A 127]

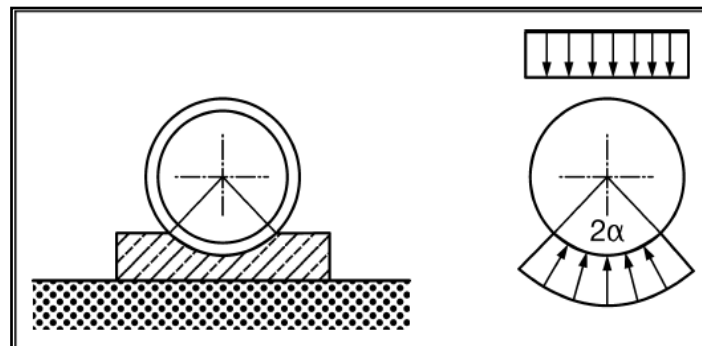


Bild 14: Lagerungsfall 2; Festes Betonaufleger nur für biegesteife Rohre [ATV-A 127]

Demnach berechnet sich q_{v_unten} wie folgt:

$$q_{v_unten} := \frac{q_v}{\sin \alpha} \quad (3.03)$$

Zu beachten ist, dass in der ATV-A 127 grundsätzlich von 2α gesprochen wird, (z.B. $2\alpha = 120^\circ$), aber in der Berechnung nur α eingesetzt werden muss.

Genau wie in Gleichung (3.02) ist auch die horizontale Flächenlast auf eine Streckenlast umzurechnen.

$$q_{h_SL} := q_h \cdot B_{Stab} \quad (3.04)$$

Die horizontale Belastung wird im Lagerungsfall 1 und 3 rechteckförmig und über die gesamte Höhe des Rohres, wie Bild 15 zeigt, angenommen. Die Belastung infolge der Rohrverformung und des daraus resultierenden Bettungsreaktionsdruckes q_h^* wird im Programm nicht angesetzt.

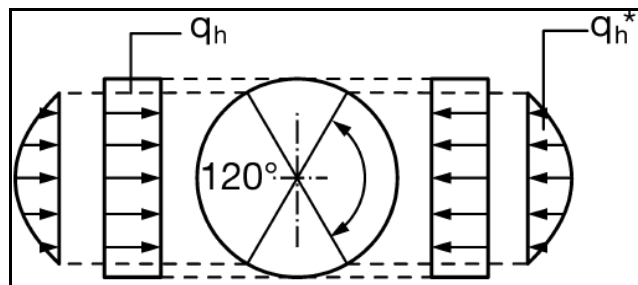


Bild 15: Lagerungsfall 1 und 3 [ATV-A 127]

Im Lagerungsfall 2 wird die horizontale Belastung nur bis zum Betonaufleger, wie Bild 16 zeigt, angenommen.

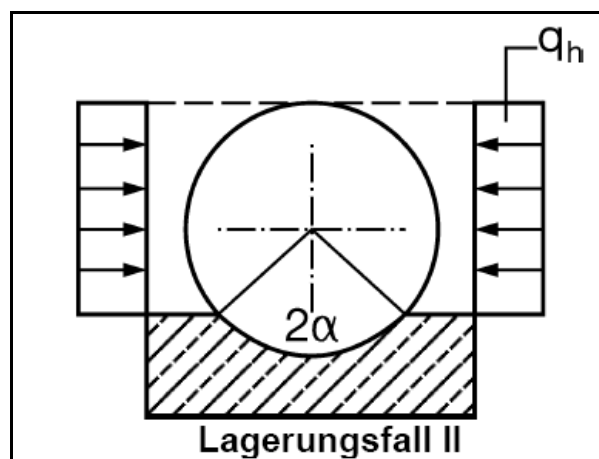


Bild 16: Lagerungsfall 2 [ATV-A 127]

Bei kleinen Überdeckungshöhen, die im Verhältnis zum Rohrdurchmesser stehen, kann man auch mit dem in die Tiefe zunehmenden trapezförmigen Seitendruck rechnen.

Wenn die horizontale und vertikale Belastung eingegeben wurde, erhält man eine Darstellung, wie im Bild 17 gezeigt. Somit können die eingegebenen Belastungen graphisch überprüft werden.

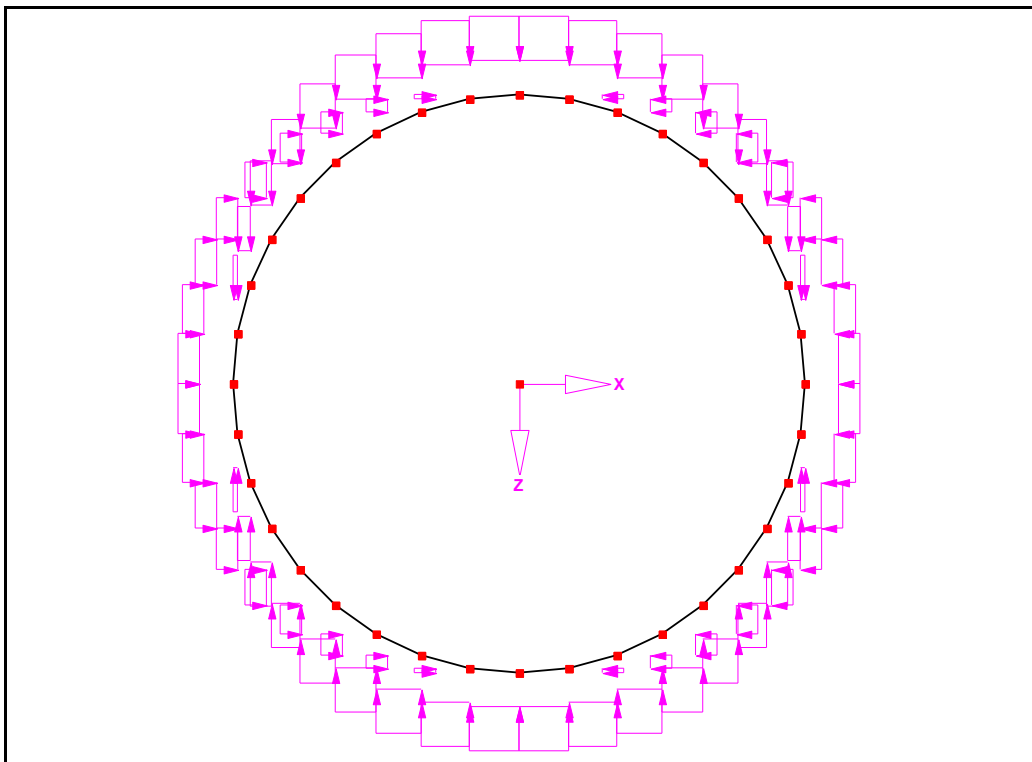


Bild 17: Rohrquerschnitt mit Belastung nach Lagerungsfall 3 [RSTAB]

3.2 Modell mit Hilfe von Auflagerfedern

Bei der Berechnung mit Auflagerfedern werden an den 36 Knoten Auflagerfedern angebracht, die radial angeordnet sind und jeweils im 95°-Winkel zum zugehörigen Balken stehen. Der Vorteil dieser Berechnungsmethode liegt darin, dass der Anwender jede Feder von Hand wieder löschen kann. Wenn nach der Berechnung eine Feder eine Zugkraft aufweist, so muss diese vom Anwender gelöscht und die Berechnung erneut gestartet werden. Die Eingabe der Auflager ist aufwendig, weil man jede Auflagerfeder in eine neue Zeile des Programmes eingeben muss. Das kommt durch die Schief Lagerung der Auflager, die sich um den Winkel der Knoten erhöht.

3.2.1 Setzen der Auflagerfedern

Für die Anordnung der Auflagerfedern ist die Stützkraft vorzugsweise nur in eine Richtung anzusetzen. Die Federn müssen um den selben Winkel wie die Knoten rotieren. Dadurch hat man eine feste Stützgröße für alle Auflager in eine Richtung (z.B. die Z-Richtung). Für die Stützgröße wird die Federkraft eingegeben, die den Bodenwiderstand simulieren soll. Diese Kraft errechnet sich nach Gleichung (3.06) aus dem Bettungsmodul des Bodens K_{sr} nach Gleichung (3.05) und der horizontalen Bettungssteifigkeit S_{Bh} nach Gleichung (2.15). Das Bettungsmodul multipliziert mit der Stabbreite und der Stablänge ergibt dann den simulierten Bodenwiderstand in Form einer Federkraft.

$$K_{sr} := \frac{S_{Bh}}{r_m} \quad (3.05)$$

Die Stabbreite ist hierbei die Streifenbreite, die in Kapitel 3.1.3 mit 10 mm angenommen wurde.

Die Stablänge kann man entweder nach Gleichung (3.06) berechnen oder mit Hilfe des Programms messen, wie z. B. Bild 18 zeigt.



Bild 18: Gemessener Abstand [RSTAB]

Der Abstand der beiden nebeneinander liegenden Knoten und somit der Stablänge beträgt 0.0436 m bzw. 43.6 mm. Dabei ist dX die projizierte Länge in X-Richtung und dZ die projizierte Länge in Z-Richtung. Der Abstand von dY muss Null ergeben, da in der X-Z-Ebene gearbeitet wird.

Mit dem Rohrumfang dividiert durch die Anzahl der Knoten berechnet sich die Stablänge wie folgt:

$$L_{\text{Stab}} := \frac{\pi \cdot d_m}{X_{\text{Knoten}}} \quad (3.06)$$

Daraus ergibt sich für die Federkraft folgende Gleichung (3.07):

$$F_{\text{Feder}} := K_{\text{sr}} \cdot L_{\text{Stab}} \cdot B_{\text{Stab}} \quad (3.07)$$

Da in dieser Simulation nur ein Rohrstreifen betrachtet wird, aber in der Realität ein sehr langes Rohr vorliegt, muss an einem Knoten ein festes Auflager geschaffen werden.

Dieses Auflager verhindert die Verdrehung um die Rohrlängsachse. Wie im Bild 18 zu sehen ist, wird mit dem Quadrat am Knoten in der Rohrsohle die Drehbehinderung dargestellt. Da eine symmetrische Belastung vorliegt, hat dies keine Auswirkungen auf die Ergebnisse.

Sind alle Auflager gesetzt, sollte folgendes Bild 19 auf der Arbeitsebene zu sehen sein.

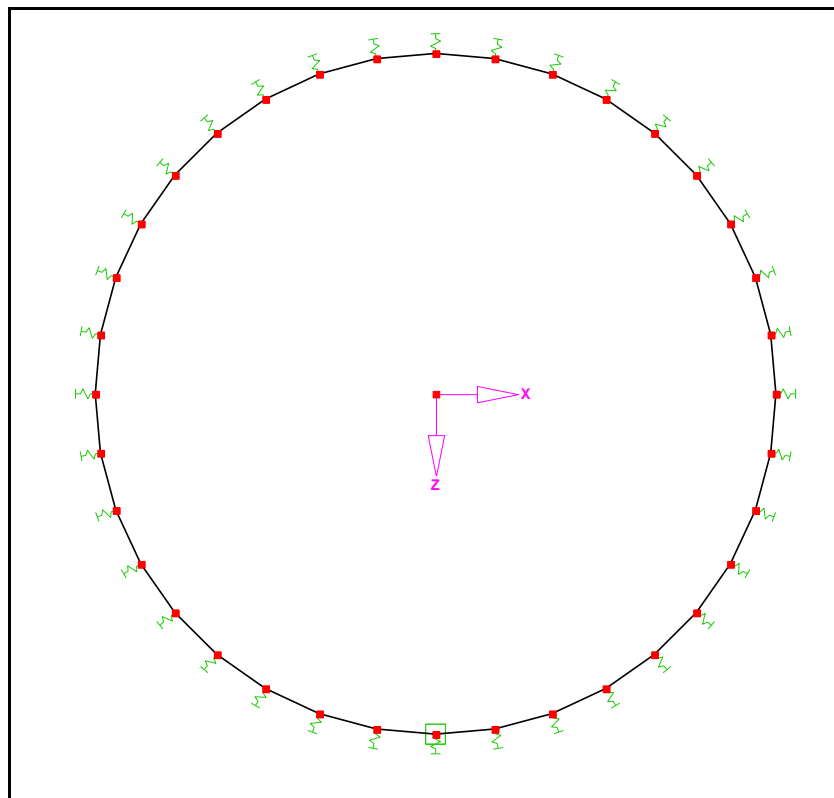


Bild 19: Gelagertes Rohr ohne Belastung [RSTAB]

3.2.2 Berechnung des mit Auflagerfedern modellierten Rohres

Nachdem die Auflagerfedern und die Belastungen modelliert wurden, kann der erste Berechnungsgang erfolgen. Liegen die Belastungen der Federn vor, muss man zwischen Zug- und Druckfedern unterscheiden. Die Zugfedern sind am negativen Vorzeichen zu erkennen.

Stellt das Berechnungsprogramm den Ausgangsquerschnitt und den verformten Querschnitt nach der Berechnung als Überlagerungsbild dar, können Zugfedern leicht detektiert werden. Diese Zugfedern gilt es jetzt wieder zu löschen. Dabei ist es wichtig, möglichst viele Zugfedern gemeinsam zu löschen.

Es ist empfehlenswert, sich die Auflagennummern mit den Zugkräften zu notieren. Grund dafür ist, dass bei manchen Programmen die Ergebnisse gelöscht werden, sobald man etwas am Modellsystem verändert.

Wenn nun; wie bei dieser Berechnung nach der ATV-A 127, eine symmetrische Belastung vorliegt, wird die Belastung der Federn in der Rohrsohle infolge des berücksichtigten Eigengewichtes leicht größer sein. Deshalb ist es sinnvoll zuerst alle Zugfedern zu löschen, die gegen die Hauptbelastungsrichtung wirken, wie im Bild 20 dargestellt. Demzufolge wären das alle Zugfedern, die im Rohrscheitel liegen. Es ist vorteilhaft nur die Zugfedern mit großen Zugkräften zu löschen, weil die anderen, die nur ganz geringe Zugkräfte aufnehmen, eventuell nach dem Löschen der ersten Federn geringe Druckkräfte aufweisen werden.

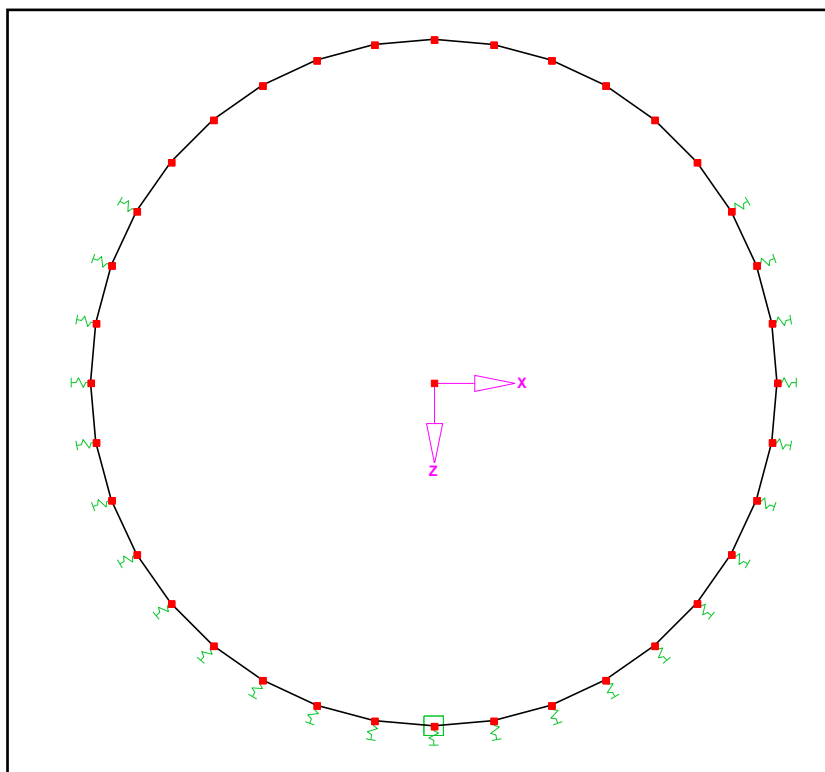


Bild 20: Auflagermodell nach dem Löschen der ersten Zugfedern [RSTAB]

Danach sollte wieder eine Berechnung erfolgen. Wenn jetzt nach der erneuten Berechnung keine Zugfedern mehr vorhanden sind, dann ist die Berechnung abgeschlossen. Falls immer noch Zugfedern vorhanden sind und diese unter anderem in der Rohrsohle liegen, dann werden erst einmal nur diese Zugfedern aus dem System gelöscht, ähnlich wie im Bild 21 dargestellt wird.

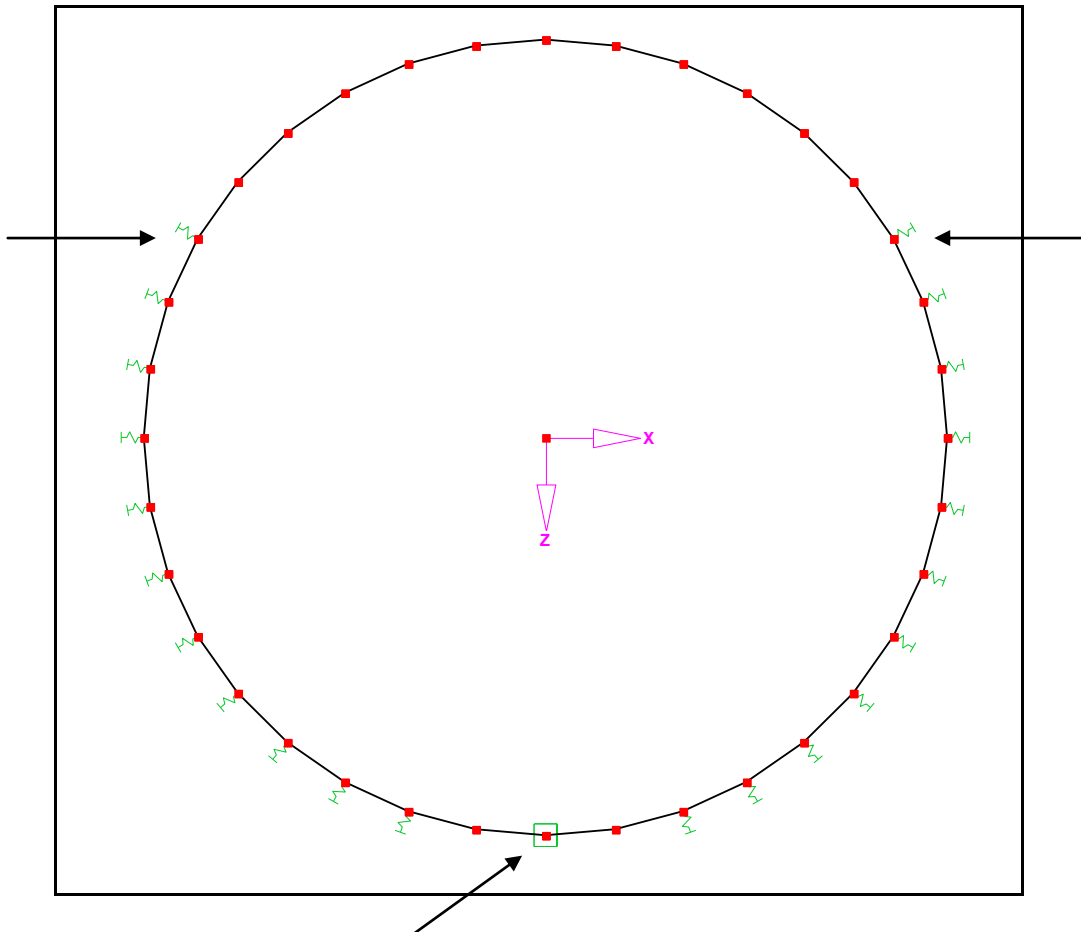


Bild 21: Gelöschte Zugfedern in der Rohrsohle [RSTAB]

Nach einer dritten Berechnung kann es sein, dass es noch je eine Zugfeder links und rechts im oberen Kämpferbereich gibt (obere Pfeile Bild 21). Wie bereits beschrieben, werden auch diese Zugfedern gelöscht und das Modell neu berechnet. Beim nächsten Berechnungsschritt sind in der Regel alle Zugfedern aus dem Modell gelöscht. Zur Kontrolle empfiehlt es sich, dass noch einmal alle Knoten in den Übergangsbereichen zwischen Zug und Druck in der Verformungsdarstellung zu prüfen, wie im Bild 22 zu sehen ist.

Es ist möglich, dass eine Feder, die vorher minimale Zugkräfte besaß und aus dem System gelöscht wurde, nun doch minimale Druckkräfte aufweist.

In einem unsicheren Fall ist es sinnvoll, die Feder wieder an diese Stelle in das Modell zu integrieren und eine Neuberechnung zu starten. Falls die Feder dann Druckkräfte aufweist, ist die Berechnung abgeschlossen. Wenn nicht, muss die Feder wieder gelöscht werden. Die Spannungsunterschiede sind an solchen Stellen in der Regel äußerst gering. Bei einer symmetrischen Belastung spielt die Reihenfolge, wie man die Zugfedern löscht, keine Rolle. Nach mehreren Berechnungsversuchen konnte festgestellt werden, dass man grundsätzlich immer zum gleichen Endergebnis gelangt, auch wenn in jedem Arbeitsgang nur eine Zugfeder gelöscht wurde. Dies ist aber wesentlich Zeitaufwendiger.

Die zwei Pfeile, im Bild 22, sollen einen möglichen unsicheren Fall zeigen.

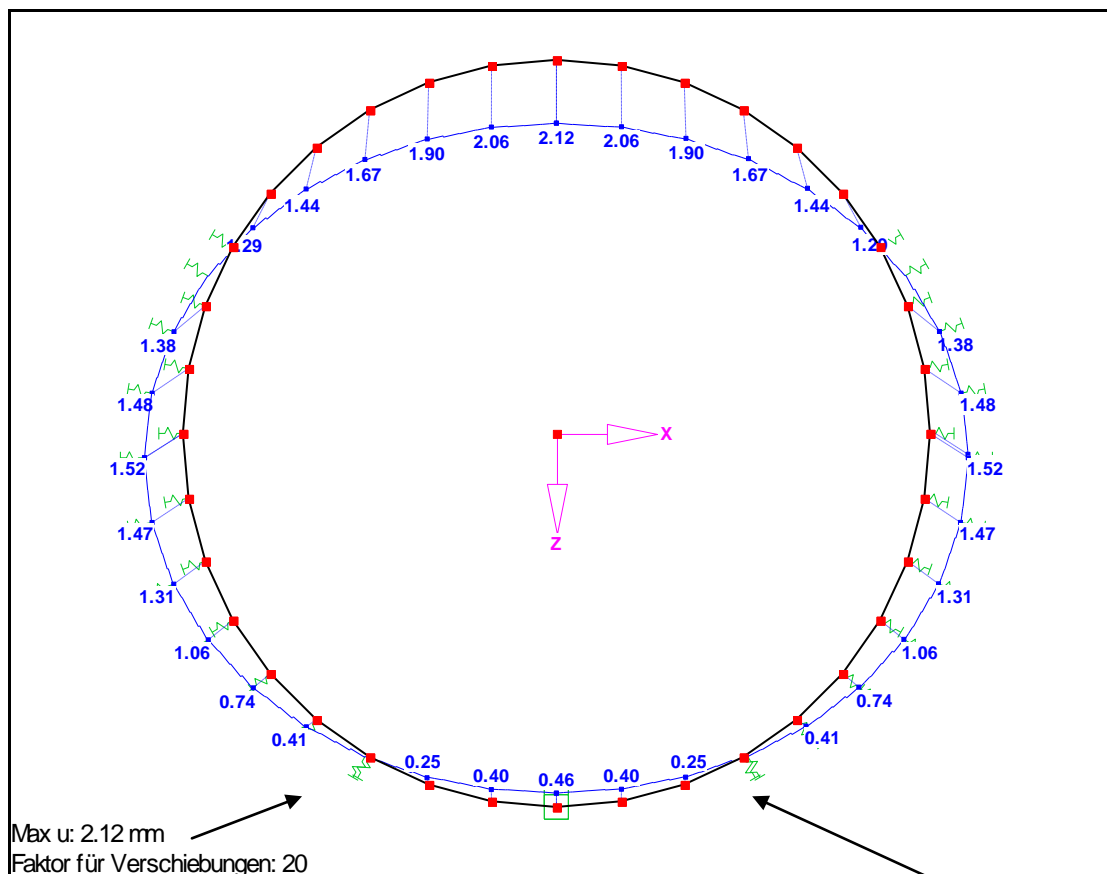


Bild 22: Überlagerung der Ausgangsform mit der Verformung nach der Berechnung [RSTAB]

3.3 Rohrmodell mit Stabfedern

Das Rohrmodell mit Stabfedern ähnelt im Aufbau dem Modell mit Auflagerfedern. Der große Unterschied ist allerdings, dass bei den Stabfedern die Wechselwirkungen zwischen Zug- und Druckbereich ausgeschaltet werden kann. Das heißt, man kann sie als Zugfedern, Druckfedern oder Zug-Druckfedern definieren. Ein weiterer Vorteil ist in der Modellierung zu sehen, da die Auflagerfedern aufwendig einzeln, um den Winkel versetzt, eingegeben werden müssen. Bei der Stabfeder-Methode kann man mit den Knoten arbeiten und alle Stabfedern gemeinsam generieren. Wenn das Programm nur mit Druckfedern arbeitet, so berücksichtigt es auch die Federn, die erst Zugkräfte aufnehmen und durch Löschen anderer Zugfedern dann Druckkräfte erhalten.

Bevorzugt es der Anwender der Software mögliche Zugfedern von Hand zu löschen. So wurde in dieser DA auch die Möglichkeit der Verwendung von Zug-Druckfedern überprüft. Es wurde festgestellt, dass diese Arbeitsweise auch zu den selben Ergebnissen führt. Die Berechnungsschritte sind dann nach Kapitel 3.2.2 zu führen.

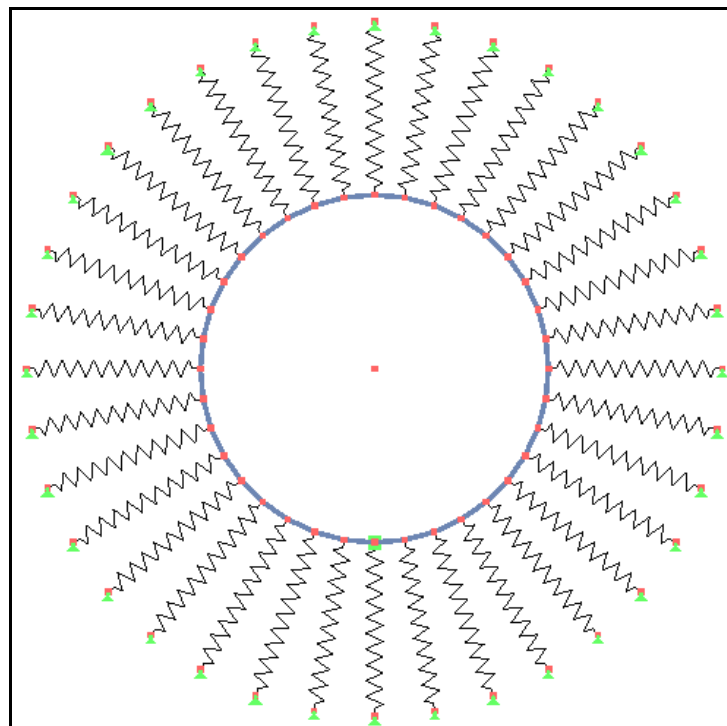


Bild 23: Modell eines mit Stabfedern gebetteten Rohres
[RSTAB]

3.3.1 Setzen der Stabfedern

Wenn die Generierung nach Kapitel 3.1 abgeschlossen ist und man beachtet hat, dass die vier Knoten direkt auf dem Hauptachsensystem liegen, so fügt man einen Knoten auf einer Hauptachse ein. Der Abstand spielt keine entscheidende Rolle, hier empfiehlt es sich den Rohrradius auch als Abstand zwischen den Knoten zu verwenden. Ist dieser Knoten gesetzt, so fügt man an dieser Position ein Auflager ein. Dieses Auflager muss ein Festlager in der Arbeitsebene sein. Die Verdrehung muss das Lager zulassen, es darf keine Einspannung simulieren. Fügt man nun einen Stab zwischen den Knoten des Rohres und den Festlagernden ein und definiert diesen Stab als Feder, erhält man eine ähnliche Ansicht, wie im Bild 24 dargestellt ist. Die Stabfeder wird radial zum Rohrquerschnitt erzeugt.

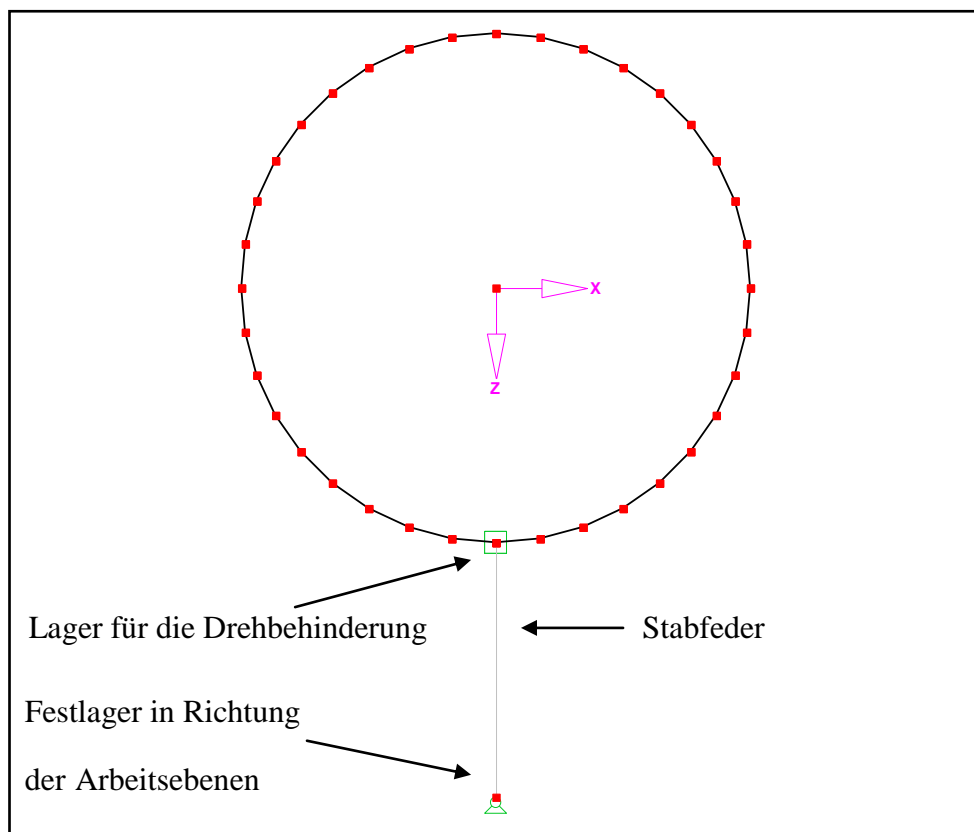


Bild 24: Rohrmodell mit einer Stabfeder und einem Auflager [RSTAB]

Danach ist es erforderlich die Feder zu definieren. Die Federkraft errechnet sich laut Kapitel 3.2 nach Gleichung (3.07).

Die Wirkungsrichtung ist analog der Auflagerfedermethode aus Kapitel 3.2. Das heißt, die Stabfeder darf nur in Stablängsrichtung wirken und nicht quer zur Stabrichtung. Natürlich muss auch, wie im Kapitel 3.2 erläutert, das Lager gesetzt werden, das die Verdrehung um die Rohrlängsachse verhindert (siehe Bild 24).

Nun kann man den Federstab, den Knoten und das Auflager markieren und den Befehl "Rotieren" ausführen. Weiterhin ist die Angabe der Anzahl der Kopien und des Drehwinkels erforderlich. Beim "Rotieren" werden alle markierten Teile um einen ausgewählten Drehwinkel kopiert. In diesem Beispiel wurden die 35 Kopien im Winkel von 10° versetzt (siehe Bild 25).

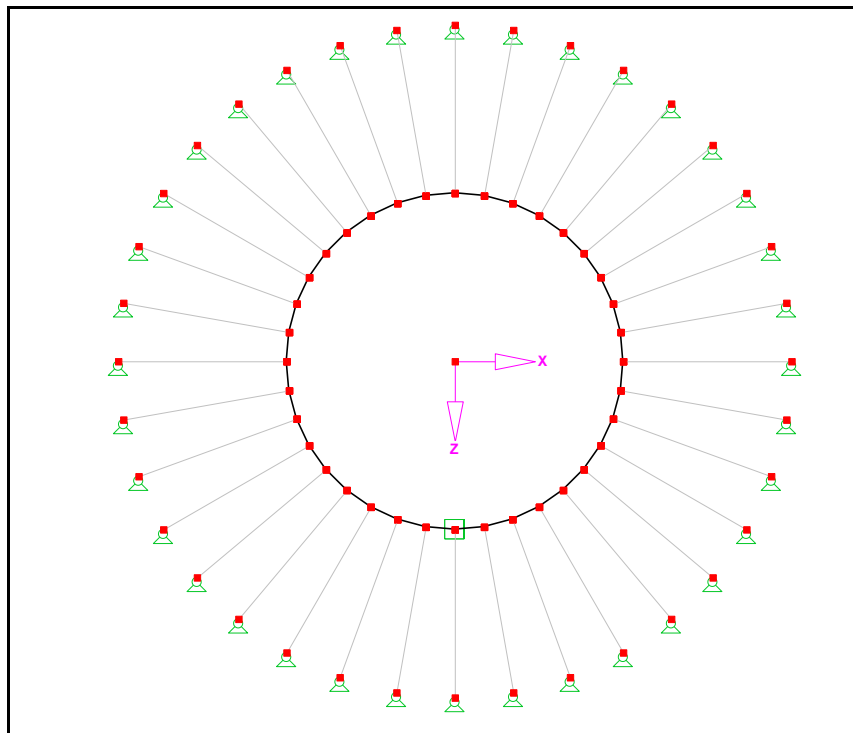


Bild 25: Fertiges Stabfedermodell [RSTAB]

Die Lager außen am Stab sollen die feste Erde neben und unter dem Rohrgraben simulieren. Damit ist die Modellierung abgeschlossen und man kann zur Berechnung übergehen.

3.3.2 Berechnung des mit Stabfedern modellierten Rohres

Erfolgt die Berechnung mit Zug-Druckfedern, so muss analog der Berechnung von Kapitel 3.2.2 vorgegangen werden. Wird ausschließlich mit der Druckfeder-Methode gearbeitet, so erfolgt die Darstellung der Berechnungsergebnisse sofort, wie im Bild 26 aufgezeigt wird.

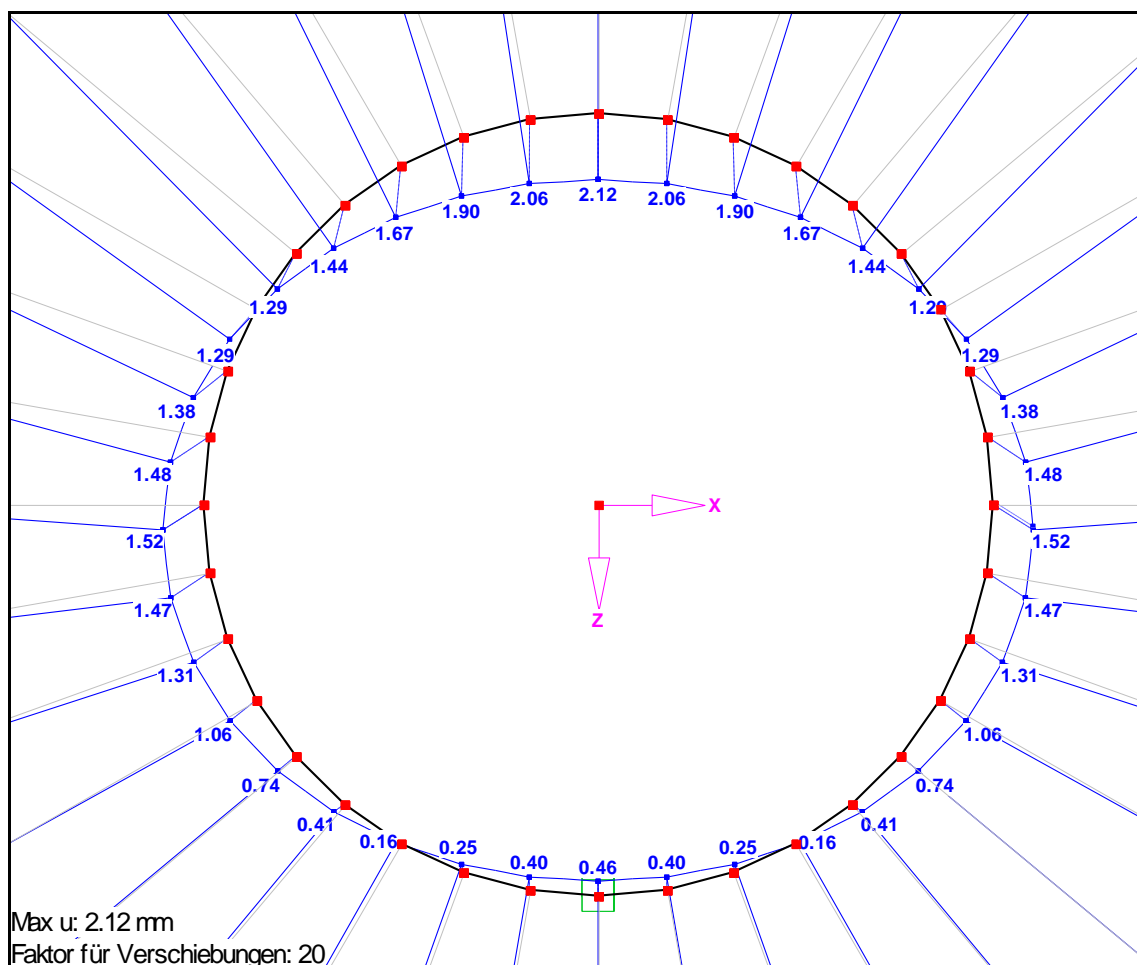


Bild 26: Stabfedermodell mit Überlagerung der Verformung [RSTAB]

Nach größerem Arbeitsaufwand wird auch die Zug-Druckfeder-Methode zu dem Ergebnis vom Bild 26 führen.

Effizienter gelangt man allerdings mit der Druckfeder-Methode zum Ziel.

3.4 Rohrmodell mit elastischer Bettung

In den neuen Programmversionen der Hersteller ist eine Simulation der elastischen Bettung implementiert und man ist außerdem in der Lage die Zug- oder Druckfedern zu deaktivieren. Da diese Simulation der elastischen Bettung die Stäbe feiner untergliedert, sollte diese Berechnungsmethode im Vergleich zu den Federmodellen die exakteren Ergebnisse liefern.

Bei manchen Programmen muss man das Bettungsmodul K_{sr} und die Stabbreite B_{stab} eingeben. Wiederum gibt es Programme, bei denen muss der Anwender das Bettungsmodul K_{sr} selbst durch die Stabbreite B_{stab} dividieren.

Ist die elastische Bettung für alle Stäbe eingetragen, so erhält man in der Regel eine Darstellung, wie Bild 27 zeigt.

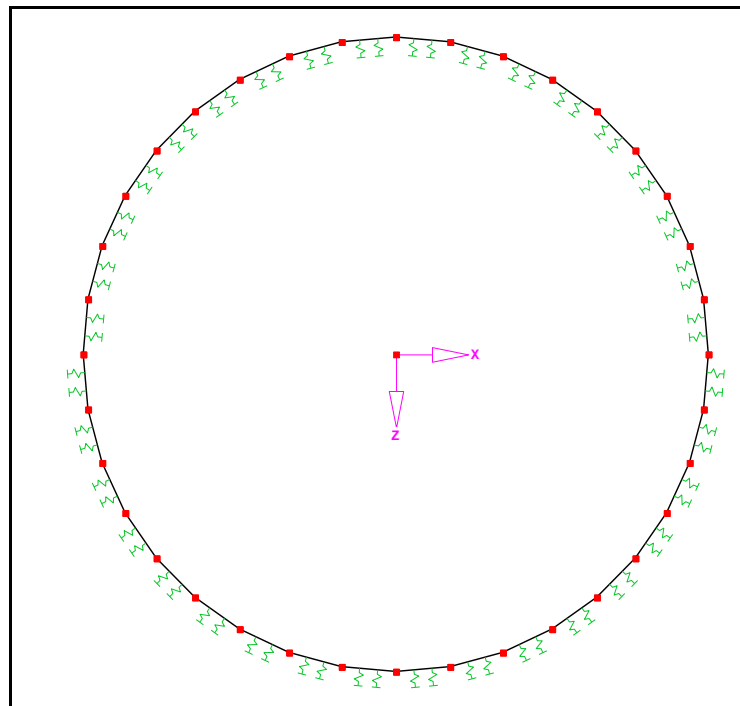


Bild 27: Elastisch gebettetes Rohr ohne gedrehte Stäbe [RSTAB]

Wie im Bild 27 dargestellt ist, hat das Programm die Bettung selbständig auf die Rohraußenseite und auf die Rohrinneinnenseite gesetzt.

Das liegt daran, dass das Stabkoordinatensystem die Koordinatenachse der Arbeitsebene übernimmt. Im Beispiel von Bild 26 zeigt die Z-Achse des globalen Koordinatensystems nach unten und somit ist die positive Z-Richtung der Stäbe nach unten gerichtet.

Jetzt gibt es zwei Möglichkeiten. Erstens, die äußere elastische Bettung wird als Druckbettung und die innere als Zugbettung definiert. Dadurch wird die Sohlspannung im oberen Bereich negativ ausgegeben.

Die zweite Möglichkeit ist, die Stäbe mit der innenliegenden Bettung zu drehen. Dabei wird der Stab um seine Längsachse um 180° gedreht. Danach liegt die Bettung wie im Bild 28 außen am Rohr und darf nur Druckspannungen aufnehmen. Der Nachteil dieser zweiten Möglichkeit der Bettungssimulation besteht darin, dass die Spannung in den gedrehten Stäben vertauscht ausgegeben wird. Die Zugspannung der Rohrinne im Scheitel wird als Druckspannung ausgegeben und analog auf der Außenseite als Zugspannung. Dabei bleibt der Betrag der Spannung gleich.

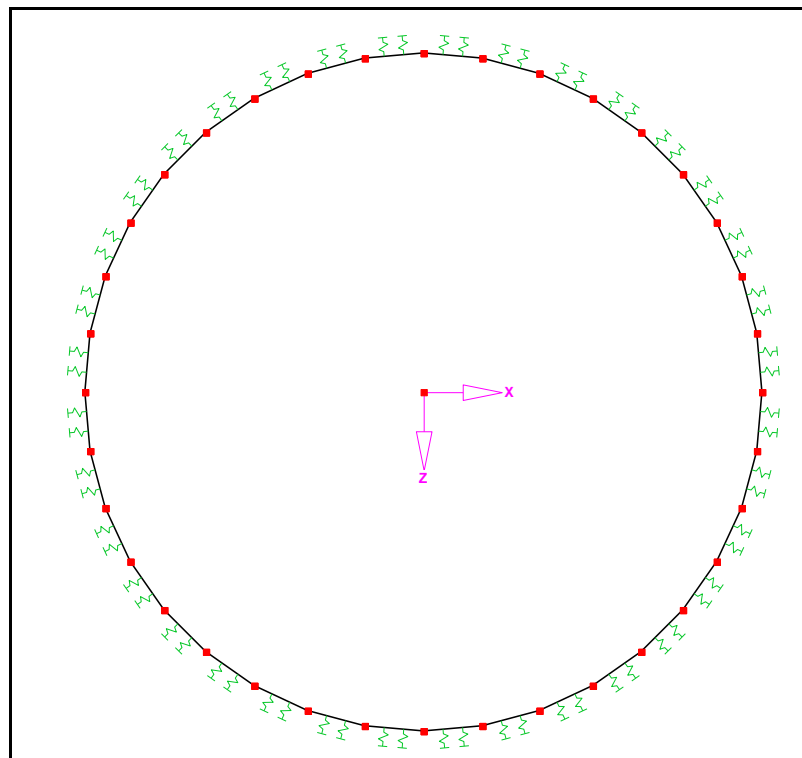


Bild 28: Elastisch gebettetes Rohr mit gedrehten Stäben [RSTAB]

4 Auswertung der Ergebnisse

Um eine aussagekräftige Auswertung zu erhalten, wurden die Berechnungen mit 3 verschiedenen Rohrdurchmessern ($d_m = 500, 750$ und 1000 mm) und 3 verschiedenen Wandstärken ($s = 8, 10$ und 15 mm) durchgeführt. Die Einbau- und Bettungsbedingungen sowie die Belastung durch Verkehr waren konstant. Jedoch verändert sich mit zunehmendem Rohrdurchmesser die Belastung infolge des Erddruckes. Dadurch wird die vertikale Belastung q_v etwas kleiner und die horizontale Belastung q_h etwas größer. Bei einem größeren Rohrquerschnitt steigt die Belastung des Rohres durch die größere vorhandene Belastungsfläche an. Diese Auswertung soll nun zeigen, inwiefern die Berechnungen mit dem Stabwerksprogramm von der Richtlinie ATV-A 127 abweichen. Für den Vergleich wurde ein weiteres Programm hinzugezogen, um eventuelle eigene Fehler in der Berechnung nach ATV-A 127 aufzudecken. Diese Kontrolle wurde ausschließlich mit der Wandstärke $s = 10$ mm durchgeführt.

Die Rohre werden wie folgt bezeichnet:

"500-10"

Die erste Zahl gibt den mittleren Rohrdurchmesser in [mm] an. In diesem Beispiel sind es 500 mm. Die zweite Zahl steht für die Wandstärke in [mm] und beträgt somit 10 mm.

Für die Modelle Stabfeder, Auflagerfeder und elastische Bettung werden folgende Stäbe in den jeweiligen Zonen mit den folgenden Nummern betrachtet:

- Sohle → Stabnummer 1 und 36
- Kämpfer → Stabnummern 9, 10 und 27, 28
- Scheitel → Stabnummer 18 und 19

Diese Stäbe sind im folgenden Bild 29 mit ihrer Nummerierung dargestellt.

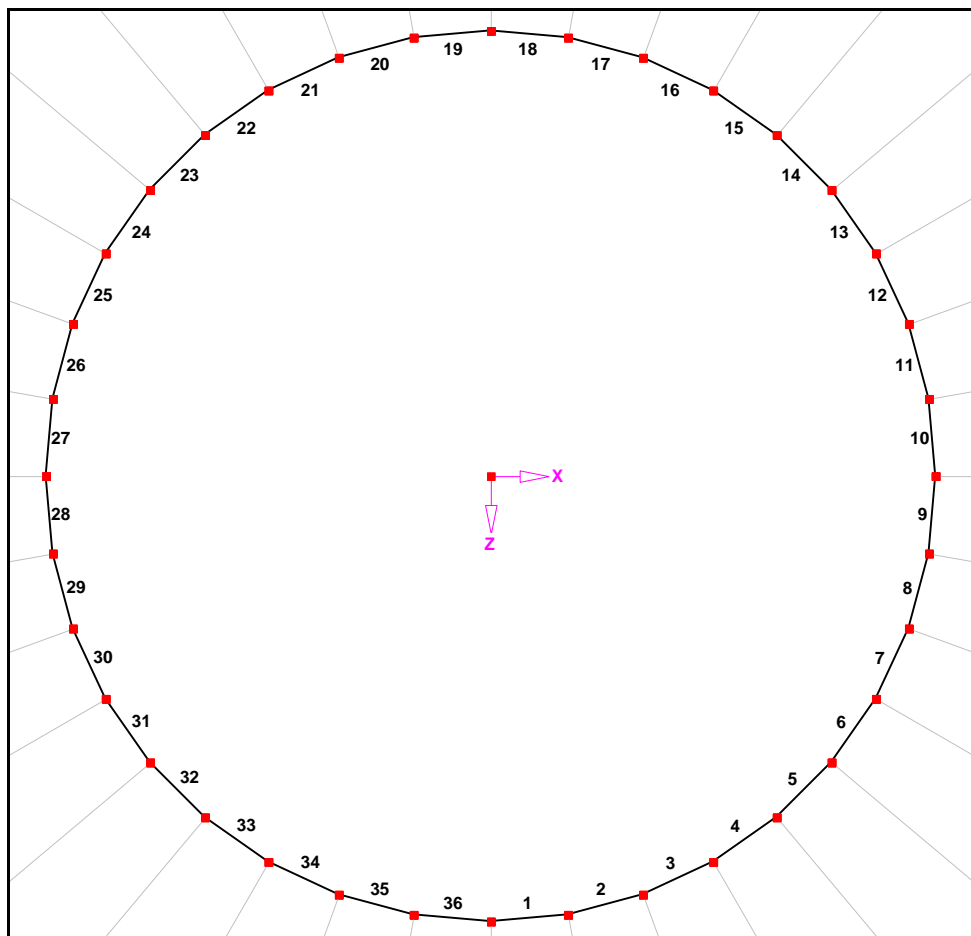


Bild 29: Anordnung der Stäbe mit Nummerierung [RSTAB]

4.1 Auswertung des Rohres 500-10

In der folgenden Tabelle 7 sind die Spannungen der markanten Rohrzonen Scheitel, Kämpfer und Sohle jeweils an der Rohrrinnen- und -außenseite gegenübergestellt.

Es wurden folgende Parameter verwendet.

Allgemein:

- Material → Stahl S 235
- mittlerer Rohrdurchmesser → $d_m = 500 \text{ mm}$
- Wandstärke → $s = 10 \text{ mm}$
- vertikale Belastung → $q_v = 87.41 \text{ kN/m}^2$
- horizontale Belastung → $q_h = 18.79 \text{ kN/m}^2$

Im Stabwerksprogramm:

- Profil → 4 KT 10 mm (Vierkantprofil)
- Federkraft → $F_{\text{Feder}} = 5.27 \text{ kN/m}$

Aus diesen Parametern ergeben sich folgende Spannungen und Verformungen, wie sie in Tabelle 7 nachfolgend dargestellt sind.

Tabelle 7: Auswertung Rohr 500-10

Rohr 500-10								
	Scheitel		Kämpfer		Sohle		Verformung	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen	vertikal	horizontal
ATV	56,53	-56,34	-58,2	52,3	56,81	-56,62	-2,18	2,17
Auflagerfeder	56,55	-57,77	-58,2	53,73	54,44	-55,77	-2,21	2,2
Δ	-0,02	1,43	0	-1,43	2,37	-0,85	0,03	0,03
Δ in %	0,04%	2,54%	0,00%	2,73%	4,17%	1,50%	1,38%	1,38%
Stabfeder	56,55	-57,77	-58,2	53,73	54,44	-55,77	-2,21	2,2
Δ	-0,02	1,43	0	-1,43	2,37	-0,85	0,03	0,03
Δ in %	0,04%	2,54%	0,00%	2,73%	4,17%	1,50%	1,38%	1,38%
el. Bettung	56,38	-57,81	-58,36	54,06	54,54	-55,83	-2,2	2,2
Δ	0,15	1,47	0,16	-1,76	2,27	-0,79	0,02	0,03
Δ in %	0,27%	2,61%	0,27%	3,37%	4,00%	1,40%	0,92%	1,38%
easy Pipe	56,51	-56,32	-58,17	52,27	56,79	-56,6	-2,2	2,2
Δ	0,02	-0,02	-0,03	0,03	0,02	-0,02	0,02	0,03
Δ in %	0,04%	0,04%	0,05%	0,06%	0,04%	0,04%	0,92%	1,38%

Die Spannungen sind in [N/mm²] und die Verformung in [mm] angegeben.
 Δ wurde jeweils zur ATV-A 127 bestimmt.

Wie Tabelle 7 zeigt, erzielen die Modelle mit Auflagerfeder und Stabfeder die gleichen Ergebnisse. Die Berechnungen nach ATV-A 127 und dem Programm easy Pipe sind nahezu identisch. Das bedeutet, dass die Ergebnisse nach Kapitel 2 korrekt berechnet wurden. Im Gesamten betrachtet sind die Berechnungen mit den Stabwerksmodellen annähernd gleich, wobei die maßgebenden Spannungen im Kämpferbereich nahezu exakt sind. Alle weiteren Spannungen befinden sich bei einer maximalen Spannungsdifferenz von 2,37 N/mm² in einem sehr guten Bereich nahe der ATV-A 127. Die Abweichungen der Verformungen liegen im hundertstel Millimeterbereich. Diese geringen Unterschiede sind absolut vernachlässigbar.

4.2 Auswertung des Rohres 750-10

Für die Berechnung des Rohres 750-10 wurden folgende Parameter verwendet.

Allgemein:

- Material → Stahl S 235
- mittlerer Rohrdurchmesser → $d_m = 750 \text{ mm}$
- Wandstärke → $s = 10 \text{ mm}$
- vertikale Belastung → $q_v = 76,64 \text{ kN/m}^2$
- horizontale Belastung → $q_h = 20,75 \text{ kN/m}^2$

Im Stabwerksprogramm:

- Profil → 4 KT 10 mm (Vierkantprofil)
- Federkraft → $F_{\text{Feder}} = 4.547 \text{ kN/m}$

Aus diesen Parametern ergeben sich folgende Spannungen und Verformungen, wie sie in Tabelle 8 nachfolgend dargestellt sind.

Tabelle 8: Auswertung Rohr 750-10

Rohr 750-10								
	Scheitel		Kämpfer		Sohle		Verformung	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen	vertikal	horizontal
ATV	82,62	-83,73	-81,58	74,36	83,24	-84,36	-7,02	6,92
Auflagerfeder	85,59	-87,98	-83,5	77,49	80,74	-83,29	-7,35	7,24
Δ	-2,97	4,25	1,92	-3,13	2,5	-1,07	0,33	0,32
Δ in %	3,59%	5,08%	2,35%	4,21%	3,00%	1,27%	4,70%	4,62%
Stabfeder	85,59	-87,98	-83,5	77,49	80,74	-83,29	-7,35	7,24
Δ	-2,97	4,25	1,92	-3,13	2,5	-1,07	0,33	0,32
Δ in %	3,59%	5,08%	2,35%	4,21%	3,00%	1,27%	4,70%	4,62%
el. Bettung	85,65	-88,46	-84,6	78,6	80,73	-83,75	-7,4	7,4
Δ	-3,03	4,73	3,02	-4,24	2,51	-0,61	0,38	0,48
Δ in %	3,67%	5,65%	3,70%	5,70%	3,02%	0,72%	5,41%	6,94%
easy Pipe	82,45	-83,57	-81,38	74,16	83,08	-84,21	-7	6,9
Δ	0,17	-0,16	-0,2	0,2	0,16	-0,15	-0,02	-0,02
Δ in %	0,21%	0,19%	0,25%	0,27%	0,19%	0,18%	0,28%	0,29%

Die Spannungen sind in [N/mm²] und die Verformung in [mm] angegeben.
 Δ wurde jeweils zur ATV-A 127 bestimmt.

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, steigen die Unterschiede zwischen der Berechnung mit dem Stabwerksprogramm und der ATV-A 127 leicht an. Dennoch befinden sich die Spannungen in einem guten Bereich, jedoch unterscheidet sich die maßgebende Zone. Bei der Berechnung nach ATV-A 127 ist die Rohrsohle maßgebend und bei den Stabwerksmodellen der Rohrscheitel. Vor allem fällt auf, dass man im Bereich der Sohle mit der Spannung unterhalb und im Bereich des Scheitels oberhalb der ATV-A 127 liegt. Die Verformungsunterschiede sind mit maximal 0.48 mm immer noch sehr gering und weiterhin vernachlässigbar.

4.3 Auswertung des Rohres 1000-10

Für die Berechnung des Rohres 1000-10 wurden folgende Parameter verwendet.

Allgemein:

- Material → Stahl S 235
- mittlerer Rohrdurchmesser → $d_m = 1000 \text{ mm}$
- Wandstärke → $s = 10 \text{ mm}$
- vertikale Belastung → $q_v = 73,01 \text{ kN/m}^2$
- horizontale Belastung → $q_h = 22.275 \text{ kN/m}^2$

Im Stabwerksprogramm:

- Profil → 4 KT 10 mm (Vierkantprofil)
- Federkraft → $F_{\text{Feder}} = 4.626 \text{ kN/m}$

Aus diesen Parametern ergeben sich folgende Spannungen und Verformungen, wie sie in Tabelle 9 nachfolgend dargestellt sind.

Tabelle 9: Auswertung Rohr 1000-10

Rohr 1000-10								
	Scheitel		Kämpfer		Sohle		Verformung	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen	vertikal	horizontal
ATV	95,88	-98,86	-87,74	79,21	96,99	-99,97	-13,88	13,42
Auflagerfeder	102,51	-106,48	-91,08	83,22	93,81	-98	-14,96	14,44
Δ	-6,63	7,62	3,34	-4,01	3,18	-1,97	1,08	1,02
Δ in %	6,91%	7,71%	3,81%	5,06%	3,28%	1,97%	7,78%	7,60%
Stabfeder	102,5	-106,48	-91,07	83,23	93,81	-98	-14,96	14,44
Δ	-6,62	7,62	3,33	-4,02	3,18	-1,97	1,08	1,02
Δ in %	6,90%	7,71%	3,80%	5,08%	3,28%	1,97%	7,78%	7,60%
el. Bettung	101,2	-106,23	-92,62	84,86	92,1	-97,94	-14,9	14,4
Δ	-5,32	7,37	4,88	-5,65	4,89	-2,03	1,02	0,98
Δ in %	5,55%	7,45%	5,56%	7,13%	5,04%	2,03%	7,35%	7,30%
easy Pipe mit ks	123,18	-126,42	-111,68	101,32	124,3	-127,55	-17,9	17,3
Δ	-27,3	27,56	23,94	-22,11	-27,31	27,58	4,02	3,88
Δ in %	28,47%	27,88%	27,29%	27,91%	28,16%	27,59%	28,96%	28,91%
easy Pipe ohne ks	101,97	-104,65	-92,45	83,87	102,90	-105,59	-14,82	14,32
Δ	-6,09	5,79	4,71	-4,66	-5,91	5,62	0,94	0,90
Δ in %	6,35%	5,86%	5,37%	5,89%	6,09%	5,62%	6,76%	6,72%

Die Spannungen sind in [N/mm²] und die Verformung in [mm] angegeben.
 Δ wurde jeweils zur ATV-A 127 bestimmt.

Wie auch schon in den Tabellen 7 und 8 sind die Spannungsunterschiede in der Tabelle 9 weiter angewachsen. Dabei gibt es in der Tabelle 9 bei der Berechnung mit easy Pipe einen Unterschied und zwar mit dem Faktor ks. Dieser Faktor berücksichtigt das Verhältnis vom Rohrdurchmesser zur Grabenbreite. Er soll die Auflockerung des Bodens durch das Ziehen der Spundwände und die damit verbundene Zerstörung der örtlichen Bettung, welches eine Spannungserhöhung zur Folge hat, berücksichtigen.

In der ATV-A 127 wird darauf hingewiesen, dass der Graben nach links und rechts mindestens einen Abstand von 500 mm haben soll. Somit werden die Restriktionen der ATV-A 127 nicht eingehalten. Daraus wird ersichtlich, dass bei falscher Annahme nach ATV-A 127 die Stabwerksmodelle auch fehlerhaft sind, wenn die Belastungs- und Widerstandsgrößen nach ATV-A 127 berechnet und eingesetzt wurden. Des Weiteren ergeben sich erneut die Spannungsunterschiede im Bereich der Sohle und des Scheitels. Ein Grund für diese auftretenden Spannungsdifferenzen könnte durch das Eigengewicht des Rohres verursacht sein. Das nachfolgende Bild 30 stellt die Wirkung des Eigengewichtes dar.

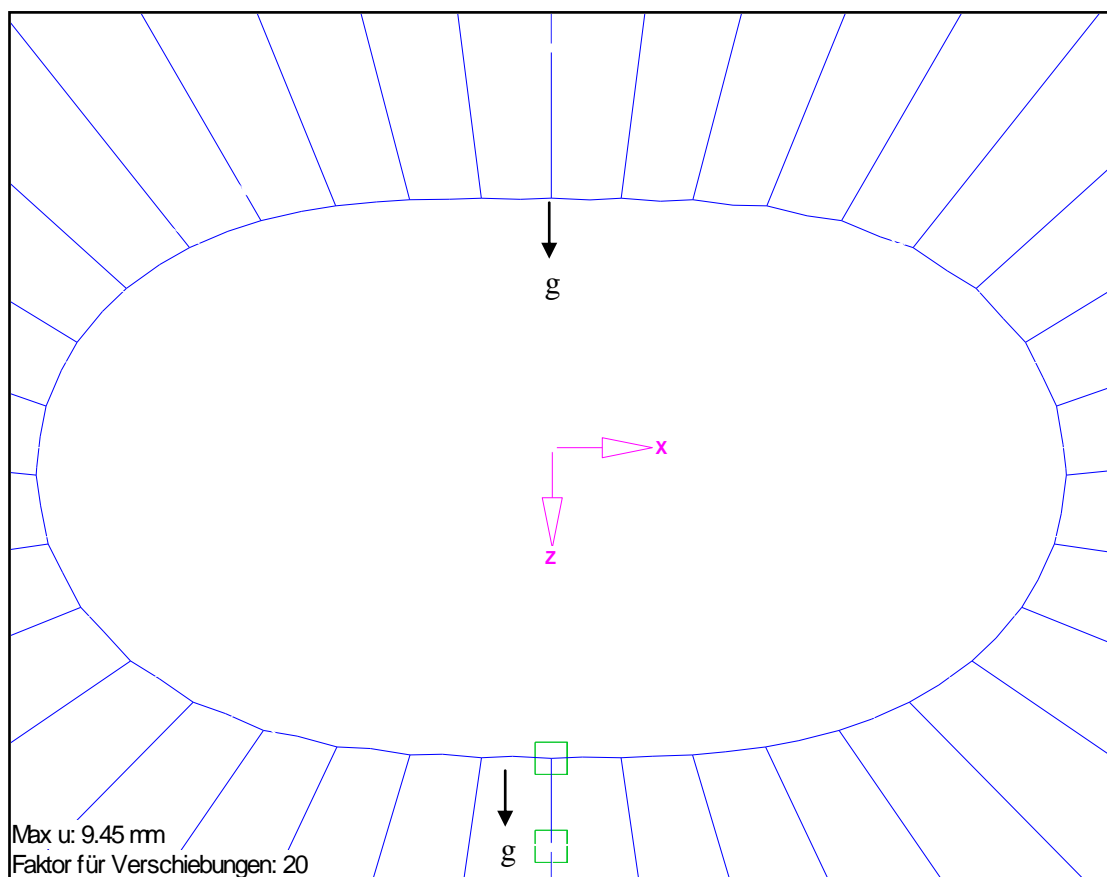


Bild 30: Darstellung der Verformung mit Wirkungsrichtung des Eigengewichtes
[RSTAB]

Wie Bild 30 zeigt, wirkt das Eigengewicht "g" des Rohres im Bereich des Scheitels belastend und im Bereich der Sohle entlastend.

Bei einer Berechnung im Stabwerksprogramm ohne Berücksichtigung des Eigengewichtes sind die Spannungen in der Sohle und des Scheitels bei gleicher Belastung auch gleich groß. Dies sollen die Ergebnisse am Beispiel der Stabfeder aus Tabelle 9 verdeutlichen. Die Spannungen außen am Scheitel betragen mit Eigengewicht $106,48 \text{ N/mm}^2$ und $102,28 \text{ N/mm}^2$ ohne Eigengewicht. Daraus ergibt sich eine Differenz von $4,2 \text{ N/mm}^2$. Addiert man diese Differenz zur Spannungen im Außenbereich der Sohle (98 N/mm^2), so erhält man den gleichen Wert von $102,2 \text{ N/mm}^2$. Dadurch erklären sich diese Unterschiede in den Tabellen 7-9 zwischen der Berechnung nach ATV-A 127 und den Stabwerksprogramm. Ob nun die Beiwerte für das Eigengewicht aus der ATV-A 127 oder die Annahmen und somit die Berechnung vom Programm nicht stimmen, ist hieraus nicht ersichtlich.

Des Weiteren haben simulierte Berechnungen ergeben, dass bei einen größeren Seitendruck oder eine höhere Bettungssteifigkeit des Bodens die Verformung des Rohres behindert und die Spannungen deutlich geringer ausfallen.

Aufgrund der Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse zwischen den Modellen mit Auflagerfedern und Stabfedern wird die weitere Berechnung, in Anbetracht des Zeitaufwandes, lediglich mit dem Stabfedermodell fortgeführt.

Die Auswertungen der Berechnungen sowie die Ergebnisse sind im Anhang A-C zu finden.

4.4 Auswertung der Wandstärken 8 und 15 mm

In dieser Auswertung wird nur zwischen der ATV-A 127 und der Berechnung mit den Federmodellen unterschieden, weil das Programm easy Pipe fast gleiche Ergebnisse wie die ATV-A 127 erbrachte und die elastische Bettung ähnliche Ergebnisse wie die Federmodelle. Der Korrekturfaktor "ks" wurde bei den Rohren mit einem mittleren Durchmesser von 1000 mm nicht mit betrachtet.

Tabelle 10: Auswertung der Wandstärken 8 und 15 mm

	Rohrdurchmesser	500		750		1000	
	Wandstärke	8	15	8	15	8	15
ATV	Scheitel innen	70,13	30,18	94,03	53,85	102,94	71,61
	Scheitel außen	-70,59	-29,79	-96,5	-53,66	-107,85	-72,25
	Kämpfer innen	-70,64	-32,09	-87,92	-55,68	-83,24	-72,17
	Kämpfer außen	64,04	27,65	79,71	50,07	73,29	65,62
	Sohle innen	70,47	30,37	94,80	54,27	104,32	72,35
	Sohle außen	-70,94	-29,97	-97,28	-54,08	-109,24	-73
	Δv	-3,36	-0,77	-9,77	-3,08	-17,65	-7,18
	Δh	3,33	0,77	9,51	3,07	16,55	7,11
	Δv in %	0,67%	0,15%	1,30%	0,41%	1,77%	0,72%
Federmodelle	Scheitel innen	71,66	29,55	100,2	53,66	112,05	73
	Scheitel außen	-73,48	-30,33	-103,74	-54,82	-117,75	-74,92
	Kämpfer innen	-71,95	-31,66	-92,08	-55,33	-87,63	-72,45
	Kämpfer außen	66,67	28,43	84,69	51,11	77,76	67,2
	Sohle innen	68,95	28,93	93,94	50,96	101,10	67,51
	Sohle außen	-70,87	-29,8	-97,65	-52,27	-107,02	-69,64
	Δv	-3,47	-0,78	-10,5	-3,14	-19,37	-7,43
	Δh	3,44	0,78	10,18	3,13	18,16	7,36
	Δv in %	0,69%	0,16%	1,40%	0,42%	1,94%	0,74%
V _{RB}	Systemsteifigkeit	0,189	1,258	0,065	0,427	0,027	0,178

Die Spannungen sind in [N/mm²] und die Verformung in [mm] angegeben.
 Δv in [%] wurde jeweils zum Ausgangsrohrdurchmesser bestimmt.

Anhand der Tabelle 10 kann erkannt werden, dass bei annähernd gleicher Systemsteifigkeit V_{RB} (Rohr 500-8 und 1000-15) auch annähernd gleiche Spannungen vorliegen. Daraus sind folgende Schlüsse zu ziehen. Der Rohrdurchmesser und die Rohrwandstärke stehen in enger Abhängigkeit bezogen auf die Spannungen im Rohr. Erhöht man den Rohrdurchmesser sollte ebenfalls die Wandstärke erhöht werden, um gleichwertige Spannungswerte zu erhalten (doppelter Durchmesser benötigt doppelte Wandstärke). Die Verformung bleibt dabei prozentual zum Ausgangrohrdurchmesser konstant, jedoch verdoppelt sich der Betrag der Verformung. Des Weiteren konnte Abhängigkeit der Systemsteifigkeit zu den ermittelten Abweichungen nachgewiesen werden. So gilt, je Steifer das System, desto geringer sind die Abweichungen bei der Berechnung mit dem Stabwerksprogramm.

In Anbetracht der Tabellen 7-10 lässt sich schlussfolgern, dass die Berechnung mit allen drei Stabwerksmodellen ausreichend genau und Regelkonform zur ATV-A 127 möglich ist. Die Abweichungen befinden sich in einem akzeptablen Bereich.

In der Regel liegen die Spannungen beim Berechnen mit einem Stabwerksmodell etwas höher als bei der Berechnung nach ATV-A 127 und somit auf der sicheren Seite.

Mit diesen Modellen können nur die Umfangsspannungen berechnet werden. Die Rohrlängsspannungen werden nicht mit berücksichtigt.

Dennoch sollte man bei der Berechnung einer erdbetteten Rohrleitung das nötige Grundwissen besitzen bzw. es sich aneignen. Dasselbe gilt für die Benutzung eines der drei Stabwerksmodelle, ohne das nötige Hintergrundwissen für ein Stabwerksprogramm, kann es schnell zu fehlerhaften Eingaben und dadurch zu falschen Ergebnissen kommen.

5 Berechnungen mit unsymmetrischen Belastungen

In Kapitel 5 wird das Stabfedermodell mit unsymmetrischen Belastungen am Rohr untersucht. Mit dieser Vorgehensweise wird untersucht, ob das Modell die zu erwartenden Ergebnisse auch bei nicht doppelsymmetrischer Belastung erbringt. Die Belastungen für das Rohr und die Federkräfte wurden für diese Untersuchung größer angenommen, um eine größere Veränderung für die Auswertung hervorzurufen. Die dabei entstehenden Spannungsverläufe, Spannungsumlagerungen sowie die Verformungen werden untersucht und ausgewertet.

Folgende Ausgangsbelastungen sowie Widerstandsparameter werden verwendet.

Allgemein:

- Material → Stahl S 235
- mittlerer Rohrdurchmesser → $d_m = 500 \text{ mm}$
- Wandstärke → $s = 10 \text{ mm}$
- horizontale Belastung: (Anwendung in Kapitel 5.2)
 - links → $q_{h_links} = 1 \text{ kN/m}$
 - rechts → $q_{h_rechts} = 1 \text{ kN/m}$
- vertikale Belastung: (Anwendung in Kapitel 5.3)
 - oben → $q_{v_oben} = 2 \text{ kN/m}$
 - unten → $q_{v_unten} = 2 \text{ kN/m}$

Im Stabwerksprogramm:

- Profil → 4 KT 10 mm (Vierkantprofil)
- Federkraft → $F_{\text{Feder}} = 15 \text{ kN/m}$

5.1 Modell mit Ausgangsbelastung

Das Grundsystem weist eine doppelsymmetrische Belastung auf (siehe Bild 31). Das bedeutet, dass die Belastungen horizontal wie auch vertikal spiegelbar sind. Die Ergebnisse dienen dem Vergleich in der späteren Auswertung. Anhand dieser Ergebnisse wird die Grundverformung und -spannung festgestellt.

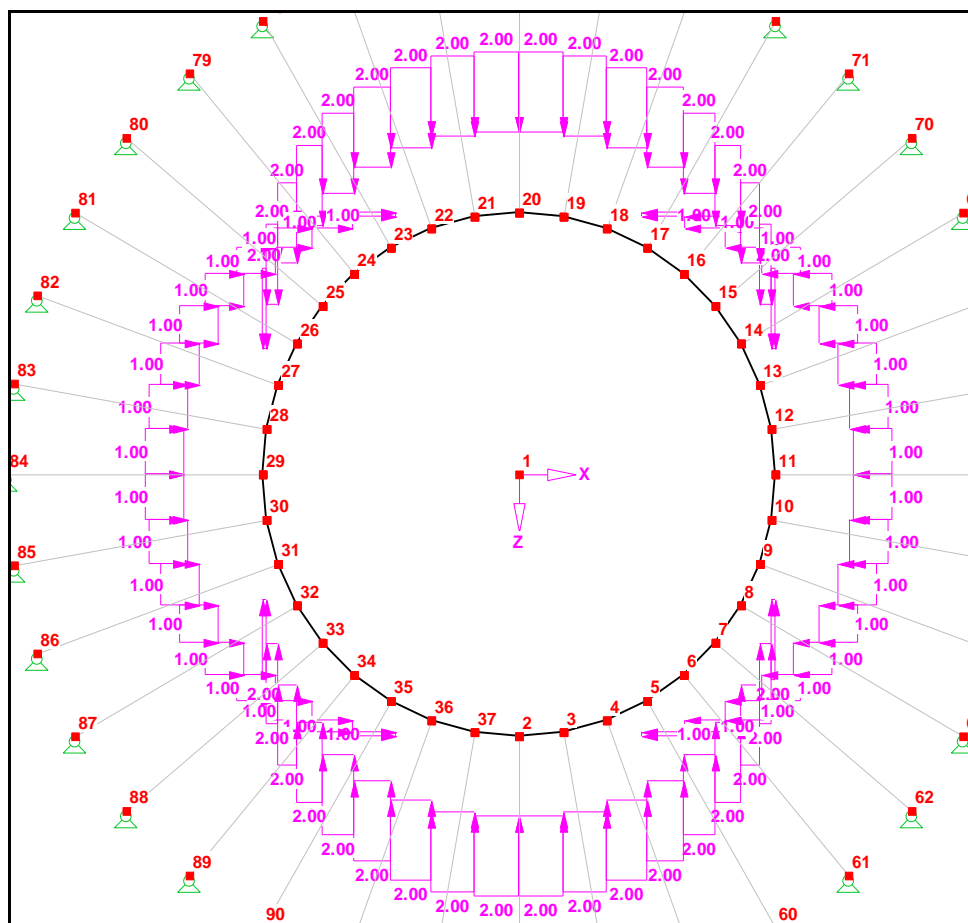


Bild 31: Grundsystem mit doppelsymmetrischer Belastung [RSTAB]

Nachdem das Grundsystem modelliert und berechnet wurde, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse. An den Knoten 11 und 29 wird die horizontale Grundverformung in X-Richtung und die vertikale Verschiebung des Rohres in Z-Richtung gemessen. Für die vertikale Grundverformung werden die Knoten 2 und 20 in Z-Richtung sowie für die horizontale Verschiebung in X-Richtung betrachtet. Die Knoten sind im Bild 31 beschriftet dargestellt.

Im Bild 32 wird der Ausgangsrohrquerschnitt mit dem verformten Querschnitt nach der Berechnung überlagert dargestellt.

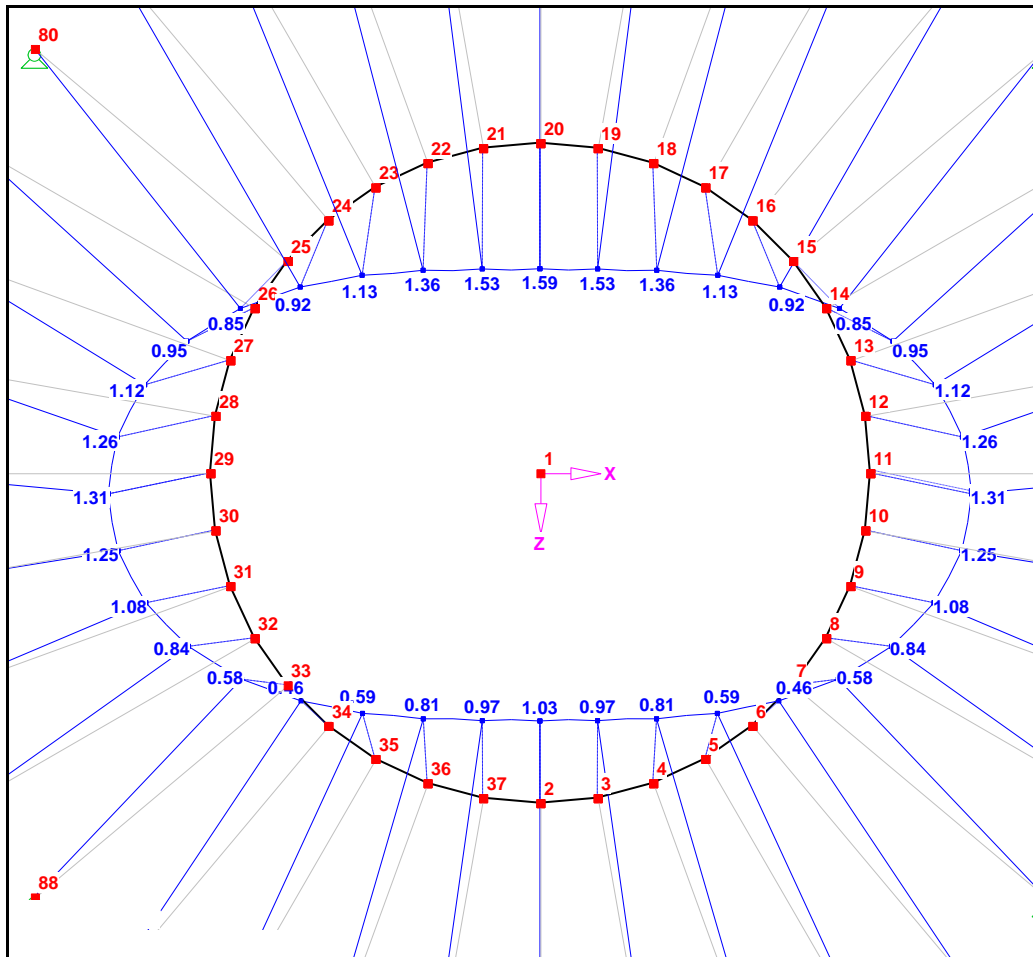


Bild 32: Darstellung der Verformung durch die doppelsymmetrische Belastung [RSTAB]

Im Bild 32 sieht man eine leichte Verschiebung zur Sohle hin, diese resultiert aus dem Eigengewicht des Rohres. Die dargestellten Werte veranschaulichen die Gesamtverschiebung in X- und Z-Richtung. Die Verschiebung wird an den Knoten größer sein, an denen die Federn wegen vorhandener Zugkräfte ausfallen, weil dort die Verschiebung nicht behindert wird. Die anschließenden Stäbe in den Bereichen Scheitel, Kämpfer und Sohle werden für die Spannungsänderung betrachtet.

Die im Bild 33 dargestellten Werte zeigen die Spannungsauslastung in Prozent an. Dabei wird die vorhandene Spannung in den einzelnen Stäben durch die Grenzspannung ($\sigma_{Rd} = 21.82 \text{ kN/cm}^2$ für S 235) dividiert. Der Verlauf der Auslastung infolge der vorhandenen Spannung wird im Bild 33 gezeigt.

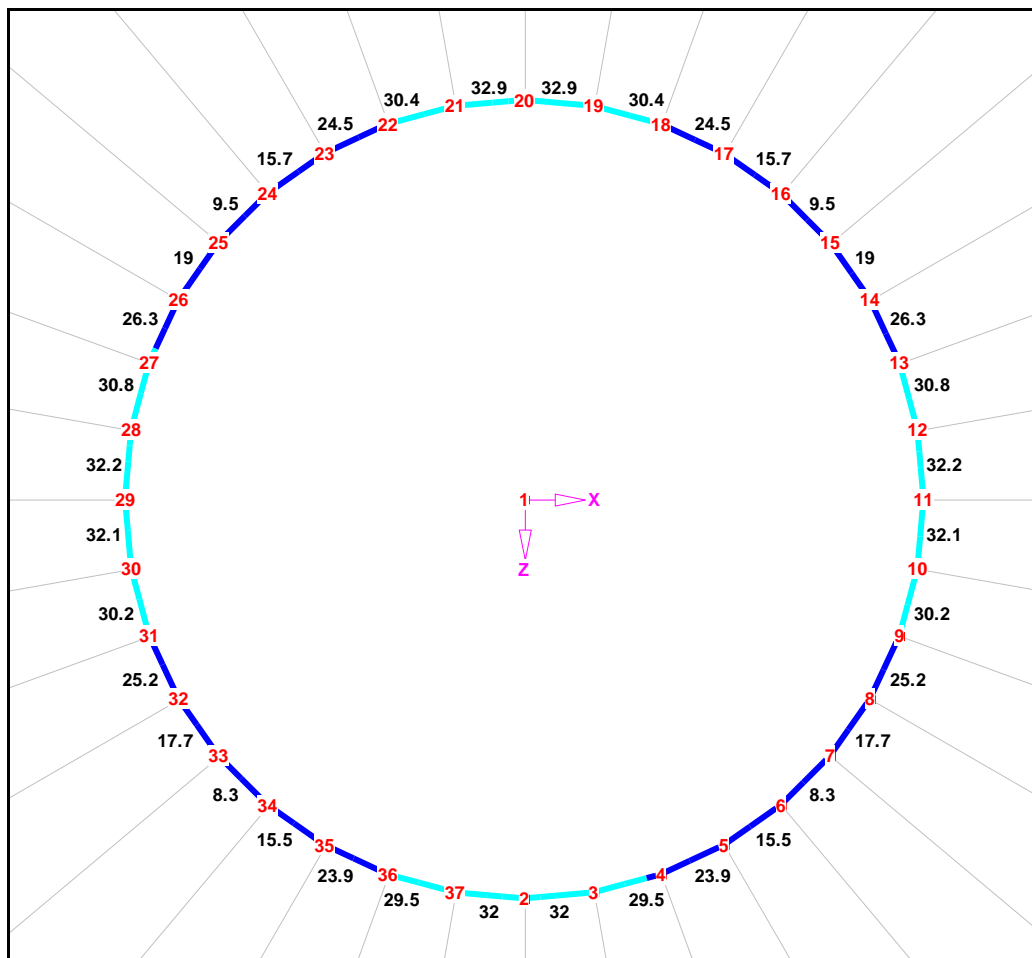


Bild 33: Darstellung der Auslastung infolge der Spannung [RSTAB]

Wie im Bild 33 zu sehen ist, liegt aufgrund der doppelsymmetrischen Belastung auch eine doppelte Symmetrie im Spannungsverlauf vor. Die kleinen Unterschiede zwischen Sohle und Scheitel resultieren auch aus dem Eigengewicht des Rohrs. Die Auslastungen im Scheitel, Kämpfer und in der Sohle sind annähernd gleich groß, wobei die Hauptauslastung im Rohrscheitel liegt.

5.2 Einfachsymmetrische Belastung

In Kapitel 5.2 wird die horizontale Belastung q_{h_rechts} in fünf Schritten jeweils um 20 % der Ausgangsbelastung (um 0.2 kN/m) verringert. Diese Anwendung soll eine nicht vorhandene Bettung oder eine zerstörte Bettung durch das Ziehen der Spundwände simulieren. Dadurch ist die Verdichtung der Zone nicht mehr gegeben und das Rohr wird infolge des seitlichen Erddruckes weniger belastet. Es ist eine horizontale Verschiebung in Richtung der geringeren Belastung sowie unterschiedliche Spannungen in den Kämpferbereichen zu erwarten.

5.2.1 Erster Schritt

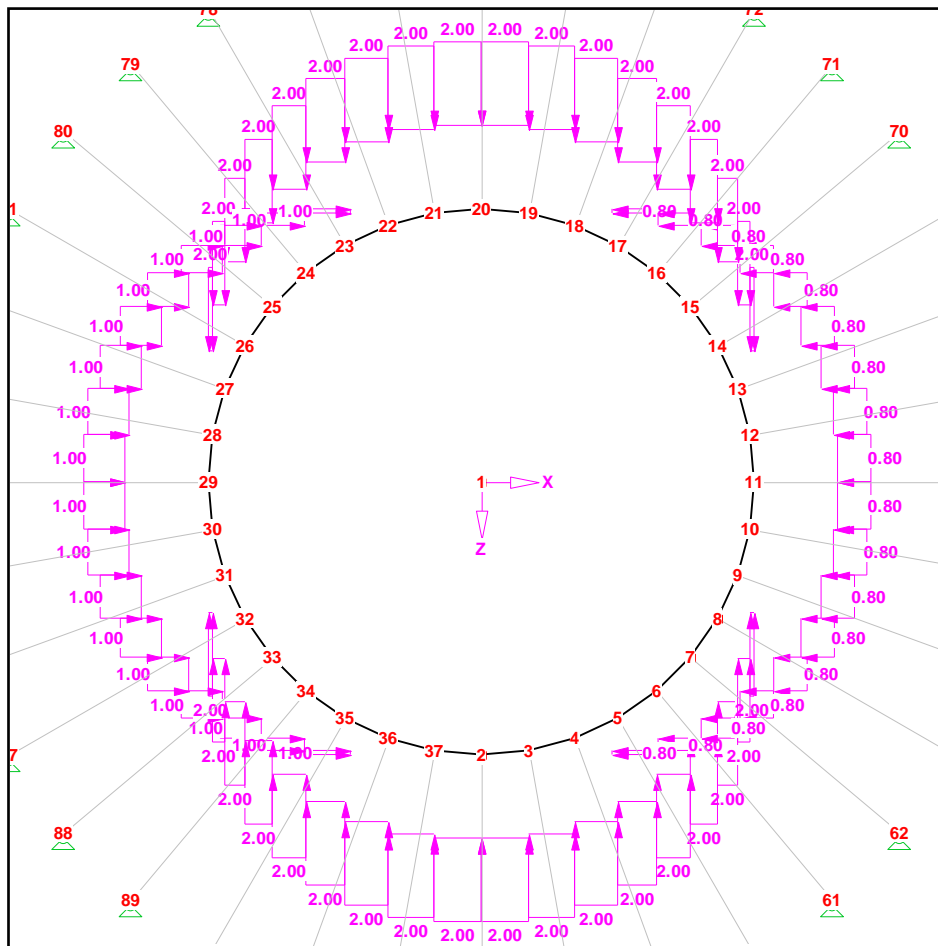


Bild 34: Belastung im 1. Schritt [RSTAB]

Das Bild 34 stellt die verringerte Belastung auf der rechten Kämpferseite dar.

Die folgenden Bilder mit Darstellung der Belastung, der Verformung und der Spannungsauslastung sollen die Schrittfolgen und den Ablauf der Simulation veranschaulichen. Im folgenden Bild 35 ist die Verformung aufgrund der Verringerung von q_{h_rechts} um 20% dargestellt.

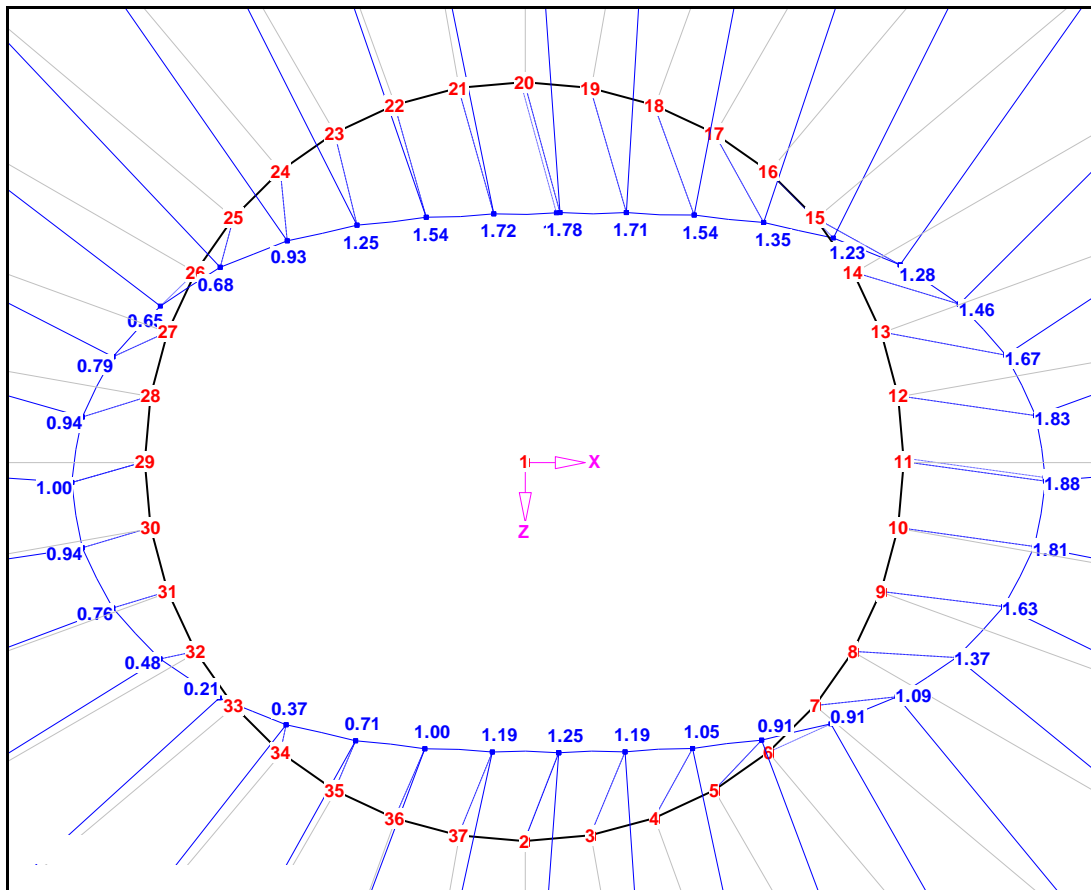


Bild 35: Verformung nach dem 1. Schritt [RSTAB]

Wie zu erwarten ist, zeigt sich eine leichte Verschiebung in positive X-Richtung nach der ersten Verringerung der Belastung.

Im Bild 36 zeigt sich die Auswirkung der ersten Belastungsverminderung auf die Auslastung der Spannung. Im linken Kämpferbereich ist die Auslastung etwas größer als im rechten.

Aufgrund des geringeren Gegendruckes von q_{h_rechts} wird die Verformung horizontal sowie vertikal betragsmäßig größer ausfallen, als bei doppelsymmetrischer Belastung. Dadurch steigt die Spannung in allen Bereichen des Rohres an.

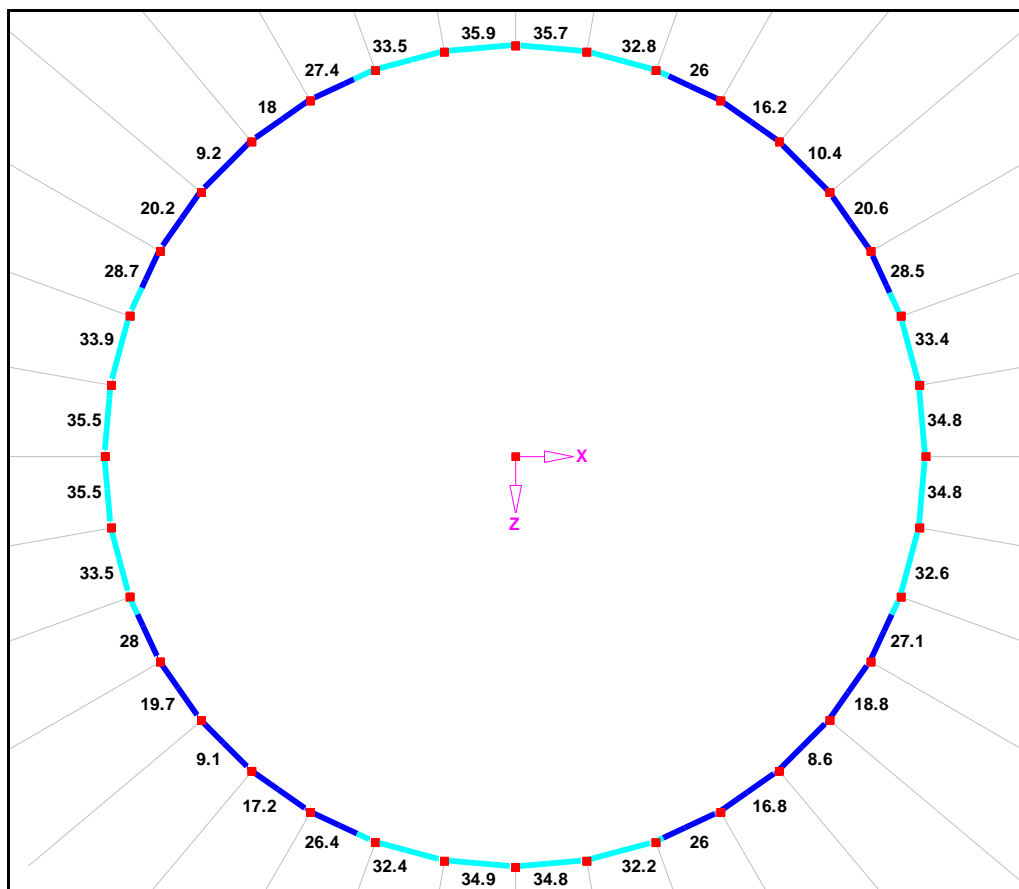


Bild 36: Spannungsauslastung nach dem 1. Schritt [RSTAB]

Vergleicht man die Spannungsauslastung aus Bild 33 mit Bild 36 so erkennt man, dass der Spannungsanstieg und die Spannungsunterschiede im linken Kämpferbereich größer als im rechten Kämpferbereich ausfallen.

Die Schritte zwei bis fünf werden in Form von Bildern dargestellt.

5.2.2 Zweiter Schritt

Im zweiten Schritt wird die Belastung q_{h_rechts} auf 0,6 kN/m reduziert, wie im nachfolgenden Bild 37 dargestellt ist.

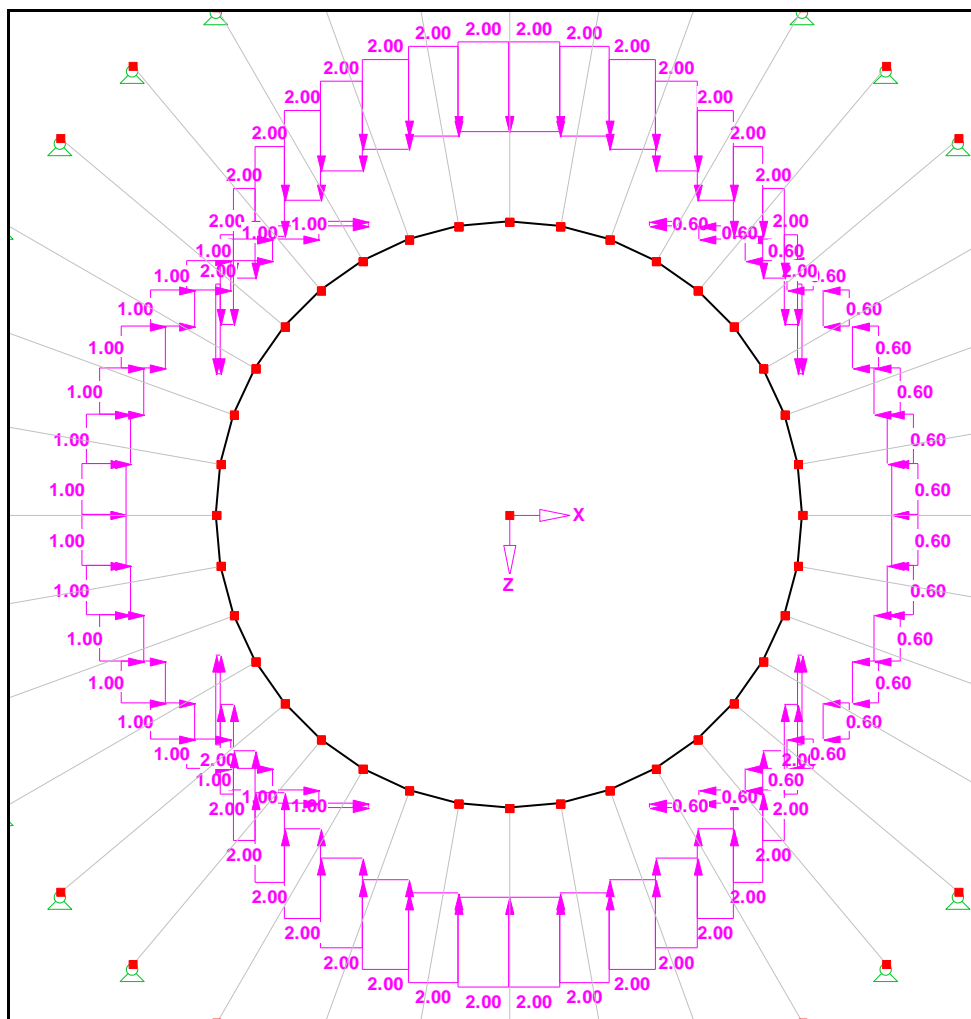


Bild 37: Belastung im 2. Schritt [RSTAB]

Die daraus resultierende Verformung wird im Bild 38 veranschaulicht.

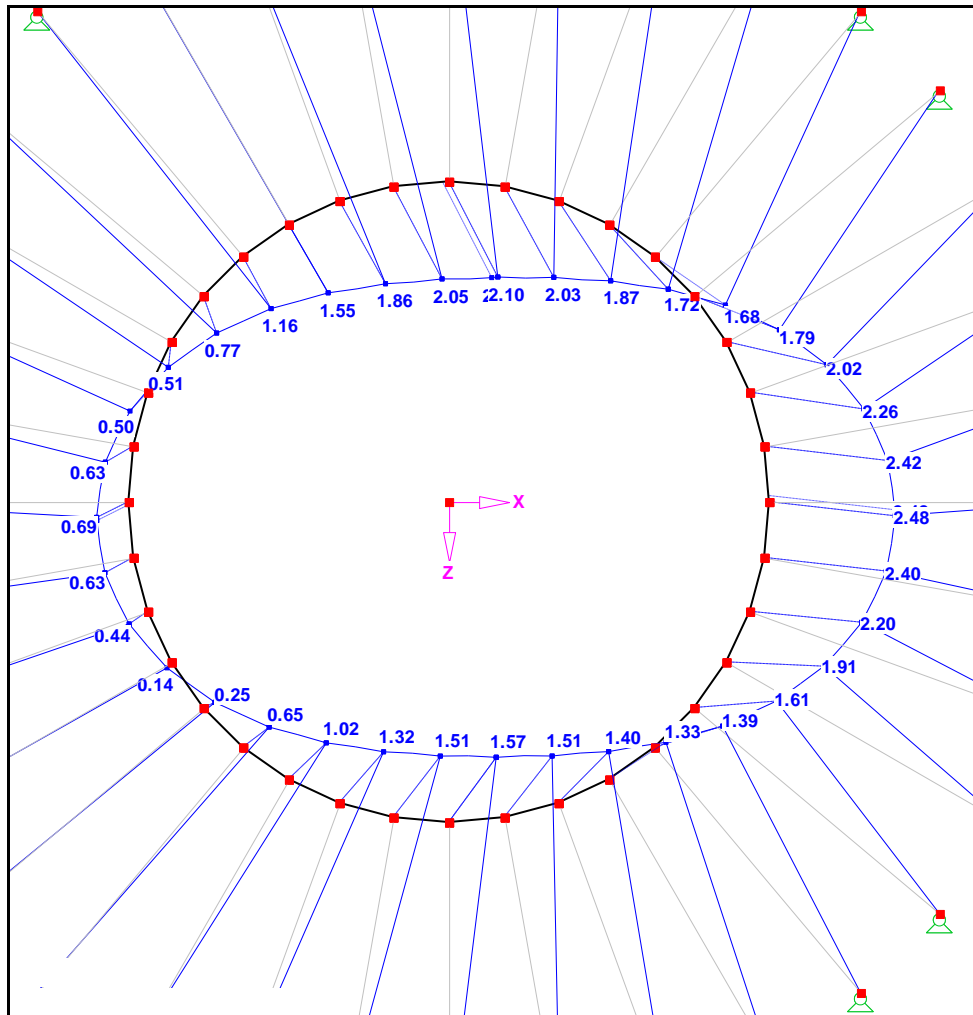


Bild 38: Verformung nach dem 2. Schritt [RSTAB]

Analog zu Kapitel 5.2.1 steigt die Verschiebung in positive X-Richtung weiter an.

Die aus der weiteren Abminderung von q_{h_rechts} entstehenden Spannungsauslastungen werden im Bild 39 dargestellt.

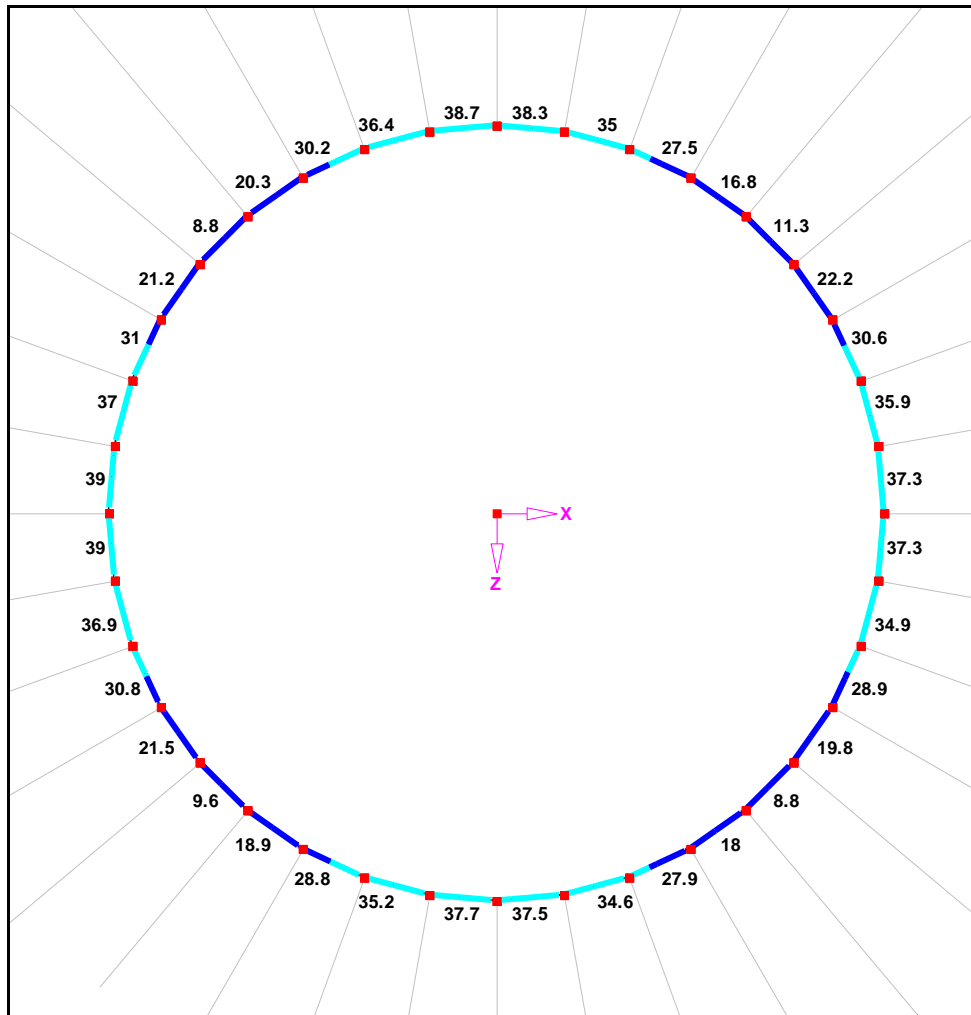


Bild 39: Spannungsauslastung nach dem 2. Schritt [RSTAB]

Die Auslastung der Spannung steigt weiter an, das heißt, dass auch die Verformungen weiter angestiegen sind. Aus Bild 39 kann man erkennen, dass die Spannungsauslastung im linken Kämpferbereichen jetzt größer als im Rohrscheitel ist.

5.2.3 Dritter Schritt

Im dritten Schritt beträgt die Belastung q_{h_rechts} nur noch 0,4 kN/m und ist im unteren Bild 40 dargestellt.

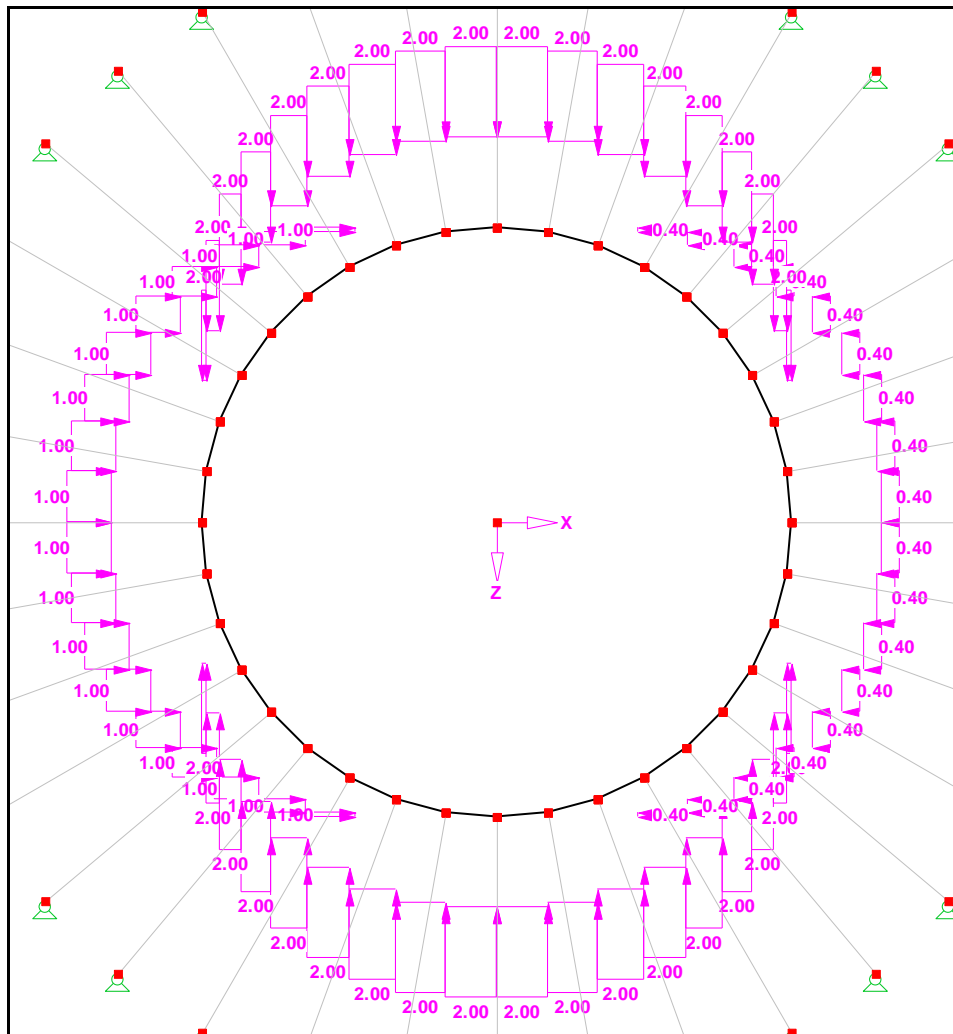


Bild 40: Belastung im 3. Schritt [RSTAB]

Die Ausgangsform mit der Überlagerung der berechneten Verformung nach dem 3. Schritt wird im folgenden Bild 41 gezeigt.

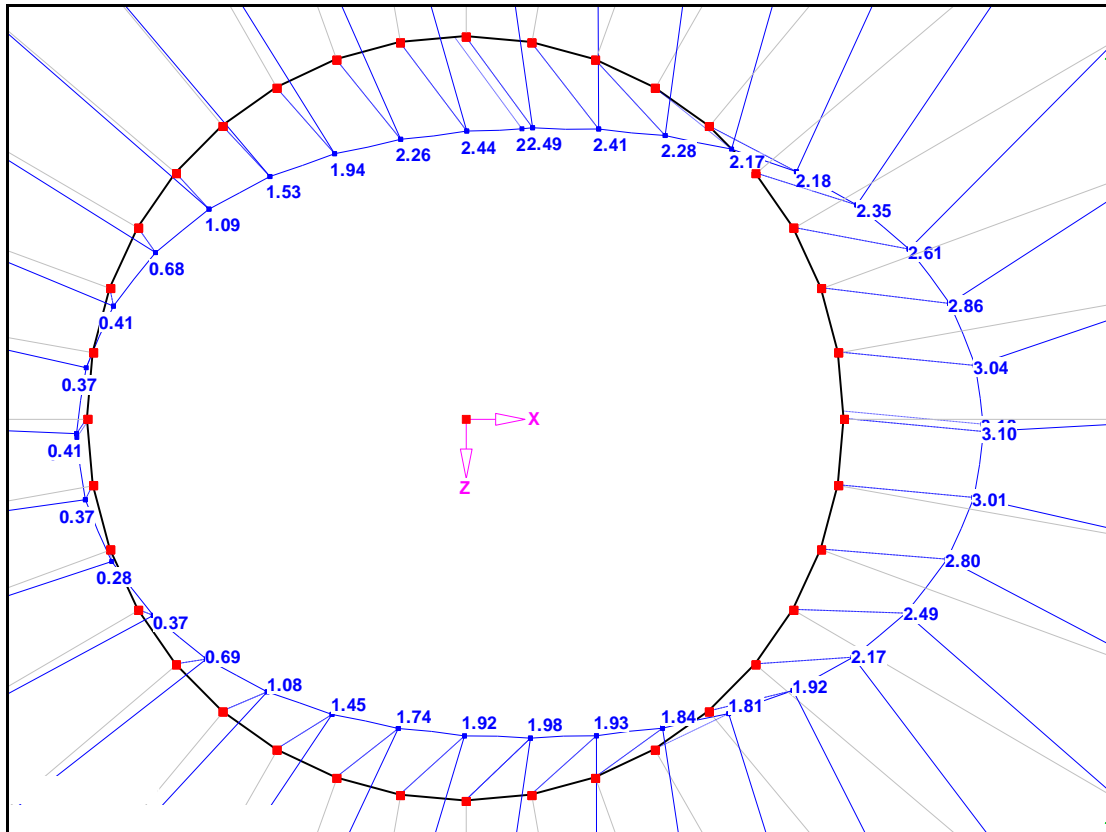


Bild 41: Verformung nach dem 3. Schritt [RSTAB]

Das Bild 41 zeigt, dass die Verschiebung und die Verformung in X-Richtung zu nehmen.

Die Auslastung der Spannung steigt weiter kontinuierlich an und wird im unteren Bild 42 dargestellt.

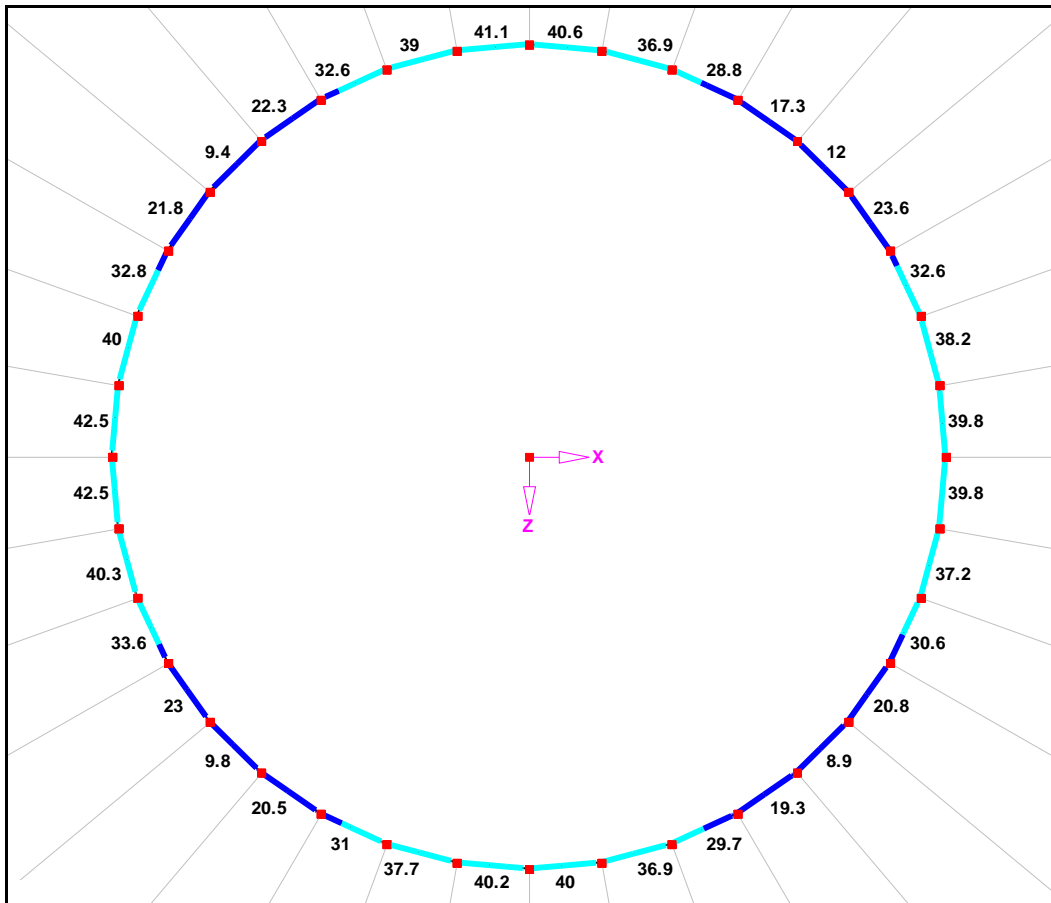


Bild 42: Spannungsauslastung nach dem 3. Schritt [RSTAB]

Vergleicht man die Spannungsauslastungen aus dem ersten und zweiten Schritt mit dem Bild 42, wird ersichtlich, dass der Spannungsanstieg im linken Kämpferbereich höher ist, als in den anderen Rohrzonon.

5.2.4 Vierter Schritt

Die horizontale Belastung q_{h_rechts} wird auf 0,2 kN/m verringert und ist im folgenden Bild 43 zu sehen.

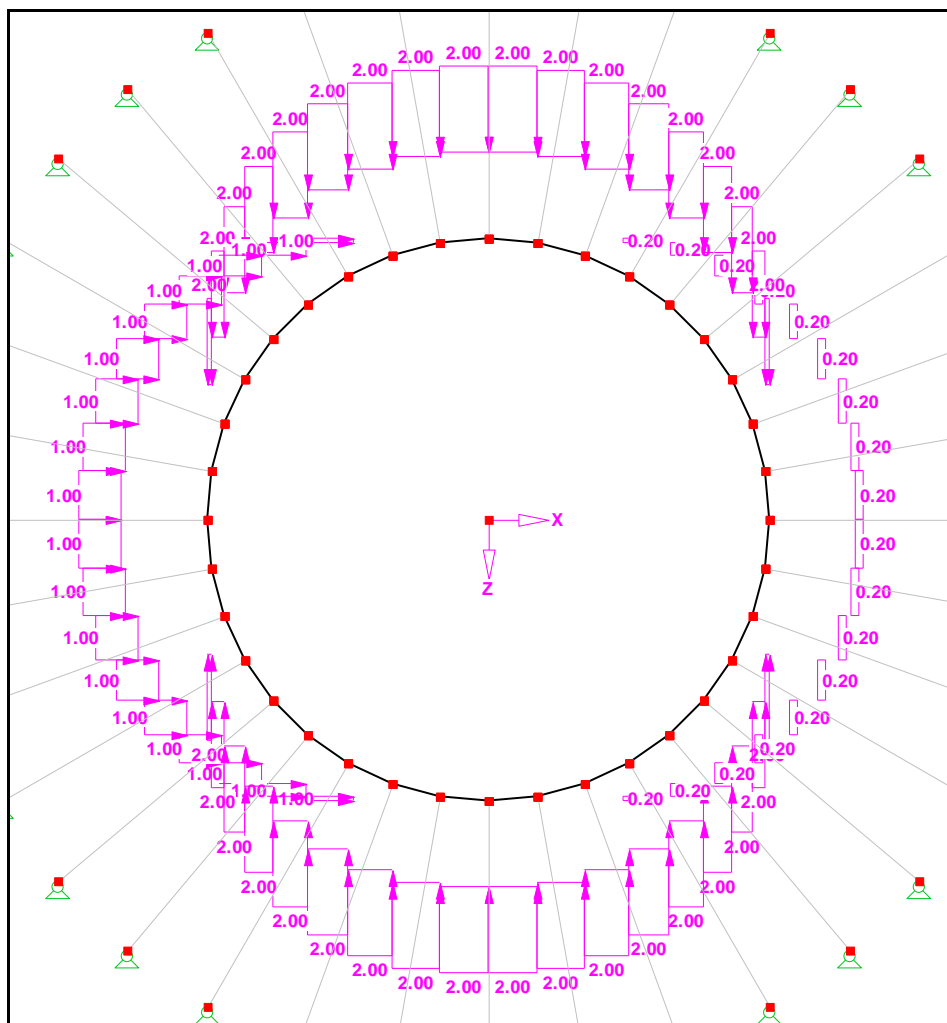


Bild 43: Belastung im 4. Schritt [RSTAB]

Die Verformung aus dem vierten Schritt wird im nachfolgenden Bild 44 dargestellt.

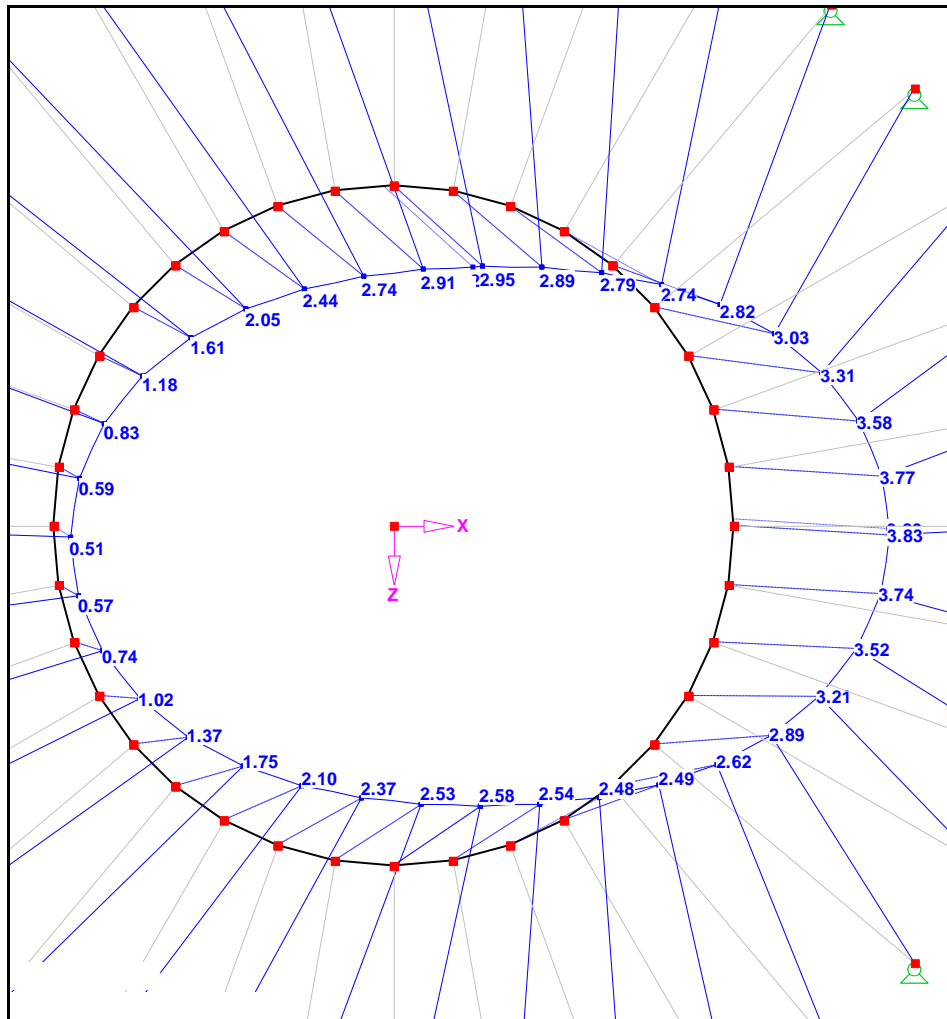


Bild 44: Darstellung der Verformung nach dem 4. Schritt [RSTAB]

Aus Bild 44 wird ersichtlich, dass sich der linke Kämpferbereich trotz Verformung ganz in X-Richtung verschoben hat. Das bedeutet, dass die Verschiebung in X-Richtung größer ist als die halbe horizontale Verformung. Somit ist die Verformung nicht mehr so stark angestiegen. Demzufolge dürfte der Spannungsanstieg im nachfolgenden Bild 45 auch nicht mehr so groß sein.

Die Spannungsauslastung vom vierten Schritt ist im Bild 45 zu sehen.

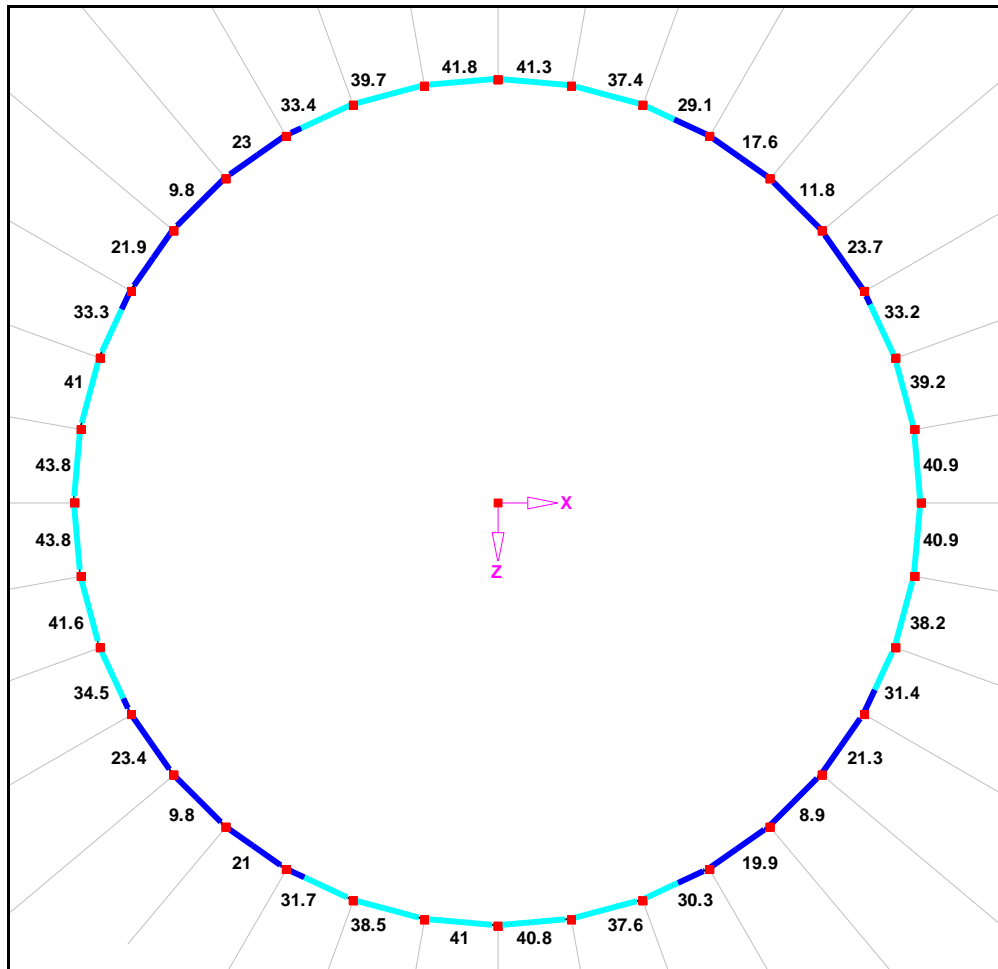


Bild 45: Spannungsauslastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]

Vergleicht man die Bilder 36, 39 und 42 mit dem Bild 45, so erkennt man, dass die Spannungsauslastungen geringer angestiegen sind.

5.2.5 Fünfter Schritt

Im fünften Schritt entfällt die horizontale Belastung q_{h_rechts} (siehe Bild 46).

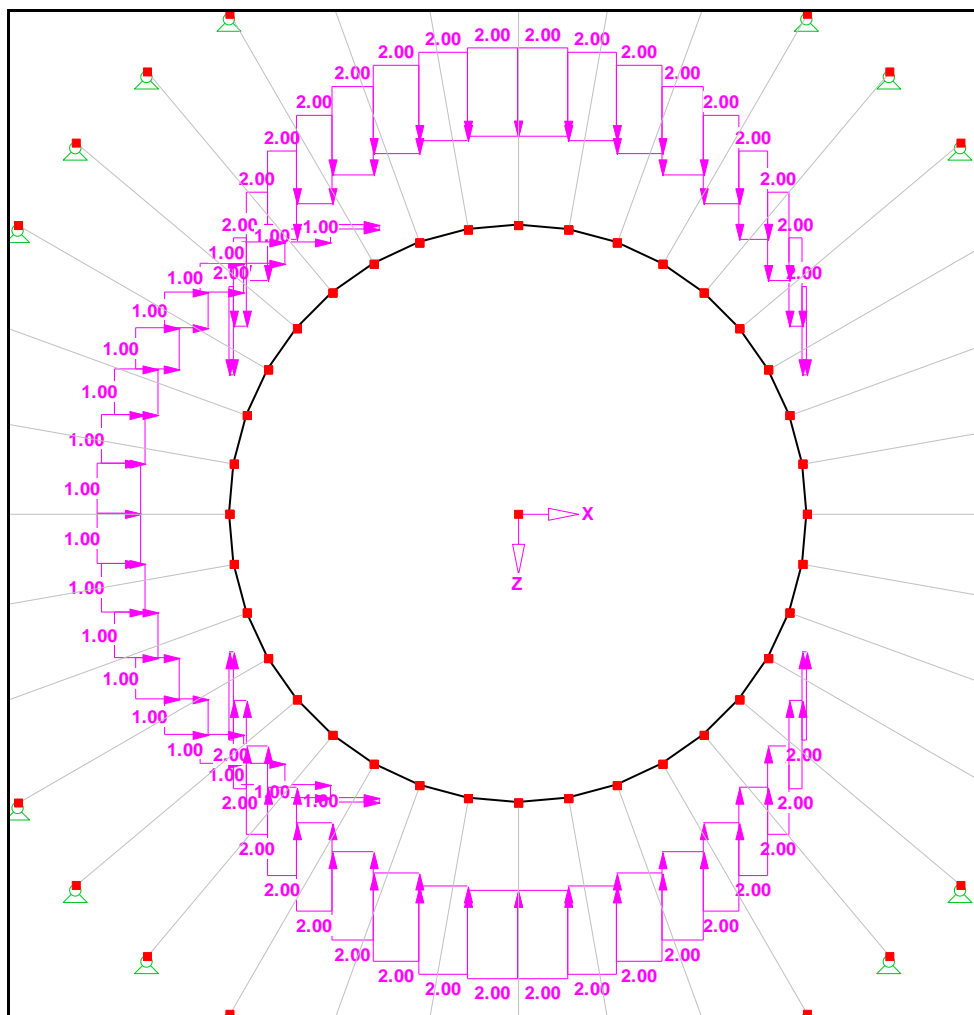


Bild 46: Belastung im 5. Schritt [RSTAB]

Im fünften Schritt, ohne die rechte horizontale Belastung, ist eine große Verschiebung in X-Richtung zu verzeichnen (siehe Bild 47).

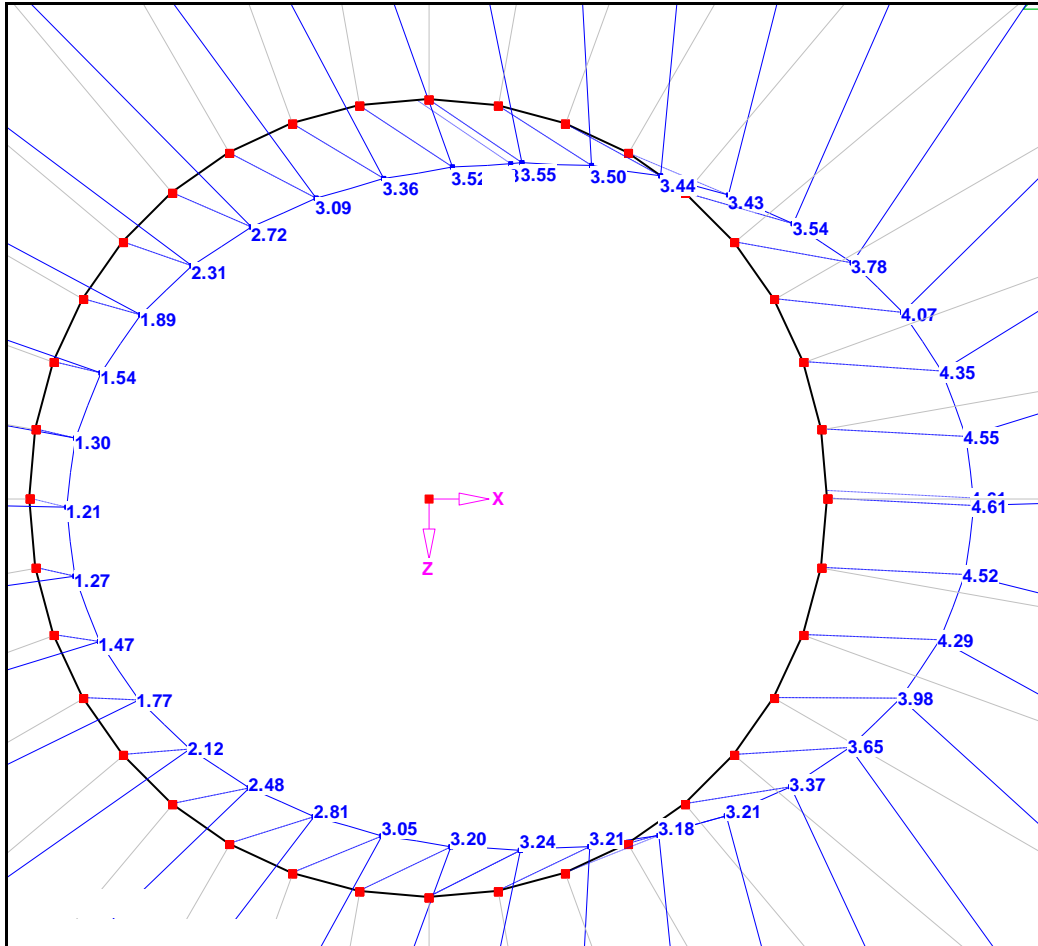


Bild 47: Darstellung der Verformung nach dem 5. Schritt [RSTAB]

Aus Bild 47 wird anhand der abgebildeten Verformungswerte ersichtlich, dass die Verschiebung weiter angewachsen ist und die Verformung sich nur sehr gering verändert hat. Demnach dürften die Spannungen auch nur eine leichte Veränderung aufweisen.

5.2.6 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt und beziehen sich auf die im Kapitel 5.2 berechneten Rohrbelastungen. Die Auswertung soll die Veränderungen des Rohres in den bestimmten Bereichen widerspiegeln.

Tabelle 11: Darstellung der Ergebnisse aus Kapitel 5.2

Abminderung der rechten horizontalen Belastung							
q_{h_rechts} in kN/m		1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
Scheitel	innen	65,87	72,74	79,16	84,74	86,34	86,58
	außen	-71,86	-78,36	-84,46	-89,76	-91,28	-91,52
	Δ in %	0,00%	9,74%	18,86%	26,78%	29,05%	29,40%
Kämpfer links	innen	-70,16	-77,47	-85,12	-92,76	-95,66	-95,98
	außen	59,87	67,37	75,16	82,9	85,85	86,14
	Δ in %	0,00%	11,47%	23,43%	35,34%	39,87%	40,34%
Kämpfer rechts	innen	-70,16	-75,87	-81,50	-86,89	-89,32	-91,08
	außen	59,87	65,82	70,57	75,58	77,54	78,77
	Δ in %	0,00%	9,04%	17,02%	25,04%	28,41%	30,69%
Sohle	innen	63,62	70,46	76,85	82,55	84,43	84,67
	außen	-69,72	-76,19	-82,25	-87,68	-89,48	-89,72
	Δ in %	0,00%	10,02%	19,38%	27,76%	30,53%	30,89%
Verformung	Δh	2,57	2,83	3,08	3,32	3,39	3,42
	Δv	-2,62	-2,88	-3,13	-3,36	-3,43	-3,45
	Δ in %	0,00%	10,02%	19,66%	28,71%	31,41%	32,38%
Verschiebung	in X	0	0,47	0,96	1,48	2,18	2,94
	in Z	0,27	0,27	0,31	0,34	0,29	0,29

Die Spannungen sind in [N/mm²] und die Verschiebung sowie die Verformung in [mm] angegeben.

Wie man anhand der Tabelle 11 erkennen kann, nimmt die Verschiebung in X-Richtung kontinuierlich zu, wobei die Verschiebung in Z-Richtung nur minimale Veränderungen aufweist.

Durch die Reduzierung des rechten Bettungsreaktionsdruckes werden die Verformungen zur rechten Seite nicht mehr behindert. Die Verformungen nehmen wie erwartet zu. Die Stabfedern bekommen zunehmend mehr Beanspruchung und erbringen dabei die Gegenreaktion. Im Prinzip wird der Boden rechts neben dem Rohr durch die Verformung und Verschiebung verdichtet. Dadurch ist die Zunahme der Verformung gegen Ende nur noch gering.

Die Spannungen verhalten sich analog den Verformungen. Bis "0,4 kN/m" steigen die Spannungswerte kontinuierlich stark an, dann flacht der Spannungsanstieg ebenfalls ab. Die Spannungszunahme ist im linken Kämpferbereich deutlich höher als die anderen betrachteten Rohrzonenn. Diese erhöhte Spannungszunahme ist mit einer erhöhten Verformung zu begründen. Durch die Verschiebung in X-Richtung treten im linken Kämpferbereich in den Stabfedern Zugspannungen auf, die zum Ausfall der Stabfedern führen. Dadurch wird die örtliche Verformung des Rohres zunehmend im rechten Kämpferbereich durch die Stabfedern behindert. Im Gegensatz wird die Verformungsbehinderung im linken Kämpferbereich zunehmend reduziert. Dadurch erhält das Rohr eine Eiform.

5.3 Unsymmetrische Belastung

In Kapitel 5.3 wird nun die untere vertikale Streckenlast q_{v_unten} abgemindert. Dies geschieht analog wie in Kapitel 5.2, mit Belastungsminimierungsschritten von 20% (0,4 kN/m).

Die Ausgangsbelastung ist die nach Bild 46, ohne die rechte horizontale Belastung. Sollten die Veränderungen ähnlich wie in Kapitel 5.2 verlaufen, so müsste die Verformung durch die geringer werdende Belastung auch kleiner werden. Dies hätte zur Folge, dass die Spannungswerte ebenfalls sinken müssten.

Die folgenden Schritte werden wie in Kapitel 5.2 als Bildfolge dokumentiert.

5.3.1 Erster Schritt

Die Belastung q_{v_unten} wird auf 1,6 kN/m reduziert und im folgenden Bild 49 dargestellt.

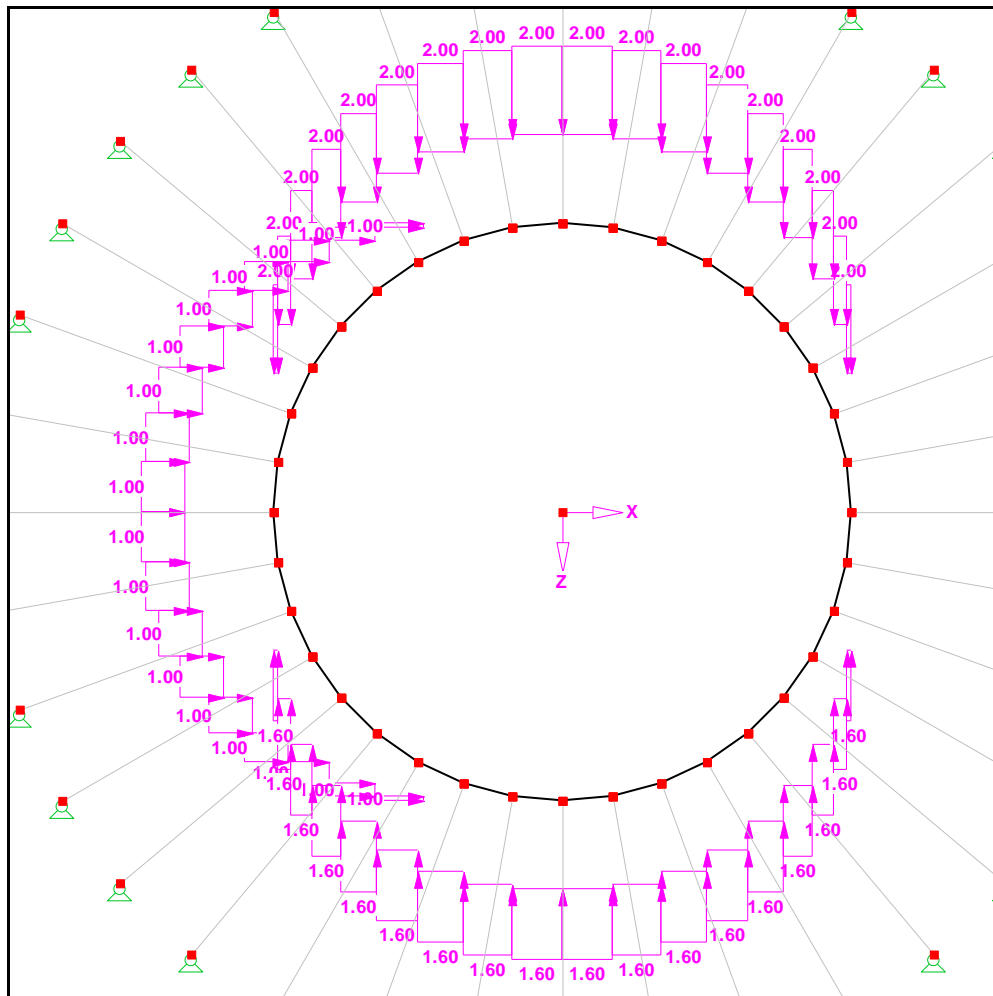


Bild 49: Belastung im 1. Schritt [RSTAB]

Aus dieser unsymmetrischen Belastung ergibt sich die Verformung, die im unteren Bild 50 zu sehen ist.

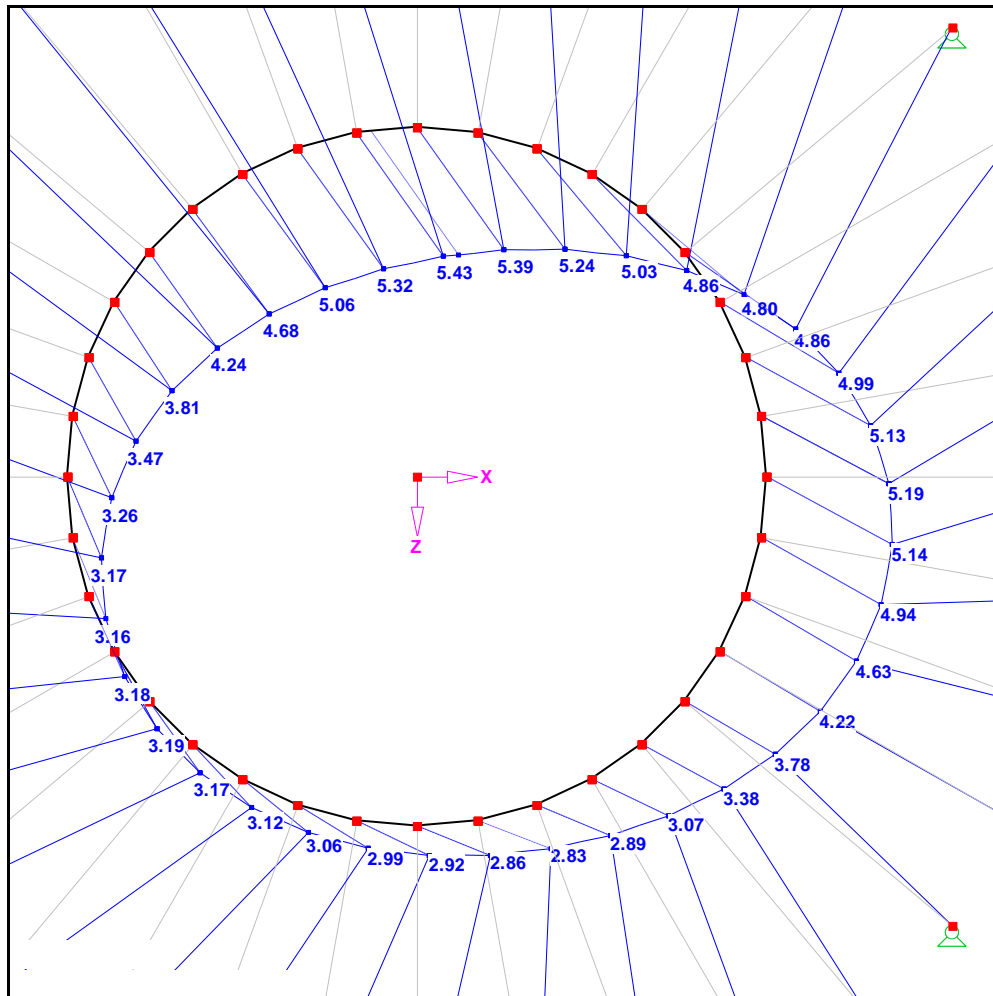


Bild 50: Darstellung der Verformung nach dem 1. Schritt [RSTAB]

In dieser Darstellung aus Bild 50 erkennt man, eine deutliche Verschiebung in X- und Z-Richtung. Eine Aussage über die Verformungsänderung kann man anhand des Bildes nicht treffen.

5.3.2 Zweiter Schritt

Die Belastung q_{v_unten} wird nun um $0,4 \text{ kN/m}$ auf $1,2 \text{ kN/m}$ reduziert. Die Darstellung der Belastung ist im Bild 52 ersichtlich.

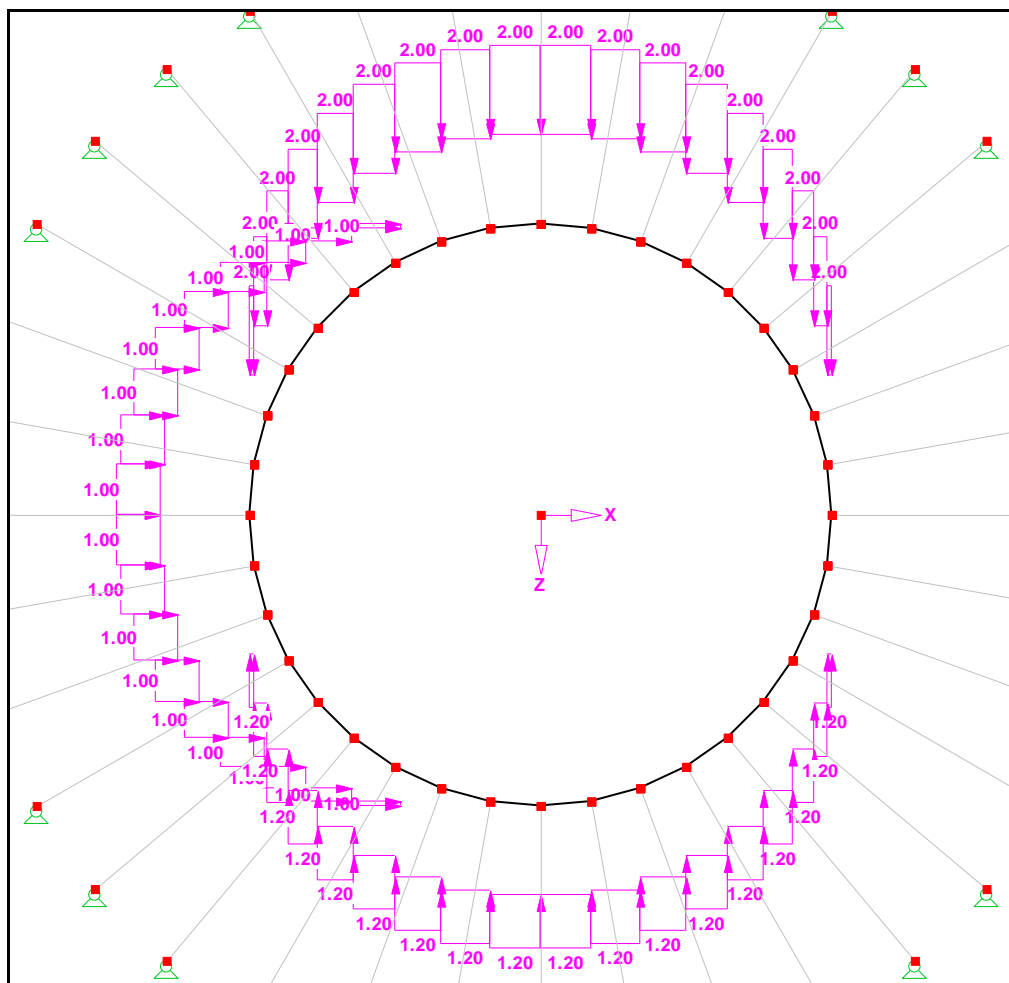


Bild 52: Belastung im 2. Schritt [RSTAB]

Die resultierende Verformung aus der weiteren Reduzierung der unteren vertikalen Belastung wird im nachfolgenden Bild 53 dargestellt.

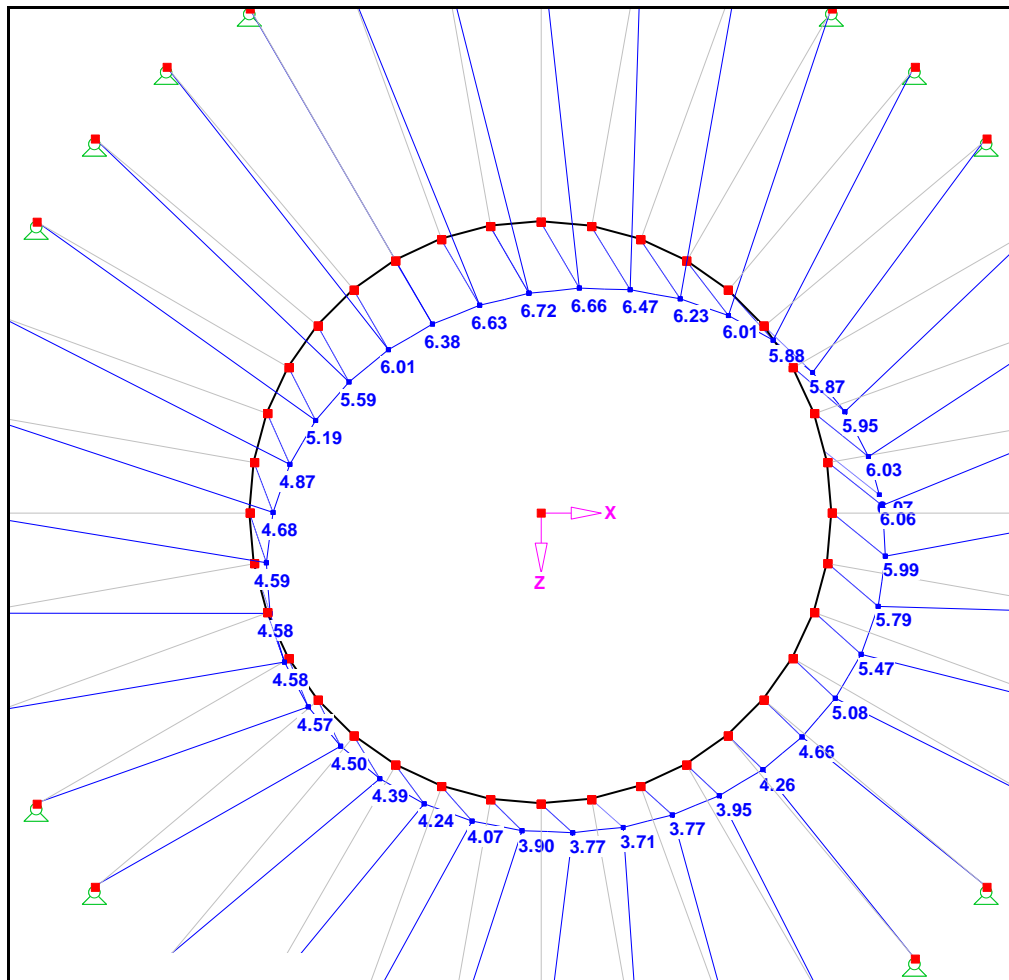


Bild 53: Verformung nach dem 2. Schritt [RSTAB]

Anhand von Bild 53 lässt sich erkennen, dass die Verschiebung diagonal in X-Z-Richtung verläuft. Hingegen ist die Verformung deutlich runder dargestellt, als im Bild 50.

Die Veränderung der Spannungsauslastung wird im Bild 54 dargestellt.

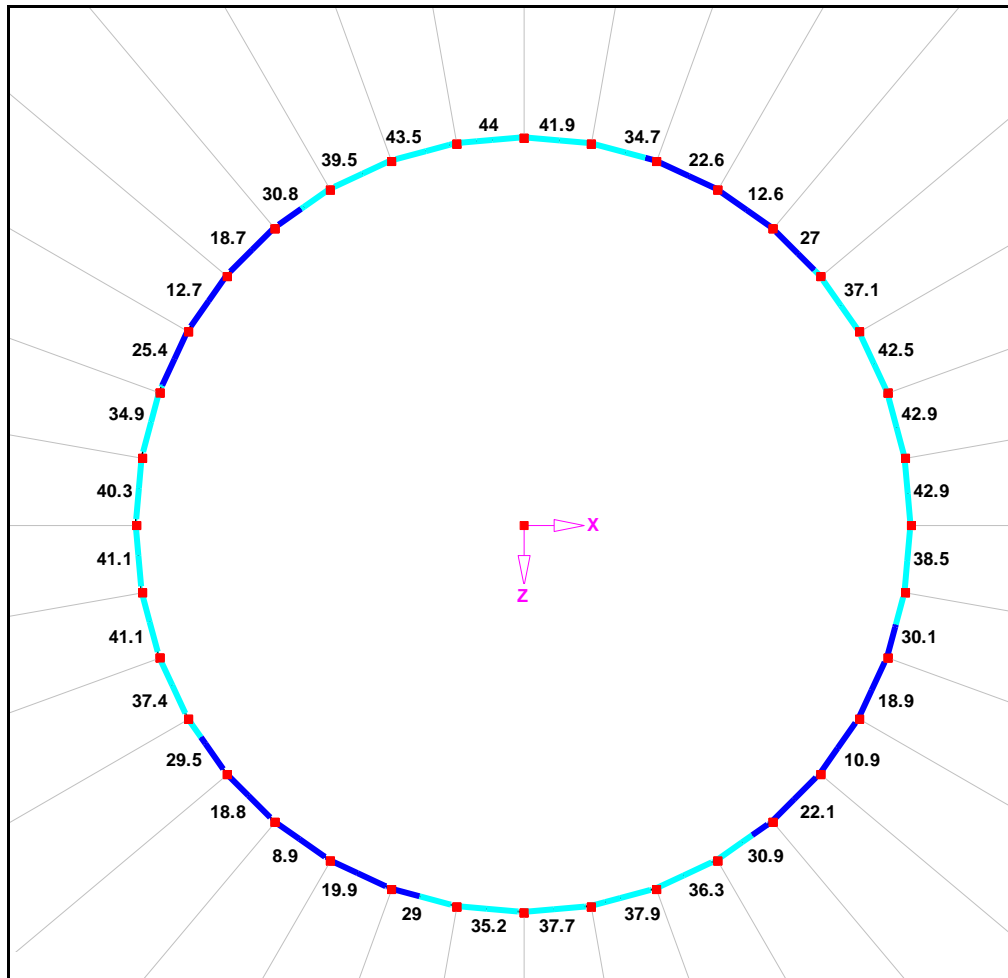


Bild 54: Spannungsauslastung nach dem 2. Schritt [RSTAB]

Wie Bild 54 zeigt, ist die Auslastung der Spannung im Rohrscheitel konstant geblieben, jedoch im rechten oberen Kämpferbereich weiter angewachsen. Die Spannungen in der Rohrsohle sowie im linken Kämpferbereich sind weiter leicht gefallen.

5.3.3 Dritter Schritt

Die Belastung q_{v_unten} wird nur noch 0,8 kN/m betragen und ist im Bild 55 abgebildet.

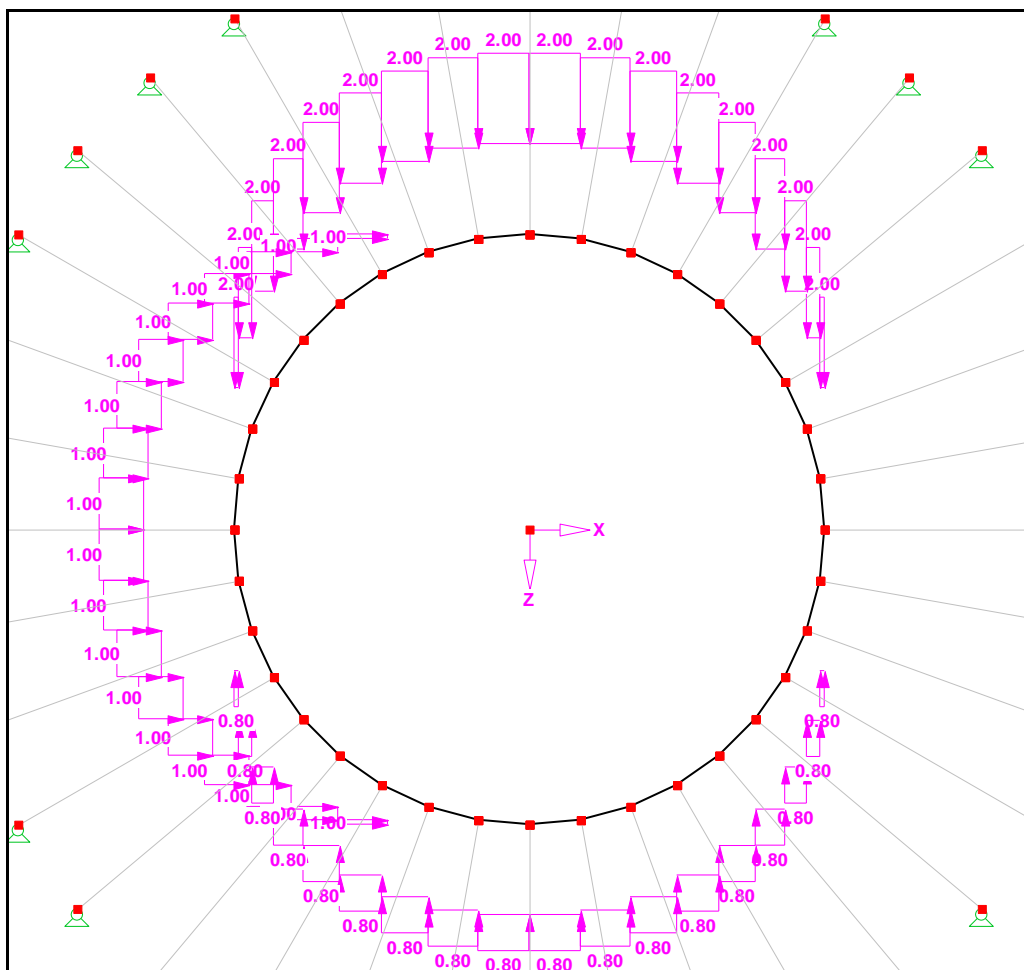


Bild 55: Belastung im 3. Schritt [RSTAB]

Die daraus resultierende Verformung ist im nachfolgenden Bild 56 zu sehen.

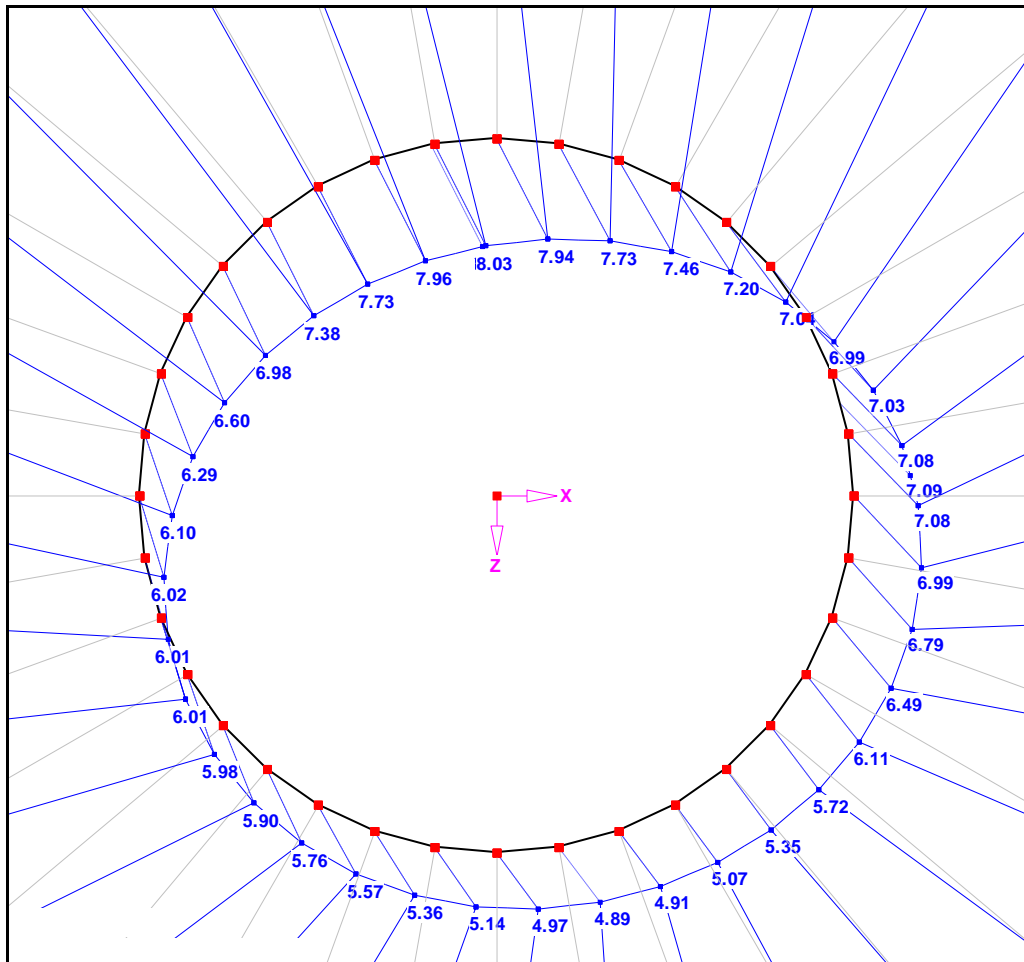


Bild 56: Verformung nach dem 3. Schritt [RSTAB]

Im Bild 56 sieht man, dass die Verschiebung in Z-Richtung weiter zugenommen hat. Über die Verformung und die Verschiebung in X-Richtung lässt sich anhand des oberen Bildes keine Aussage treffen.

Die Spannungsauslastung für den dritten Schritt in Kapitel 5.3 wird im Bild 57 dargestellt.

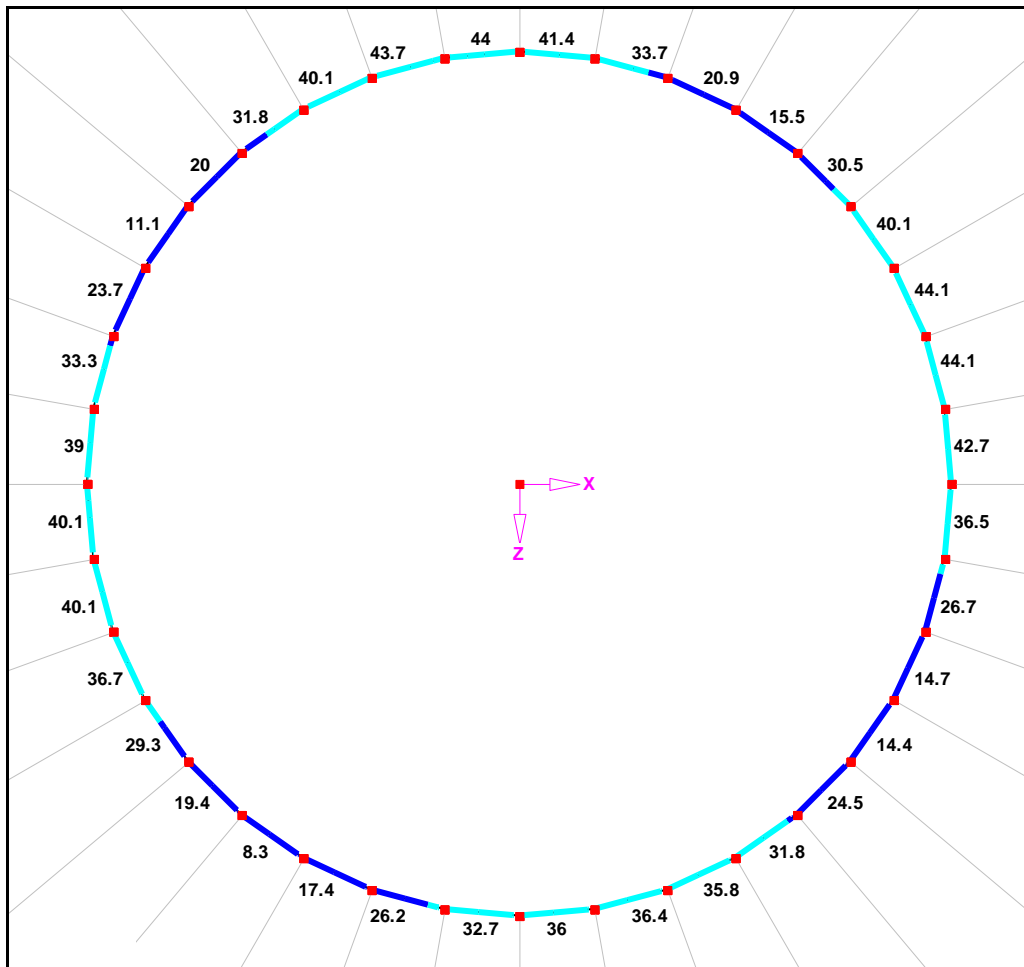


Bild 57: Spannungsauslastung nach dem 3. Schritt [RSTAB]

Im Bild 57 wird eine Verdrehung der Hauptspannungsbereiche erkennbar. Die Spannungen im Rohrscheitel bleiben weiterhin konstant und die Spannungsauslastungen in der Rohrsohle sowie im linken Kämpferbereich sinken kontinuierlich. Der rechte obere Kämpferbereich ist ab diesem Berechnungsschritt am stärksten belastet.

5.3.4 Vierter Schritt

Die Belastung q_{v_unten} wird um die Hälfte auf 0,4 kN/m reduziert. Die Belastung in diesem Berechnungsschritt wird im Bild 58 dargestellt.

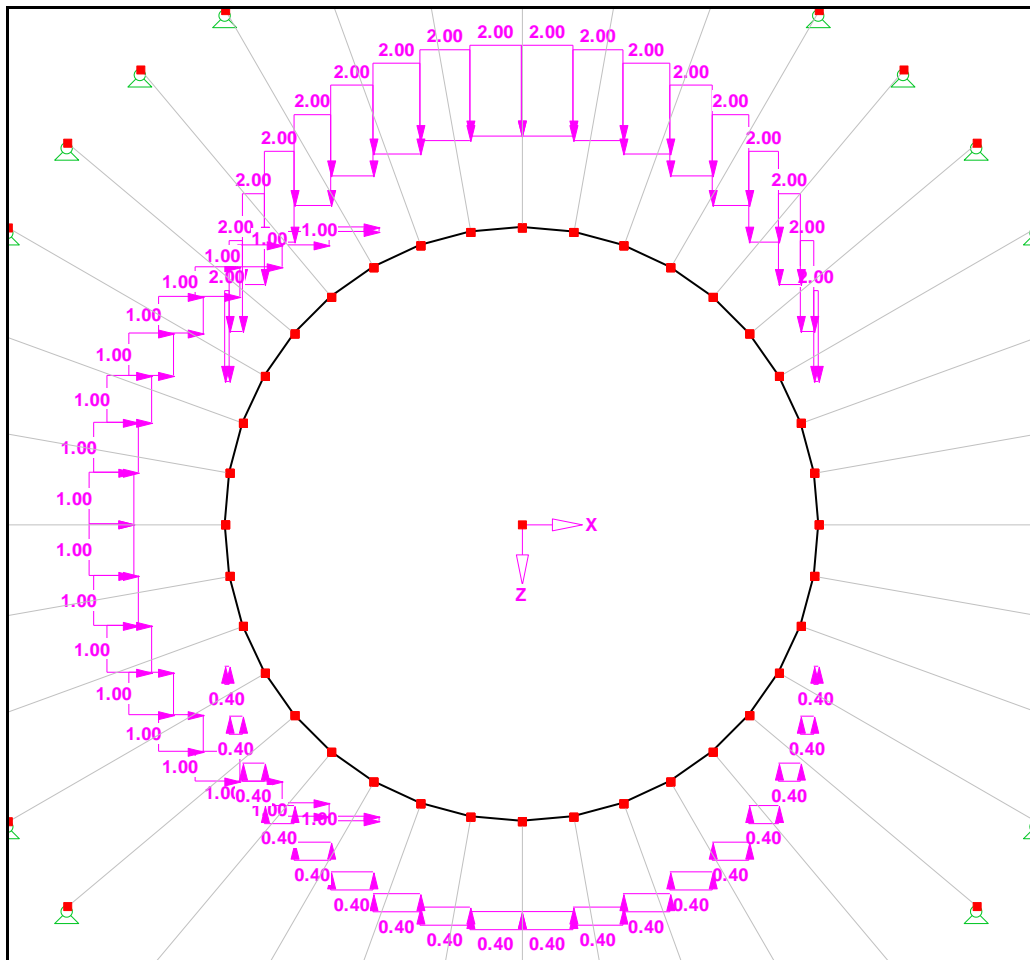


Bild 58: Belastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]

Die aus der weiteren Abminderung von q_{v_unten} entstehenden Spannungsauslastungen werden im Bild 60 dargestellt.

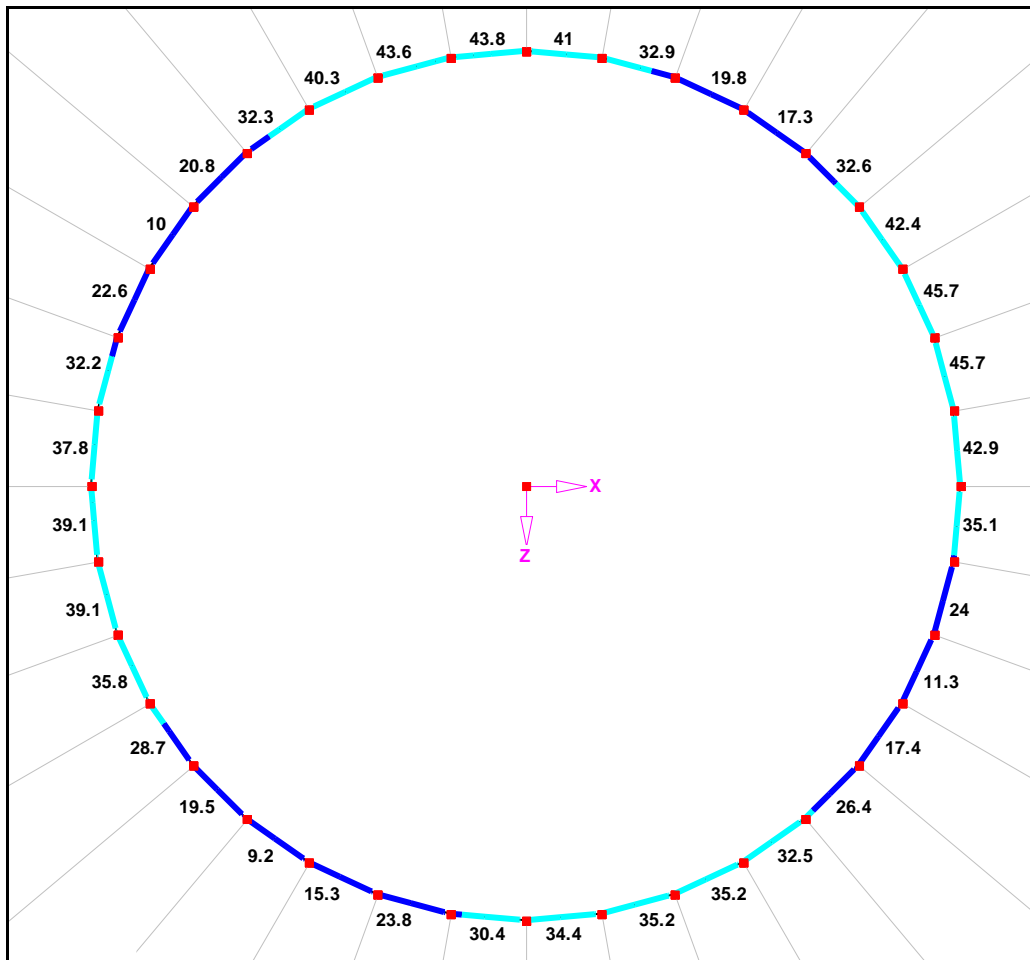


Bild 60: Spannungsauslastung nach dem 4. Schritt [RSTAB]

Die Spannungsauslastung im rechten oberen Kämpfer steigt konstant weiter an, während die Spannungen im Rohrscheitel leicht und im linken Kämpferbereich sowie in der Rohrsohle kontinuierlich gefallen sind.

5.3.5 Fünfter Schritt

Im fünften Schritt wird die vertikale Belastung q_{v_unten} auf null gesetzt.

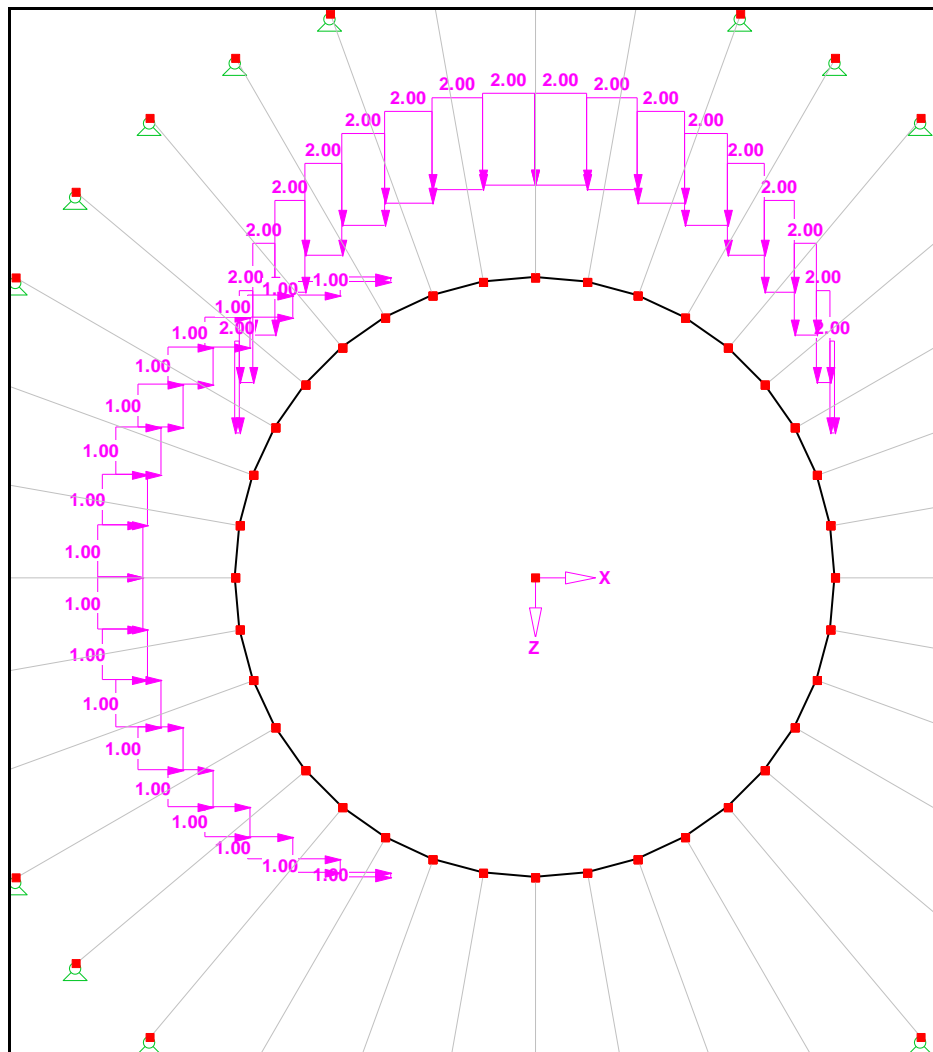


Bild 61: Belastung im 5. Schritt [RSTAB]

Im folgenden Bild 62 ist die Endverformung dargestellt.

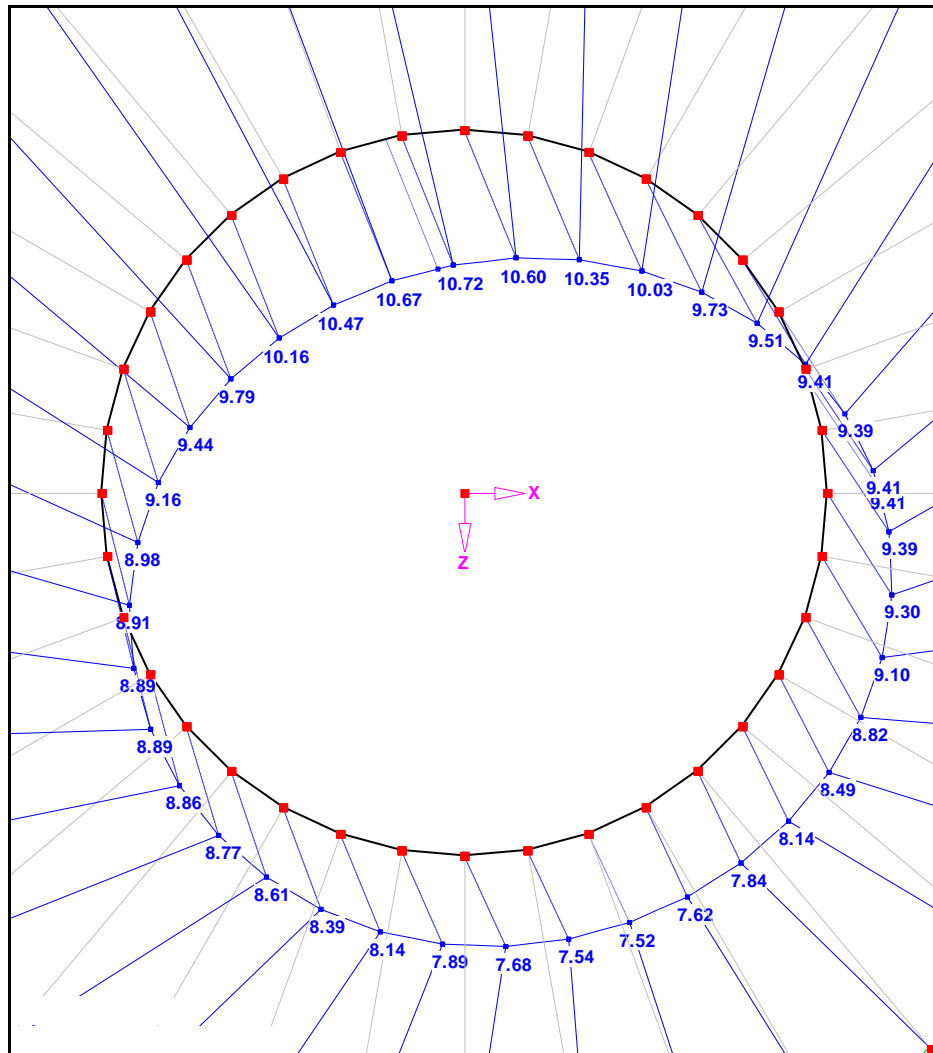


Bild 62: Verformung nach dem 5. Schritt [RSTAB]

Anhand der Verformungsdarstellung vom Bild 62 erkennt man, dass eine starke Verschiebung in Z-Richtung stattgefunden hat. Ein Rückgang der Verformung ist nicht gut erkennbar, dennoch ist die Form der Ellipse geringer ausgebildet.

Die Auslastung der Spannung infolge der letzten Reduzierung ist im Bild 63 zu sehen.

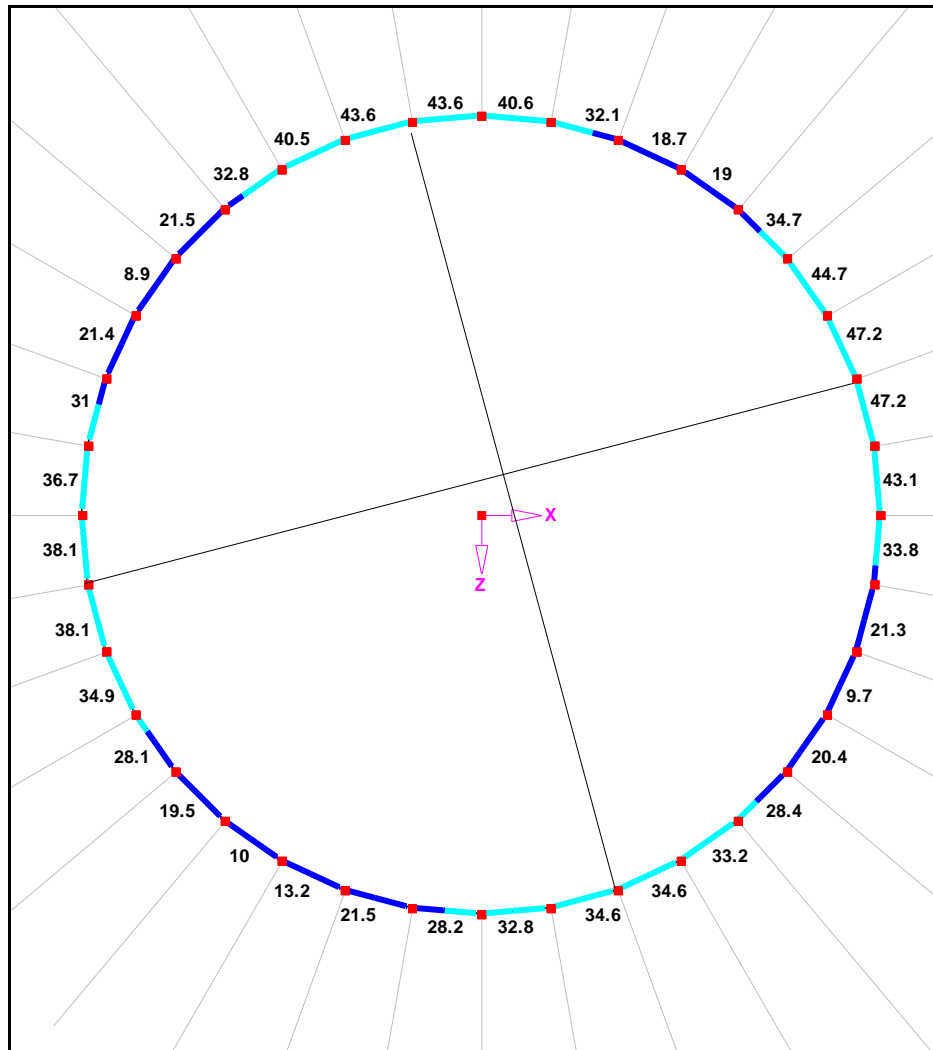


Bild 63: Spannungsauslastung nach dem 5. Schritt [RSTAB]

Betrachtet man Bild 63 so erkennt man, dass die Hauptspannungsbereiche sich deutlich verdreht haben. Die Spannungsauslastung ist im rechten oberen Kämpferbereich auf den Höchstwert angestiegen.

5.3.6 Auswertung der Ergebnisse

Die in Kapitel 5.3 mit dem Stabwerksprogramm berechneten Spannungen und Verformungen infolge der Abminderung von q_{v_unten} werden in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Spannungen infolge der Reduzierung von q_{v_unten}

Reduzierung der unteren vertikalen Belastung							
	q_{v_unten} in kN/m	2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,0
Scheitel	innen	86,58	91,32	91,66	91,59	91,2	90,83
	außen	-91,52	-95,84	-96,11	-95,99	-95,59	-95,2
	Δ in %	0,00%	5,10%	5,44%	5,34%	4,89%	4,46%
Kämpfer links	innen	-95,98	-91,02	-89,72	-87,57	-85,39	-83,2
	außen	86,14	81,63	80,4	78,31	76,15	73,99
	Δ in %	0,00%	-5,20%	-6,59%	-8,93%	-11,32%	-13,71%
Kämpfer rechts	innen	-91,08	-93,48	-93,54	-96,26	-99,65	-103,06
	außen	78,77	81,68	81,78	84,98	88,37	91,76
	Δ in %	0,00%	3,16%	3,26%	6,79%	10,80%	14,82%
Sohle	innen	84,67	80,5	75,85	71,53	67,94	65,75
	außen	-89,72	-86,29	-82,7	-79,36	-76,78	-75,51
	Δ in %	0,00%	-4,37%	-9,12%	-13,53%	-17,09%	-19,09%
Verformung	Δh	3,42	3,29	3,17	3,04	2,92	2,81
	Δv	-3,45	-3,33	-3,21	-3,07	-2,96	-2,84
	Δ in %	0,00%	-3,64%	-7,13%	-11,06%	-14,41%	-17,76%
Verschiebung	in X	2,94	3,15	3,36	3,62	3,81	3,99
	in Z	0,29	2,92	4,35	5,76	7,2	8,64

Die Spannungen sind in $[N/mm^2]$ und die Verschiebung sowie die Verformung in $[mm]$ angegeben.

Wie Tabelle 12 zeigt, ist die Verschiebung in Z-Richtung sehr stark angestiegen, aber auch die Verschiebung in X-Richtung stieg kontinuierlich weiter an.

Die Verformungen gehen wie erwartet zurück, jedoch nicht so deutlich.

Bei den Spannungen sind große Differenzen entstanden. So ist die Spannung im Scheitel nach der ersten Reduzierung von q_{v_unten} um ca. 5% gestiegen, aber in den nächsten Berechnungsschritten relativ konstant geblieben. Dagegen haben sich die Spannungen in den Kämpferbereichen deutlich verändert. Im linken Kämpferbereich verringerte sich die Spannung in etwa analog der Verformung. Jedoch stieg die Spannung im rechten Kämpferbereich weiter an, so dass diese zur maßgebenden Spannung wurde. Der Grund hierfür ist die zunehmende Gegenreaktion der Stabfedern, diese sind durch die Reduzierung von q_{h_rechts} vorbelastet und erbringen dadurch einen größeren Gegendruck.

Die Spannung in der Sohle reduziert sich in etwa analog der Verformung. Die Stabfedern müssen die steigende Belastung aufnehmen, dabei erbringen sie noch nicht den vollen Gegendruck.

Wenn bei einer Rohrleitung in einem kleinen Bereich die Bettung zerstört wurde und es an dieser Stelle zu einer Verschiebung kommen könnte, so wird diese Rohrleitung zusätzlich in Längsrichtung beansprucht und es entstehen Längsspannungen. Diese können mit den Stabwerksmodellen nicht berechnet werden.

Die Auswertungen der Berechnungen sowie die Ergebnisse sind im Anhang D zu finden.

6 Zusammenfassung

Nach mehreren Rohrberechnungen stellt sich heraus, dass die Berechnungen mit einfachsymmetrischen (Bild 64) und mit doppelsymmetrischen Belastungen (Bild 31), mit Hilfe der drei Stabwerksmodelle durchgeführt werden können.

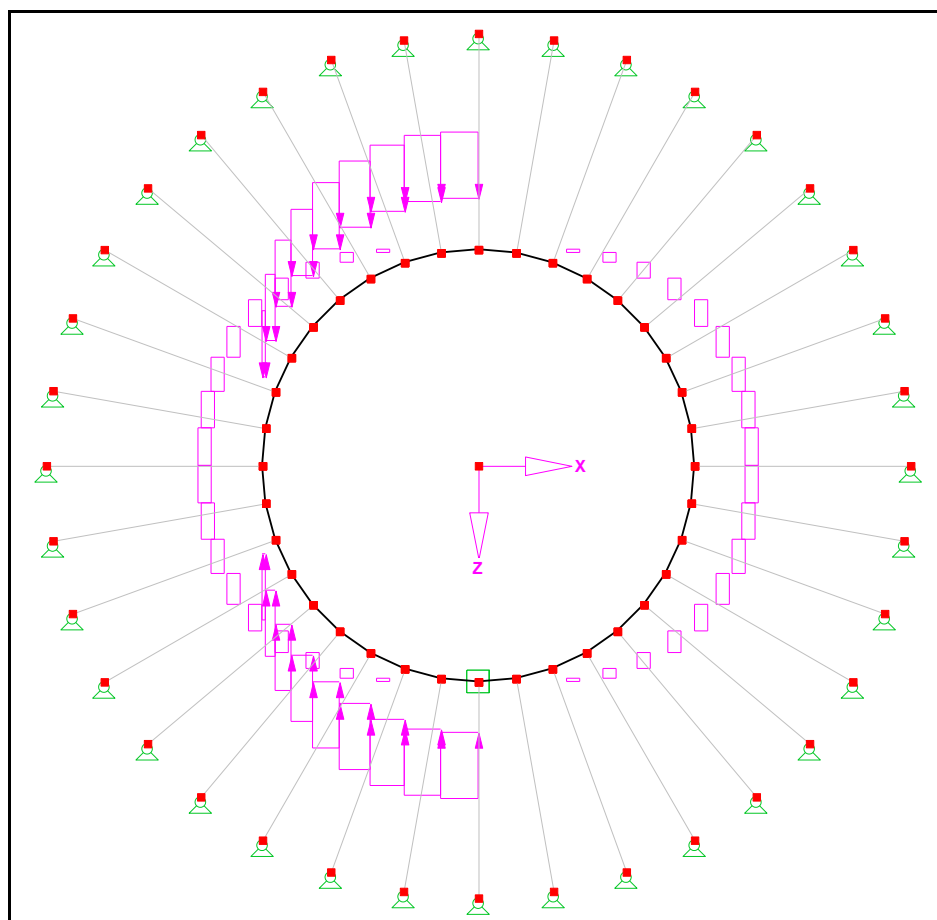


Bild 64: Einfachsymmetrische Belastung (spiegelbar über die horizontale X-Achse) [RSTAB]

Die folgenden Bilder zeigen einige Beispiele, wo die Berechnungen korrekt durchgeführt wurden.

Liegt aufgrund besonderer Umstände eine unsymmetrische Belastung vor, die aber kein Drehmoment erzeugt, kann die Berechnung trotzdem durchgeführt werden.

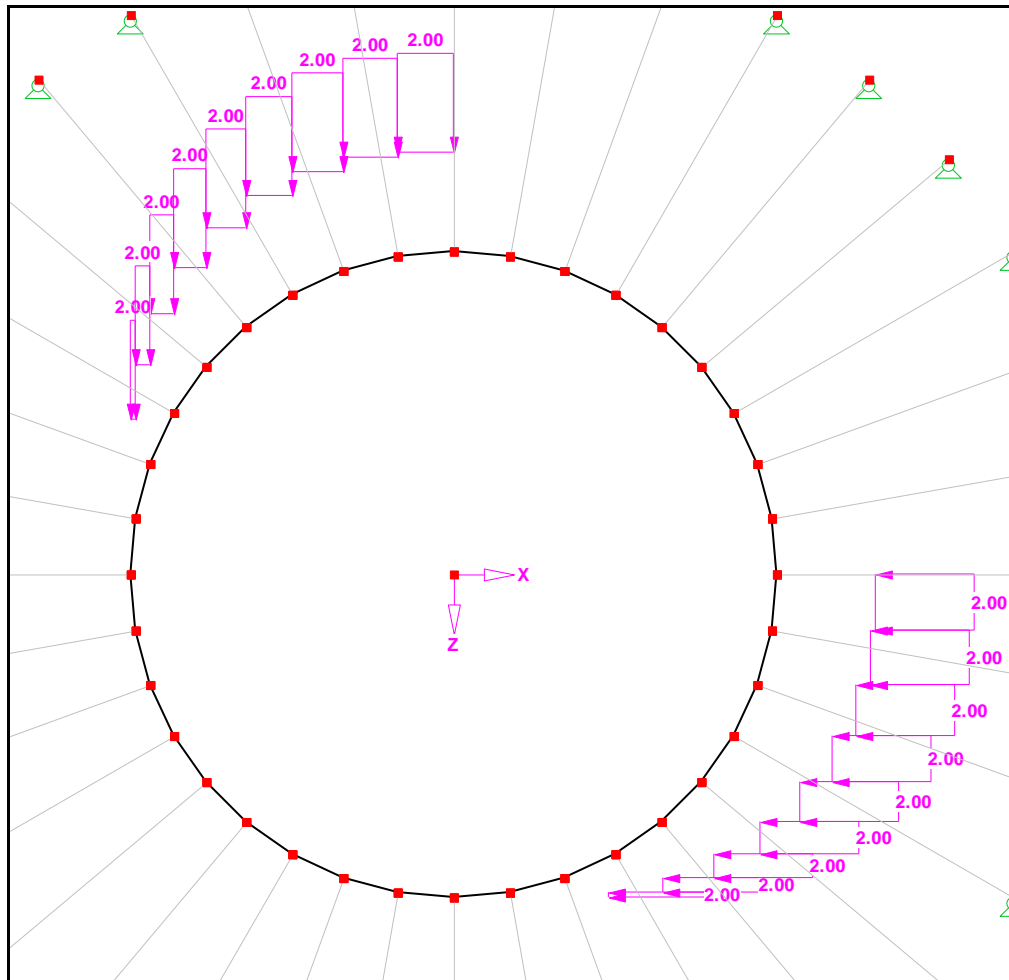


Bild 65: Unsymmetrische Belastung Gesamtdrehmoment = 0 [RSTAB]

Die im Bild 65 dargestellten Belastungen erzeugen auch ein Drehmoment, was sich aber gegenseitig aufhebt. Dadurch entstehen keine torsionalen Beanspruchungen um die Rohrlängsachse. Das Auflager, wie im Bild 66, wird nicht benötigt. Wurde das Festlager trotzdem eingefügt, so erhält es keine Reaktionen und es entstehen keine Spannungen.

Erzeugen die unsymmetrischen Belastungen (Bild 66) ein Drehmoment, so dürfen diese vorgestellten Modellsysteme nicht verwendet werden. Das Problem liegt darin, dass das entstehende Drehmoment eine Spannungskonzentration am Knoten des Festlagers in der Rohrsohle verursacht (siehe Pfeil Bild 66).

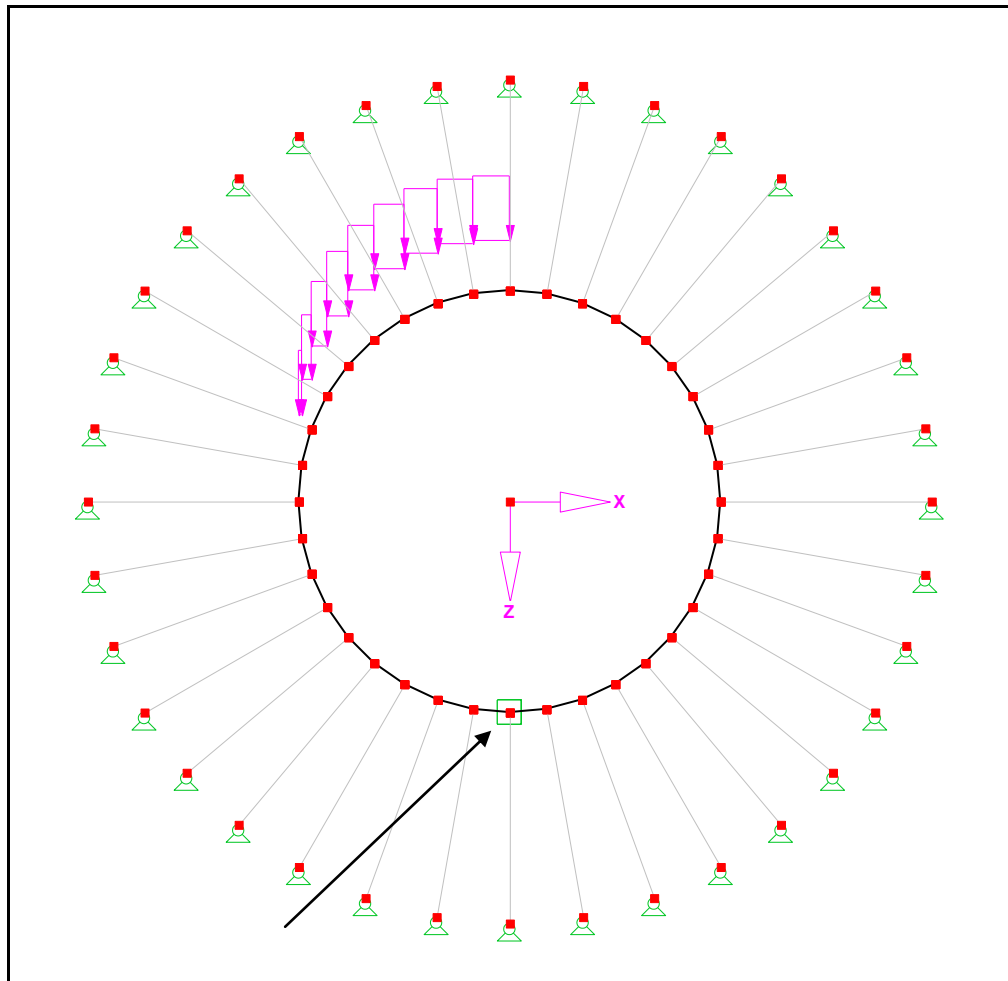


Bild 66: Unsymmetrische Belastung die ein Drehmoment erzeugt [RSTAB]

7 Ausblick

Dieses Problem des angreifenden Drehmomentes könnte weiterführend untersucht werden. Eine erste Vorgehensweise zur Simulation mit einem Drehmoment könnte darin bestehen, den Einsatz von je zwei Stabfedern pro Bettungslager vorzusehen. Diese Möglichkeit ist im Bild 67 dargestellt.

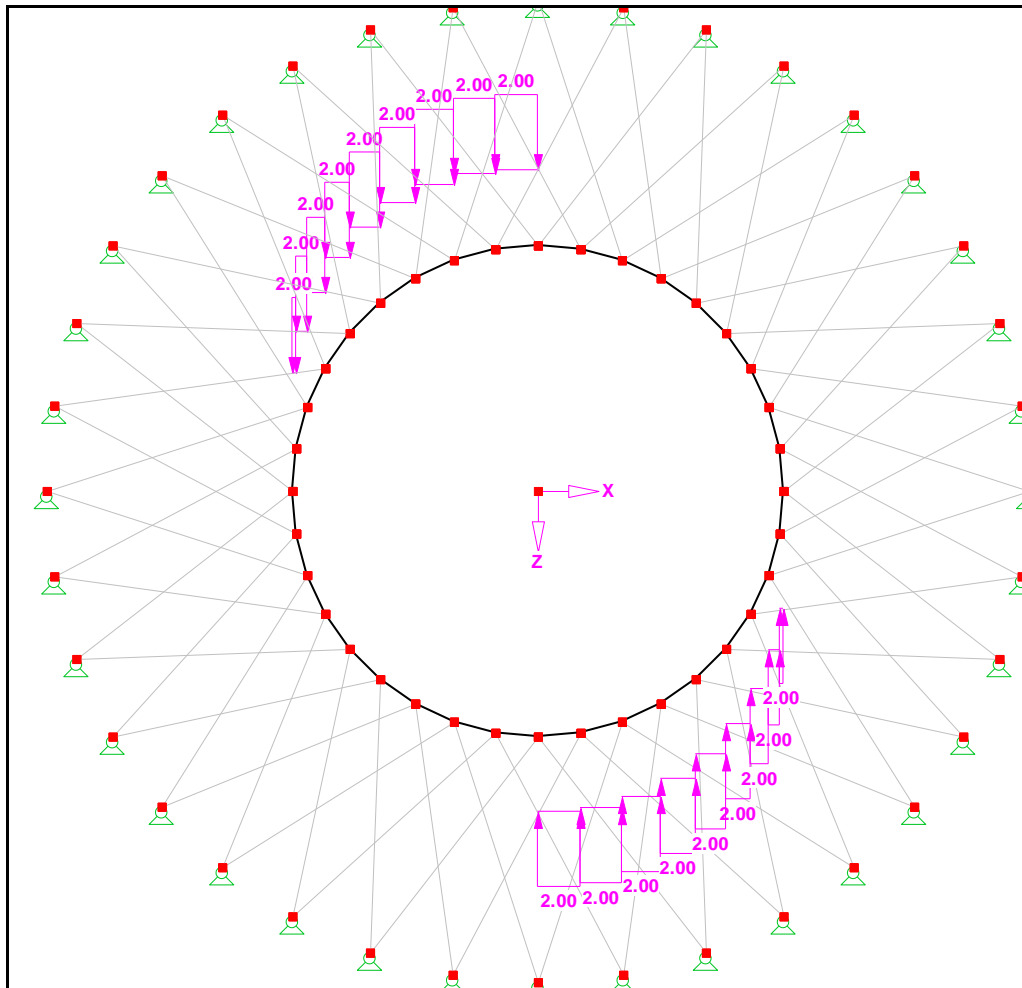


Bild 67: Modell mit je 2 Stabfedern pro Bettungslager [RSTAB]

Diese Vorgehensweise beruht auf folgender Überlegung. Die Stabfedern können weiterhin nur Druckkräfte aufnehmen die durch die Belastung entstehen. Je größer die Belastung wird, desto größer werden die Druckkräfte in den Stabfedern.

Die Schrägstellung dieser Federn und die resultierenden Druckkraft erzeugen jeweils eine horizontale und eine vertikale Kraftkomponente. Die vertikale Kraftkomponente nimmt die gleichen Reaktionen auf, wie im Modellsystem mit nur einer Stabfeder am Bettungslager. Die entstehenden horizontalen Kraftkomponenten erzeugt ein Gegen-drehmoment, welches die Torsion um die Rohrlängsachse verhindern soll.

Das folgende Bild 68 mit der Darstellung der Kraftkomponenten soll diese Überle-gung veranschaulichen.

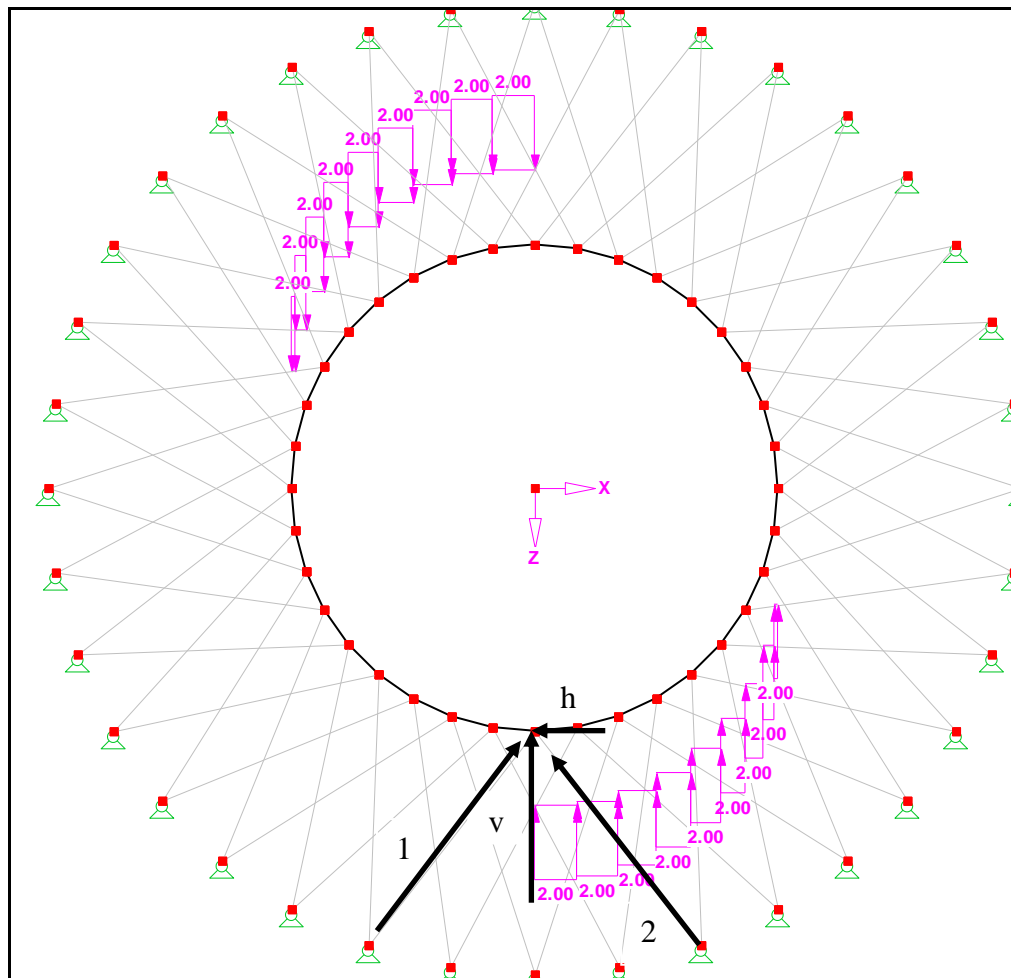


Bild 68: Darstellung der Kraftkomponenten [RSTAB]

Die Stabfeder 1 im Bild 68 fällt entweder aus, weil sie Zugkräfte aufnehmen würde oder erfährt nur minimale Druckkräfte. Somit erzeugt sie eine geringe horizontale Kraftkomponente. Dagegen weist die Stabfeder 2 aus dem Bild 68 eine hohe Druck-

kraft auf. Daraus resultiert eine große horizontale Kraftkomponente, die eine Gegen-
drehmoment erzeugt. Addiert man diese Torsionsmomente auf, so müssten sie gleich
groß den Drehmoment sein, das durch die Belastung erzeugt wurde. Somit sollte sich
ein Gleichgewicht einstellen und die Torsion um die Rohrlängsachse verhindert wer-
den können. Die Berechnung der Federkräfte aus dem Bettungsmodul gilt für die ver-
tikale Kraftkomponente. Diese muss durch die Anzahl der Stabfedern an einem Kno-
ten dividiert und über die Winkelbeziehungen auf die Stabfeder umgerechnet werden.
Die Verformung aus der Belastung wie im Bild 67 gezeigt, könnte wie folgt aussehen.

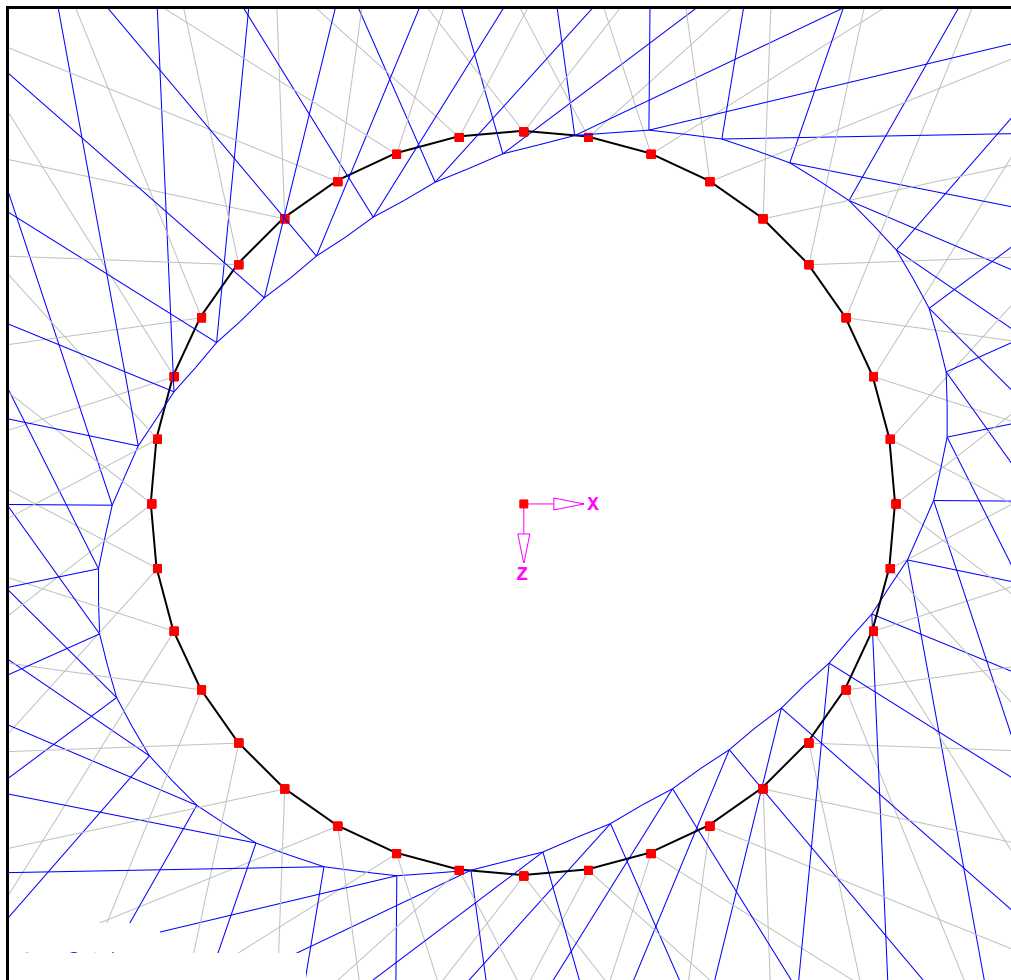


Bild 69: Mögliche Verformung bei torsionsbelasteten Rohr [RSTAB]
Bei dieser Berechnung wurde für die Simulation eine Federkraft von 15 kN/m ange-
nommen.

8 Literaturverzeichnis

- (1) ATV-DVWK-REGELWERK Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127; Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen - 3. korrigierte Auflage (2000) 69 S. ISBN 978-3-933707-37-6
- (2) Schneider, Klaus-Jürgen; Goris, Alfons: Bautabellen für Ingenieure: 17. Auflage. Neuwied: Werner Verlag, 2006: ISBN-10 3-8041-5228-7
- (3) Wetzell, Otto W. (Hrsg.): Wendehorst: Bautechnische Zahlentafeln. 30. akt. und erw. Aufl. Teubner Verlag Stuttgart/ Leipzig/ Wiesbaden, 2002: ISBN 3-519-45002-X
- (4) Falter, Bernhard Prof. Dr.-Ing.: Forschungsbericht: MIBAK: Mindestüberdeckung und Belastungsansätze für flach überdeckt Abwasserkanäle, <http://www.ikt.de/>: URL: <http://www.ikt.de/down/f0140langbericht.pdf>
- (5) Hermann, Ursula (Verf.): Die neue deutsche Rechtschreibung: Bertelsmann Lexikon Verlag: Gütersloh 1996

9 Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Annaberg-Buchholz, den 17.02.2011

Michael Eck