

Dr.-Ing. Dietmar Beckmann, S & P Consult GmbH, Bochum
Dipl.-Ing. (Univ. Belgrad) Vladimir Lacmanović, IngSoft GmbH, Nürnberg

Linerstatik für Kanäle mit Eiquerschnitt im Altrohrzustand III

Die statische Berechnung von Linern in nicht dauerhaft standsicheren Kanälen mit Eiquerschnitt konnte bisher nur mit sehr aufwendigen und teuren FEM-Analysen für den jeweiligen Einzelfall durchgeführt werden. Nun steht eine neue zuverlässige Berechnungsmethode zur Verfügung, die regelwerkskonform auf einem speziell entwickelten Stabwerksmodell basiert und sich für eine komfortable Bedienung automatisieren lässt.

Der S & P Consult GmbH ist es in enger Zusammenarbeit mit der IngSoft GmbH gelungen, eine neue Berechnungsmethode für Liner in nicht mehr dauerhaft standsicheren Eiprofilen zu entwickeln. Grundlage bildet dabei ein spezielles Stabwerksmodell, das parametrisiert ist und sich somit für die automatisierte Berechnung eignet.

Besonderheiten der statischen Berechnung von Linern in nicht standsicheren Eiprofilen

Die statische Berechnung von Linern zur Renovierung von undichten und/oder nicht mehr standsicheren Kanälen ist im Arbeitsblatt DWA-A 143-2 geregelt, das im Juli 2015 erschienen ist und das Merkblatt ATV-M 127-2 ersetzt. Danach muss der Liner in Abhängigkeit vom Altrohrzustand (AZ) entweder lediglich auf den äußeren Wasserdruck bemessen werden (AZ I und AZ II) oder zusätzlich auch die Erd- und Verkehrslasten tragen (AZ III). In allen Fällen ist die statische Berechnung aufgrund der Dünnwandigkeit des Liners und seines Kontaktverhaltens zum Altrohr in mehrfacher Hinsicht nichtlinear, sodass eine Handrechnung nicht möglich ist. Die wenigen Spezialprogramme zur statischen Berechnung von Linern können kreisförmige Querschnitte für alle Altrohrzustände rechnen, beschränkten sich beim Eiprofil bisher aber auf die Altrohrzustände I und II. Somit war die Statik für Liner in nicht mehr standsicheren Eiprofilen sehr aufwendigen und teuren FEM-Analysen vorbehalten, die im Einzelfall für das jeweilige Sanierungsprojekt vorzunehmen waren. Sie ermöglichten zwar eine Optimierung der Wanddicke des Liners, ließen aber keine Variantenuntersuchungen bezüglich des Sanierungsverfahrens mit vertretbarem Aufwand zu. Die einzige Alternative bestand in der Anwendung des sogenannten Ersatzkreisverfahrens, bei dem die eiförmige Kontur mit den für den Kreis gültigen Formeln berechnet wurde. Aufgrund der vollkommen unzutreffenden Querschnittsgeometrie mit einem gänzlich anderen Tragverhalten kam es bestenfalls zu unwirtschaftlichen Ergebnissen oder aber bei ungünstigen Lastkombinationen sogar zu gefährlichen Unterbemessungen, die wegen fehlender Kontrollmöglichkeiten unbemerkt blieben.

Parametrisiertes Stabwerksmodell (IngSoft EasyPipe)

Das neu entwickelte Stabwerksmodell besteht im Wesentlichen aus drei Teilstrukturen:

- Liner
- Altrohr
- Kopplung von Altrohr und Liner

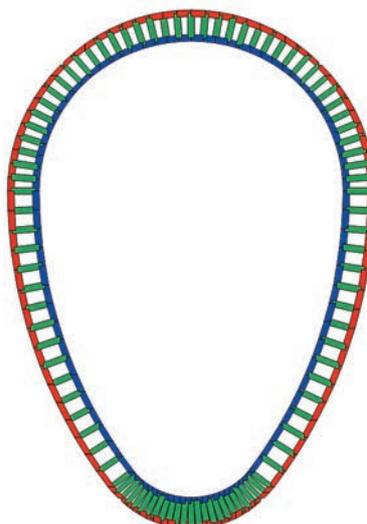


Bild 1. Struktur des Stabwerksmodells mit den Teilstrukturen Liner (blau), Altrohr (rot) und Kopplung von Liner und Altrohr (grün)

Der *Liner* wird ausschließlich mit einer ausreichenden Anzahl gerader Balkenelemente erfasst, die biegesteif miteinander verbunden die Kontur der Schwerachse (Mittellinie) des Liners abbilden. Den Balkenelementen werden die Werkstoffeigenschaften (Kurzzeit und Langzeit) sowie die Geometriewerte Querschnittsfläche (entspricht der Linerdicke t_L) und Trägheitsmoment ($t_L^3/12$) zugewiesen.

Das *Altrohr* wird analog zum Liner mit Balkenelementen diskretisiert, die die Kontur der Schwerachse (Mittellinie) abbilden. Die Risse im Altrohr werden über Balkenelemente mit Endgelenken und ihrer modifizierten Elementsteifigkeitsmatrix erfasst. Die mathematische Simulation der Gelenkexzentrizität erfolgt über die entsprechende Verschiebung der Gelenkknoten nach innen oder außen.

Die *Kopplung von Altrohr und Liner* erfolgt über radial ausgerichtete Stäbe (Fachwerkelemente ohne Biegeanteil), die mit einem Knoten orthogonal an den Liner und mit dem anderen Knoten an das Altrohr anschließen. Ihr Steifigkeitsverhalten ist bilinear programmiert, um den Druckkontakt zwischen Liner und Altrohr herzustellen, ein Abheben des Liners aber widerstandsfrei zu erlauben.

Der umgebende Boden wird nicht diskretisiert, sondern über eine ebenfalls bilineare Bettung der Balkenelemente des Altrohres erfasst. Die Einwirkungen werden gemäß den Vorschriften im Arbeitsblatt DWA-A 143-2 angesetzt, wobei die Erd- und Verkehrslasten auf das Altrohr wirken, während das eventuell vorhandene Grundwasser direkt den Liner belastet. Dabei sind für den Altrohrzustand III grundsätzlich die folgenden Lastkombinationen zu untersuchen:

- Erd- und Verkehrslasten ohne Grundwasserdruck und ohne Spalt zwischen Liner und Altrohr
- Erd- und Verkehrslasten mit Grundwasserdruck und ohne Spalt zwischen Liner und Altrohr

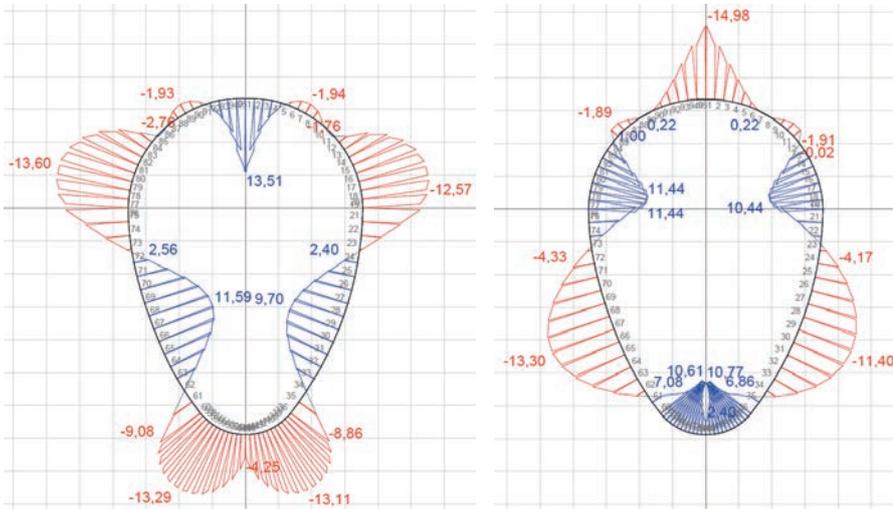


Bild 2. Typischer Spannungsverlauf [N/mm²] im Liner innen (links) und außen (rechts) beim Altrohrzustand III unter Grundwasserdruck

- Erd- und Verkehrslasten mit Grundwasserdruck und mit Spalt zwischen Liner und Altrohr
- Nur Grundwasserdruck mit Spalt zwischen Liner und Altrohr (Altrohrzustand II)

Alle Lastkombinationen müssen einzeln gerechnet werden, da wegen des nicht linearen Tragverhaltens eine Superposition nicht zulässig ist.

Darüber hinaus muss im Gegensatz zum Kreisprofil bei allen Lastkombinationen mit Erd- und Verkehrslasten untersucht werden, ob sich das Eiprofil vertikal oder horizontal zusammendrückt. Insbesondere bei Böden mit einem hohen Seitendruckbeiwert in Verbindung mit Grundwasser kann die horizontale Belastung maßgebend werden, die Kämpfer bzw. die schwach gekrümmten Bereiche eindrücken und so die vom Kreisprofil gewohnte Verformungsfigur umkehren.

Aus diesen Gründen sind bei jeder Linerstatik zahlreiche voneinander unabhängige Systeme nachzuweisen, zumal jeweils eine Berechnung unter charakteristischen Lasten für den Verformungsnachweis und eine weitere Berechnung unter Bemessungslasten für den Stabilitäts- und Spannungsnachweis durchzuführen sind, um gesichert die maßgebenden Nachweise führen zu können. Diese Fleißaufgabe übernimmt im Programmsystem IngSoft EasyPipe das neue Modul für die Berechnung von Linern in nicht mehr standsicheren Eiprofilen (Altrohrzustand III), aus dem auch die Darstellung der maßgebenden Linerspannungen in Bild stammt.

Kontinuumsmodell (Femap mit NX Nastran)

Ein wichtiger Bestandteil des umfangreichen Test- und Kontrollverfahrens für die Verifizierung der neuen Berechnungsmethode für Liner in nicht standsicheren Eiprofilen waren numerische Vergleichsrechnungen nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) mit Kontinuumsmodellen. Bei dieser Analyseverfahren wird die Struktur in endlich viele Teile (Elemente) zerlegt. Diese Elemente (Schalen, Volumenelemente) sind durch Knoten verbunden. Es entsteht so das FE-Netz, auf dem die gesamte Berechnung basiert. Danach werden Randbedingungen und Lasten definiert.

Der Liner wird mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen, das Altrohr und der Boden mit Hilfe von achtknotigen Volumenelementen diskretisiert. Die verwendete Diskretisierung ist in Bild 3 dargestellt. Die Kontaktfläche zwischen Rohr und Boden wird durch einen nichtlinearen 3-D-Kontakt (Fläche auf Fläche) simuliert, d. h. es werden allein Druckkräfte, keine Zug- und keine Scherkräfte übertragen. Eigengewichtslasten werden durch Zuweisung der materialspezifischen Wichte zu den entsprechenden Elementen, die Straßenverkehrslast wird durch die Anordnung einer Flächenlast auf der Modelloberfläche berücksichtigt. Der Außendruck infolge von Grundwasser wird in Form einer Flächenlast auf der Lineroberfläche berücksichtigt. Das Modell ist symmetrisch in Bezug auf die ver-

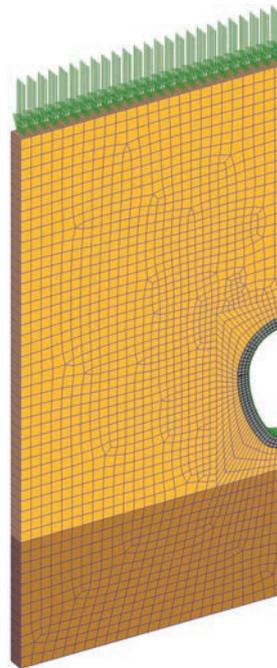


Bild 3. Diskretisiertes Rechenmodell des Liner-Altrohr-Boden-Systems

tikale Ebene durch die Rohrmitte, sodass nur eine Hälfte des Systems modelliert werden muss und an der Schnittkante die Symmetrie durch entsprechende Auflagerbedingungen hergestellt wird. Da es sich um ein Stabilitätsproblem handelt, erfolgen geometrisch nichtlineare Berechnungen, in deren Rahmen die Lasten iterativ bis zur doppelten Gebrauchslast gesteigert werden.

Vergleich am Beispiel

Beide vorgestellten Modelle basieren auf der Methode der Finiten Elemente (FEM), unterscheiden sich aber voneinander in einigen wesentlichen Eigenschaften, die in der Tabelle 1 zusammengefasst sind. Grundsätzlich orientiert

Tabelle 1. Für die Linerstatik wesentliche Unterschiede zwischen dem Stabwerksmodell und dem Kontinuumsmodell

Kriterium	Stabwerksmodell (IngSoft EasyPipe)	Kontinuumsmodell (Nastran)
Dimension	eben	quasi eben
Elemente	Balken, Stäbe	Schalen, Quader, Prismen
Implementation des Bodens	als Belastung und Bettung (gem. A 143-2)	mit Quader- und Prismen-Elementen in einer ausreichend großen Umgebung
Position der Einwirkungen Erdlasten Verkehrslasten Grundwasserlast	direkt auf das Altrohr (gem. A 143-2) direkt auf das Altrohr (gem. A 143-2) direkt auf den Liner (gem. A 143-2)	als Volumenlast des Bodens auf die Geländeoberkante direkt auf den Liner (gem. A 143-2)
Datenerfassung	parametrisiert (gem. A 143-2, Anhang G)	individueller Modellaufbau
Berechnung der Lastkombinationen	automatisch	einzel definiert
Lingergeometrie	mit örtlicher Imperfektion (gem. A 143-2)	perfekte Geometrie (nur in AZ III)
Nichtlineare Berechnungen	Theorie II. Ordnung (gem. A 143-2)	Theorie großer Verformungen
Anforderungen an den Statiker	Fachmann für Linerstatik	Fachmann für Linerstatik und für nichtlineare FEM-Analysen

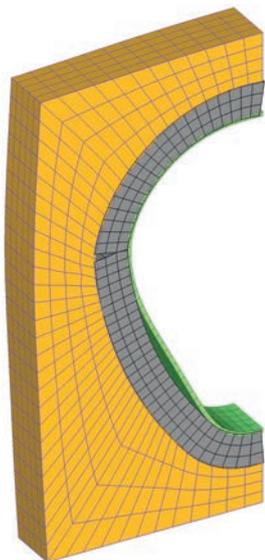


Bild 4. Verformtes Modell unter Gebrauchslast, erhöhte Darstellung (Faktor 3)

sich das Stabwerksmodell wesentlich stärker am gültigen Arbeitsblatt DWA-A143-2 mit seinen Ansätzen auf der sicheren Seite, während sich das Kontinuumsmodell in einigen Bereichen davon lösen muss bzw. lösen kann.

Zum konkreten Vergleich wurde ein Regeleiprofil B/H = 700/1050 mm im AZ III ausgewählt. Das Altrohr ist ein Betonrohr mit einer Wanddicke von 100 mm. Das Linermaterial entspricht der Schlauchliner-Materialgruppe 20, s. Unterlage 2. Die Wanddicke des Liners beträgt 12 mm. Die Lastfälle sind aus folgenden Belastungen kombiniert: Erdüberdeckung von 2,5 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast LM 1 (Lastmodell 1) nach DIN EN 1991-2 und 1,5 m Grundwasser über Rohrsohle. Der umgebende

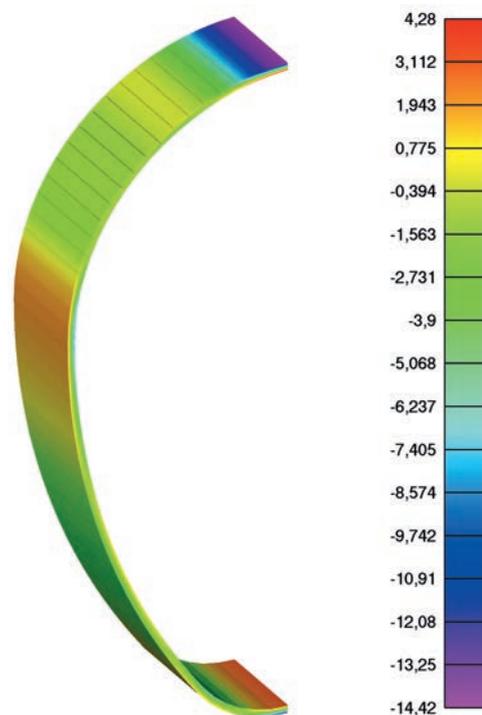


Bild 5. LF 2, maximale Druckspannung [MPa] unter Bemessungslast (Grafiken: Autoren)

Tabelle 2. Vergleich der Spannungen (σ), Ausnutzungsgrade (η) und horizontaler Verformungen ($\Delta\omega_h$)

Stabwerksmodell - IngSoft Easypipe A143-2					
Lastfall	σ_z	σ_D	η_z	η_D	$\Delta\omega_h$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[%]
LF 1	9,36	-9,35	9,36	9,35	1,15
LF 2	14,71	-16,59	14,71	16,59	0,98
LF 3	13,49	-14,83	13,49	14,83	0,95

Kontinuumsmodell - Femap mit NX Nastran					
Lastfall	σ_z	σ_D	η_z	η_D	$\Delta\omega_h$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[%]
LF 1	9,87	-10,14	9,87	10,14	0,73
LF 2	12,22	-14,42	12,22	14,42	0,68
LF 3	12,16	-13,84	12,16	13,84	0,95

Boden entspricht der Bodengruppe G2 nach ATV-DVWK-A 127 mit 95 % Verdichtungsgrad. Alle anderen Parameter, wie z. B. Vorverformungen, sind nach DWA-A 143-2 gewählt. Kombinationen (Lastfälle) sind:

- LF 1: Erd- und Verkehrslasten
- LF 2: Erd- und Verkehrslasten mit Grundwasser
- LF 3: Erd- und Verkehrslasten mit Grundwasser und Ringspalt.

Die auch beim Altrohrzustand III obligatorische Berechnung für den Altrohrzustand II wurde in die vergleichende Betrachtung nicht einbezogen, da für den reinen Wasserdrucklastfall ohnehin stets die einschlägigen Programme verwendet werden und keine separate FEM-Berechnung durchgeführt wird.

Tabelle 2 zeigt vergleichend die maßgebenden Ergebnisse der Berechnungen mit dem Stabwerksmodell (oben) und dem Kontinuumsmodell (unten). Obwohl es sich um sehr unterschiedliche Berechnungsmodelle handelt (s. Tabelle 1), liegen die Ergebnisse in derselben Größenordnung. Beim Lastfall 1 (ohne Grundwasserdruck) beträgt die Abweichung hinsichtlich der Standsicherheitsnachweise deutlich unter 10 %. Bei den Lastkombinationen mit Grundwasserdruck liegt das Stabwerksmodell um 10 % bis 20 % gegenüber dem Kontinuumsmodell auf der sicheren Seite. Zu begründen ist die Abweichung u. a. mit dem Ansatz der örtlichen Imperfektion gemäß dem Arbeitsblatt DWA-A 143-2, die den schwach gekrümmten Bereich unter dem Kämpfer noch flacher macht.

Fazit

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht erstmals eine schnelle und zugleich nachweislich korrekte Berechnung von Linern in nicht standsicheren Eiprofilen (AZ III). Es erreicht eine deutlich höhere Genauigkeit als das heute immer noch verwendete Ersatzkreisverfahren, das unter ungünstigen Randbedingungen sogar weit auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse produziert. Das Stabwerksmodell ermöglicht durch seine Parametrisierung einen mit dem Ersatzkreisverfahren vergleichbaren Bedienungskomfort und verlangt vom Anwender lediglich gute Kenntnisse in der Linerstatik und kein Fachwissen in der nichtlinearen Kontinuumsmechanik und in der Anwendung von FEM-Programmen.

Das neue Berechnungsverfahren ist inzwischen als zusätzliches Modul in das Programm IngSoft EasyPipe der IngSoft GmbH integriert worden. Der große Vorteil zeigt sich in einer einfachen und komfortablen Erfassung der maßgebenden Parameter analog zum Kreisprofil, sodass Variantenuntersuchungen oder Optimierungen der Wanddicke auch bei diesen hoch belasteten Linern eine sehr wirtschaftliche und zeitsparende, aber dennoch sichere Bemessung ermöglichen.

Literatur

[1] Arbeitsblatt DWA-A 143-2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren (Juli 2015).

- [2] DWA-M 144-3: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) für die Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Teil 3: Renovierung mit Schlauchliningverfahren (vor Ort härtendes Schlauchlining) für Abwasserkanäle; November 2012.
- [3] ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen (2000-08).
- [4] DIN EN 1991-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010 (2010-12).

Weitere Informationen:

IngSoft GmbH
Vladimir Lacmanović
Irrerstraße 17, 90403 Nürnberg
Tel. (0911) 4 308 79-41, Fax (0911) 43 08 79-29
Vladimir.Lacmanovic@ingsoft.de, www.ingsoft.de