



**Verlegung einer Gashochdruckleitung
HD 3 DN 400 St DP 70**

Frankfurt am Main-Fechenheim, Hanauer Landstraße und Orber Straße

**Probabilistische Sicherheitsbetrachtung
(Unterlage 7.5)
nachrichtlich**

Vorhabenträger: NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH
Solmsstraße 38
60486 Frankfurt a.M.

Bearbeitung: Dr.-Ing. Veenker
Ingenieurgesellschaft mbH
30173 Hannover

Veenker

Projektleiter: Christoph Meyer
Bearbeiterin: Tina Klingler

Stand: August 2018

Aufgestellt Frankfurt a.M., 15.12.2021  Herr Tobias Stolze	 Herr Lars Finkernagel
	Planfeststellungsbehörde

Hannover – Leipzig

Dr.-Ing. Veenker
Ingenieurgesellschaft mbH

Heiligengeiststraße 19
30173 Hannover

Leibnizstraße 25
04105 Leipzig

mail@veenkerghmbh.de
www.veenkerghmbh.de

Gutachten

Umverlegung der Gashochdruckleitung HD3 DN 400 MOP 40 in Frankfurt- Fechenheim

Sicherheitsanalyse auf Basis einer
strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse

Ergebnisse

Auftraggeber: NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH

Projekt: 58618.00

Datum: 23.08.2018

Revision: 00

Vereidigte Sachverständige
Dr.-Ing. Manfred Veenker
Dipl.-Ing. Jörg Himmerich
Dipl.-Ing. Alexander Junge

Amtsgericht Hannover
HRB 57 606
USt-IdNr.: DE 198 708 104

Geschäftsführer
Jörg Himmerich

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Vorgang	5
3. Unterlagen	6
3.1 Hinweis	6
3.2 Unterlagen	6
4. Grundlagen	9
4.1 Beschreibung der Leitung und des Bauvorhabens	9
4.2 Erläuterung der Vorschriftenlage und der Literatur für die durchzuführende SRA	9
4.3 Vorgehensweise in anderen europäischen Ländern	11
4.4 Datengrundlage	11
5. Datengrundlage	13
5.1 Hinweis	13
5.2 Erforderliche Leitungsdaten	13
5.3 Zusätzliche Leitungsdaten	14
5.4 Baugrundverhältnisse	15
5.4.1 Allgemeines	15
5.4.2 Geologie im Verlauf der Trasse	16
5.4.3 Längsbiegespannungen	16
5.4.4 Bodenaggressivität	16

6. Ergebnisse	18
6.1 Einordnung der Zahlenwerte	18
6.2 Grenzwert	19
6.3 Ausfallwahrscheinlichkeiten	19

Anlagenverzeichnis

A 1	Trassenverlauf
A 2	Querschnitt Stahlbetonschutzrohr DN 1600 im Bereich Lahmeyerbrücke
A 3	Stationierungspunkte der Bewertung und Zuordnung zu Lageplänen
A 4	Ergebnisdarstellung
A 5	Grundlagengutachten 58618.01

1. Zusammenfassung

Im vorliegenden Gutachten sind die Ergebnisse für die Untersuchung der geplanten Umlegung der Gashochdruckleitung HD3 in Frankfurt-Fechenheim wiedergegeben. Dabei wird im Rahmen einer Structural Reliability Analysis (SRA) die Versagenswahrscheinlichkeit sowohl infolge bestimmungsgemäßer Beanspruchung als auch infolge Einwirkungen Dritter untersucht.

Allgemeine Ausführungen zur durchgeführten Untersuchung sind dem in Anlage A 5 enthaltenen Bericht zu entnehmen.

Die Bewertungsergebnisse zeigen, dass die geplante Leitung im gesamten Trassenabschnitt die geforderten Versagenswahrscheinlichkeiten einhält und unterschreitet. Hierbei sind sowohl die Aspekte der Gefährdung der Leitung durch Dritte wie auch das Versagen infolge mechanischer Überbeanspruchung berücksichtigt.

Die Leitung erfüllt bei planmäßiger Errichtung die an sie gestellten zuverlässigkeitsrelevanten Anforderungen uneingeschränkt.

Dipl.-Ing. Roberto Ferrari

2. Vorgang

Die Netzdienste Rhein-Main GmbH (NRM) plant im Stadtgebiet Frankfurt (Frankfurt-Fechenheim) die Umverlegung der bestehenden Gashochdruckleitung HD3 auf einem ca. 1.200 m langen Teilstück. Im Rahmen der Genehmigung wird von der Behörde beim Regierungsbezirk Darmstadt ein Gutachten zur Leitungssicherheit auf Basis einer strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse (Structural Reliability Analysis [SRA]) gefordert.

Wir sind von NRM beauftragt, die o. a. SRA durchzuführen, die zugehörige Vorschriftenlage und Literatur zu erläutern und vergleichbare Vorgehensweisen in anderen europäischen Ländern aufzuzeigen.

3. Unterlagen

3.1 Hinweis

Dieses Gutachten dokumentiert die Ergebnisse der SRA für einen Leitungsabschnitt. Alle fundamentalen Unterlagen sind im Grundlagengutachten in Anlage A 5 angegeben. Im Folgenden werden lediglich die Unterlagen zitiert, die sich unmittelbar mit dem betrachteten Leitungsabschnitt befassen.

3.2 Unterlagen

- U 1 DIN EN ISO 16708: „Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods“, Ausgabe 08/2006
- U 2 DVGW-Arbeitsblatt GW 9: „Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen und Behälter aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen“, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn März 1986
- U 3 „Studie zur Beurteilung der Bewertungsmöglichkeiten des Bodenkorrosionsverhaltens“, erstellt von der Technischen Universität Bergakademie Freiberg für die Verbundnetz Gas AG, Bearbeiter: M. Hofbauer 1997
- U 4 Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHDrLtgV), Ausgabe 05/2011
- U 5 DIN EN 1594: „Gasinfrastruktur – Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar – Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1594:2013“, Ausgabe 12/2013
- U 6 Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 463 (A): „Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Errichtung“, Ausgabe 07/2016
- U 7 Beschreibung der Bauausführung; Übersichtsplan II, hergestellt aus Open-Street-Map-Daten; Koordinierter Gesamtleitungstrassenplan, Blatt 11 und Detailplan/Längsschnitt DB-/HFM-Querung, Blatt 10a, erstellt durch Ingenieurbüro Becker & Partner GmbH; Lagepläne Auftrag Nr. 960 1264, Blatt Str.Nr.: 1.073 (Hanauer Landstraße), Str.Nr.: 1871 (Orber Straße), Blätter 1 bis 6, erstellt durch Ingenieurbüro Hänsele; zu-

- sammengestellt und per E-Mail übermittelt durch NRM, eingegangen am 07.03.2018
- U 8 Zusammenstellung Rohrkenndaten im Bereich Betonschutzrohr DN 1600 und im Bereich der weiteren geplanten Umverlegung; Temperaturangabe zu Wärmeeinwirkungen durch parallel verlegte Stromkabel, Innendrucke; geotechnisches Gutachten ETN-AZ.: 13/5229, Neuverlegung von 30-kV- und 110-kV-Kabeln mit Querung der DB-Strecke, Lahmeyer-Brücke, erstellt durch ETN Erdbaulaboratorium Tropp-Neff u. Partner; Querschnitt Schutzrohrquerung Lahmeyer-Brücke DN 1600 STB, erstellt durch Ingenieurbüro Becker & Partner GmbH; zusammengestellt und per E-Mail übermittelt durch NRM, eingegangen am 26.07.2018
 - U 9 Materialzeugnisse für Stahlrohre im Bereich der Schutzrohrverlegung; Auszug Materialkatalog für Rohrbögen; Auszüge der Dokumentation für die Bestandsleitung DN 400 (HD-Leitung Nordring); zusammengestellt und per E-Mail übermittelt durch NRM, eingegangen am 26.07.2018
 - U 10 Bodenkarte von Hessen, Blatt Nr. 5818 Frankfurt a. M. Ost, Maßstab 1 : 25.000 und Geologische Karte von Hessen, Blatt Nr. 5818 Frankfurt a. M. Ost, Maßstab 1 : 25.000
 - U 11 Trassenplan Gas (mit hinterlegtem Lageplan der koordinierten Maßnahme „Verlängerung der Ferdinand-Happ-Straße bis zur Dieselstraße“), erstellt durch Ingenieurbüro Becker & Partner GmbH; Stand 09/2018; zusammengestellt und per E-Mail übermittelt durch NRM, eingegangen am 18.09.2018
 - U 12 Telefonnotiz zum Telefonat mit Frau Jahnke am 16.10.2018 zur Thematik Schilderpfähle, erstellt durch Dr. Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH
 - U 13 DVGW-Rundschreiben G 07/15: „Abstände von Windenergieanlagen zu Gashochdruckleitungen“, erstellt durch DVGW mit Datum 01.12.2015.

- U 14 DVGW-Schlussbericht: „Windenergieanlagen in Nähe von Schutzobjekten; Bestimmung von Mindestabständen“, DVGW-Förderkennzeichen G 02/01/12, erstellt durch Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, identisch mit Gutachten 97111, Stand Revision 7 mit Datum vom 11.12.2014 (Abruf unter http://www.veenkermbh.de/wpcontent/uploads/2016/12/Gutachten_A_R07_s.pdf)
- U 15 StFV-ch: „Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV)“, die Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Stand 7/2008
- U 16 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) der Schweizerischen Eidgenossenschaft: „Richtlinien – Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV“, 09/2016
- U 17 PGS3: „Guideline for quantitative risk assessment / CPR 18 / 'Purple book“, VROM, Ausgabe 12/2005
- U 18 Kemmler, J., et. al.: „Sicherheit von Erdgashochdruckleitungen / Rahmenbericht zur standardisierten Ausmaßeinschätzung und Risikoermittlung“, Revision 2010

4. Grundlagen

4.1 Beschreibung der Leitung und des Bauvorhabens

Gegenstand dieser Sicherheitsanalyse ist die geplante Umlegung der Erdgashochdruckleitung HD3 (DN 400 MOP 40) in Frankfurt-Fechenheim (Regierungsbezirk Darmstadt) zwischen der Hanauer Landstraße und der Einbindung in die bestehende Leitung DN 400 (Bauende) in der Orber Straße. Der geplante Leitungsabschnitt hat eine Länge von ca. 1,2 km. Der Trassenverlauf ist in Anlage A 1 dargestellt.

Im Bauabschnitt der Leitungskreuzung mit bestehenden Bahngleisen wurde bereits im Jahr 2017 ein Stahlbetonschutzrohr DN 1600 im Pressbohrverfahren erstellt. In dieses Schutzrohr wurden, wie in Anlage A 2 dargestellt, die Stahlrohrleitung DN 400 und weitere PE-Schutzrohre (für Stromkabel und andere Kabel) eingezogen und der verbleibende Ringraum verdämmt (CABLECEM®).

Ausgehend von den im Schutzrohr parallel liegenden Stromkabeln sind Wärmeeinwirkungen für die Leitung zu berücksichtigen. Der Temperaturwert ist im folgenden Kapitel aufgeführt.

In den übrigen Bauabschnitten der Umlegung wird die Leitung in offener Bauweise verlegt. Die geplanten Ausführungszeiten sind in der Anlage A 1 zusammengestellt.

4.2 Erläuterung der Vorschriftenlage und der Literatur für die durchzuführende SRA

Planung und Bau einer Gashochdruckleitung müssen nach den Vorgaben der Gashochdruckleitungsverordnung (Unterlage U 4) sowie der DIN EN 1594 (Unterlage U 5) und des DVGW-Arbeitsblatts G 463 (Unterlage U 6) erfolgen, wobei die Sicherheit und der Schutz von Menschen und Umwelt an erster Stelle stehen. Aufgrund der hohen Siedlungsdichte in Deutschland und der notwendigen Versorgungssicherheit führen die Gastransportleitungen unweigerlich auch an dicht bebaute Gebiete und an Verkehrsflächen heran bzw. kreuzen Verkehrsflächen. In diesen vorgenannten Gebieten, sogenannte Gebiete mit besonderem Schutzbedürfnis, sieht das DVGW-Arbeitsblatt G 463 gemäß Abschnitt 5.1.12

erhöhte Sicherheitsmaßnahmen vor, wie z. B. (angegebene Reihenfolge ohne Wichtung):

- Überprüfung der Auslegung (Erhöhung des Sicherheitsbeiwertes)
- Überprüfung der Rohrdeckung und ggf. Erhöhung
- Vorsehung von Trassenwarnband
- Vorsehung von Geotextil
- Erhöhung der Anforderung an die Druckprüfung (nach DVGW-Arbeitsblatt G 469)
- etc.

Die Maßnahmen sind in Abhängigkeit von der Art des Gebietes und des möglichen Gefährdungspotenzials gegeneinander abzuwägen. Dabei kann der Aspekt Gefährdungspotenzial nur mit probabilistischen Methoden bewertet werden. Wie diese probabilistische Bewertungsmethode aussieht, wird im G 463 im Abschnitt 5.1.8 Windenergieanlagen mit dem dortigen Hinweis auf das DVGW-Rundschreiben G 07/15 „Abstände von Windenergieanlagen zu Gashochdruckleitungen“ (Unterlage U 13) aufgezeigt. Mit dem vorgenannten DVGW-Rundschreiben wird auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens zur Bestimmung von Mindestabständen von Windenergieanlagen in Nähe von Schutzobjekten verwiesen (Unterlage U 14).

In dem Schlussbericht werden unter Anwendung von probabilistischen Bewertungen konservative Mindestabstände angegeben, für die bei Einhaltung kein weiterer Nachweis erforderlich ist. Die relevanten Gefährdungspotenziale werden probabilistisch bewertet. Der Abstand zwischen einer WEA und einem Schutzobjekt werden iterativ verringert bis ein zuvor definierter Grenzwert erreicht wird. Der probabilistische Grenzwert ist schutzobjektspezifisch und ergibt sich z. B. bei einer Gashochdruckleitung aus der DIN EN ISO 16708 (Unterlage U 1). Einzelheiten zu den theoretischen und probabilistischen Grundlagen und zur Vorgehensweise sind in der Unterlage U 14 (frei verfügbar über den in Kapitel 3.2 aufgeführten Link) zusammengestellt. Diese probabilistischen Grundlagen kommen in vergleichbarer Weise für die im vorliegenden Fall angewendeten SRA analog zur Anwendung. Diese Grundlagen sind bezogen auf die SRA in der Anlage A 5 zu diesem Gutachten zusammengestellt.

4.3 Vorgehensweise in anderen europäischen Ländern

Die Verwendung des probabilistischen Bewertungskonzeptes ist in Deutschland in unterschiedlicher Intensität eingeführt. Normative Festlegungen liegen teilweise vor. Die Festlegungen beziehen sich dabei entweder auf die technische Einrichtung, von der eine Gefährdung ausgehen kann, oder auf das Schutzobjekt, welches gefährdet werden kann. Je nach Vorschrift erfolgt die Bewertung qualitativ oder quantitativ. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass ausländische Vorschriften, z. B. in der Schweiz mit Unterlagen U 15, U 16 und in den Niederlanden mit Unterlage U 17 eingeführt, pauschale Festlegungen für Grenzwerte einer probabilistischen Bewertung enthalten, sodass eine quantitative Bewertung möglich ist.

Die Anwendung z. B. der Störfallverordnung in den Niederlanden und in der Schweiz sieht eine quantitative Risikobewertung vor. Für die Niederlande gibt das „Purple Book“ (Unterlage U 17) Hinweise zur qualitativen Bewertung von Störfällen. Die gleichen Grundlagen werden in den Niederlanden u. a. auch für die Bewertung und Bemessung von Deichen angewendet. In der Schweiz wurden Richtlinien zur Bewertung aufgestellt (Unterlage U 16), die im Rahmen der Störfallverordnung (Unterlage U 15) angewendet werden. Basierend auf diesen Herleitungen wurde eine Studie zur Risikoermittlung von Erdgashochdruckleitungen aufgestellt (Unterlage U 18). In den benannten Vorschriften und Empfehlungen erfolgt die Bewertung des Risikos durch quantitative Betrachtungen. Es sind sowohl die Schadensereignisse mit Zahlenwerten unterlegt, als auch die Definition einer zulässigen Gefährdung von Personen bzw. der Umwelt.

4.4 Datengrundlage

Die Leitung befindet sich mit Ausnahme des bereits ausgeführten Schutzrohrabschnitts im Planungsstadium. Vom Auftraggeber wurde uns der Trassenverlauf in Form von pdf-Dokumenten (Unterlage U 7) zur Verfügung gestellt. Aus diesen Unterlagen können die wesentlichen für die Bewertung relevanten Daten abgegriffen werden.

In den beiden Regelquerschnitten, für die Verlegung im offenen Rohrgraben und im Stahlbeton-Schutzrohr, weist die Rohrleitung DN 400 die folgenden Parameter auf:

Regelquerschnitt Stahlrohre DN 400

Transportmedium	Erdgas
Außendurchmesser (D)	406,4 mm
Nennwanddicke	8,8 mm (im Schutzrohr) 7,1 mm (offene Verlegung)
Rohrmaterial	L360NE (im Schutzrohr) L360NE, L360MB, StE 360.7 oder gleichwertige (offene Verlegung)
Streckgrenze	360 N/mm ²
Sicherheitsbeiwert	1,60
Rohrumhüllung	PE 2,9 mm (im Schutzrohr) PE 2,2 mm (offene Verlegung)
Auslegungsdruck DP	70 bar
Maximaler Betriebsüberdruck MOP	40 bar
Maximale Temperatur Rohraußenseite	68 °C (im Schutzrohr) 10 °C (Mittelwert, offene Verlegung)
Überdeckung Rohrscheitel	mindestens 1,0 m

Zusätzliche Angaben zu Werkbögen DN 400

Nennwanddicke	8,8 mm
Rohrmaterial	L360NE (an Schutzrohrenden) L360NE, L360MB, StE 360.7 oder gleichwertige (offene Verlegung)
Streckgrenze	360 N/mm ²
Radius Werkbögen	2,5 x D (an Schutzrohrenden) 1,5 x D; 2,5 x D; 5,0 x D (offene Verl.)

Ergänzende Informationen können aus den ebenfalls vorliegenden geotechnischen Gutachten (Unterlage U 8) entnommen werden. Zur weiteren Klassifizierung des anstehenden Baugrundes werden topographische und geologische Karten herangezogen.

5. Datengrundlage

5.1 Hinweis

Im Folgenden werden die für die Bewertung relevanten Daten benannt. Sofern erforderlich, werden diese erläutert.

5.2 Erforderliche Leitungsdaten

Für die Bewertung werden grundsätzlich die im Folgenden genannten Daten benötigt. Da es sich hier um eine Leitung in der Planungsphase handelt, liegen einige dieser Informationen nur global vor. Hier werden die jeweiligen Mindestwerte aus der Planung angesetzt. Dies gilt beispielsweise für die Überdeckung, die in der späteren Realität nicht exakt bei einem Meter sondern darüber liegen wird.

Es werden folgende Daten benötigt:

- Außendurchmesser

- Wanddicke

Es wird die Nennwanddicke verwendet.

- Überdeckung

Es wird die Überdeckung des Rohrscheitels gemäß der Planungsunterlagen und der dort dargestellten Querschnitte angesetzt.

- Werkstoff

- Druck

Es wird auf der sicheren Seite liegend der Auslegungsdruck DP 70 bar angesetzt, auch wenn für die bestehende Leitung, in die eingebunden wird, der niedrigere Druck MOP 40 bar gilt.

- Schweißnahtgüte

Da es sich um eine neu errichtete Leitung handelt, wird die Nahtgüte zu 1,0 gesetzt.

- Oberflächennutzung

Die Oberflächennutzung ist relevant zur Bestimmung der Verkehrslast auf Geländeoberkante sowie zur Bestimmung der Gefährdung durch Dritte. Für die Leitungsbereiche wird hier weitestgehend „Straße“ angesetzt.

- Bodenaggressivität und Längsbiegespannung aus Bodensetzung

Im Rahmen der technischen Zustandsanalyse stellt die Baugrundsituation im Leitungsbereich eine wichtige Einflussgröße dar. Dieser Einfluss auf die Leitung variiert aufgrund der sich im Leitungsbereich verändernden Baugrundsituation. Von VEENKER werden die Daten zur Beurteilung der Bodenaggressivität sowie möglicher Bodensetzungen erhoben. Die Beurteilung der Auswirkung auf die Beanspruchung der Leitung erfolgt jeweils in Expertensystemen. Zur Ermittlung der im Leitungsverlauf der Leitung anzunehmenden Baugrundsituation wird auf das vorliegende geotechnische Gutachten sowie geowissenschaftliche Karten zurückgegriffen. Nähere Ausführungen sind in Kapitel 5.4 enthalten.

5.3 Zusätzliche Leitungsdaten

- Umhüllung

- Bauteile

In den Bauausführungsplänen sind Bögen verzeichnet.

- Schutzeinrichtungen

Es sind gem. Unterlage U 12 folgende Schutzeinrichtungen vorgesehen:

- Trassenwarnband, durchgehend im Bereich der offenen Verlegung
- Schildpfähle an den Enden der Pressung unter Gleisen und an signifikanten Richtungsänderungen

- Schutzrohre

Hier nicht relevant

- Düker

Unter Dükern werden Unterquerungen von Gewässern verstanden, die im offenen Graben verlegt und als ein Bauteil eingebaut werden. Die Thematik ist hier nicht relevant. Sonderkreuzungen, die beispielsweise im Pressverfahren hergestellt und anschließend mit Ober- und Unterbögen eingebunden werden, sind keine Düker in diesem Sinne. Hier werden die Bögen jeweils separat als Bauteile erfasst.

5.4 Baugrundverhältnisse

5.4.1 Allgemeines

Der Boden umgibt die Leitung und stellt somit das wesentliche Element sowohl hinsichtlich der statischen Auflagerung als auch der Übertragung chemischer Prozesse dar. Um diese Interaktion zwischen Rohr und Boden abzubilden, ist es erforderlich, die aus dem Boden auf die Leitung einwirkenden Faktoren detailliert zu analysieren und in der Bewertung zu berücksichtigen. Entsprechende Ausführungen sind in Kapitel 5.4.2 zu finden.

Hinsichtlich der Statik wurde ein Lastmodell entwickelt, bei dem davon ausgegangen wird, dass an beliebiger Stelle auf der Trasse eine definierte Auflast auf Geländeoberkante aufgebracht wird, die Setzungen hervorruft. Da die Leitung im Boden elastisch gebettet ist, resultieren aus einer Setzung abhängig von der Bodenbeschaffenheit und der Eigensteifigkeit der Leitung Biegespannungen im Rohr (Kapitel 5.4.3).

Chemische Einflüsse, die vom Boden auf die Leitung einwirken, werden durch die Bestimmung von Bodenaggressivitäten abgebildet (Kapitel 5.4.4). Das hierzu entwickelte Modell berücksichtigt die Parameter Petrografie, Grundwasserstände (vgl. Kapitel 5.4.2) und Bodennutzungsarten. Hieraus wurde eine vierstufige Klassifizierung (1 = praktisch nicht aggressiv, 2 = schwach aggressiv, 3 = aggressiv und 4 = stark aggressiv) in Anlehnung an die Angaben der Unterlage U 3 und der Unterlage U 2 entwickelt.

5.4.2 Geologie im Verlauf der Trasse

Zur Ermittlung der im Leitungsverlauf der Erdgasleitung anzunehmenden Baugrundsituation wurde zusätzlich zu Bohrverzeichnissen und Suchschlitzen (Unterlage U 8) auf geowissenschaftliche Karten (Unterlage U 10) zurückgegriffen.

Entlang der Leitungstrasse treten unter anthropogenem Material quartäre Sande auf, die in zahlreichen Abschnitten von Tonen und Schluffen überlagert werden. Im Liegenden folgen pleistozäne Sande und Kiese über tertiärem Ton.

5.4.3 Längsbiegespannungen

Bei der Berechnung der setzungsbedingten Längsbiegespannungen wird der Leitungsverlauf in Abhängigkeit von der Baugrundsituation, von der Überdeckung, der Wanddicke und vom Außendurchmesser der Rohrleitung in Abschnitte unterteilt und für jeden Abschnitt die entsprechende potentielle Beanspruchung ermittelt. Setzungsempfindliche Böden spiegeln sich in größeren Spannungswerten wider.

Im Trassenverlauf variieren die Beträge der Längsbiegespannungen aus Bodensetzungen im Bereich von 7 N/mm^2 bis 23 N/mm^2 und können als gering angesehen werden.

5.4.4 Bodenaggressivität

Auf der Grundlage des oben zitierten Modells wurden die Bodenaggressivitäten entlang der Trasse bestimmt. Für die Definition der Bodenaggressivität im Leitungsbereich wird von dem Substrat ausgegangen, welches in einer Teufe von einem Meter ansteht. Neben der Mächtigkeit beider Schichten findet auch die Genese sowie der Grundwasserstand und die Bodennutzung Eingang in die Bewertung der Bodenaggressivität.

Die von VEENKER durchgeführten Auswertungen weisen in Abschnitten mit künstlichen Auffüllungen mit einem Grundwasserstand von $\geq 2,0 \text{ m}$ unter GOK auf „aggressive“ Verhältnisse hin.

Tone und Schluffe mit einem Grundwasserspiegel von $\geq 2,0 \text{ m}$ unter GOK zeigen

„schwach aggressive“ Bedingungen an. Als „praktisch nicht aggressiv“ sind die Leitungsbereiche im Schutzrohr anzusehen.

6. Ergebnisse

6.1 Einordnung der Zahlenwerte

Im Rahmen der Bewertung wird die Wahrscheinlichkeit für das Versagen der Leitung ermittelt. Grundlage hierfür sind zum einen statistische Auswertungen von in der Vergangenheit beobachteten Schadensfällen sowie andererseits statistische Auswertungen von Werkstoffparametern und Beanspruchungsparametern, wie beispielsweise Materialkennwerte und Betriebsdruckschwankungen. Durch eine mathematische Verknüpfung der Auftretenshäufigkeit bestimmter Beanspruchungsgrößen und Schadensszenarien mit der Widerstandsfähigkeit der Leitung sowie der Wirksamkeit von Schutzeinrichtungen lässt sich eine Ausfallwahrscheinlichkeit berechnen. Diese Ausfallwahrscheinlichkeit wird angegeben in der Einheit

Ereignisse
km · Jahr

Eine Versagenswahrscheinlichkeit von 1,0 bedeutet somit, dass mit dem Auftreten eines Schadensfalles pro Jahr und Kilometer Leitung sicher zu rechnen ist. Andererseits bedeutet eine Versagenswahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-6}$, dass mit dem Auftreten eines Schadens pro Jahr auf einer Leitungslänge von einer Million Kilometer zu rechnen ist bzw. mit dem Auftreten eines Schadens auf einem Kilometer Leitung im Zeitraum von einer Million Jahren. Die Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeit um eine 10er-Potenz (z.B. von $1 \cdot 10^{-6}$ auf $1 \cdot 10^{-7}$) bedeutet eine Veränderung um den Faktor 10.

Um dies in den folgenden Abschnitten aufgeführten abstrakten Zahlen zu erläutern, sei folgendes Beispiel gegeben. Die BRD verfügte im Jahr 2010 über 81,75 Mio Einwohner. Gleichzeitig waren 3648 Verkehrstote zu beklagen. Hieraus ermittelt sich die Wahrscheinlichkeit für jeden Einwohner Deutschlands, einem Verkehrsunfall mit tödlichen Verletzungen zum Opfer zu fallen, zu $3.648/81.750.000 = 4,5 \cdot 10^{-4}$. Somit ist dieser Wert ca. um den Faktor 10.000 größer als der für einen Leitungsschaden akzeptierte (vgl. Kapitel 6.2).

6.2 Grenzwert

Für die Versagenswahrscheinlichkeit als Ergebnis der SRA ist in der DIN EN ISO 16708 (Unterlage U 1) eine Empfehlung für entsprechende Grenzwerte genannt. Aus den Leitungsdaten, speziell dem Abstand zur Bebauung, ergibt sich, dass für die Safety Class nach DIN EN ISO 16708 der Grenzwert „Very high“ einzuhalten ist.

Die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit ist nach der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$\text{Safety Class „Very High“} \quad P_f = 5 \cdot 10^{-6} / (P \cdot D^3) = 1,06E-6$$

Unter Berücksichtigung des Auslegungsdrucks von 70 bar und des Außendurchmessers von 0,416 m ergibt sich der genannte Grenzwert.

In den im Folgenden verwendeten Diagrammen zur Ergebnisdarstellung wird dieser Grenzwert, bezeichnet mit "Very High", angegeben. Die beiden weiteren dargestellten Grenzwerte, bezeichnet mit "Normal" und "High", sind im vorliegenden Fall nicht relevant.

6.3 Ausfallwahrscheinlichkeiten

Die Ergebnisse sind in Anlage A 4 dargestellt und werden im Folgenden erläutert. Das Diagramm zeigt neben den oben benannten Grenzwerten für die unterschiedlichen Gefährdungsklassen zwei Linien für die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten. Die Ergebnisse sind entlang der Stationierung über die Leitung aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit infolge Gefährdung durch Dritte durchgängig kleiner als der Grenzwert für die Safety Class Very High von $1,06 \cdot 10^{-6}$ ist. Rechnerisch variieren die Werte, abhängig insbesondere von der Überdeckung und der Rohrwanddicke.

Die Versagenswahrscheinlichkeit infolge mechanischer Beanspruchung liegt unter 10^{-14} . Sie unterschreitet den Grenzwert um mehr als acht 10er-Potenzen und liegt damit im vernachlässigbaren Bereich. Die im Diagramm erkennbaren

Sprünge in der Ergebnislinie sind im Wesentlichen auf Veränderungen in der Wanddicke sowie der Temperaturbeanspruchung aus parallel verlaufenden Hochspannungskabeln im Bereich der Bahnquerung zurück zu führen.

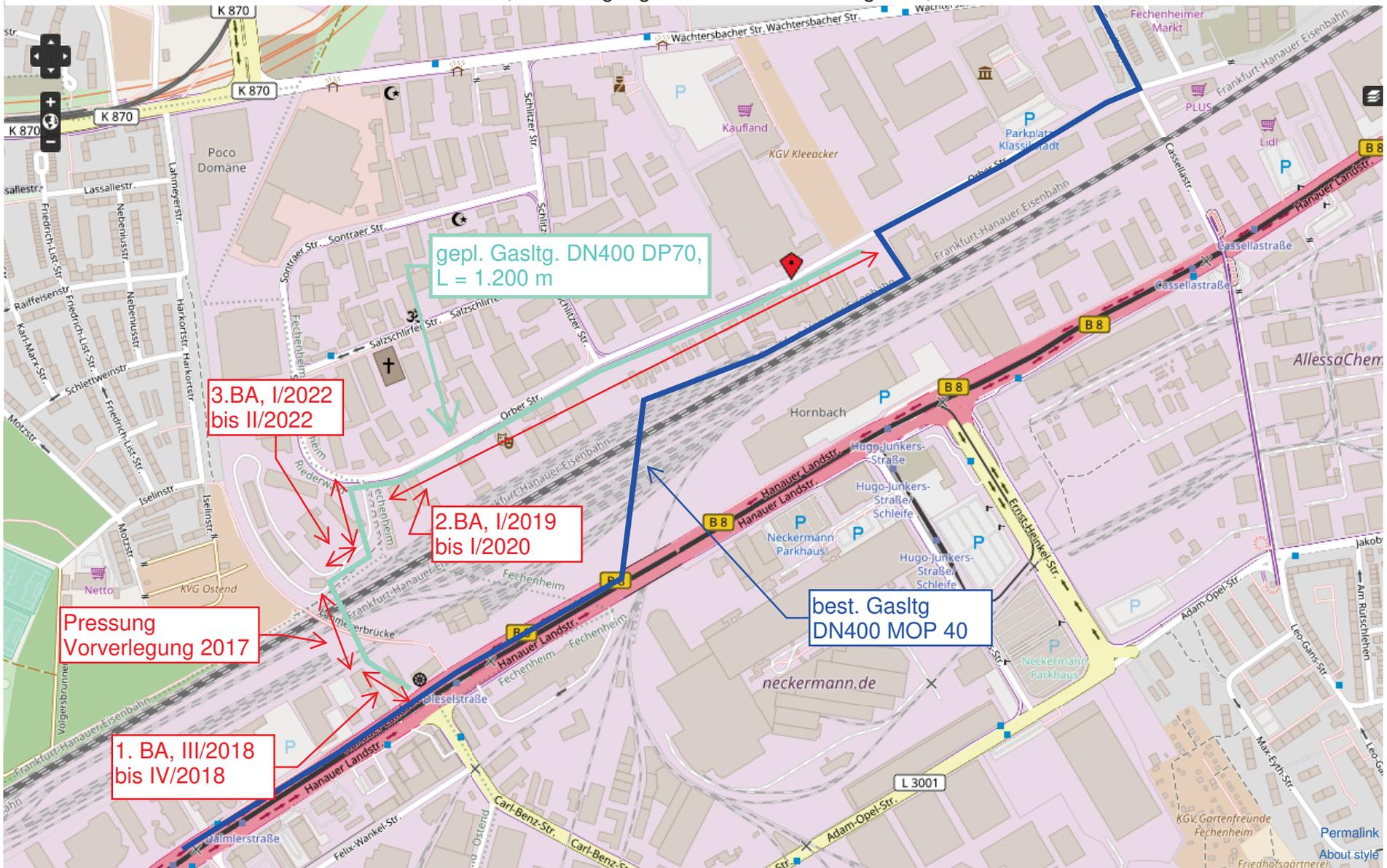
Die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten (Pf in Ereignisse pro km und Jahr) sind in der folgenden Tabelle zahlenmäßig zusammengestellt.

Grenzwert „Very High“	Pf inf. mechanischer Überbeanspruchung (max.)	Pf inf. mechanischer Überbeanspruchung (avg.)	Pf inf. Gefährdung durch Dritte (max.)	Pf inf. Gefährdung durch Dritte (avg.)
1,06 E-6	4,26 E-15	8,90 E-17	1,25 E-7	6,05 E-8

Anlage

A 1 Trassenverlauf

Übersichtsplan II Netzdienste Rhein-Main GmbH Frankfurt-Fechenheim, Umverlegung Gas-Hochdruckleitung HD3, DN 400 MOP 40



Legende

Karte hergestellt aus OpenStreetMap-Daten | Lizenz: Open Database License (ODBL)

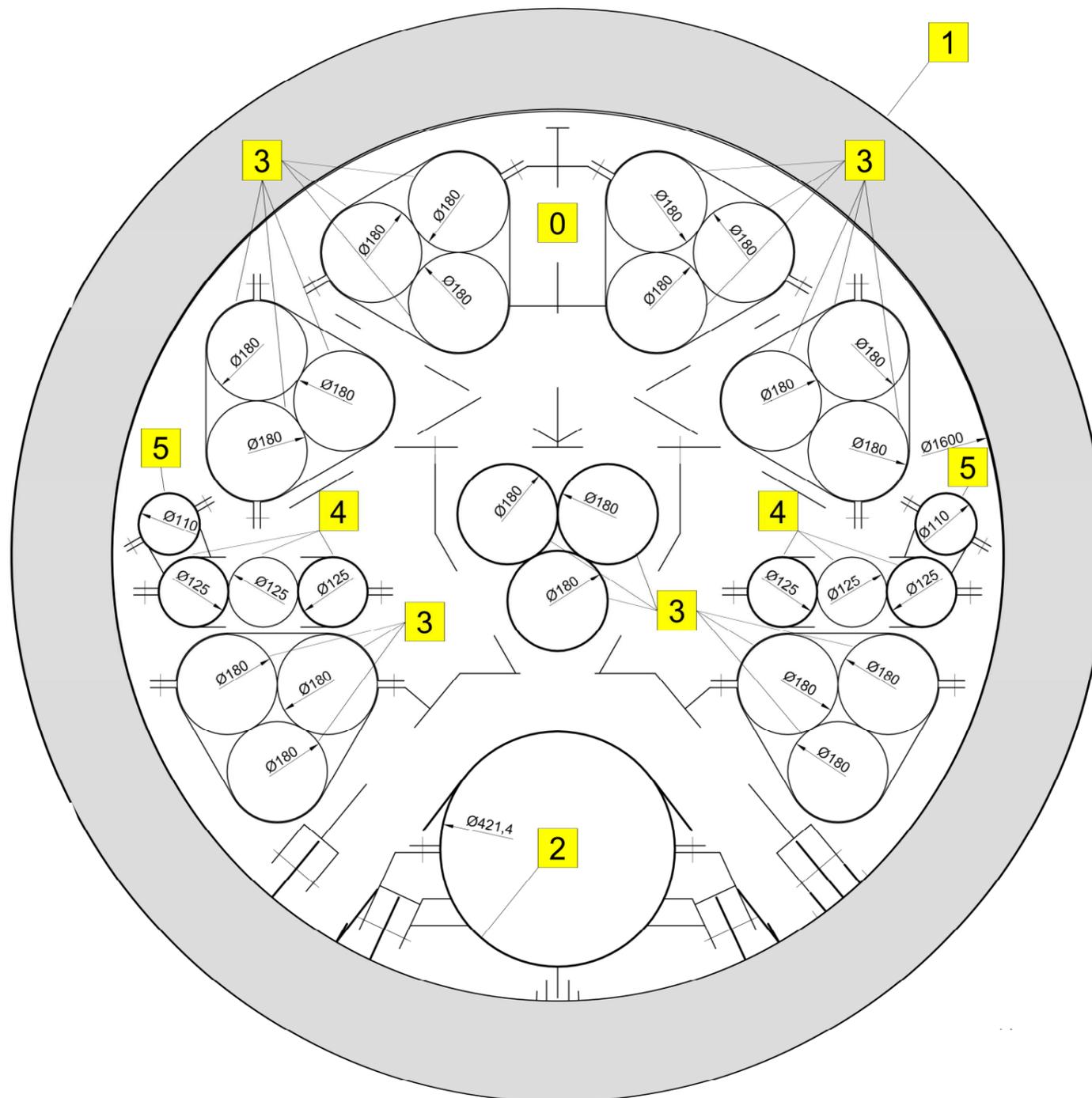
Gutachten 58618.00 Dr. Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH
Anlage A 1 Übersichtsplan

Anlage

A 2 Querschnitt Stahlbetonschutzrohr DN 1600 im Bereich Lahmeyerbrücke

Schutzrohrquerung Lahmeyerbrücke

DN 1600 Stb



ROHRDEFINITION

- 1** Schutzrohr DN 1600 gem. DIN EN 1916 Stahlbeton kreisrund, mit Keilgleitdichtung, da = 1960 mm, L = 3,0 m
- 2** Gas-Hochdruckleitung 406,4 x 8,8 mm, L 360 NE gem. DIN EN ISO 3183, Stahlleitungsrohr, kreisrund
Korrosionsschutz: PE-Umhüllung (s = 2,5 mm)
Mechanischer Schutz: GFK-Umhüllung (s = 5,0 mm)
=> da = 421,4 mm, L = 8,0m
- 3** Schutzrohre d 180 PE-HD, da 180 x 10,2 mm, L = 6,0 m
- 4** Schutzrohre d 125 PE-HD, da 125 x 7,1 mm, L = 6,0 m
- 5** Schutzrohr d 110 PE-HD, da 110 x 6,3 mm, L = 6,0 m mit Mehrfachbelegungsrohr PE-HD 2 x d 40 + 2 x d 32, Trommelware
- 0** Verbleibender Ringraum zwischen dem Stahlbetonschutzrohr **1** und den Schutz-/Medienrohren **2**, **3**, **4** und **5**, wird abschließend verdämmt.

				Auftragsnr: NRM	
				Auftragsnr: ASE	
				Str.Nr.	
		01	Ausschreibungsunterlage	09.09.15	V. Rutz
		Index	Aenderungstext	Datum	Name
gezeichnet	25.09.14	M. Cord		 Ingenieurbüro Becker & Partner GmbH Planung-Vermessung-Dokumentation	
Planstand	09.09.15	V. Rutz			
geplottet	21.09.15	V. Rutz			
Maßstab	1:10	Verlegung von Kabel- und Leitungstrassen im Zuge der Baufeldfreimachung Tunnel Riederwald DB-/HFM-Querung i. B. d. Lahmeyerbrücke Rohranordnung Stahlbetonschutzrohr			
Lagestatus	-				
Koordinatensys	GK				
Höhensystem	ü.N.N				
				Abteilung N1-PM2	
				Sachbearbeiter Hr. O. Floch	
				Telefon 069/213-26849	
					
				Zeichnungsnummer 2015-95571 RA	
				Index Blatt 01 01	

Anlage

A 3 Stationierungspunkte der Bewertung und Zuordnung zu Lageplänen

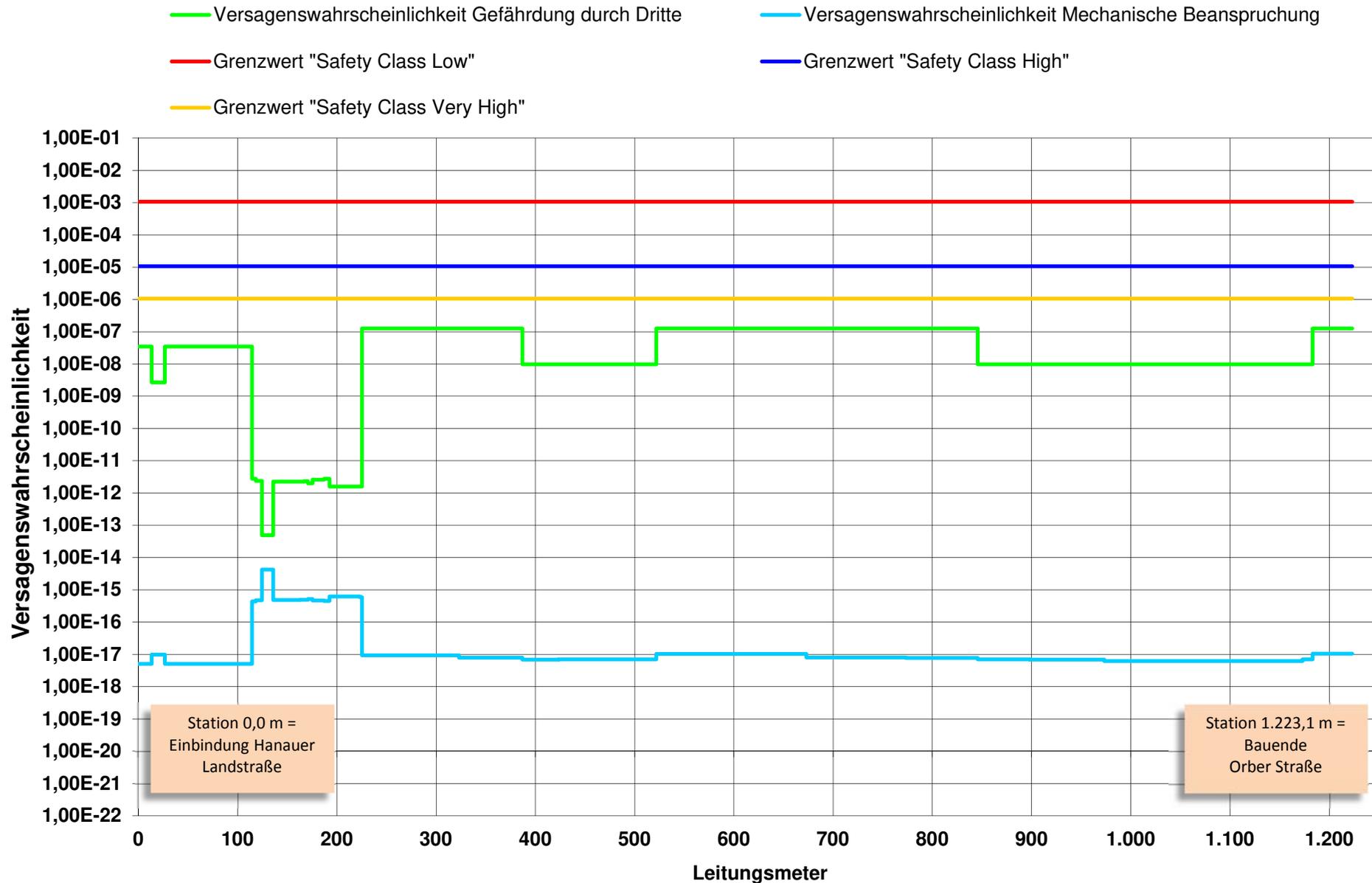
Umverlegung Gashochdruckleitung HD 3 DN 400 DP 70 bar Frankfurt-Fechenheim

Anfangsstation [m]	Blattschnitt Anfang Anmerkung / Blatt-Bezeichnung [-]
0	Beginn an Einbindung Hanauer Landstraße / Koordinierter Gesamtleitungstrassenplan, Blatt 11, IB Becker & Partner, NRM Auftragsnummer I96651, Blatt Nr. 5 (Bereich Verlängerung Ferdinand-Happ-Straße)
114,4	Beginn am südlichem Ende der Pressung / Detailplan/Längsschnitt DB-/HFM-Querung, Blatt 10a, IB Becker & Partner,
225,4	Beginn an nördlichen Ende der Pressung / NRM Bestandsplan Nr.1 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.04.2014
386,9	Frankfurt/M. - Fechenheim, Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.2 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016
577,0	Frankfurt/M. - Fechenheim, Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.3 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016
755,8	Frankfurt/M. - Fechenheim, Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.4 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016
934,1	Frankfurt/M. - Fechenheim, Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.5 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016
1116,2	Frankfurt/M. - Fechenheim, Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.6 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016
1223,1	Bauende Orber Straße / NRM Bestandsplan Nr.6 von 6, Auftrag Nr. 960 1264, IB Henseler, Stand 04.10.2016

Anlage

A 4 Ergebnisdarstellung

Versagenswahrscheinlichkeit



Anlage

A 5 Grundlagengutachten 58618.01

Hannover – Leipzig

Dr.-Ing. Veenker
Ingenieurgesellschaft mbH

Heiligengeiststraße 19
30173 Hannover

Leibnizstraße 25
04105 Leipzig

mail@veenkerghmbh.de
www.veenkerghmbh.de

Anlage zum Gutachten 58618.00

Grundlagengutachten

Hochdruckleitungen

Sicherheitsanalyse auf Basis einer
strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse

Auftraggeber: NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH

Projekt: 58618.01

Datum: 23.10.2018

Revision: 00

Vereidigte Sachverständige
Dr.-Ing. Manfred Veenker
Dipl.-Ing. Jörg Himmerich
Dipl.-Ing. Alexander Junge

Amtsgericht Hannover
HRB 57 606
USt-IdNr.: DE 198 708 104

Geschäftsführer
Jörg Himmerich

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	5
2. Unterlagen	6
2.1 Hinweis	6
2.2 Vorschriften und Literatur	6
2.3 Schadensstatistiken	9
3. Vorgehen	10
4. Grundlagen der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse	12
4.1 Allgemeines	12
4.2 Definition „Versagen“	12
4.3 Technische Zustandsbewertung	13
4.4 Theoretische Grundlagen der probabilistischen Berechnung	14
4.5 Grundsätzliche Aufteilung der Ursachen	16
4.6 Schädigung durch Dritte	17
4.6.1 Allgemeine Bemerkungen	17
4.6.2 Beschreibung	17
4.6.3 Fehlerbaum für den Leitungskontakt	18
4.6.4 Undichte bei Schädigung durch Dritte	23
4.6.5 Berücksichtigung von Maßnahmen zum Leitungsschutz	24
4.7 Schädigung durch mechanische Beanspruchung	25

4.7.1	Beschreibung	25
4.7.2	Darstellung der verwendeten Basisvariablen	26
4.7.3	Fehlerbaum für die mechanische Beanspruchung	35
4.7.4	Versagenswahrscheinlichkeit infolge mechanischer Beanspruchung	36
4.7.5	Zusammenstellung der benötigten Parameter	36
4.8	Korrosionsmodelle	38
4.8.1	Allgemeines	38
4.8.2	Das integrierte Korrosionsmodell	39
4.8.3	Berücksichtigung von Molchdaten	39
4.8.4	Raten der generalisierten Waddickenabträge	39
4.9	Allgemeines	44
4.10	Erforderliche Leitungsdaten	45
4.11	Zusätzliche Leitungsdaten	45

Anlagenverzeichnis

- A 1 Fehlerbaum für die grundsätzliche Aufteilung der Schadensursachen
- A 2 Fehlerbaum für die Wahrscheinlichkeit von Leitungskontakt durch Dritte
- A 3 Wahrscheinlichkeit des Leitungskontakts als Funktion der Erdüberdeckung der Leitung
- A 4 Versagenswahrscheinlichkeit bei Baggerangriff
- A 5 Modell Geogitter
- A 6 Statistische Angaben zu den Basisvariablen
- A 7 Fehlerbaum für die Undichte infolge mechanischer Beanspruchung
- A 8 Bewertungsstruktur Probabilistik
- A 9 Einfluss der Leitungsdaten

1. Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument stellt die Grundlagen der bei der Bewertung von Hochdruckleitungen im Sinne der Gashochdruckleitungsverordnung (Unterlage U 1) und der Rohrfernleitungsverordnung (Unterlage U 2) auf Basis der probabilistischen Vorgehensweise angewendeten Verfahren dar. Es werden normative Bezüge hergestellt, die verwendeten Formeln sowie die zu treffenden Annahmen und Festlegungen erläutert.

Bei der Bewertung wird im Rahmen einer Structural Reliability Analysis (SRA) die Versagenswahrscheinlichkeit sowohl infolge bestimmungsgemäßer Beanspruchung als auch infolge Einwirkungen Dritter untersucht.

Die konkreten Untersuchungsergebnisse finden sich in der vorangestellten leitungsbezogenen Sicherheitsanalyse.

Dipl.-Ing. Roberto Ferrari

2. Unterlagen

2.1 Hinweis

Die hier zusammengestellte Literatur ist kontinuierlich recherchiert worden. Die Beschaffung von Literatur erfolgt einerseits durch Stichwortrecherche in nicht-kommerziellen Datenbanken (z. B. OPAC) und andererseits mittels Durchsicht einschlägiger Fachzeitschriften (z. B. 3R international, Int. J. Pres. Ves. & Piping) und Dokumentationen einschlägiger Konferenzen (z. B. Pipeline Safety Conference, OMAE, International Pipeline Conference). Der Übersicht halber sind in der vorliegenden Zusammenstellung nicht alle recherchierten Unterlagen aufgeführt. Es sind nur die Unterlagen, auf die im Folgenden Bezug genommen wird, benannt.

2.2 Vorschriften und Literatur

- U 1 Verordnung über Gashochdruckleitungen (Gashochdruckleitungsverordnung, GasHDrLtgV), Ausgabe 05/2011
- U 2 Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (Rohrfernleitungsverordnung, RohrFLtgv), Ausgabe 09/2002]
- U 3 DIN EN 1594: „Gasinfrastruktur - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar - Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1594:2013“, Ausgabe 12/2013
- U 4 TRFL: „Technische Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL) nach §9 Absatz 5 der Rohrfernleitungsverordnung“, Ausgabe 05/2017
- U 5 DIN EN ISO 16708: „Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods“, Ausgabe 08/2006
- U 6 DIN 25424, Teil 1: „Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen“, Ausgabe 09/1981
- U 7 DIN 25424, Teil 2: „Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerstammbaumes“, Ausgabe 04/1990
- U 8 DIN 25419: „Ereignisablaufanalyse; Verfahren, graphische Symbole und Auswertung“, Ausgabe 11/1985

- U 9 DIN 2413: „Nahtlose Stahlrohre für öl- und wasserhydraulische Anlagen - Berechnungsgrundlage für Rohre und Rohrbögen bei schwel-
ender Beanspruchung“, Ausgabe 06/2011

- U 10 DIN EN 13480-3: „Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Kon-
struktion und Berechnung; Deutsche Fassung EN 13480-3:2012“, Aus-
gabe 12/2014

- U 11 DVGW GW 315: „Gas- und Wasserversorgung Rohrnetz, Hinweise für
Maßnahmen zum Schutz von Versorgungsanlagen bei Bauarbeiten“,
Ausgabe 05/1979

- U 12 DIN EN 14161: “Erdöl- und Erdgasindustrie – Rohrleitungstransport-
systeme (ISO 13623:2009 modifiziert); Deutsche Fassung EN
14161:2011+A1:2015”, Ausgabe 07/2015

- U 13 ASME B31.8S: “Managing System Integrity of Gas Pipelines”, Ausgabe
10/2016

- U 14 API RP 1160: “ Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipe-
lines”, Ausgabe 09/2013

- U 15 DIN EN 10208-2: „Stahlrohre für Rohrleitungen für brennbare Medien –
Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Rohre der Anforderungsklasse
B“, Ausgabe 07/2009

- U 16 DIN EN ISO 3183:2013-03: „Erdöl- und Erdgasindustrie - Stahlrohre für
Rohrleitungstransportsysteme (ISO 3183:2012); Deutsche Fassung
EN ISO 3183:2012“, Ausgabe 03/2013

- U 17 JCSS Probabilistic Modal Code, Part I-IV, Stand 2002

- U 18 EAU Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen": 1980;
Arbeitsausschuss Ufereinfassungen der Hafenbautechnischen Gesell-
schaft e. V., Wilhelm Ernst & Sohn, Ausgabe 1981

- U 19 AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil1-18: „Verlegung und Statik von Kunst-
stoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze“, Ausgabe 12/2007

- U 20 VdTÜV MB ROHR 1063: „Technische Richtlinie zur statischen Berech-
nung eingerdeter Stahlrohre“, Ausgabe 05/1978

- U 21 Jager, Kuik, Stallenberg, Zanting: "The influence of land use and depth of cover on the failure rate of gas transmission pipelines", in 4th IPC, Calgary Canada, 2002
- U 22 Zimmermann, T.: „Pipeline Limit States Design Developments in North America“, in: Proceedings of an International Conference on Risk-Based & Limit State Design & Operation of Pipelines, Aberdeen, 1998
- U 23 Dinovitzer, A. S.; Smith, R.J.: „Strain-based pipeline design criteria review“ in Proceedings of the International Pipeline Conference 1998, Volume II
- U 24 Alber, D; Reitmeier, W.: „Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse“, Schriftenreihe Heft 7 vom Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, 10/1986
- U 25 Mørk, K. F.; Spiten, J.; Torselletti, E.; Ness, O. B.; Verley, R.: „The Superb Project DNV '96: Buckling and Collapse Limit State“, in: 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Yokohama, April 13-18, 1997
- U 26 Smith, D.J.: „Reliability, maintainability and risk“, Butterworth and Heinemann, 2001
- U 27 Guidelines for quantitative risk assessment, "Purple Book", CPR 18E, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, 1999
- U 28 Darstellung der Wahrscheinlichkeit des Leitungskontakts in Abhängigkeit der Erdüberdeckung, unveröffentlicht
- U 29 DIN 1055-100: „Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln“, Ausgabe 03/2001
- U 30 DIN EN 1990:2010-12: „Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010“, Ausgabe 12/2010
- U 31 DIN EN 1990/NA:2010-12: „Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“, Ausgabe 12/2010

- U 32 Spaethe, G.: „Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen“, 2. Auflage 1992, Springer-Verlag Wien, New York
- U 33 Engel, A.: „Abgrenzung zwischen vorwiegend ruhender und schwel-
lender Rohrbeanspruchung“, in Gas Erdgas 137 S. 363 - 366, 1996
- U 34 Rackwitz, R.: „Einwirkungen auf Bauwerke“, in Mehdorn, G.: Der Ingeni-
eurbau; Grundwissen, Verlag Ernst & Sohn, Ausgabe 1997
- U 35 Zimmermann, T.: „Pipeline Reliability-Based Design Developments for
Outside Force Damage“, in: Proceedings of an International Conference
on Risk-Based & Limit State Design & Operation of Pipelines, Aberdeen,
1998
- U 36 DVGW - Arbeitsblatt GW 9 (A): „Beurteilung der Korrosionsbelastungen
von erdüberdeckten Rohrleitungen und Behältern aus unlegierten und
niedrig legierten Eisenwerkstoffen in Böden“ Wirtschafts- und Verlags-
gesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, Mai 2011

2.3 Schadensstatistiken

- U 37 Papadakis, G. A.: „Review of transmission pipeline accidents involving
hazardous substances“, Report EUR 18122 EN, aufgestellt vom Institute
for Systems, Informatics and Safety, 1999
- U 38 EGIG: 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group,
March 2018
- U 39 Lyons, D.: Western European cross-country oil pipelines; 30-year per-
formance statistics, concawe-report no. 1/02, February 2002
- U 40 Schadensstatistik des DVGW, Systemjahr 1981 - 2000, nicht veröffent-
licht
- U 41 US DOT 1992 „National Transportation Statistics“, US Department for
the Transportation, Research and Special Program Administration, Of-
fice of Pipeline Safety, Washington DC
- U 42 Concawe Report No. 6/18 „Performance of European cross-country oil
pipelines; Statistical summary of reported spillages in 2016 and since
1971“, Concawe Oil Pipelines Management Group's Special Task Force
on pipeline spillages (OP/STF-1), Brussels, Ausgabe März 2018

3. Vorgehen

Ziel jeder sicherheitstechnischen Betrachtung ist der Schutz menschlichen Lebens und der Umwelt. Es wird gefordert, dass jedes technische System (hier: Leitung) weder menschliches Leben, und falls gefährdende Medien transportiert oder gespeichert werden, noch die Umwelt gefährdet. Um dieses Ziel zu erreichen, sind zahlreiche Vorschriften und Bestimmungen - sowohl für die Errichtung als auch für den Betrieb einer Leitung - aufgestellt worden. Diese Vorschriften und Bestimmungen gehören zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik. Dennoch verbleibt ein geringes Risiko, welches in der probabilistischen Bewertung durch Angabe eines Grenzwertes für die Versagenswahrscheinlichkeit (SRA) quantifiziert werden kann.

Bestimmendes Ereignis zur Beschreibung der technischen Sicherheit einer Leitung ist die „Undichte“, d. h. der Austritt des Mediums aus der Leitung. In Bezug auf dieses Ereignis ergeben sich zwei Fragestellungen, die in sicherheitstechnischen Betrachtungen eine Rolle spielen.

Die erste Fragestellung befasst sich mit den Ursachen für dieses Ereignis. Hierbei werden die Ursachen zunächst zusammengestellt. In der Regel handelt es sich um eine bestimmte Anzahl von Ereignissen oder Umständen, die gleichzeitig eintreten müssen, um zu einer Undichte zu führen. Es entsteht somit eine Verkettung von Ereignissen. Lässt sich für die in Frage kommenden Ereignisse oder Umstände eine Eintretenswahrscheinlichkeit darstellen, so kann hieraus unter Beachtung der entsprechenden algebraischen Gesetze die Eintretenswahrscheinlichkeit für das Ereignis „Undichte“ ermittelt werden. Es ist ohne weiteres einzusehen, dass die Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses „Undichte“ stark von den Randbedingungen einer bestimmten Leitung abhängt. Die analytische Untersuchung für die Ermittlung der Eintretenswahrscheinlichkeit anhand der Ursachen ist die Fehlerbaumanalyse (U 6 und U 7).

Die zweite Fragestellung befasst sich mit den Folgen dieses Ereignisses. Nach Eintreten einer Undichte ist eine Beeinträchtigung menschlichen Lebens nicht grundsätzlich als unmittelbare Folge anzusehen. In der vorliegenden Untersuchung wird jedoch ein konservativer Ansatz verfolgt, bei dem die Folgen einer Undichte nicht näher untersucht und als grundsätzlich inakzeptabel kategorisiert werden. Hieraus folgt, dass eine Undichte auf jeden Fall zu vermeiden ist,

was durch die Einhaltung einer zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit im Rahmen der SRA gewährleistet wird.

4. Grundlagen der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse

4.1 Allgemeines

Im vorliegenden Kapitel werden die Grundlagen der probabilistischen Bemessung für den Einsatz in einer technischen Zustandsbewertung aufbereitet. Es sind die mathematischen Operationen für die Ermittlung einer Versagenswahrscheinlichkeit angegeben, wenn Versagen aufgrund einer oder mehrerer Ursachen eintreten kann. Außerdem werden die Dichtefunktionen für die Einflussgrößen (Basisvariablen) angegeben. Hierbei werden Einflussgrößen mit einer erfahrungsgemäß geringen Streuung der möglichen, annehmbaren Werte mit dem Nennwert als deterministische Eingangsgröße berücksichtigt. Einflussgrößen mit einer erfahrungsgemäß großen Streuung der möglichen, annehmbaren Werte werden mit einer statistischen Verteilung berücksichtigt.

4.2 Definition „Versagen“

In den folgenden Ausführungen wird der Begriff Versagen bzw. Versagenswahrscheinlichkeit verwendet. Es ist erforderlich, das Versagen in dem hier verwendeten Kontext zu definieren.

Bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit infolge der Gefährdung durch Dritte (Kapitel 4.6) ist das Versagen gleichgesetzt mit dem Auftreten einer Undichte. Hierbei ist es unerheblich, ob es sich bei dieser Undichte um ein kleines Loch, aus dem geringe Gasmengen austreten, oder um einen Totalabriss der Leitung handelt. Die ermittelten Ergebnisse sind daher konservativ, da sie immer den Totalabriss abdecken, auch wenn es lediglich zu punktuellen Gasaustritten kommt.

Bei der Ermittlung des Versagens infolge mechanischer Überbeanspruchung (Kapitel 4.7) wird als Versagen das Erreichen der Materialstreckgrenze definiert. Dies bedeutet, dass ein Beanspruchungszustand, der Beanspruchungen im Werkstoff hervorruft, die über der Werkstoffstreckgrenze liegen, als Versagen im Sinne der hier durchgeführten Betrachtung definiert wird. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass der Werkstoff auch über die Streckgrenze hinaus unter In-

kaufnahme plastischer Verformungen beansprucht werden kann, ohne dass es zu einer Beschädigung oder einem Gasaustritt kommt. Die Bewertung ist daher auch für diesen Fall als konservativ zu betrachten.

4.3 Technische Zustandsbewertung

Das Programmsystem *ZBS* wurde zur quantitativen Zustandsbewertung bestehender Leitungen für beliebige Fluide, z. B. Gas und Öl entwickelt. Der temporär vorhandene Zustand dieser Leitungen ist der direkten Überwachung entzogen und zudem, z. B. durch Einflüsse Dritter oder Korrosion, zeitabhängig veränderlich. Aus den üblichen Planungs- und Bauunterlagen für die Errichtung der Leitung sowie der anschließenden Bestandsdokumentation (Bestandspläne, Rohrbuch etc.) werden die technischen Parameter der Leitung und sonstige Einflussgrößen aus dem Umfeld erhoben. Die relevanten Daten werden unter Verwendung speziell entwickelter Rechenalgorithmen zu einer operativen Versagenswahrscheinlichkeit miteinander verknüpft. Die Algorithmen stützen sich auf anerkannte Berechnungsmodelle der Statik sowie der Statistik und sind damit eindeutig reproduzierbar und nachvollziehbar.

Ein „Ereignis“ im Sinne dieser Überlegung ist das Auftreten eines Schadensfalles bezogen auf 1 km Hochdruckleitung während des Betriebszeitraumes von einem Jahr. Die Versagenswahrscheinlichkeit gibt frühzeitig Anzeichen dafür, ob der Leitungszustand in Teilbereichen einer Anhäufung von ungünstigen Einflüssen unterliegt und ob sich der Zustand des Systems mit der Zeit verändert. Das *ZBS* eignet sich damit zur frühzeitigen Erkennung von Systemschwachstellen an bestehenden und neu zu errichtenden Hochdruckleitungen. Aufgrund des modularen Aufbaus des Systems ist es möglich, Ursachenforschung zu betreiben und so die Ursachen eindeutig festzustellen. Hierauf abgestimmt, können frühzeitig Überwachungs- bzw. Sicherungsmaßnahmen geplant werden.

Bei der Zustandsbewertung werden entgegen der deterministischen Bemessung sämtliche *möglichen* Lastfälle anhand ihres Gefährdungspotentiales unterschieden und bezüglich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit gewichtet. Bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit wird dann nicht die Standsicherheit des Systems für feste Belastungs- und Widerstandswerte nachgewiesen, sondern es wird über die Streuung der entsprechenden Parameter die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens ermittelt, die mit einer zulässigen Grenzwahrscheinlich-

keit verglichen werden kann. Die Zustandsbewertung erfolgt ergänzend zur Bemessung und ersetzt diese nicht.

Das hier beschriebene System *ZBS* wurde in den letzten Jahren bei mehreren großen Gasversorgern eingerichtet. Überwachungs-, Sanierungs- und Instandsetzungsprogramme werden damit gesteuert und optimiert und es wurden erhebliche wirtschaftliche Erfolge erzielt. Das *ZBS* ist von einem anerkannten Sachverständigen nach Gashochdruckleitungsverordnung zertifiziert worden und kann somit uneingeschränkt und ohne weitere Anhörung angewendet werden.

4.4 Theoretische Grundlagen der probabilistischen Berechnung

Die Berechnung erfolgt mit den Methoden der probabilistischen Dimensionierung. Bei diesem Verfahren wird eine operative Versagenswahrscheinlichkeit errechnet, die in einer Risikostudie weiterverarbeitet oder mit einer zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit verglichen werden kann. Je geringer die Versagenswahrscheinlichkeit, desto höher ist die Sicherheit.

Für die Berechnung gibt es zwei grundsätzliche Wege: Die analytische Lösung und die statistische Lösung. Bei der analytischen Lösung ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit aus dem Integral über die Dichtefunktionen. Die Integrationsgrenzen umfassen den Bereich, für den die Grenzzustandsgleichung negative Werte liefert. Bei der statistischen Methode wird die Grenzzustandsgleichung hinreichend oft mit statistisch verteilten Werten für die Basisvariablen ausgewertet und die Fälle mit Anzeige eines Versagens aufaddiert (Monte-Carlo-Methode).

In der *Grenzzustandsgleichung* wird das mechanische Modell durch Gegenüberstellung der Beanspruchbarkeit und der Beanspruchung dargestellt. Im Grenzzustand hat die Gleichung die Form

$$g = \text{Beanspruchbarkeit} - \text{Beanspruchung} = 0$$

Sowohl die Beanspruchbarkeit als auch die Beanspruchung werden durch Basisvariablen dargestellt. Ist das Ergebnis größer oder gleich Null, liegt ein stabiler Zustand vor. Das negative Ergebnis der Grenzzustandsgleichung bedeutet das Versagen.

Als *Basisvariable* werden die maßgeblichen Werte zur Beschreibung des mechanischen Modells in der Grenzzustandsgleichung bezeichnet. Die Basisvariablen können eine stochastische Verteilung oder einen festen (deterministischen) Wert haben.

Die oben angegebene Auswertung von Integralen über die Dichtefunktionen lässt sich nur in seltenen Fällen geschlossen lösen. Ein solcher Fall ist gegeben, wenn in der Grenzzustandsgleichung sowohl die Beanspruchung als auch die Beanspruchbarkeit mit jeweils einer statistischen Verteilung dargestellt werden. Hierbei resultiert die Versagenswahrscheinlichkeit aus den Mittelwerten und den Standardabweichungen beider Verteilungen. Sind die Einflussgrößen normalverteilt, ist die Lösung sogar exakt. Für nicht normalverteilte Einflussgrößen handelt es sich um eine Näherung. Bei der hier vorgesehenen Form der Grenzzustandsgleichung mit statistisch verteilten und deterministischen Einflussgrößen ist die Näherung nur noch sehr grob. Zur Anwendung kommen daher numerische Lösungsverfahren.

Die Belastung wird zunächst durch einen Nennwert dargestellt und ist mit den folgenden zusätzlichen Informationen zu versehen:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Belastung in der Größe des Nennwertes bzw. Darstellung einer Dichtefunktion für den Betrag der Belastung.
- Auftretenswahrscheinlichkeit der Belastung bezogen auf den Ort. Da die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit immer bezogen auf eine räumliche Einheit der Leitung (Rohrschuss oder Bauteil) erfolgt, sind Belastungen, die nur an bestimmten Orten auftreten können, entsprechend zu bewerten.
- Auftretenswahrscheinlichkeit der Belastung bezogen auf die Zeit. Da die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit immer bezogen auf ein Jahr erfolgt, sind Belastungen, die nur zu bestimmten Zeiten auftreten können, entsprechend zu bewerten.

Bei einer statistischen Beschreibung einer Belastung ist also immer zu prüfen, inwieweit die oben genannten zusätzlichen Einflussgrößen enthalten sind.

4.5 Grundsätzliche Aufteilung der Ursachen

Eine Schädigung der Leitung kann durch unterschiedliche Ursachen entstehen. Für eine Analyse ist die Einordnung dieser Ursachen in Gruppen sinnvoll. Hier erfolgt die Einordnung in Anlehnung an die Schadensstatistik in U 39 in die sechs Gruppen: Schädigung durch Dritte, mechanisches Versagen, Korrosion, Bodenverformungen, Arbeiten an falscher Leitung und Sonstige.

Die Schädigung durch Dritte wird durch die Erdüberdeckung, die Wanddicke, die Intensität der Leitungsüberwachung, Häufigkeit der erdbaulichen Tätigkeiten im Leitungsbereich usw. wesentlich beeinflusst. Die Schädigung durch Dritte ist statistisch gesehen die häufigste Ursache von Undichten von Leitungen (U 37 bis U 41). Sie wird daher berücksichtigt.

Die Schadensgruppe „Mechanisches Versagen“ umfasst im Wesentlichen Ereignisse, bei denen die Beanspruchung die Widerstandsfähigkeit übersteigt. Hierzu gehören Materialversagen, hohe Beanspruchungszustände usw. Hierbei ist zwischen dem geraden Rohr und Bauteilen bzw. Verbindungen zu unterscheiden.

Schäden durch Korrosion treten ebenfalls häufig als Ursache auf. Korrosion wird durch die Aggressivität des Bodens, die Güte der Umhüllung, die Wirksamkeit des KKS usw. beeinflusst. Aus technischer Sicht führt die Korrosion zu einem Schaden infolge mechanischer Beanspruchung. In der folgenden Bewertung ist es also sinnvoll, die Korrosion als zur Schadensgruppe „Mechanisches Versagen“ zugehörig zu betrachten.

Ebenso führten Bodenverformungen zu einem Schaden infolge Überbeanspruchung. Demzufolge wird auch diese Schadensursache der Schadensgruppe „mechanisches Versagen“ zugeordnet.

Arbeiten an falscher Leitung führt U 38 zufolge nur an Leitungen geringeren Durchmessers zu Undichten. Diese Schadensursache ist darüber hinaus in deutlich weniger als 10 % der Fälle Ursache einer Undichte. Aus diesen Gründen bleibt diese Schadensgruppe im Folgenden unberücksichtigt.

Die verbleibende Schadensgruppe „Sonstiges“ ist der oben aufgeführten Statistik zu Folge in ca. 7 % der Fälle als Ursache einer Undichte angegeben worden.

In dieser Schadensgruppe werden Fehler im Betrieb und Naturereignisse wie Blitzeinschlag erfasst. Aufgrund der geringen Schadenshäufigkeit wird diese Gruppe hier vernachlässigt. Außerdem sind diese Ereignisse nicht bestimmend für die Zustandsanalyse einer Fernleitung.

In der Anlage A 1 ist der Fehlerbaum für die hier untersuchten Gruppen von Ursachen dargestellt. Die Versagenswahrscheinlichkeit für eine Undichte ergibt sich aus der Summe der Versagenswahrscheinlichkeiten infolge Beanspruchung und infolge Gefährdung durch Dritte.

4.6 Schädigung durch Dritte

4.6.1 Allgemeine Bemerkungen

Das Ereignis „Schädigung der Leitung durch Dritte“ wird als häufigste Schadensursache aufgeführt. Hierbei treten Schadenshäufigkeiten auf, die deutlich von den rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten in der Bemessung abweichen. Die in den folgenden Kapiteln zusammengestellten Formeln und Rechnungsgänge dienen der Abschätzung der Gefährdung von Leitungen infolge Schädigung durch Dritte. Die Größenordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses wird unter Verwendung von Schadensstatistiken mit den tatsächlichen Verhältnissen abgeglichen.

Die Entstehung einer Undichte infolge Schädigung durch Dritte kann nahezu zeitgleich oder zeitlich versetzt zur Schädigung selbst eintreten. Dementsprechend handelt es sich um ein Problem der Kurzzeitfestigkeit oder um ein Problem der Zeitfestigkeit. In den vorliegenden Untersuchungen wird nicht zwischen diesen beiden Fällen unterschieden, sondern es wird von einer zeitgleichen Entstehung der Undichte ausgegangen. Der günstige Effekt, dass eine später eintretende, potenzielle Undichte vorher durch den KKS erkannt wird, bleibt auf der sicheren Seite liegend unberücksichtigt.

4.6.2 Beschreibung

Schädigung durch Dritte entsteht bei Tätigkeiten im unmittelbaren Leitungsbe-
reich durch Personen, die nicht zum Leitungsbetrieb gehören. Als Beispiele
seien hier genannt:

- Bodenaushub für die Verlegung von Leitungen anderer Versorger (Wasser, Abwasser, Gas, Elektrizität, Dränage usw.)
- Bodenaushub für die Herstellung eines Straßenunterbaus
- Bodenaushub für die Herstellung einer Gründung
- Landwirtschaftliche Tätigkeiten
- Forstwirtschaftliche Tätigkeiten

Zur Schädigung durch Dritte gehören keine außergewöhnlichen Ereignisse wie Flugzeugabsturz, Verkehrsunfälle mit von der Fahrbahn abgekommenen Fahrzeugen, abgeworfene Rotorblätter von Windenergieanlagen usw. Diese Ereignisse werden auch in den Schadensstatistiken gesondert betrachtet. Sie weisen eine vergleichsweise geringe Auftretenswahrscheinlichkeit auf.

Bei dem Ereignis „Schädigung durch Dritte“ sind für die probabilistische Betrachtung zunächst zwei Schritte zu unterscheiden. Erst muss eine Berührung der Leitung zustande kommen. Hierzu ist es erforderlich, dass überhaupt eine erdbauliche Tätigkeit im Bereich der Leitung stattfindet. Dann ist es erforderlich, dass diese Tätigkeit die Leitungslage berührt. Bei der entsprechenden Missachtung der Vorsichtsmaßnahmen wird die Leitung beschädigt. Überschreitet die Energie der Beschädigung die Widerstandsfähigkeit des Rohres, so kommt es zu dem TOP-Ereignis „Undichte“. Aus probabilistischer Sicht ist festzuhalten, dass das TOP-Ereignis nur stattfinden kann, wenn eine Berührung (Kontakt) der Leitung eingetreten ist UND die Schädigungsenergie größer ist als die Widerstandsfähigkeit des Rohres. Die zugehörige mathematische Formel lautet:

$$p(\text{TPI}) = p(\text{contact}) \cdot p(\text{resistance})$$

In der folgenden Untersuchung werden diese beiden Ereignisse getrennt voneinander betrachtet.

4.6.3 Fehlerbaum für den Leitungskontakt

In der Anlage A 2 ist ein vereinfachter Fehlerbaum für diesen Themenkomplex dargestellt. Der Fehlerbaum ist der Unterlage U 22 entnommen.

Für das Eintreten von Leitungskontakt müssen drei Voraussetzungen gegeben sein. Erstens muss überhaupt eine erdbauliche Tätigkeit im Leitungsbereich stattfinden. Zweitens muss bei dieser Tätigkeit die Leitung nicht beachtet werden. Drittens wird die erdbauliche Tätigkeit vom Leitungsbetreiber nicht bemerkt. Diese drei Ereignisse müssen gleichzeitig eintreten. Daher sind sie im Diagramm mit einer UND-Verknüpfung miteinander verbunden. Diese drei Ereignisse lassen sich durch weitere Ereignisse darstellen. Es sind dies:

Tätigkeit findet statt

Es findet eine erdbauliche Tätigkeit oberhalb der Leitung statt. Die Urheber für eine solche Tätigkeit sind in Kapitel 4.6.2 beschrieben. Es ist unmittelbar einzu-sehen, dass die Wahrscheinlichkeit für diese Tätigkeiten von der Bebauungs-dichte abhängt. Eine höhere Bebauungsdichte bedingt eine höhere Wahrschein-lichkeit erdbaulicher Tätigkeit.

$h_U < h_w$

Die Tiefe (h_w) der erdbaulichen Tätigkeit ist größer als die Erdüberdeckung (h_U) der Leitung. Bei der Herstellung von Baugruben für Gründungen oder bei der Herstellung von Gräben für die Rohrverlegung wird die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Ereignisses als relativ hoch angesehen. Diese Wahrschein-lichkeit ist bei landwirtschaftlicher oder forstwirtschaftlicher Tätigkeit als gerin-ger einzustufen.

Nicht informiert

Der Ausführende der erdbaulichen Tätigkeit ist über die Lage der Leitung nicht informiert. Bei diesem Ereignis wird der Ausführende als Einheit betrachtet. Das Ereignis tritt ein, wenn eins der folgenden zwei Ereignisse eintritt (ODER-Verknüpfung).

Leitung nicht gekennzeichnet

Zu diesem Ereignis gehört sowohl die Auspflockung der Leitung als auch die Möglichkeit der Ermittlung der Leitungslage anhand von Markierungspfählen.

Erdbau nicht angezeigt

Der Erdbau ist anzuzeigen. Es wird vorausgesetzt, dass alle Leitungen bei der entsprechenden Institution angezeigt sind. Somit wird der Ausführende der erd-baulichen Tätigkeiten bei der Anzeige über diese Leitung informiert. Wird der

Erdbau nicht angezeigt, handelt es sich um Fahrlässigkeit oder um einen Notfall (z. B. Bodendekontamination nach einem Verkehrsunfall). Dieses Ereignis ist mit einer geringen Wahrscheinlichkeit belegt.

Missachtung der Information

Der Ausführende der erdbaulichen Tätigkeiten ist über die Leitung informiert, missachtet jedoch diese Information einschließlich der Vorgaben aus den einschlägigen Vorschriften (U 11).

Überwachungsintervall zu groß

Der Überwachungsintervall ist betriebsintern in Anlehnung an U 12 festgelegt. Zu beachten ist hierbei sowohl die Größe des Überwachungsintervalls als auch die Dauer einer erdbaulichen Tätigkeit.

Von Überwachung übersehen

Eine Überwachung findet statt, jedoch wird die Maßnahme übersehen. Ursachen hierfür sind Fahrlässigkeit, ungeeignete Überwachungsbedingungen usw. Zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Ereignisses gelten beispielsweise die Geschwindigkeitseinschränkungen bei der Befliegung von Leitungstrassen.

Der hier dargestellte Fehlerbaum dient im Wesentlichen zur Veranschaulichung der Zusammenhänge. Wichtig für die weitere Vorgehensweise ist die Darstellung der Wahrscheinlichkeit. In der Unterlage U 35 ist die Wahrscheinlichkeit für den Leitungskontakt in Abhängigkeit der Erdüberdeckung (h_{ij}) enthalten. Das Diagramm gilt unabhängig von der Bebauungsdichte. Das Diagramm ist in der Anlage A 3 dargestellt. Aus der Regressionsanalyse ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit die folgende Formel:

$$p(\text{contact}) = 0,038521 \cdot e^{(-2,5554 \cdot h_{ij})} \quad h_{ij} \text{ in [m]}$$

Bei der hier angegebenen Formel muss ein Faktor zur Berücksichtigung der Bebauungsdichte eingeführt werden.

Die Berücksichtigung der Bebauungsdichte kann einerseits anhand der Vorschriftenlage beschrieben werden. Insbesondere in ausländischen und internationalen Vorschriften werden Sicherheitsbeiwerte oder zulässige Versagenswahr-

scheinlichkeiten an die Bebauungsdichte gekoppelt. Werden zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten angegeben, so lässt sich der Faktor hieraus direkt ermitteln. Werden Sicherheitsbeiwerte angegeben, so müssen hieraus zunächst die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit z.B. durch Verwendung der Kesselformel errechnet werden, um den Korrekturfaktor zu bestimmen. Wegen der Unschärfe bei der Durchführung mehrerer Berechnungen, und der Einschränkung durch die angenommene Bestimmungsgleichung wird die Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten nachrangig.

Ein anderer Weg zur Berücksichtigung der Bebauungsdichte besteht in der Auswertung von Schadensstatistiken. Hierbei werden näherungsweise Transportleitungen als außerhalb von Bebauungsgebieten liegend vorausgesetzt und Versorgungsleitungen als innerhalb von Bebauungsgebieten liegend vorausgesetzt, sofern die Statistiken nichts Genaueres liefern.

Es wird die Schadensstatistik des DVGW (Unterlage U 40) herangezogen. Hierin sind die Schäden nach Ursachen, nach unterschiedlichen Kategorien von Leitungen und nach Werkstoff differenziert dokumentiert. Die Auswertung des Zahlenmaterials liefert die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Wahrscheinlichkeiten für Stahlleitungen:

Leitungskategorie	Schadenshäufigkeit [Ereignisse/Jahr/km]
Hochdruckleitungen mit PN >16 bar	$0,92 \cdot 10^{-3}$
Hochdruckleitungen mit 4 bar <PN <16 bar	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Versorgungsleitungen mit PN <4 bar	$9,2 \cdot 10^{-3}$
Anschlussleitungen mit PN <4 bar	$34 \cdot 10^{-3}$

Für die Ermittlung der Verhältniswerte seien zunächst die Hochdruckleitungen den Leitungen außerhalb bebauter Gebiete gleichgesetzt. Werden Anschlussleitungen den Leitungen in bebauten Gebieten gleichgesetzt, so ergibt sich ein Verhältniswert zwischen 0,027 und 0,14. Werden die Versorgungsleitungen als Bezugsgröße verwendet, so ergeben sich Verhältniswerte zwischen 0,10 und 0,52.

Es liegen weitere Schadensstatistiken vor, deren Verwendung wegen der groben Einteilung in unterschiedliche Bebauungsklassen hier nur nachrangig betrachtet wird. Sie werden der Vollständigkeit halber kurz aufgeführt.

Im EGIG-Report (U 38) sind Zahlen für unterschiedliche Überdeckungshöhen angegeben. Das Zahlenmaterial basiert auf den Angaben von überregionalen Gastransportunternehmen. Für eine Erdüberdeckung von weniger als 0,8 m beträgt die Wahrscheinlichkeit für die Schädigung durch Dritte $0,23 \cdot 10^{-3}$ Ereignisse pro Jahr und km. Für Leitungen mit einer höheren Überdeckung wurden $0,14 \cdot 10^{-3}$ Ereignisse pro Jahr und km verzeichnet. Eine Unterscheidung nach der Bebauungsdichte erfolgt nicht.

In einem Bericht aus U 41 wird zwischen dem Verteilungs- und dem Transportnetz unterschieden. Die Statistik liefert die in U 22 angegebene Anzahl der Schädigungen pro Jahr und km. Demnach wurden bei Leitungen im Versorgungsnetz $45 \cdot 10^{-3}$ Schädigungen pro Jahr und km verzeichnet. Demgegenüber wurden Leitungen im Transportnetz in $3,5 \cdot 10^{-3}$ Fällen pro Jahr und km geschädigt. Der Verhältniswert beträgt dann 0,077.

Der Vergleich der Zahlenwerte zeigt zunächst, dass in vergleichbaren Fällen die Statistiken ähnliche Werte liefern. Eine Anwendung erscheint aus ingenieurtechnischer Sicht hier sinnvoll zu sein. Der Vergleich der Statistiken mit den in den Vorschriften geforderten zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten liefert dann eine sinnvolle Ergänzung, wenn man davon ausgeht, dass nur drei Umgebungsklassen betrachtet werden. Der Wertebereich für die Versagenswahrscheinlichkeit erreicht demnach maximal eine Größenordnung von 10^2 .

Basierend auf den zitierten Unterlagen und den daraus abzuleitenden Zusammenhängen können die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Faktoren angegeben werden:

Umgebungsklasse	Dichte	Faktor
URBAN	hoch	3,5
RURAL	gering	0,4

4.6.4 Undichte bei Schädigung durch Dritte

Bei Kontakt mit der Leitung im Falle von Tätigkeiten Dritter wird die Leitung beschädigt, wobei es nicht unbedingt zur Undichte kommen muss. Die Entstehung einer Undichte erfordert eine Schädigungsenergie, die größer ist als der vom Rohr entgegenwirkende Widerstand. Der Widerstand des Rohres ist abhängig von der Rohrgeometrie, insbesondere der Wanddicke und von der Materialgüte, und von der Art der Schädigung (Durchschlag, Rille, Delle). Die Schädigungsenergie ist abhängig vom eingesetzten Gerät (Bagger, Pflug usw.).

In dem Bericht U 22 ist ein Berechnungsansatz dargestellt, der von einer Schädigung der Leitung durch den Zahn eines Baggers ausgeht. Dieser Ansatz wird verwendet, da hier eine statistische Verteilung für die angreifende Kraft enthalten ist. Es wird vorausgesetzt, dass die Schädigungsenergie anderer Geräte hiermit abgedeckt ist. Die Grenzzustandsgleichung ist nicht abhängig vom aktuellen Innendruck (PN). Der Einfluss des Innendrucks auf die Versagenswahrscheinlichkeit wird als gering betrachtet, da es sich bei dem Angriff durch den Baggerzahn vornehmlich um ein „Scherproblem“ (Durchschlag) handelt. Maßgebliche Größe der Beanspruchbarkeit ist die Zugfestigkeit. Vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend wird statt der Zugfestigkeit hier die um 15 % erhöhte Streckgrenze als Grenzwert festgelegt.

In der Grenzzustandsgleichung ist neben der Beanspruchbarkeit der Leitung die Beanspruchung selbst zu berücksichtigen. Die Gleichung hat dann die Form

$$g = \left[1,17 - 0,0029 \cdot \left(\frac{d_A}{t} \right) \right] \cdot (L + w) \cdot t \cdot (1,15 \cdot R_e) - F_{\text{Bagger}} = 0$$

Entsprechend Kapitel 4.7.2.1 wird hier die Streckgrenze (Basisvariable R_e) stochastisch verteilt angenommen. Die Kraft im Zahn der Baggerschaufel (Basisvariable F_{Bagger}) weist weiterhin einen hohen Variationskoeffizienten auf. Hierbei wird angenommen, dass eine mit Zähnen versehene Baggerschaufel die Isolierung zerstört und senkrecht auf das Rohr drückt. Die dann einwirkende Kraft ist abhängig vom Fahrzeugtyp. Für diese Belastung sind in U 22, resultierend aus der Auswertung der Baggerpopulation, die im Folgenden aufgeführten Kennwerte enthalten:

Basisvariable Kraft im Zahn der Baggerschaufel (F_{Bagger})	
Dichtefunktion	3-par. Gamma-Verteilung
Mittelwert	164 kN
Variationskoeffizient	0,45
unterer Nullwert	92 kN

Dieser Basisvariablen ist somit der wesentliche Einfluss auf die zu ermittelnde Versagenswahrscheinlichkeit zuzuordnen.

Die restlichen Basisvariablen werden deterministisch angesetzt. Hinsichtlich des Außendurchmessers (d_A) und der Wanddicke (t) sind Erläuterungen in Kapitel 4.7.2.3 und 4.7.2.4 enthalten.

In der Anlage A 4 ist das Ergebnis einiger Berechnungsgänge dargestellt. Sie wurden für Leitungen mit unterschiedlichen Werten für die Parameter PN, d_A und die Materialgüte durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei Auftragung der Versagenswahrscheinlichkeit über das Produkt aus der Nennstreckgrenze und der Wanddicke eine einheitliche Kurve entsteht. Die Kurve hat ihren Maximalwert bei geringer Wanddicke und geringer Festigkeit und ihren Minimalwert bei großer Wanddicke und hoher Festigkeit, was unmittelbar einzusehen ist. Die obere Grenze der Punktwolke in Anlage A 4 lässt sich durch die folgenden Gleichungen annähern.

$$\begin{aligned} \text{für } R_e \cdot t \leq 4182 \quad \text{pf}(\text{resistance}) &= 3,4722 \cdot e^{-1,8569 \cdot 10^{-3} \cdot R_e \cdot t} \\ \text{für } R_e \cdot t > 4182 \quad \text{pf}(\text{resistance}) &= 4,1778 \cdot 10^{13} \cdot e^{-9,0596 \cdot 10^{-3} \cdot R_e \cdot t} \end{aligned}$$

Hierin stellt der Grenzwert für die Anwendung ($R_e \cdot t = 4182$) die Schnittstelle beider Kurven dar. R_e ist in $[\text{N}/\text{mm}^2]$ und t in $[\text{mm}]$ einzusetzen.

4.6.5 Berücksichtigung von Maßnahmen zum Leitungsschutz

Sicherungsmaßnahmen wie das Einbringen von Geogittern über der Leitung oder die Verlegung von Warnband haben Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Leitungskontaktes und somit auf die Entstehung der Undichte infolge Schädigung durch Dritte (siehe auch Kapitel 4.5).

Die probabilistische Bewertung erfolgt durch Verwendung von mechanischen Modellen, durch Verwendung der Fehlerbäume unter Einsatz der den Booleschen Operatoren entsprechenden mathematischen Operatoren und durch Verwendung von Literaturstellen, insbesondere in Bezug auf menschliches Versagen. Die in der Bewertung verwendeten Methoden werden aufgeführt und kurz dargestellt, der Übersicht halber jedoch nicht für alle Faktoren in allen Einzelheiten beschrieben.

4.7 Schädigung durch mechanische Beanspruchung

4.7.1 Beschreibung

Bei der Schädigung durch mechanische Beanspruchung geht es um Ereignisse, die üblicherweise in der statischen Berechnung zu erfassen sind. Zunächst ist zwischen der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit zu unterscheiden. Die Beanspruchung resultiert aus den diversen Belastungen, denen eine Leitung ausgesetzt ist. Zu der Beanspruchbarkeit gehören die geometrischen Rohrparameter sowie die Materialeigenschaften.

Zu den Belastungen gehören im Wesentlichen:

- Innendruck, bei den hier betrachteten Hochdruckleitungen als wesentliche Belastung.
- Erdauflast, als über den Rohrumfang veränderlich wirkender Außendruck.
- Verkehrslast, als über den Rohrumfang veränderlich wirkender Außendruck.
- Setzungen des Bodens infolge Belastungen der Geländeoberfläche oder aus Bergsenkungen.
- Hanglage der Leitung.
- Temperaturdifferenz zwischen Einbautemperatur und Betriebstemperatur.
- Dynamik (z. B. Rammen, Sprengungen).

Die Beanspruchbarkeit ist dargestellt durch

- die Streckgrenze,
- die Möglichkeit von Lastumlagerungen,
- den Durchmesser und
- die Wanddicke.

Sowohl für die Beanspruchung als auch für die Beanspruchbarkeit ist weiterhin zu unterscheiden zwischen dem geraden Rohr, einer Verbindung und einem Bauteil (T-Stück, Bogen, Armatur usw.). Bauwerke wie Düker, Mantelrohre oder Freileitungen haben weiterhin einen Einfluss auf die Ergebnisse.

4.7.2 Darstellung der verwendeten Basisvariablen

4.7.2.1 Basisvariable Streckgrenze

Kennzeichnend für die Festigkeit des Materials ist die Streckgrenze R_e . In der Literatur sind zahlreiche Angaben über statistische Verteilungen von Materialeigenschaften vorhanden. Für Stahlsorten beziehen sie sich in der Regel auf die Streckgrenze. In der Anlage A 6 sind einige Zahlenwerte beispielhaft zusammengestellt. Von Interesse sind hier zunächst die statistischen Angaben für das Material von Rohren. Zur Einschätzung und zum Abgleich sind in der Tabelle Angaben zu Profilen im Allgemeinen enthalten. Die Zahlenwerte werden im Folgenden erläutert.

In den Veröffentlichungen U 22 und U 5, die speziell für Rohre gelten, wird die statistische Verteilung sowohl der Streckgrenze als auch der Zugfestigkeit mit einer Normalverteilung beschrieben. Für die numerische Bearbeitung sind die in den folgenden Spalten der Tabelle angegebenen Kennwerte (Variationskoeffizient und Fraktile für den Nennwert) erforderlich. Demnach variiert der Variationskoeffizient der Streckgrenze von 0,02 bis 0,06. Für die Zugfestigkeit ist ein Variationskoeffizient von 0,035 anzuwenden. Der Nennwert des Werkstoffs entspricht gemäß der Unterlage U 5 der 2 %-Fraktile.

Allgemein gültig für Profile im Bauwesen sind die von Spaethe (U 32) angegebenen Wertebereiche für den Variationskoeffizienten und die Verteilungsfunktionen sowie die gemäß der DIN 1055-100 (U 29) festgelegte Einordnung des Nennwerts innerhalb der Verteilung. Die Angaben bezüglich des Variationskoeffizienten zeigen eine recht gute Übereinstimmung. So ist der ungünstigste anzunehmende Variationskoeffizient bei der Beschreibung der Streckgrenze mit 0,06 gemäß der Unterlage U 5 in etwa gleich dem Variationskoeffizienten von 0,08, der bei von unterschiedlichen Herstellern erzeugtem Profil anzusetzen ist.

Für die vorliegenden Untersuchungen werden die Basisvariablen wie folgt festgelegt:

Basisvariable Streckgrenze (R_e)

Nennwert	Rohdatum in [N/mm ²]
Dichtefunktion	GAUSS
Variationskoeffizient	0,06
Fraktile des Nennwerts	2 %

4.7.2.2 Basisvariable Grenzdehnung

In der Bemessung wird für die zweiaxiale Beanspruchung der Nachweis nach dem Bauteilfließkonzept geführt. Für diesen Nachweis ist die Grenzdehnung festzulegen. Die Festlegung bezieht sich sowohl auf den Nennwert als auch auf die statistische Verteilung.

Angaben über eine statistische Verteilung von Dehnungen (z. B. Dehnung beim Fließen, Dehnung zu Beginn der Verfestigung, o. Ä.) liegen nicht vor. Näherungsweise werden hier die statistischen Kennwerte für die Streckgrenze nach Kapitel 4.7.2.1 angesetzt.

Basisvariable Grenzdehnung

Nennwert	$\epsilon_e = R_e/E$
Dichtefunktion	GAUSS
Variationskoeffizient	0,06
Fraktile des Nennwerts	2 %

4.7.2.3 Basisvariable Außendurchmesser

Der Außendurchmesser wird als deterministischer Wert eingesetzt. Diese Festlegung beruht auf der Tatsache, dass die Streuung des Außendurchmessers im Vergleich zur Streuung anderer Basisvariablen erfahrungsgemäß irrelevant ist.

4.7.2.4 Basisvariable Wanddicke

Die Wanddicke wird als deterministischer Wert eingesetzt. Diese Festlegung beruht auf der Tatsache, dass die Streuung der Wanddicke im Vergleich zur Streuung anderer Basisvariablen erfahrungsgemäß irrelevant ist.

4.7.2.5 Basisvariable Innendruck

Bei der statistischen Beschreibung von wesentlichen Belastungen sind in der Regel die Extremwerte von größerer Bedeutung als die Gesamtheit der Belastungszustände. Als Verteilungsfunktion eignen sich hier Extremwertverteilungen. Sinngemäß wird im ISO-Standard (U 5) eine Gumbelverteilung Typ I vorgeschlagen. Die zugehörigen Zahlenwerte sind ebenfalls in der Anlage A 3 enthalten. Demnach ist ein Variationskoeffizient von 0,015 bis 0,02 anzusetzen. Der Mittelwert liegt 3 % bis 5 % über dem Nennwert.

Für die vorliegende Untersuchung wird die Basisvariable Innendruck wie folgt beschrieben:

Basisvariable Innendruck (P_{max})

Nennwert	Rohdatum in [bar]
Verteilungsfunktion	Gumbel Typ I
Mittelwert	$1,05 \cdot PN$
Variationskoeffizient	0,02

In DIN 2413, Teil 1 (U 9) wird zwischen vorwiegend ruhender und schwellender Beanspruchung unterschieden. Hier gilt es zunächst festzulegen, ob die betrachtete Leitung als schwellend beansprucht zu klassifizieren ist. Zur grundsätzlichen Abschätzung können die Untersuchungen aus U 33 herangezogen werden. Die dort aufgezeigten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass bei Transportleitungen grundsätzlich von vorwiegend ruhender Belastung ausgegangen werden kann. Die Schwellbelastung findet somit keine weitere Berücksichtigung.

4.7.2.6 Basisvariable Erdauflast

Die Beanspruchung der Leitung infolge Erdauflast resultiert aus der Wichte des Bodens, der Erdüberdeckung und einem Grabenbeiwert. Diese Variablen als Nennwert angesetzt, liefern eine Spannung, die mit den in Kapitel 4.1 angegebenen zusätzlichen Informationen zur Auftretenswahrscheinlichkeit versehen werden muss.

Zunächst ist festzuhalten, dass die Beanspruchung bei erdverlegten Leitungen sowohl örtlich als auch zeitlich immer vorhanden ist. Ausnahme hierzu sind Fälle der Freilegung (z. B. für Reparaturzwecke). Es wird hier festgelegt, dass dieser Fall eine statistisch untergeordnete Rolle spielt, und daher nicht berücksichtigt wird. Außerdem ist zu beachten, dass die Beanspruchung einer freigelegten Leitung geringfügig kleiner ist als die Beanspruchung einer eingedeckten Leitung.

Die Höhe der Belastung ist statistisch zu beschreiben. Im vorliegenden Fall werden alle drei Parameter (Wichte des Bodens, Erdüberdeckung und Grabenbeiwert) als deterministische Variable beschrieben. Diese Festlegung wird mit dem geringen Einfluss der Beanspruchung infolge Erdauflast auf die Sicherheit bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit der Leitung begründet. Im Einzelnen wird festgelegt:

Basisvariablen für die Beanspruchung aus Erdauflast (Konstante)

Wichte des Bodens	20 kN/m ³
Erdüberdeckung	Rohdatum in [m]
Grabenbeiwert	1,0.

Für die Wichte des Bodens ist in U 18 ein Wertebereich für den erdfeuchten Zustand in Abhängigkeit der Bodenart von 11 kN/m³ bis 22 kN/m³ angegeben. Hierbei gilt der Maximalwert für festen Geschiebemergel, der nicht in Nähe der Geländeoberkante anzutreffen ist. Daher wird eine geringere Wichte als Rechenwert angesetzt.

4.7.2.7 Beanspruchung aus Verkehrslast

Die Beanspruchung infolge Verkehrslast resultiert aus der Größe der Radlast und der Erdüberdeckung. Diese Basisvariablen als Nennwert angesetzt liefern eine Spannung im Rohr, die mit den in Kapitel 4.1 angegebenen zusätzlichen Informationen zur Auftretenswahrscheinlichkeit versehen werden muss.

Beanspruchung aus Verkehrslast ist bei Kreuzungen mit Straßen und Bahnstrecken und in bebauten Gebieten auf jeden Fall vorhanden. Auf eine statistische Beschreibung der Radlasten hinsichtlich des Betrags und der zeitlichen Häufigkeit wird hier wegen des geringen Einflusses der Beanspruchung infolge Verkehrslast auf die Sicherheit bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit des Rohres verzichtet.

In sonstigen Bereichen ist statistisch gesehen mit einer verringerten Beanspruchung infolge Verkehr zu rechnen. Hier wird die Darstellung der Verkehrslast für Brückenbauwerke in U 34 zugrunde gelegt. Dort sind die Fahrzeuge in 5 Kategorien (PKW, LLKW, SLKW, ALKW und TLKW) eingeteilt. Für jede Fahrzeugkategorie werden Achslasten als normalverteilte Basisvariablen mit Mittelwert und Standardabweichung beschrieben. Zusätzlich wird bei den Achslasten im Schwerlastverkehr (LLKW, SLKW, ALKW und TLKW) zwischen vollbeladenem und teilbeladenem Zustand unterschieden und hierfür prozentuale Anteile der Fahrten angegeben. Aus diesen Daten ergibt sich für jede Fahrzeugkategorie eine Mischverteilung für die Achslasten (bzw. Radlasten). Für jede Kategorie lässt sich ein Anteil am Gesamtverkehr angeben. Wiederum durch Bildung einer Mischverteilung ergibt sich dann eine statistische Verteilung für die Radlasten einer Überfahrt. Wird jede Überfahrt als eine Untermenge der Grundgesamtheit aufgefasst, so liefert die Bildung einer Extremwertfunktion mit T Wiederholungen die statistische Verteilung der Beanspruchung. Mit den Daten aus U 34 und einer angenommenen Wiederholung von $T = 25000$ Kfz/Tag auf Straßen (SLW 60) und von $T = 0,01$ Kfz/Tag im Gelände (Acker, Wald usw.) ergeben sich unterschiedliche Verteilungskurven für die Beanspruchung. Für eine Bemessung mit festen Werten wird vereinfachend die 95 %-Fraktile beider Kurven gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass dann im Gelände 36 % der Radlast aus SLW 60 anzusetzen sind. Für die Bewertung wird folglich zwischen den folgenden Fällen unterschieden.

Geländenutzung	Radlast	Abminderungs- faktor	Schwing- beiwert
Straße, Autobahn	SLW 60; 100 kN	1,00	1,20
Gelände	SLW 30; 50 kN	0,75	1,40

4.7.2.8 Basisvariable Spannung aus Setzung infolge Belastung der Geländeoberfläche

Die Leitungsbeanspruchung wird in signifikantem Maße durch die im Leitungsbereich vorliegende Baugrundsituation beeinflusst. Durch Setzungen erzeugte Zwangsverformungen verursachen unplanmäßige Biegespannungen in Rohrlängsrichtung. Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen entstehen bei der Belastung eines nicht tragfähigen Baugrundes oder bei Hebungen und Senkungen aus weiteren Einflüssen wie beispielsweise Grundwasser etc. Kurzzeitig wirkende Belastungen wie beispielsweise temporäre Sandschüttungen oder große Verkehrsbelastungen auf der Geländeoberfläche können entlang der Leitungstrecke nicht immer erfasst werden. Daher wird zur Bewertung der Baugrundqualität, wie im Bauwesen üblich, eine verallgemeinerte Lastannahme über die gesamte Leitung getroffen. Als Belastungsmodell wird hier ein unendlich langer, die Leitung kreuzender Einheitsdamm definiert, der in seinen Abmessungen (Höhe 2 m, Böschungsneigung 1:1) alle zu erwartenden Belastungen, die zu Bodenverformungen führen können und nicht zwangsläufig unmittelbar durch die regelmäßige Begehung und Befliegung der Leitungstrasse entdeckt werden, abdeckt.

Die Setzungen sind abhängig von der Höhe der Belastung und der Steifigkeit des Bodens (Steifemodul E_s). Die Beanspruchung im Rohr wird beeinflusst von der Steifigkeit des Rohres (Elastizitätsmodul und Flächenmoment 2. Grades) und von dem Abstand zwischen dem setzungsfreien Bereich und dem Bereich mit der maximalen Setzung.

Der Elastizitätsmodul wird für alle Rohre als konstant vorausgesetzt. Das Flächenmoment 2. Grades ist abhängig vom Durchmesser und von der Wanddicke und somit, wie diese, ein konstanter Wert über die Abschnitte, bei denen sich diese Parameter nicht ändern.

Eine statistische Verteilung kann für die Steifigkeit des Bodens angegeben werden. Die statistische Verteilung der Bodenparameter ist stark abhängig von der Größe des Beobachtungsraums, in dem sich die Leitungen befinden. Insbesondere verhält sich der Variationskoeffizient direkt proportional zu der Größe des Beobachtungsraums. Hier wird auf die Empfehlungen EAU (U 18) einerseits und auf einen Bericht über räumliche Verteilungen von Bodenparametern (U 24) andererseits zurück gegriffen. Die Unterlage U 18 gilt für einen Beobachtungsraum in der Größenordnung des Versorgungsgebietes eines überregionalen Energieversorgungsunternehmens. Diese Unterlage enthält Werte für den Steifemodul. Die Unterlage U 24 enthält eine statistische Aufbereitung einiger Bodenparameter auf einer Untersuchungslänge von ca. 400 Metern. Von Bedeutung sind hier die Angabe über Konsistenzzahlen bzw. Lagerungsdichten. Für den vorliegenden Fall einer Leitung von einigen Kilometern Länge gelten die Unterlage U 18 als Obergrenze und die Unterlage U 24 als Untergrenze.

Der Unterlage U 18 sind Wertebereiche für den Steifemodul unterschiedlicher Bodenarten zu entnehmen. Die Ermittlung der Setzung erfolgt in der Regel mit dem Mindestwert aus diesem Wertebereich. Es ergibt sich hieraus die größtmögliche Setzung, so dass die Berechnung auf der sicheren Seite liegt. In der probabilistischen Betrachtung wird der Wertebereich derart interpretiert, dass der Mindestwert der 5 %-Fraktile und der Maximalwert der 95 %-Fraktile einer im Übrigen normalverteilten Variablen entspricht. Dann lassen sich sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung angeben. Wird der Mittelwert auf den Nennwert normiert und der Variationskoeffizient betrachtet, so lässt sich die statistische Verteilung auf den Nennwert für die Spannung aus Setzung übertragen. Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Zusammenhänge.

Das Verhältnis zwischen dem Nennwert und dem Mittelwert des Steifemoduls variiert zwischen 0,75 und 0,29. Bezogen auf den tatsächlichen Wert des Steifemoduls zeigt sich, dass der Mindestwert nur bei geringen Steifemoduli auftritt, während der Maximalwert bei allen Steifemoduli auftritt. Folglich wird in der Bewertung ein Verhältniswert in der Nähe des Maximalwertes anzusetzen sein.

Der Variationskoeffizient variiert zwischen 0,43 und 0,15. Bezogen auf den tatsächlichen Wert für den Steifemodul zeigt sich, dass der Variationskoeffizient nur bei geringen Steifemoduli hohe Werte annimmt. Für die Auswertung bedeutet dies, dass bei kleinen Setzungen der geringere Wert und bei großen Setzun-

gen der größere Wert einzusetzen ist. Auf der sicheren Seite liegend ist hier ein Variationskoeffizient in der Nähe des Maximalwertes anzusetzen.

Damit kann eine obere Schranke für die Bewertung angegeben werden: Bei der Bewertung von Leitungsnetzen überregionaler Energieversorgungsunternehmen wird üblicherweise der Mittelwert zu 60 % des Nennwertes und ein Variationskoeffizient von 0,40 angesetzt.

In der Unterlage U 24 ist die Veränderlichkeit wichtiger Bodenparameter über kürzere Strecken dargestellt. Für die Konsistenzzahlen bzw. Kennwerte der Lagerungsdichte werden hier Variationskoeffizienten zwischen 0,15 und 0,20 angegeben. Der Mittelwert dieser Parameter beträgt ca. 75 % bis 80 % der 95 %-Fraktile.

Für die Bewertung eines sehr kurzen Leitungsabschnittes resultiert hieraus eine Festlegung des Mittelwertes zu 75 % des Nennwertes bei einem Variationskoeffizienten von 0,20. Wie oben aufgeführt, handelt es sich hierbei um die untere Schranke für die hier durchzuführende Bewertung.

Die Festlegung der statistischen Parameter erfolgt derart, dass der Bereich oberhalb der 95 %-Fraktile möglichst ausgedehnt ist. Hierbei wird der Variationskoeffizient möglichst hoch angesetzt und der Verhältniswert für den Mittelwert so angepasst, dass der Nennwert etwa der 95 %-Fraktile entspricht. Hierbei werden die oben aufgeführten Schranken, die Länge der untersuchten Leitung und Erfahrungswerte über die anstehenden Bodenverhältnisse berücksichtigt. Es ergeben sich die folgenden Festlegungen:

Basisvariable Spannung aus Setzung

Nennwert	Rohdatum in [N/mm ²]
Dichtefunktion	GAUSS
Mittelwert	Nennwert · 0,70
Variationskoeffizient	0,25

Des Weiteren wird berücksichtigt, dass die Belastung aus Setzung nicht überall auftritt. Zur Abschätzung wird hier folgendes Modell verwendet: Setzungsrelevante Materialablagerungen finden vornehmlich in der Nähe von Verkehrswegen statt, um dort für den Weitertransport verladen zu werden. Die Auswertung ver-

schiedener Leitungen in unterschiedlichen Umgebungen (eher ländlich, eher in bebauter Umgebung) ergibt, dass Leitungen alle 500 bis 1100 Meter von Verkehrswegen aller Art gekreuzt werden. Zur Erfassung von „schleifenden“ Kreuzungen bzw. Parallelführungen wird in den folgenden Untersuchungen der Abstand auf im Mittel alle 100 Meter abgemindert. Diese Annahme liegt erfahrungsgemäß auf der sicheren Seite.

Dann ist die unter Verwendung der oben angegebenen Parameter der statistischen Verteilung ermittelte Versagenswahrscheinlichkeit für diese Beanspruchung um einen Faktor zu verringern von

$$p = \frac{10 \cdot 14}{1000} = 0,14 \approx 0,2$$

In diesem Faktor ist die Breite des „Einheitsdammes“ von 14 Metern berücksichtigt. Auf der sicheren Seite liegend wird hier weiterhin angenommen, dass die Belastung über den gesamten Bemessungszeitraum wirkt.

4.7.2.9 Bauteile (Bögen, T-Stücke, Formstücke)

Im Zuge der Leitungsbewertung werden folgende Bauteile unterschieden:

- Glattrohrbögen
- T-Stücke
- Formstücke

Die genannten Bauteile zeigen keine Einzelteile, die sich im Betrieb bewegen bzw. gegenseitig verschieben. Die probabilistische Betrachtung dieser Bauteile ist ähnlich wie für gerade Leitungsabschnitte. Es sind lediglich Spannungsfaktoren zu berücksichtigen, die den entsprechenden Vorschriften zu entnehmen sind. Die Beanspruchungserhöhungsfaktoren für die Bögen und T-Stücke lassen sich einerseits direkt aus Vorschriften ableiten und definieren, andererseits werden sie aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt und fließen in die Bewertung ein. Explizite Erhöhungsfaktoren lassen sich in Anlehnung an U 19 genau berechnen. Es erfolgt eine pauschale Berücksichtigung mittels deterministischer Beiwerte, da generell davon ausgegangen werden kann, dass ein Bogen oder ein Abzweig bestimmungsgemäß bemessen ist.

4.7.2.10 Bauwerke

Im Rahmen der Zustandsbewertung werden Bauwerke wie Düker, Mantelrohre oder Freileitungen durch einen Offset auf die Längsspannungen berücksichtigt. Eine detaillierte Berechnung solcher Sonderstellen ist im Rahmen einer allgemeingültigen Bewertung nicht zielführend. Somit ist die statistische Verteilung der eingehenden Größen nicht sinnvoll. Hier werden Festlegungen getroffen, die in ihrer Auswirkung in der Lage sind, schwächende Einflüsse dieser Sonderstellen auf die Leitung sicher abzubilden. Die Annahme einer Schwächung ist darin begründet, dass die Leitung im Bereich von Bauwerken aufgrund unterschiedlicher Einflüsse höher belastet ist als im „Normalbereich“. Zu denken ist beispielsweise an ungünstige Verdichtungsverhältnisse im Bereich vor und hinter Mantelrohren, was aufgrund der Einspannung der Leitung im Mantelrohr zu ungünstigen Verhältnissen führt. Düker werden in diesem Zusammenhang abhängig von ihrer Länge vom Bewertungssystem in Klassen eingeteilt und abgestuft bewertet. Die Düker werden in folgende Klassen eingeteilt:

- Länge \leq 20 m Klasse 1
- 20 m $<$ Länge \leq 50 m Klasse 2
- 50 m $<$ Länge Klasse 3

Die Bauwerke werden in Bauwerksklassen eingeordnet. Nach Festlegung der Bauwerksklasse wird entsprechend ein Spannungs-Offset von 10 N/mm² bis 50 N/mm² der Bewertung zugrunde gelegt.

4.7.3 Fehlerbaum für die mechanische Beanspruchung

Mit den in Kapitel 4.7.1 und 4.7.2 beschriebenen Belastungen ergibt sich der in Anlage A 7 dargestellte Fehlerbaum für das Eintreten einer Undichte. Grundsätzlich ergibt sich aus den möglichen Lastfällen und deren Kombinationen eine Vielzahl ($2^n - 1$) von Eingängen. Die Berechnung aller Eingänge setzt allerdings voraus, dass in den statistischen Darstellungen der einzelnen Eingänge die anderen Eingänge nicht mit erfasst werden. Dieses ist in den Ansätzen nicht realisiert. So wird der Innendruck als über die gesamte Zeit und über die gesamte Strecke wirkend angesetzt. Dann genügt es, die Versagenswahrscheinlichkeit

nur für die Kombination aller Lastfälle zu ermitteln. Eine Ausnahme bildet hier die Beanspruchung infolge Setzung, die nur begrenzt örtlich auftritt.

4.7.4 Versagenswahrscheinlichkeit infolge mechanischer Beanspruchung

Es ist nachzuweisen, dass die Leitung allein unter Innendruck tragfähig ist. Hierzu wird die Versagenswahrscheinlichkeit infolge Innendruckbeanspruchung gegen die zulässige Streckgrenze des Werkstoffes ermittelt. Als Bestimmungsgleichung ist zu lösen:

$$g = R_e - \frac{PN \cdot d_A}{2 \cdot t}$$

Der Nachweis der Versagenswahrscheinlichkeit infolge sämtlicher Beanspruchungen wird über die Vergleichsspannung geführt. Hierbei werden die linear ermittelten Einzelspannungen der Streckgrenze gegenübergestellt. Die Grenzgleichung hat die Form:

$$g = R_e - \sqrt{\left(\frac{PN \cdot d_A}{20 \cdot t} + \sigma_u\right)^2 + (\sigma_x)^2} - \left(\frac{PN \cdot d_A}{20 \cdot t} + \sigma_u\right) \cdot (\sigma_x) = 0$$

mit	R_e	=	Streckgrenze
	PN	=	Nenndruck [bar]
	d_A	=	Außendurchmesser [mm]
	t	=	Wanddicke [mm]
	σ_u	=	Weitere Umfangsspannung [N/mm ²]
	σ_x	=	Längsspannung [N/mm ²]
	g	=	Grenzspannung [N/mm ²]

4.7.5 Zusammenstellung der benötigten Parameter

Für die probabilistische Berechnung werden die erforderlichen Parameter zusammengestellt.

Innendruck

Es ist der Innendruck als statistisch verteilte Basisvariable einzusetzen. Die Dichtefunktion ist in Kapitel 4.7.2.5 beschrieben. Ausnahme ist die Ermittlung der Beanspruchung infolge Erdauflast und Verkehrslast mit dem Formelwerk nach VdTÜV (U 20), bei der der Innendruck als deterministische Variable eingesetzt wird.

Rohrdurchmesser

In der Regel wird der Außendurchmesser angegeben. Der Außendurchmesser wird wegen der geringen Streuung als konstant angesetzt.

Wanddicke

Es ist die Nennwanddicke einzusetzen. Die Nennwanddicke wird wegen der geringen Streuung als konstant angesetzt.

Streckgrenze

Es ist die Streckgrenze des Materials einzusetzen. Die statistische Verteilung erfolgt nach Kapitel 4.7.2.1.

Erdüberdeckung

Die Erdüberdeckung wird als konstanter Wert eingegeben.

Verkehrslast/Oberflächennutzung

Die Verkehrslast wird bei Leitungen mit hohem Nenndruck als konstanter Wert eingegeben, allerdings gekoppelt an die Information der Bebauung und Oberflächennutzung.

Setzungen

Die Spannung infolge Setzung wird als statistisch verteilte Basisvariable nach Kapitel 4.7.2.8 eingesetzt. Zu berücksichtigen ist außerdem das örtlich begrenzte Auftreten dieser Belastung.

Bauteile

Bögen, T-Stücke und Formstücke werden über Spannungserhöhungsfaktoren berücksichtigt.

Bauwerke

Düker, Mantelrohre und Freileitungen werden nach 4.7.2.10 klassifiziert und erhalten einen Offset auf die Längsspannungen.

In der Anlage A 8 ist die zugehörige Bewertungsstruktur für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit infolge Beanspruchung und infolge Gefährdung durch Dritte dargestellt. Am äußersten rechten Rand befinden sich die einfließenden Rohdaten, die dann miteinander verknüpft und bis zum Endergebnis verdichtet werden. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, in welcher Form für die einzelne Einflussgröße ein verteilter Ansatz bzw. ein deterministischer Ansatz gewählt wird.

4.8 Korrosionsmodelle

4.8.1 Allgemeines

Die Beeinträchtigung der Beanspruchbarkeit infolge Korrosion ist vergleichsweise häufig Ursache einer Undichte. Unter der Annahme, dass vom Medium keine korrosive Wirkung auf die Rohrleitung ausgeht, reduziert sich die Betrachtung auf Korrosionsabträge auf der Rohraußenseite. Im Allgemeinen kann bei einem Leitungsneubau nach dem heutigen Stand der Technik von einem optimalen Korrosionsschutz ausgegangen werden, bei dem praktisch auch an der Rohraußenseite kein Korrosionsabtrag stattfindet. Die Erfahrung zeigt, dass dennoch Schäden an der Umhüllung durch Transport, Bauverfahren oder später durch Dritte auftreten. Durch den kathodischen Schutz (KKS) ist der Korrosionsfortschritt in diesen Bereichen auf ein technisch vernachlässigbares Maß reduziert. Die schützende Wirkung des KKS kann durch Streu- und Wechselstromeinflüsse und in Bereichen mit großen Umhüllungsschäden beeinträchtigt sein. Wechselstromkorrosion tritt vorwiegend an kleineren Fehlstellen von gut umhüllten PE-Rohrleitungen auf. Die Korrosionsgeschwindigkeit kann bei Wechsel- und Streustrombeeinflussung relativ hoch sein. Die Korrosionsrate wird des Weiteren durch den umgebenden Boden mitbestimmt. Ursache dafür ist die Ausbildung von Deckschichten aus unlöslichen Korrosionsprodukten, welche durch Sauerstoffkonzentration im Boden begünstigt werden. Die Schutzwirkung von Deckschichten wird durch die im Bodenwasser gelösten Salze beeinträchtigt. In organischen Böden (Moorboden, Schlack, fäkalienhaltiger Lehm) kann in Folge der Mitwirkung von sulfatreduzierenden Bakterien mikrobiologi-

sche Korrosion auftreten. In Bereichen mit Altlastenvorkommen aus Industrienutzung können weiterhin aggressive Stoffe im Boden vorkommen, die Korrosion begünstigen. Erdverlegte Rohrleitungen durchqueren nahezu immer Böden unterschiedlicher Strukturzusammensetzungen, sodass sie z. B. infolge unterschiedlicher Belüftung und Elektrolytkonzentrationen auch weit voneinander entfernte anodische und kathodische Bereiche ausbilden.

4.8.2 Das integrierte Korrosionsmodell

Die Zustandsbewertung sieht Algorithmen zur Abschätzung möglicher Korrosionsabtragsraten vor. Diese Algorithmen sind stark abhängig von der individuellen Ausprägung des jeweiligen Leitungsnetzes und können daher nicht allgemeingültig formuliert werden. Das Programmsystem sieht einen Extension-Point vor, über den individuelle Korrosionsmodelle hinzugefügt werden können.

4.8.3 Berücksichtigung von Molchdaten

Der Leitungszustand hinsichtlich einer Schädigung durch Korrosion wird üblicherweise durch Inspektions-Molchungen festgestellt. Die Ergebnisse solcher Molchungen können als externe bzw. interne Wanddickenabträge direkt in der Zustandsbewertung verarbeitet werden. In diesem Fall würde ein Korrosionsmodell nicht zum Einsatz kommen.

Die Inspektionsergebnisse müssen vor der Verwendung in der Zustandsbewertung skaliert werden, da die Rechenalgorithmen des ZBS nur konstante Wanddicken und keine lokalen Schwankungen berücksichtigen können. Ein als externer oder interner Wanddickenabtrag eingegebener Wert führt zu einer Verminderung der Wanddicke für das ganze Segment. Eine mögliche Art der Skalierung ist im Folgenden beschrieben.

4.8.4 Raten der generalisierten Wanddickenabträge

4.8.4.1 Allgemeines

Das angewendete Korrosionsmodell dient der qualitativen Abschätzung der Tragfähigkeitsminderung der bewerteten Leitung infolge von Außenkorrosion. Das Korrosionsmodell arbeitet mit jährlichen Abtragsraten, die unter dem An-

satz festgelegt wurden, dass eine punktuelle Korrosionsstelle und der dort tatsächlich auftretende Korrosionsabtrag bzw. die in der Korrosionsstelle minimal verbliebene Restwanddicke in eine ideelle Wanddicke über den kompletten Leitungsumfang umgerechnet wurde. Die daraus resultierenden jährlichen Abtragsraten entsprechen einer ideellen Korrosion, die nicht identisch ist mit Abtragsraten, die punktuell gemessen werden.

Das Korrosionsmodell liefert Ergebnisse, die eine wirtschaftliche und gleichzeitig technisch zuverlässige Bewertung der Leitung ermöglichen.

Unabhängig vom implementierten Korrosionsmodell ist es abschnittsweise möglich, tatsächliche Wanddickenabträge einzupflegen, wie sie beispielsweise aus Auswertungen intelligenter Molchungen oder der Freilegung von vorgefundenen Korrosionsstellen gewonnen werden können.

4.8.4.2 Einflussparameter

Maßgebliche Parameter für die Ermittlung des rechnerischen Wanddickenabtrags sind

- Baujahr,
- KKS-Wirksamkeit,
- Bodenaggressivität,
- Qualität der Umhüllung.

Für das Merkmal KKS-Wirksamkeit können historienbehaftete Daten berücksichtigt werden. So ist es möglich, die Ergebnisse mehrerer Beurteilungen der Wirksamkeit des KKS (Intensivmessung, Schutzstromstärke) zu berücksichtigen.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Angaben zum Leitungsbaujahr und zur KKS-Wirksamkeit chronologisch aufsteigend vorliegen. Für Leitungsabschnitte, in denen Teilstücke neu gebaut wurden, ist jedoch nicht zwingend eine Korrektur der historischen Daten notwendig. Das Korrosionsmodell kann hier auch mit Baujahren arbeiten, die jünger als die Angaben zur KKS-Wirksamkeit sind. Bei alten Leitungen, bei denen das KKS-System nachträglich ermittelt wurde, ist für den Zeitraum vom Leitungsbau bis zur Inbetriebnahme des KKS die Wirksamkeit auf nicht aktiv zu setzen.

4.8.4.3 Abtragsraten

Die jährlichen Abtragsraten sind in Abhängigkeit der Wirksamkeit des kathodischen Korrosionsschutzes sowie der Bodenaggressivität definiert. Die Bodenaggressivitäten „stark aggressiv“ und „sehr stark aggressiv“ werden bewertungstechnisch gleich behandelt, ebenso wie die KKS-Wirksamkeiten nicht nachgewiesen und eingeschränkt wirksam. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass bei voll wirksamem kathodischem Korrosionsschutz die Bodenaggressivität keine Rolle spielt. Weiterhin findet die Qualität der Umhüllung nur bei nicht aktivem KKS Berücksichtigung. Hier wird unterschieden zwischen „Umhüllung OK“ bzw. „Umhüllung fehlerbehaftet“.

Die normierte Abtragsrate für den besten Fall (KKS aktiv und keine Bodenaggressivität) ist zu 1,0 gesetzt. Die weiteren Abtragsraten ergeben sich durch eine Verdopplung, Verdreifachung etc. für den Fall der KKS-Zustände eingeschränkt und nicht nachgewiesen. Im Falle des nicht wirksamen KKS und intakter Umhüllung werden die 2,5- bis 5,5-fachen Werte angesetzt; bei fehlerbehafteter Umhüllung die 5- bis 11-fachen Werte. Der zahlenmäßige Wert für die normierte Abtragsrate 1,0 ermittelt sich aus einer Parameterstudie, bei der der Mittelwert der Bewertung zahlreicher tatsächlich an Hochdruckleitungen vorgefundener Korrosionsabträge gebildet wurde. Diese Korrosionsstellen wurden mit dem System KaRo bewertet. Dieses berechnet eine virtuelle (rechnerische) Wanddicke, die ein (virtuelles) Rohr beschreibt, welches, berechnet nach der Kesselformel, exakt den Druck tragen kann, der mithilfe der nichtlinearen Berechnungsansätze von KaRo für die Korrosionsstelle zulässig ist. Es ergibt sich die folgende Gleichung für die normierte Abtragsrate 1,0

$$\Delta t_{1,0} = 0,005 \text{ mm/Jahr.} \quad (1)$$

Der rechnerische Wanddickenabtrag ergibt sich nach der folgenden Abbildung 1 mit der Gleichung

$$\Delta t_{\text{calc}} = t - t_{\text{calc}} \quad (2)$$

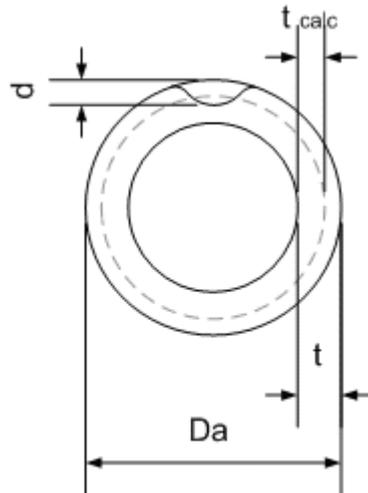


Abbildung 1: Rechnerische Wanddicke

Dank der Kenntnis des Zeitraumes, über den sich die Korrosionsstellen gebildet oder vergrößert haben, lässt sich so eine Zeitabhängigkeit herstellen. Es ergeben sich die in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellten jährlichen Abtragsraten. Dabei handelt es sich um die rechnerischen Wanddickenabträge, ermittelt nach Formel 2.

KKS	aktiv (alle)	eingeschränkt & nicht nachgewiesen (alle)			
Umhüllung		N	L	M	H & X
Bodenaggressivität	1				
Abtrag [-]					
Abtrag [mm/a]	0,0050	0,0100	0,0150	0,0200	0,0250

Tabelle 1: Abtragsraten Außenkorrosion mit KKS

KKS	inaktiv							
Umhüllung	ok				fehlerhaft			
Bodenaggressivität	N	L	M	H & X	N	L	M	H & X
Abtrag [-]	2,5	3,5	4,5	5,5	5	7	9	11
Abtrag [mm/a]	0,0125	0,0175	0,0225	0,0275	0,0250	0,0350	0,0450	0,0550

Tabelle 2: Abtragsraten Außenkorrosion ohne KKS

Zur Ermittlung des anzusetzenden Korrosionsabtrags werden die kumulierten Zeiträume, die der jeweilige Leitungsabschnitt den KKS-Zuständen zugeordnet war, berechnet. Hieraus kann in Verbindung mit der Bodenaggressivität der Abtrag ermittelt werden.

Es werden alle Einzelzeiträume, die ein Leitungsstück im jeweiligen Zustand war, summiert. Dabei ist es unerheblich, in welcher Reihenfolge die Zustände auftraten bzw. wie häufig sie gewechselt haben. Weiterhin wird für den Fall, dass die erste Aussage über die Wirksamkeit des KKS nach Inbetriebnahme des KKS erfolgt, der Leitungsabschnitt zu Wirksamkeit nicht nachgewiesen zugeordnet.

4.9 Allgemeines

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Leitung mit dem beschriebenen Verfahren der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse sind zunächst die Leitungsdaten zu erfassen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen erforderlichen Leitungsdaten, die im Programmablauf zur Durchführung der SRA zwingend benötigt werden, und zusätzlichen Daten, die bei Vorliegen entsprechender Informationen in die Berechnung übernommen werden können und somit das Ergebnis verbessern. Darüber hinaus werden weitere Informationen für die Leitung erfasst, die nicht direkt in die Berechnung einfließen.

Die Einteilung der erfassten Daten in diese Kategorien sowie der Einfluss der einzelnen Daten auf die Versagenswahrscheinlichkeit infolge mechanischer Beanspruchung bzw. auf die Versagenswahrscheinlichkeit infolge Einwirkungen Dritter kann der Darstellung in Anlage A 9 entnommen werden.

Da es sich bei den betrachteten Leitungen um Leitungen im Planungsstand handelt und die Leitungen somit noch keine lokalen Besonderheiten, wie Ergebnisse intelligenter Molchungen etc., aufweisen, ist es im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht erforderlich, den kompletten Leitungsstrang detailliert zu bearbeiten. Vielmehr wurden repräsentative Leitungsstücke für die Bearbeitung ausgewählt. Diese Auswahl erfolgt unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:

- Annäherung an Einzelbebauung bzw. Siedlungsgebiete
- Durchquerung topografisch oder geologisch interessanter Bereiche
- Querung großer Straßen oder Gewässer

Die detailliert betrachteten Abschnitte wurden so gewählt, dass alle relevanten Besonderheiten, die im gesamten Trassenverlauf der Leitung auftreten, berücksichtigt werden. So ist es beispielsweise nicht erforderlich, alle Straßenkreuzungen detailliert zu bewerten, wenn an einzelnen diskreten Kreuzungen ein sicherer Leitungszustand nachgewiesen werden kann. Für die Leitungsabschnitte, bei denen keine detaillierten Daten erfasst wurden, sind die Grunddaten in die Bewertung eingeflossen. Dies hat zur Folge, dass ein kontinuierliches Ergebnis über den kompletten Leitungsverlauf vorliegt. Dieses Ergebnis ist in den detail-

liert erfassten Abschnitten feiner aufgelöst, als in den nur grob bearbeiteten Abschnitten.

Die Erfassung der Bodendaten wurde unter der gleichen Vorgabe durchgeführt. Auch hier gilt, dass sich alle im Trassenverlauf auftretenden Baugrundverhältnisse in der Bewertung widerspiegeln. Auf Abschnitten, die über längere Distanz keine signifikante geologische Strukturveränderung aufweisen, wurde jeweils ein global gültiger Wert erfasst. Auch hier liegt somit ein über die komplette Leitung kontinuierliches Ergebnis vor.

4.10 Erforderliche Leitungsdaten

Für die Bewertung werden grundsätzlich die im Folgenden genannten Daten benötigt. Da es sich hier um eine Leitung in der Planungsphase handelt, liegen einige dieser Informationen nur global vor. Hier werden die jeweiligen Mindestwerte aus der Planung angesetzt. Dies gilt beispielsweise für die Überdeckung, die in der späteren Realität nicht exakt bei einem Meter sondern darüber liegen wird.

Es werden benötigt:

- Außendurchmesser
- Wanddicke
- Überdeckung
- Werkstoff
- Druck
- Schweißnahtgüte
- Oberflächennutzung
- Globaler Sicherheitsbeiwert
- Bodenaggressivität und Längsspannung aus Bodensetzung

4.11 Zusätzliche Leitungsdaten

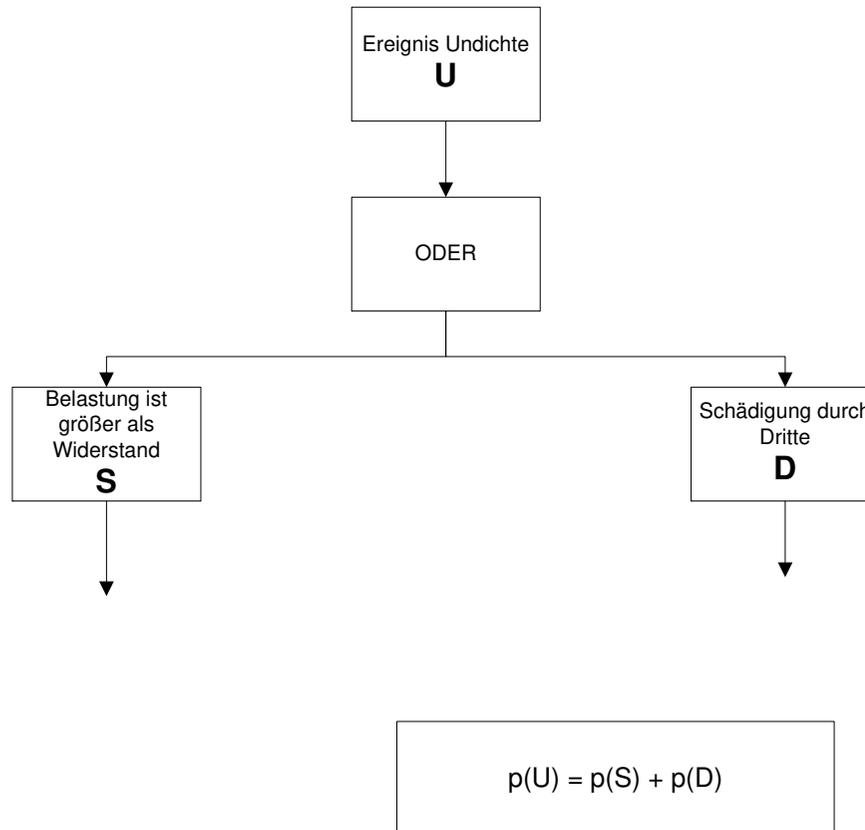
- Umhüllung
- Bauteile
- Schutzeinrichtungen
- Mantelrohre

- Düker
- Angaben zu den Baugrundverhältnissen

Anlage

A 1 Fehlerbaum für die grundsätzliche Aufteilung der Schadensursachen

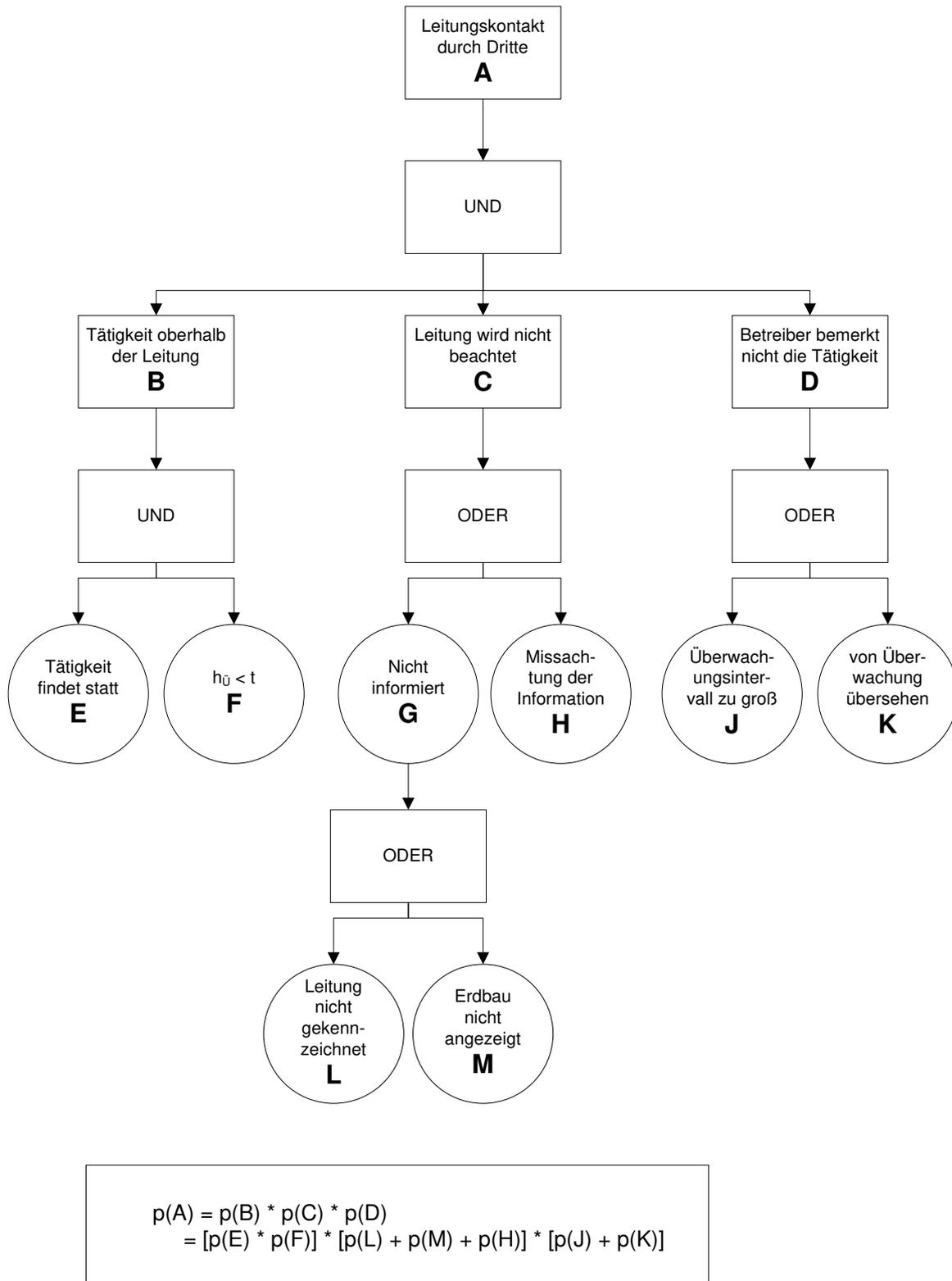
Fehlerbaum für die Leitungsbewertung



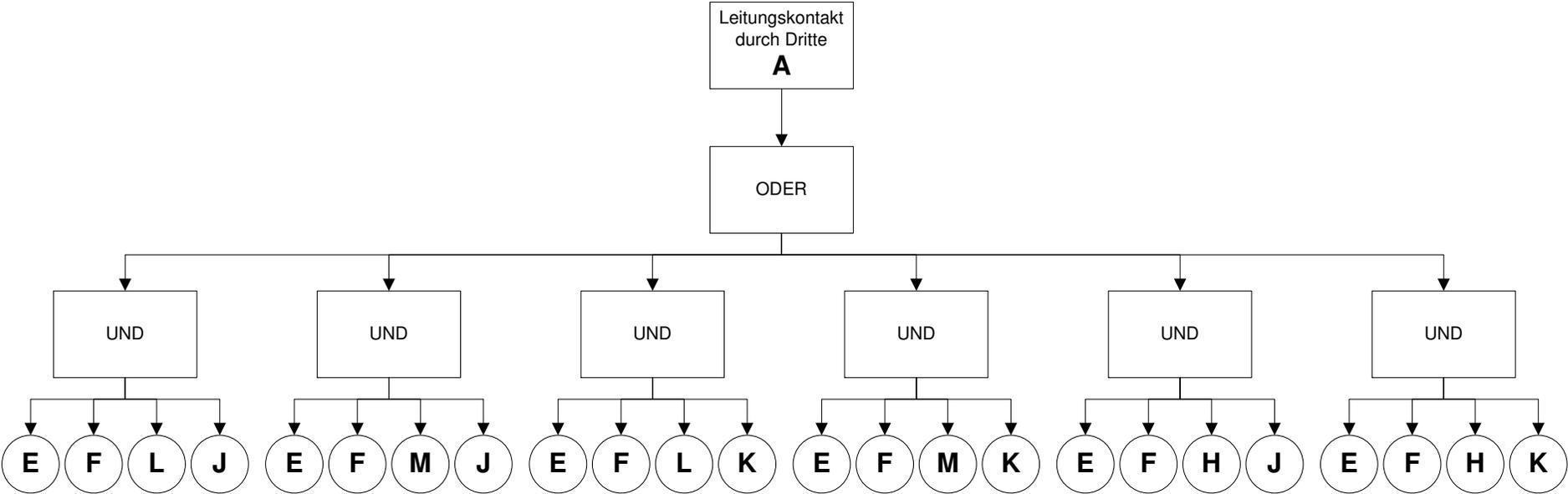
Anlage

A 2 Fehlerbaum für die Wahrscheinlichkeit von Leitungskontakt durch Dritte

Fehlerbaum für den Leitungskontakt



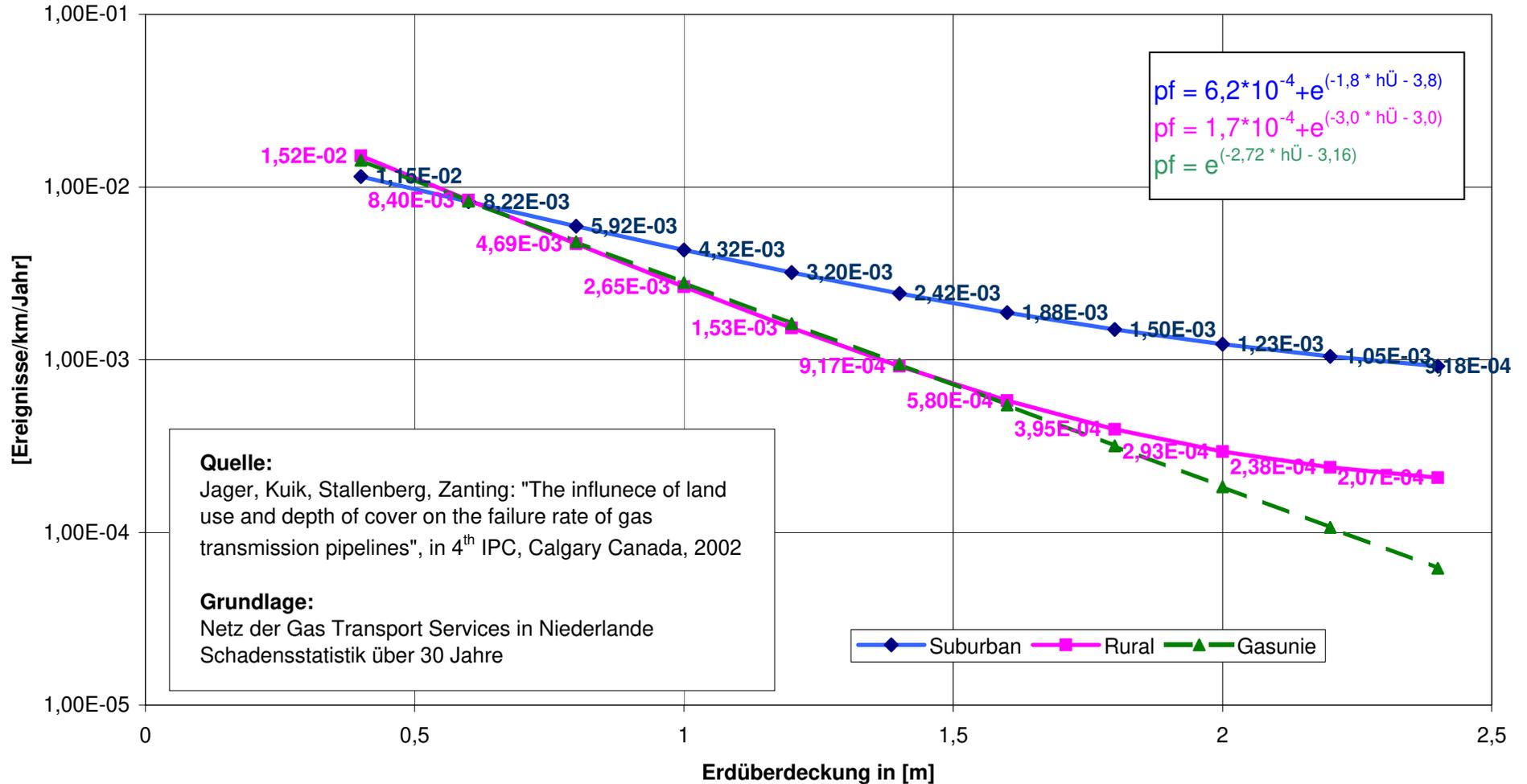
Fehlerbaum für den Leitungskontakt



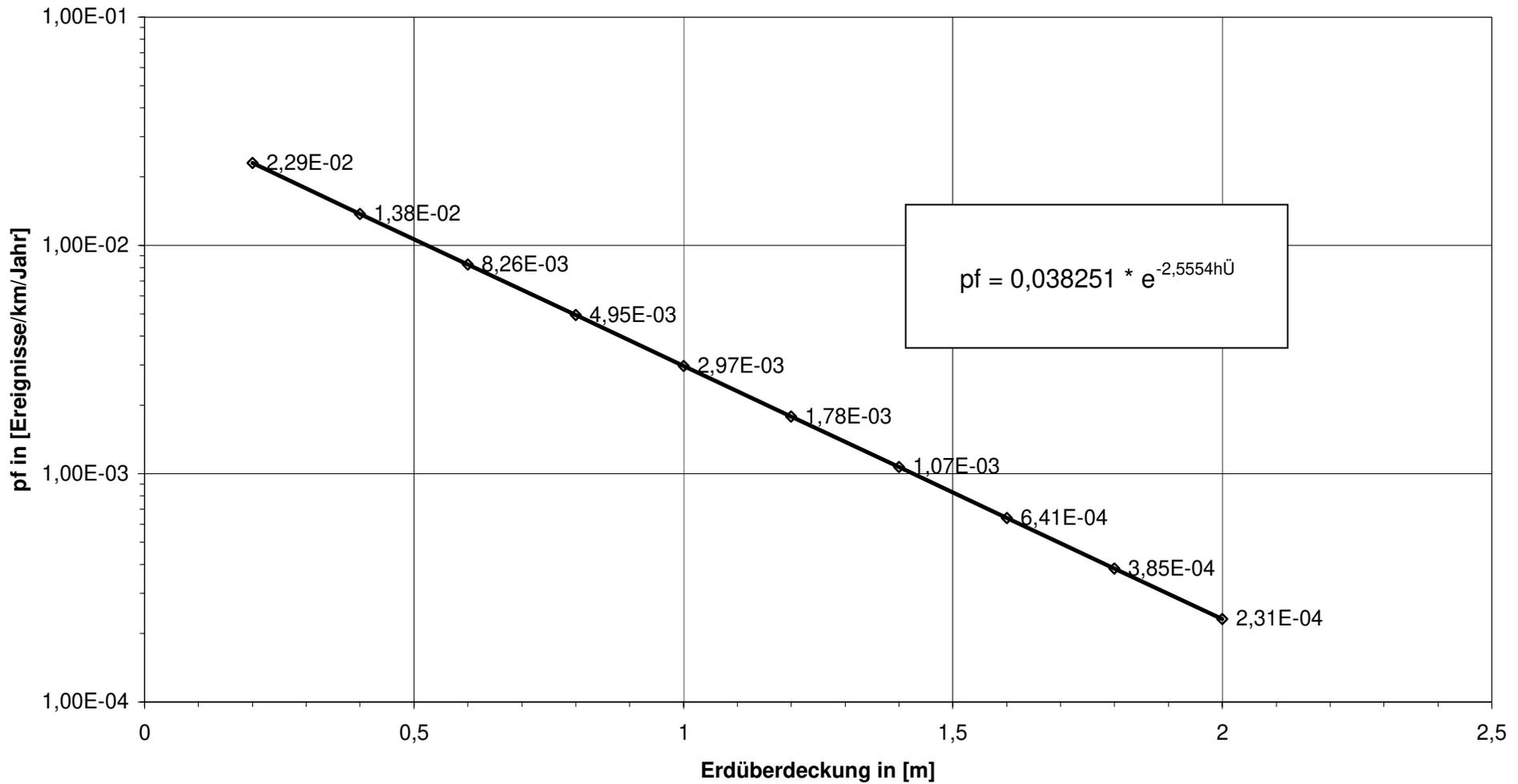
$$\begin{aligned}
 p(A) = & p(E)*p(F)*p(L)*p(J) \\
 & +p(E)*p(F)*p(M)*p(J) \\
 & +p(E)*p(F)*p(L)*p(K) \\
 & +p(E)*p(F)*p(M)*p(K) \\
 & +p(E)*p(F)*p(H)*p(J) \\
 & +p(E)*p(F)*p(H)*p(K)
 \end{aligned}$$



Wahrscheinlichkeit für Leitungskontakt



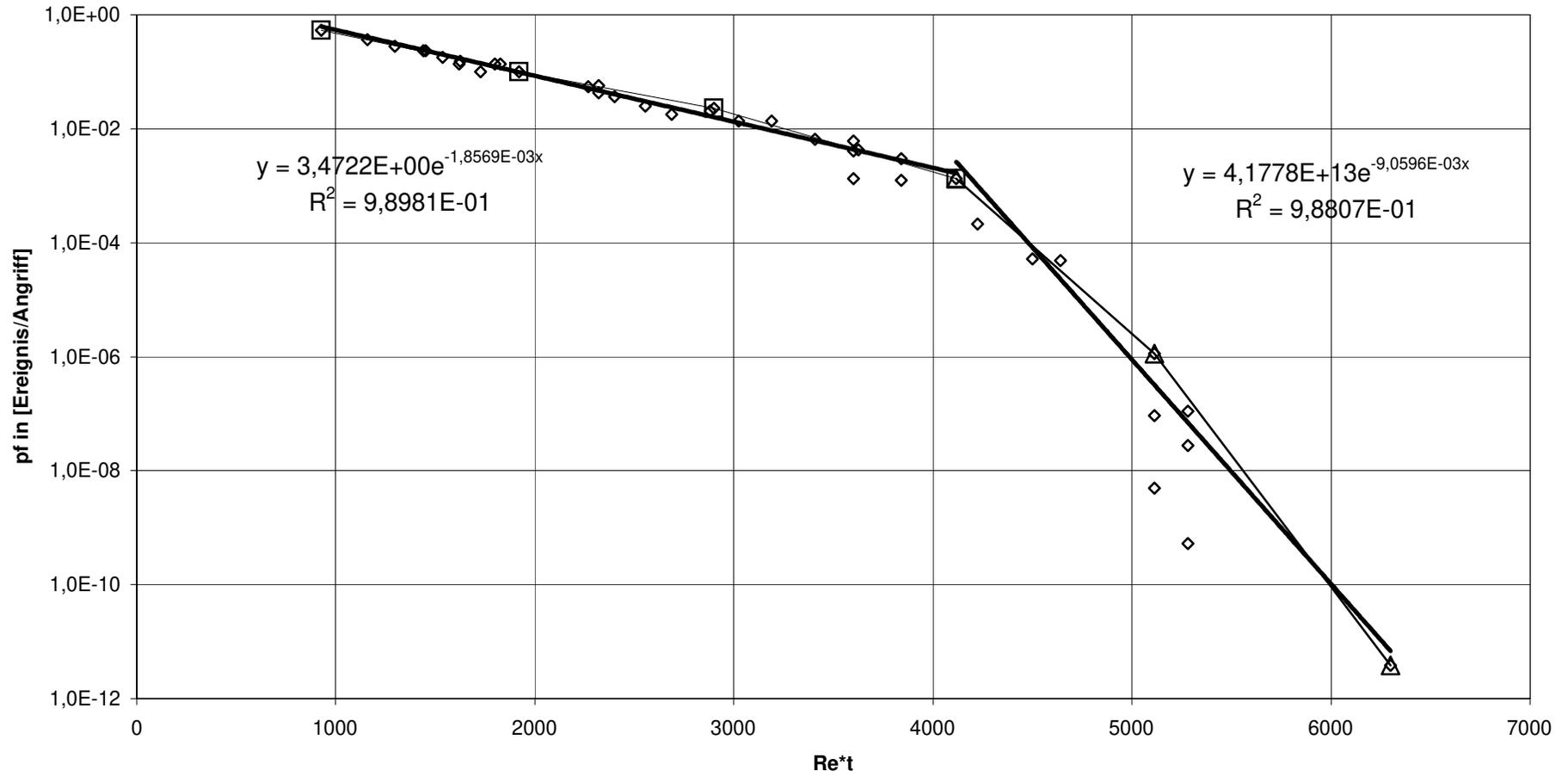
Wahrscheinlichkeit für einen Leitungskontakt durch Dritte in Abhängigkeit der Verlegetiefe



Anlage

A 4 Versagenswahrscheinlichkeit bei Baggerangriff

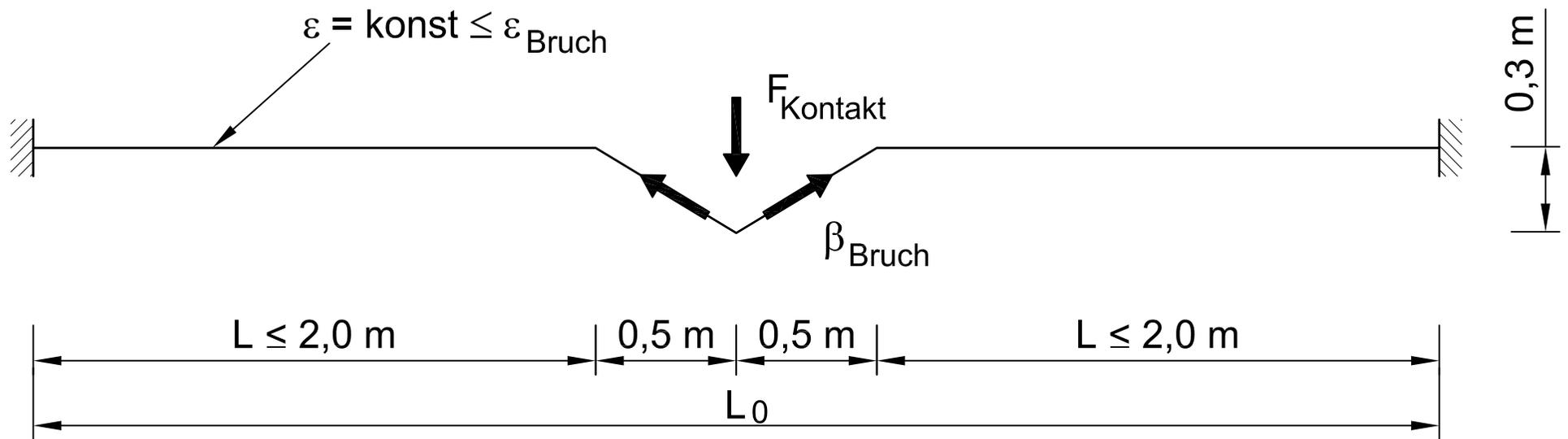
Baggerangriff / pf als Funktion von Re*t



Anlage

A 5 Modell Geogitter

Mechanisches Modell Geogitter



Anlage

A 6 Statistische Angaben zu den Basisvariablen

Statistische Angaben zu den Basisvariablen

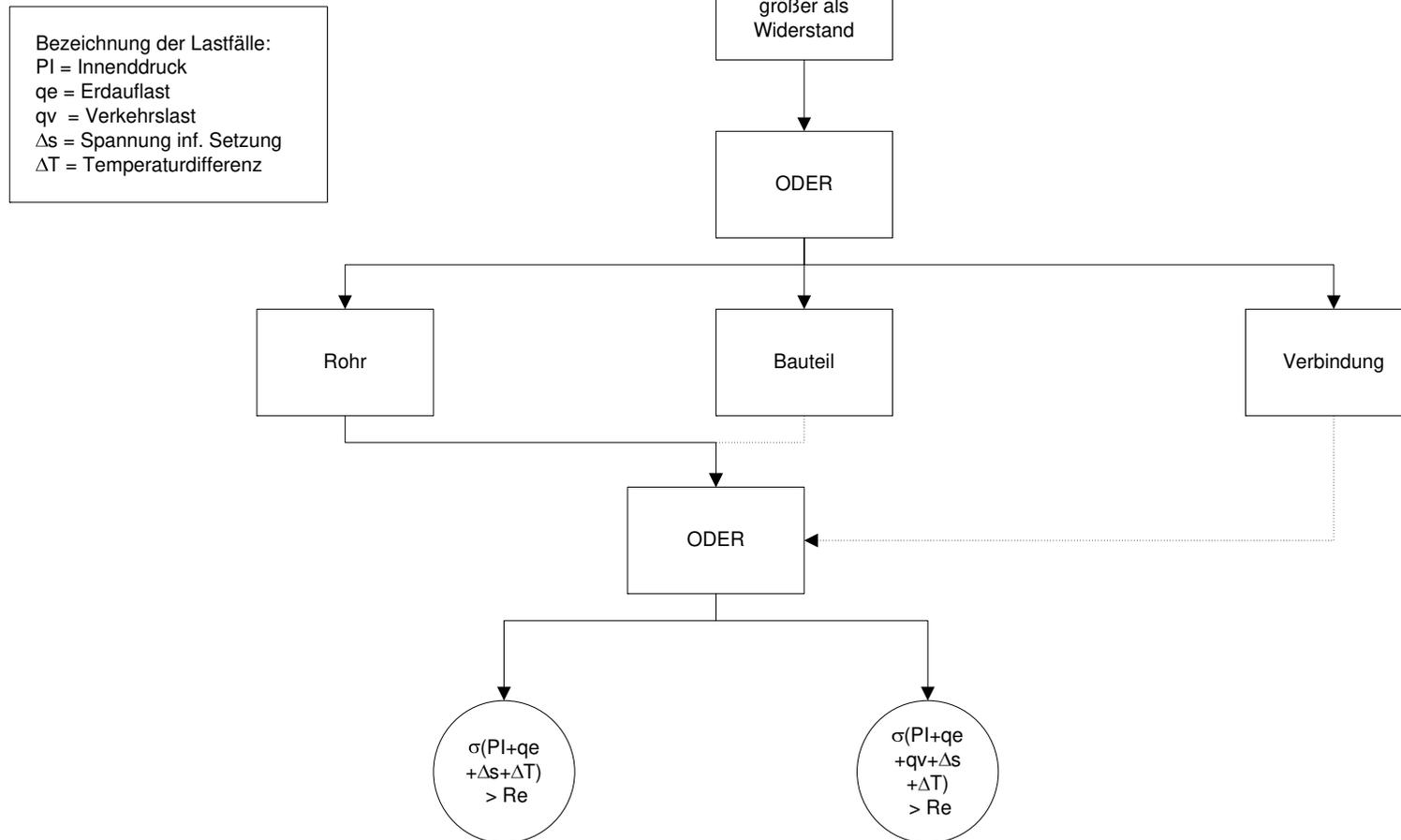
Basisvariable	Bauteil und Hersteller	Verteilungsfunktion	Variationskoeffizient	Nennwert	Nullwert	Quelle
R _e	Rohre	normal	0,02 bis 0,06	2 %-Fraktile	-	ISO
	allgemein: 1. gleiches Profil, gleicher Hersteller 2. unterschiedliches Profil, gleicher Hersteller 3. gleiches Profil, unterschiedlicher Hersteller 4. unterschiedliches Profil, unterschiedlicher Hersteller	bevorzugt: 3-par. lognormal alternativ: normal, Beta, Extremwert Typ I	1. 0,01 bis 0,04 2. 0,04 bis 0,07 3. 0,05 bis 0,08 4. 0,06 bis 0,12	5 %-Fraktile	z. B. 0,67 x Nennwert bei lognormal	Spaethe, GRU-SIBAU
R _m	Rohre	normal	0,035	k. A.	-	Zimmermann
	Profil und Hersteller wie R _e	wie R _e	geringer als R _e	k. A.	wie R _e	Spaethe
PN	Rohre	Gumbel Typ I	0,015 bis 0,02	Mittelwert ca. 1,03- bis 1,05-facher Nennwert	-	ISO
F _{Bagger}	Rohre	3-par. Gamma	0,45	164 kN (Mittelwert)	92 kN	Zimmermann
Δs aus Setzung	Für Längsbeanspruchung von Rohren infolge Setzungen	normal	0,25	95%-Fraktile; Mittelwert 0,7-facher Nennwert	-	Anlehnung an Smoltczyk, Alber, Reitmeier

Veenker

Anlage

A 7 Fehlerbaum für die Undichte infolge mechanischer Beanspruchung

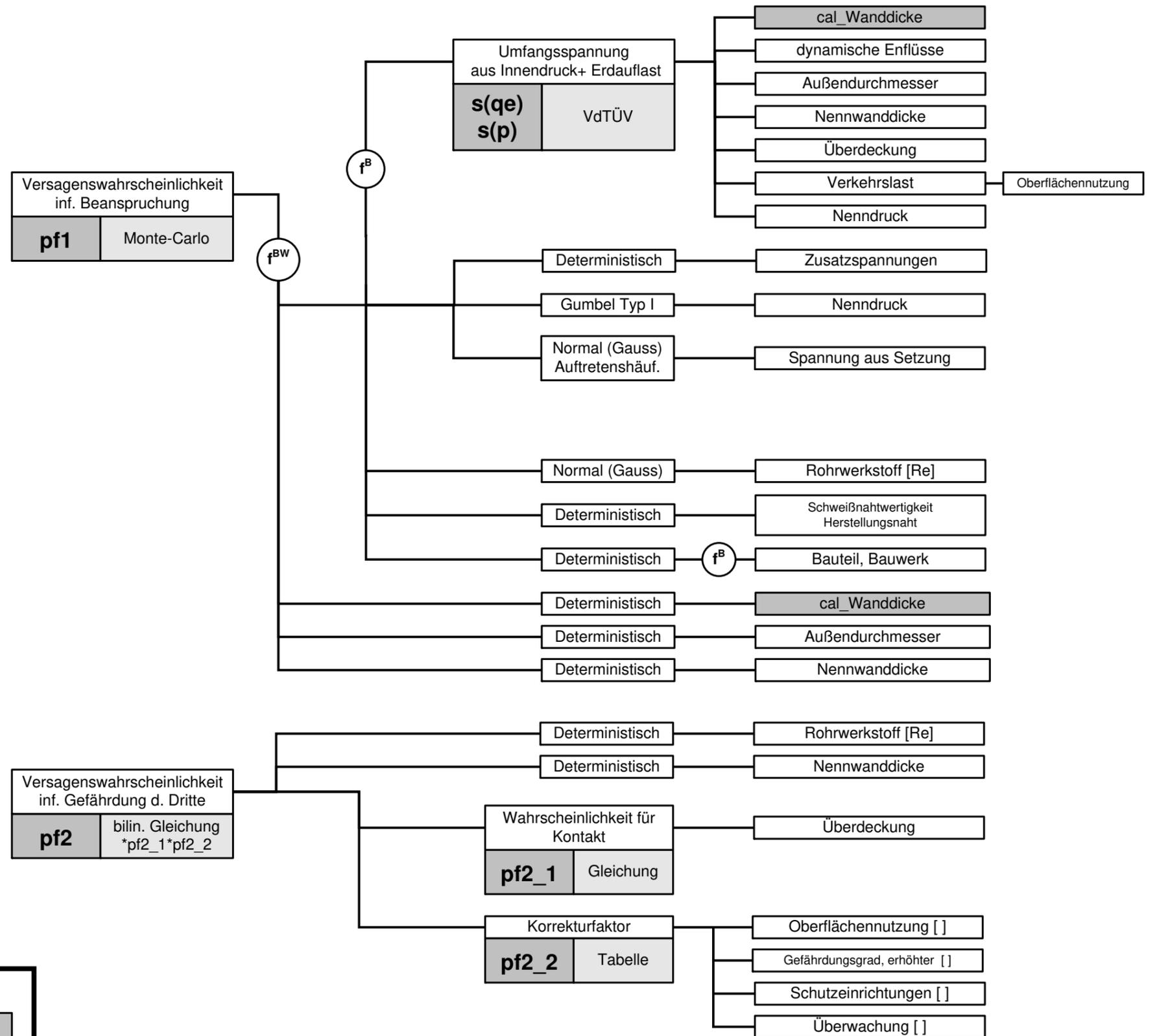
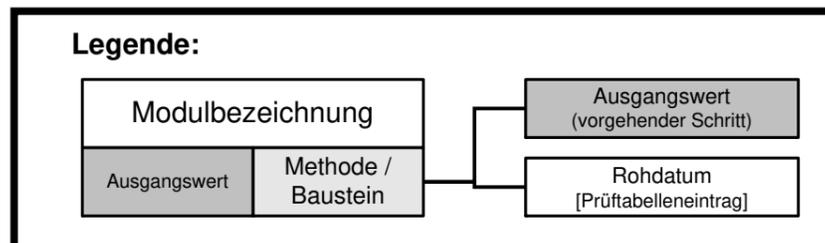
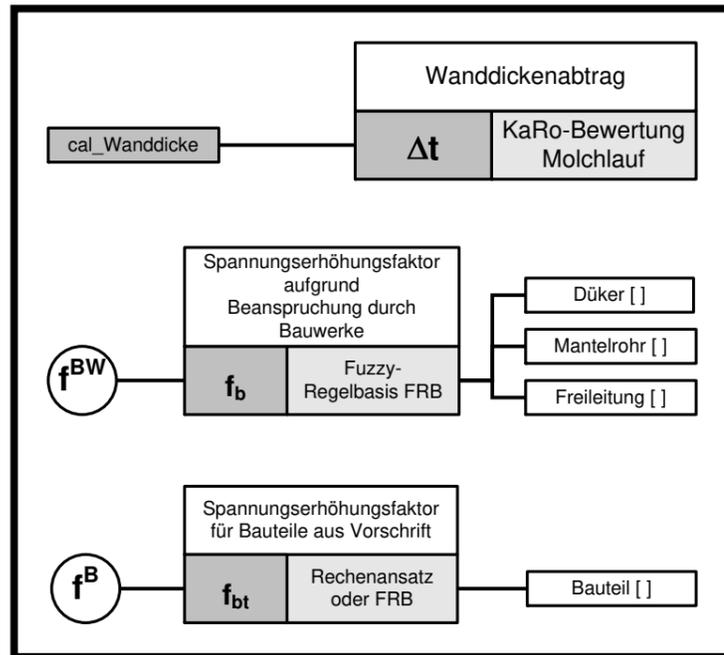
Fehlerbaum für die Schädigung durch Überbeanspruchung



Anlage

A 8 Bewertungsstruktur Probabilistik

Bewertungsstruktur Probabilistik



Anlage

A 9 Einfluss der Leitungsdaten

Einfluss der Leitungsdaten

		Einfluss auf Versagenswahrscheinlichkeit infolge...	
		Überbeanspruchung	Einwirkungen Dritter
Muss-Daten	Außendurchmesser	x	x
	Wanddicke	x	x
	Überdeckung	x	x
	Werkstoff	x	x
	Druck	x	
	Längsspannung aus Bodensetzung	x	
	Bewertungsjahr	x	
	Baujahr	x	
	Schweißnahtgüte	x	
	Bodenaggressivität	x	
	Medium	x	
	Oberflächennutzung	x	x
	Kann-Daten	Umhüllung	x
Bauteile		x	
Schutzeinrichtung			x
Mantelrohr		x	
Düker		x	