

4. Konzept zur Risikobewertung von Pipelineanlagen

4.1 Vorgehensweise

Mit den durchgeführten sicherheitstechnischen Untersuchungen wurden die Grundlagen für die Entwicklung eines Konzeptes zur Risikobewertung von Pipelineanlagen geschaffen. Es wird untersucht, wie wahrscheinlich es ist, daß die für einen Pipelineabschnitt ermittelten Gefährdungen wirksam werden und wie hoch der dabei entstehende Schaden wäre. Dabei werden die Erkenntnisse der durchgeführten sicherheitstechnischen Analysen sowie zusätzlich das sich ändernde territorialspezifische Schutzbedürfnis und das Auftreten der differenzierten sicherheitsbeeinflussenden Parameter entlang des Trassenverlaufes einbezogen.

Das Risiko wird nach /203/ definiert als Kombination

- der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts mit
- dem Schadensausmaß.

Für Pipelineanlagen wird als Schaden die Stoffemission aus der Leitung in die Umgebung (Leckage durch Rohrversagen) und als Schadensausmaß die daraus resultierenden Schädigungen der Umwelt (Flora, Fauna, Gewässer, Böden) und der Personen (Beschäftigte, Dritte) definiert.

Voraussetzung für die Beurteilung des Risikos ist eine geeignete Unterteilung der Pipelineanlage in Untersuchungsabschnitte, da im Gegensatz zu vergleichbaren Methoden die Risikobewertung bei Rohrleitungsanlagen aufgrund ihrer linearen Struktur abschnittsweise erfolgen muß. Eine geeignete Unterteilung der Pipeline in Segmente (Segmentierung) ist außerdem erforderlich, da sie die Grundlage für die Ermittlung und Gestaltung der erforderlichen Datenbasis darstellt.

Die Festlegung der Pipelineabschnitte kann nach verschiedenen Methoden erfolgen:

1. Unterteilung in genügend kurze gleichmäßige Pipelinesegmente,
2. Segmentierung unter Berücksichtigung des Schutzbedarfs oder anderer spezifischer Bedingungen der Umgebung,
3. Segmentierung unter Berücksichtigung der anlagentechnischen Gestaltung.

Die Auswahl der Segmentierungsmethode richtet sich nach der Leitungslänge, der realisierten Anlagenstruktur sowie der Ausdehnung und Art der durchquerten Gebiete. Eine Risikoanalyse stellt insbesondere für Pipelineanlagen ein umfangreiches und aufwendiges Verfahren dar, da viele Einflußgrößen einzubeziehen sind. Es ist bei Fernleitungen mit sehr großer Längenausdehnung nicht vertretbar, für alle Pipelineabschnitte eine differenzierte Risikountersuchung durchzuführen. Aus diesem Grund werden in einem ersten Teil mit Hilfe eines Klassifizierungsverfahrens den Pipelinesegmenten Risikobereiche zugeordnet, die aus Untersuchungen zur Wahrscheinlichkeit eines Stoffaustrittes und zu den potentiellen Gefährdungen für Personen und Umwelt abgeleitet werden. Auf Grundlage der so klassifizierten Pipelineabschnitte erfolgen für die kritischen Bereiche weiterführende risikoanalytische Untersuchungen unter Einbeziehung von Auswirkungsbetrachtungen. In folgender Abbildung ist der prinzipielle Ablauf der Risikoanalyse zusammengefaßt.

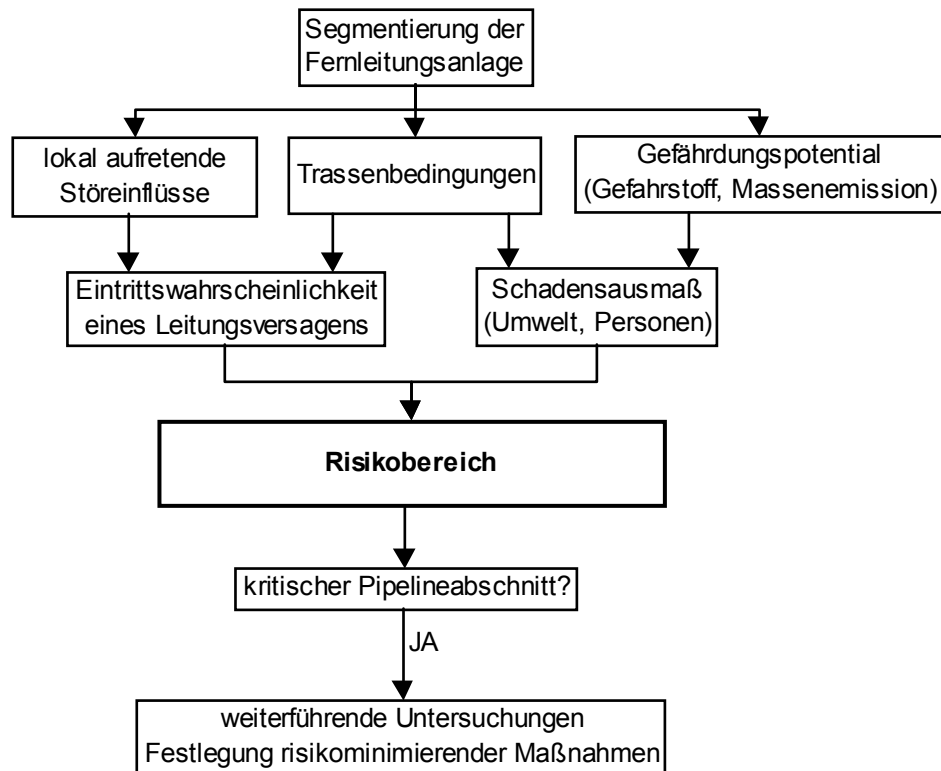


Abbildung 4.1: Prinzipieller Ablaufplan einer Risikoanalyse an Pipelineanlagen

4.2 Risikoklassifizierung der Pipelineabschnitte

4.2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Im Rahmen der Risikoklassifizierung ist für die betrachtete Anlage eine umfassende und detaillierte Analyse der Schadensursachen und der Mechanismen der Gefährdungsbildung unter Berücksichtigung des wahrscheinlichen Schadensausmaßes durchzuführen. Die zu berücksichtigenden sicherheitskritischen Zustände ergeben sich primär aus einem angenommenen Leckageereignis, wobei das mögliche Schadensausmaß unter Einbeziehung der Stoffcharakteristik und der Umgebungsbedingungen abzuschätzen ist.

Das Grundproblem eines solchen komplexen und heterogenen Bewertungsverfahrens besteht vor allem in einer einheitlichen Skalierung bzw. Klassifizierung der Einfluß- und Auswirkungsgrößen. Zur Lösung dieses Problems werden Parameter definiert, welche die anlagen- und umgebungsbezogenen Bedingungen widerspiegeln. Sie sind für jeden Pipelineabschnitt zu ermitteln. Die Risikoklassifizierung (Festlegung des Risikobereiches) des Pipelineabschnittes erfolgt, ausgehend von der Definition des Risikos mit ermittelten Werten für die Leckagewahrscheinlichkeit (R_{Leck} als Äquivalent zur Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts) und für das Schadensausmaß (R_{Schad}).

Da ein Leckageereignis von der komplexen Wirkung interner oder externer Einflußgrößen abhängig ist, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Schadensfall ausschließlich von deren Auftreten und Charakteristik abgeleitet. Demzufolge werden die Risikoparameter für die Ermittlung der Leckagewahrscheinlichkeit in Anlehnung an die im Rahmen der Analyse zur Gefährdungsbildung ermittelten Schadensursachen festgelegt.

Die Beurteilung der Auswirkungen im Rahmen der Risikoklassifizierung bezieht sich auf die *potentiellen* Schäden an Personen und der Umwelt, woraus sich die Risikoparameter zur Ermittlung des Schadensausmaßes ableiten lassen.

Es werden folgende Risikoparameter definiert:

Risikoparameter zur Beurteilung der Leckagewahrscheinlichkeit (L):

- | | | |
|----|----------------------|-------------------------------|
| 1. | Externe Korrosion | $L_{\text{ext. Korr.}}$ |
| 2. | Interne Korrosion | $L_{\text{int. Korr.}}$ |
| 3. | Einwirkungen Dritter | $L_{\text{Einw. Dritter}}$ |
| 4. | Bodenbewegungen | $L_{\text{Bodenbeweg.}}$ |
| 5. | Mechanische Fehler | $L_{\text{mech. Fehler}}$ |
| 6. | Betriebliche Fehler | $L_{\text{betriebl. Fehler}}$ |

Risikoparameter zur Beurteilung der Schadensauswirkungen (S):

- | | | |
|----|-----------------|-----------------------|
| 7. | Personenschaden | S_{Personen} |
| 8. | Umweltschaden | S_{Umwelt} |

Mit den für den Leitungsabschnitt ermittelten Risikoparametern werden die Leckagewahrscheinlichkeit und die Schadensauswirkungen bestimmt. Aus der Kombination dieser beiden Werte ergibt sich für jeden Pipelineabschnitt der Risikobereich (vg. Abb. 4.2)

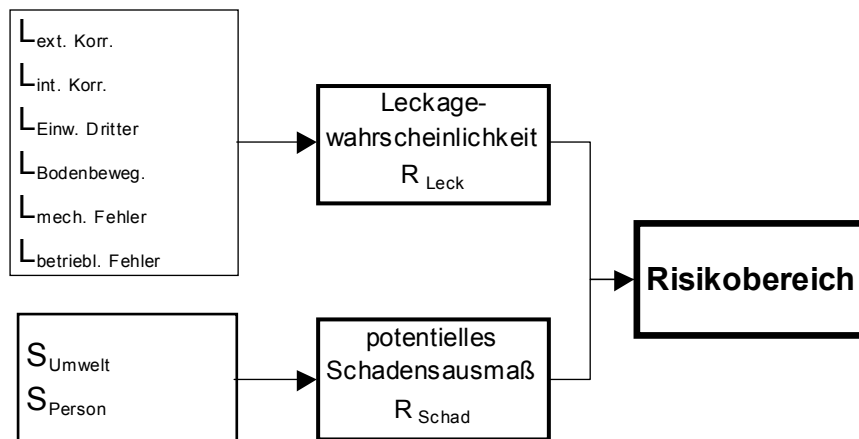


Abbildung 4.2: Ermittlung des Risikobereiches

4.2.2 Risikoparameter zur Bestimmung der Leckagewahrscheinlichkeit

4.2.2.1 Festlegung von Bewertungsvariablen

Die Bewertung der einzelnen Risikoparameter erfolgt differenziert unter Einbeziehung der wichtigsten Einflussfaktoren. Dazu werden für jeden Risikoparameter Variablen (v_n) definiert, die den jeweils relevanten Einflussfaktor widerspiegeln. So werden z.B. für den Risikoparameter "Externe Korrosion" ($L_{\text{ext. Korr.}}$) die Variablen "Umgebungsbedingungen" (v_1), "kathodischer Korrosionsschutz" (v_2) und "passiver Korrosionsschutz" (v_3) festgelegt (Zusammenstellung für jeden Risikoparameter in den Tabellen 4.1-4.6). Grundlage für die

Festlegung der Bewertungsvariablen sind die Ergebnisse der sicherheitsbezogenen Bewertung der Schadensursachen.

4.2.2.2 Wertigkeitsfaktor η_{vi}

Es ist notwendig, den einzelnen Bewertungsvariablen Wertigkeitsfaktoren (η_{vi}) zuzuordnen, da aus physikalischer und sicherheitstechnischer Sicht die Variablen unterschiedliche Relevanz im Rahmen der Gefährdungsbildung besitzen. So ist z.B. bei der Bewertung des Risikoparameters "Einwirkungen Dritter" ($L_{\text{Einw. Dritter}}$) den Variablen "Verlegung und Überwachung" und "Design" eine geringere Wertigkeit zuzuordnen als der Variable "Umgebungsbedingungen". Die Grundlage für die Festlegung der Wertigkeitsfaktoren ist die umfassende sicherheitstechnische Bewertung der einzelnen Schadensursachen.

Die Wertigkeitsfaktoren werden zwischen 0,1 (für weniger bedeutsame Variablen) und 1 (für bedeutsame Variablen) festgelegt werden, wobei die Summe der Wertigkeitsfaktoren für einen Parameter 1 beträgt.

Die in den Tabellen 4.1-4.6 angegebenen Wertigkeitsfaktoren stellen die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen dar. Sie müssen jedoch bei neuen Erkenntnissen zur Gefährdungsbildung bzw. Ergebnissen aus Schadensuntersuchungen entsprechend angepaßt werden.

4.2.2.3 Wichtung der Bewertungsvariablen mit Hilfe von Bewertungskriterien

Die einzelnen Variablen werden mit Hilfe der Attribute 0, 1, 2 oder 3 bewertet, wobei der festgelegte Wert die Relevanz der Bewertungsvariable in dem jeweils betrachteten Pipelineabschnitt charakterisiert. Je kleiner der Wert ist, desto geringer ist die Bedeutung dieser Bewertungsvariable in diesem Pipelineabschnitt. Der Wert 0 bedeutet dabei, daß in dem Abschnitt der mit der Bewertungsvariable zu charakterisierende Einflussfaktor nicht wirksam ist und damit sicherheitstechnisch unkritische Bedingungen vorliegen (z.B. keine korrosionsfördernde Umgebungsbedingungen, hoher technischer Stand bei den Ausrüstungen, sehr gute Rohrqualität). Mit steigendem Wert nimmt die Bedeutung der Bewertungsvariable zu. Bei hohen Werten liegen sicherheitstechnisch kritische Bedingungen vor (z.B. korrosiver Transportstoff, gefährdende Umgebungsbedingungen). Die Zuordnung der Werte 0 bis 3 erfolgt in Abhängigkeit der Erfüllung des Standes der Technik, der konkreten Betriebs-, Verfahrens- oder Umgebungsbedingungen oder des Zustandes bzw. Alters der Pipelineanlage und setzt ein Team erfahrener Fachleute voraus, die ausreichende Kenntnisse über die zu bewertende Pipelineanlage und dem Stand der Technik bzw. ggf. unternehmerseitig festgelegten Standards besitzen. Mit der 4-Stufigkeit wird gewährleistet, daß eine ausreichende Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen erfolgt, andererseits der subjektive Einfluss, der sich bei einer höheren Stufigkeit ergeben würden, gering bleibt.

Es ist grundsätzlich sehr schwierig, eine einheitliche Vorgabe für die Bewertung und Wichtung der Variablen festzulegen, da sich die jeweiligen Bedingungen stark unterscheiden und einzelne Unternehmen ggf. spezifische sicherheitstechnische Standards zu Grunde legen. Die in den Tabellen 4.1-4.6 aufgeführten Bewertungskriterien stellen jedoch eine wesentliche Grundlage dar und garantieren, daß die wichtigsten Einflussfaktoren in die Betrachtungen einbezogen werden.

In folgender Abbildung ist die grundsätzliche Vorgehensweise zur Bestimmung der Risikoparameter strukturiert zusammengefaßt:

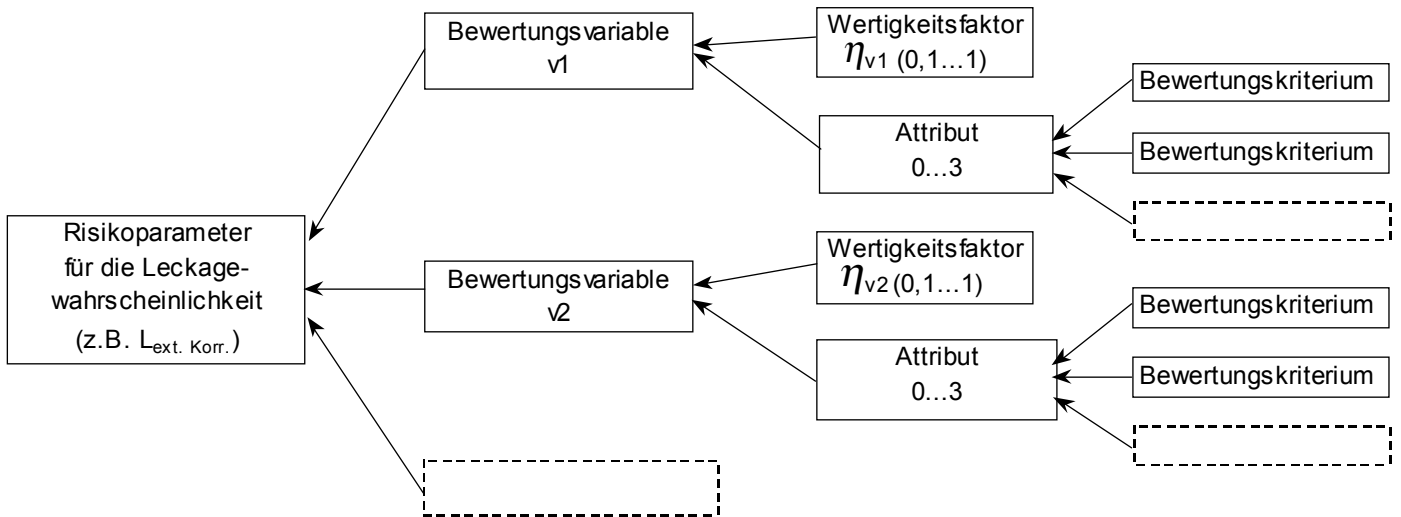


Abbildung 4.3: Grundsätzliche Vorgehensweise zur Bestimmung der Risikoparameter

4.2.2.4 Berechnung der Risikoparameter

Der jeweilige Risikoparameter wird durch Aufsummierung der einzelnen gewichteten Bewertungsvariablen nach folgenden Gleichungen ermittelt (Die Indizes sind den Tabellen 4.1-4.6 zu entnehmen):

$$\text{Externe Korrosion:} \quad L_{\text{ext.Korr.}} = \sum_{i=1}^3 \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.1)$$

$$\text{Interne Korrosion:} \quad L_{\text{int.Korr.}} = \sum_{i=4}^6 \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.2)$$

$$\text{Einwirkungen Dritter:} \quad L_{\text{Einw.Dritter}} = \sum_{i=7}^9 \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.3)$$

$$\text{Bodenbewegungen:} \quad L_{\text{Bodenbeweg.}} = \sum_{i=10}^{11} \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.4)$$

$$\text{Mechanische Fehler:} \quad L_{\text{mech.Fehler}} = \sum_{i=12}^{15} \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.5)$$

$$\text{Betriebliche Fehler:} \quad L_{\text{betriebl.Fehler}} = \sum_{i=16}^{18} \eta_{v_i} \cdot v_i \quad (4.6)$$

In den folgenden Tabellen sind die Bewertungsvariablen mit den Wertigkeitsfaktoren und wichtigsten Bewertungskriterien sowie die Indizes für alle Risikoparameter zur Bestimmung der Leckagewahrscheinlichkeit zusammengefasst:

Tabelle 4.1: Risikoparameter "Externe Korrosion" ($L_{\text{ext. Korr.}}$)			
Indizes	Bewertungsvariable (v_i)	wichtige Bewertungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
1	v_1 : Umgebungsbedingungen	Bodenzusammensetzung pH-Wert Temperatur elektr. Widerstand Bodendichte	$\eta_{v_1} = 0,2$
2	v_2 : kathodischer Korrosionsschutz	regelmäßige Funktionsprüfungen Alter Ausführung Störungseinflüsse	$\eta_{v_2} = 0,4$
3	v_3 : passiver Korrosionsschutz	Typ und Dicke der Außenbeschichtung Alter der Beschichtung regelmäßige Zustandsüberprüfung Störungseinflüsse Fehlstellen	$\eta_{v_3} = 0,4$

Tabelle 4.2: Risikoparameter "Interne Korrosion" ($L_{\text{int. Korr.}}$)			
Indizes	Bewertungsvariable (v_i)	wichtige Bewertungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
4	v_4 : Korrosivität des Fördermediums	Wassergehalt Sulfatgehalt pH-Wert Temperatur Inhibitoren andere korrosionsfördernde Elemente	$\eta_{v_4} = 0,4$
5	v_5 : Betrieb	Durchflussrate Stillstandszeiten Molchzyklen (Reinigung und Prüfung) Pipelinealter Inspektion	$\eta_{v_5} = 0,3$
6	v_5 : Rohrauslegung/-verlegung	Tiefpunkte Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes Schweißnahtposition Korrosionszuschläge	$\eta_{v_5} = 0,3$

Tabelle 4.3: Risikoparameter "Einwirkungen Dritter" ($L_{\text{Einw. Dritter}}$)			
Indizes	Bewertungsvariable (v_i)	wichtige Bewertungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
7	v_7 : Umgebungsbedingungen	Bauaktivität in der Umgebung Flächennutzung (Landwirtschaftliche Nutzungsintensität) parallelverlegte Leitungen	$\eta_{v_7} = 0,5$

8	v ₈ : Verlegung und Überwachung	Verlegetiefe, Kennzeichnung des Trassenverlaufes Information der anliegenden Bevölkerung, Unternehmen und Behörden regelmäßige Begehungen und Befliegungen	$\eta_{v8} = 0,2$
9	v ₉ : Design	Wandstärke Materialqualität Durchmesser/Wandstärke- Verhältnis	$\eta_{v9} = 0,3$

Tabelle 4.4: Risikoparameter "Bodenbewegungen" ($L_{\text{Bodenbew.}}$)

Indizes	Bewertungsvariable (v _i)	wichtige Bewertungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
10	v ₁₀ : Kreuzungen	Gewässer, Straßen Eisenbahntrassen Durchörterungstiefe Schutzrohrverlegung	$\eta_{v10} = 0,2$
11	v ₁₁ : Umgebungsbedingungen	Bodenverhältnisse Bergbaugebiet erdbebengefährdete Gebiete seismisch aktives Gebiet Überwachungsstrategie	$\eta_{v11} = 0,8$

Tabelle 4.5: Risikoparameter "Mechanische Fehler" ($L_{\text{mechan. Fehler}}$)

Indizes	Bewertungsvariable (v _i)	wichtige Bewertungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
12	v ₁₂ : Rohrqualität	Qualitätssicherungssystem bei der Herstellung Schweißnahtausführung Materialqualitätsnachweis Betriebszeit	$\eta_{v12} = 0,3$
13	v ₁₃ : Verlegung	Überwachung Schweißnahtprüfung Stresstest/Druckprüfung	$\eta_{v13} = 0,2$
14	v ₁₄ : Design	max. Betriebsdruck Auslegungsdruck Sicherheitsbeiwerte und Zuschläge Werkstoffeigenschaften	$\eta_{v14} = 0,2$
15	v ₁₅ : Betrieb und Überwachung	Inspektionsmaßnahmen regelmäßige Prüfungen Druckprüfungen Belastungskollektiv Alter der Leitung	$\eta_{v15} = 0,3$

Tabelle 4.6: Risikoparameter "Betriebliche Fehler" ($L_{\text{betriebl. Fehler}}$)			
Indizes	Bewertungsvariable (v_i)	wichtige Wichtungskriterien	Wertigkeitsfaktor (η_{v_i})
16	v_{16} : Betrieb und Verfahrensbedingungen	Qualifikation der Bediener Automatisierungsgrad An- und Abfahrprozeduren Reaktion auf Betriebsstörungen Dokumentation Druckverlauf Zwischenpumpstationen max. Betriebsdruck Stoffeigenschaften Druckstoßgefährdung (schnellschließende Armaturen)	$\eta_{v_{16}} = 0,2$
17	v_{17} : Design/Auslegung	Sicherheitsbeiwerte Materialeigenschaften Auslegungsdruck/Betriebsdruck Berücksichtigung von Druckstoßbelastungen	$\eta_{v_{17}} = 0,3$
18	v_{18} : Sicherheitsausrüstung	Schutzeinrichtungen gegen Druckstöße und Überbeanspruchungen Sicherheitsstrukturen Datenfernübertragung Pumpensteuerungen Zuverlässigkeit der sicherheitstechn. Ausrüstung	$\eta_{v_{18}} = 0,5$

Die Werte für die Bewertungsvariablen und damit für die Risikoparameter variieren mit dem Trassenverlauf und müssen für jeden definierten Pipelineabschnitt separat ermittelt werden. Die ermittelten Risikoparameter repräsentieren damit die differenziert vorhandenen Einflüsse auf die Leckagewahrscheinlichkeit. Bei einem Wert zwischen 0 und 1 hat der Parameter einen geringeren Einfluss auf die Leckagewahrscheinlichkeit. Ein Wert über 1 bedeutet, daß der Parameter aufgrund der Bedingungen bzw. unzureichender Sicherheitsmaßnahmen einen erhöhten Einfluß aufweist.

Mit Hilfe der ermittelten Risikoparameter unter Anwendung dieses Algorithmus und einer entsprechenden grafischen Dokumentation der Ergebnisse ist es möglich, Schwachpunkte einer Pipelineanlage differenziert ermitteln zu können bzw. defizitäre Anlagenabschnitte zu definieren.

Beispiel:

Für einen Pipelinebereich soll der Parameter "Externe Korrosion" ($L_{\text{ext. Korr.}}$) ermittelt werden. Der Pipelinebereich wird dazu in 3 Abschnitte unterteilt.

1. Abschnitt:

Umgebungsbedingungen

Die Bodenbewertung ergab geringe korrosionsfördernde Eigenschaften.

$$v_{1/1} = 1$$

kathodischer Korrosionsschutz

Anlagenalter: 10 Jahre, Ausführung entspricht nicht mehr dem aktuellen technischen Standard, es erfolgen regelmäßige Funktionsprüfungen, keine Störeinflüsse

$$v_{2/1} = 2$$

passiver Korrosionsschutz

Bitumenbeschichtung, Alter der Beschichtung: 10 Jahre, letzte Zustandsüberprüfung vor 5 Jahren ergab keine Beschädigungen

$$v_{3/1} = 1$$

$$L_{\text{ext. Korr./1}} = \eta_{v1}v_{1/1} + \eta_{v2}v_{2/1} + \eta_{v3}v_{3/1} = 0,2 \cdot 1 + 0,4 \cdot 2 + 0,4 \cdot 1 = 1,4$$

2. *Abschnitt:*

Umgebungsbedingungen

Die Bodenbewertung ergab erhöhte korrosionsfördernde Eigenschaften.

$$v_{1/2} = 2$$

kathodischer Korrosionsschutz

Schutzanlage wurde vor 1 Jahr erneuert und entspricht dem aktuellen technische Standard, es erfolgen regelmäßige Funktionsprüfungen, keine Störeinflüsse

$$v_{2/2} = 0$$

passiver Korrosionsschutz

Die Bitumenbeschichtung für diesen Abschnitt wurde vor 1 Jahr erneuert.

$$v_{3/2} = 0$$

$$L_{\text{ext. Korr./2}} = \eta_{v1}v_{1/2} + \eta_{v2}v_{2/2} + \eta_{v3}v_{3/2} = 0,2 \cdot 2 + 0,4 \cdot 0 + 0,4 \cdot 0 = 0,4$$

3. *Abschnitt:*

Umgebungsbedingungen

Die Bodenbewertung ergab erhöhte korrosionsfördernde Eigenschaften.

$$v_1 = 2$$

kathodischer Korrosionsschutz

Anlagenalter: 10 Jahre, Ausführung entspricht nicht mehr dem aktuellen technische Standard, es erfolgen regelmäßige Funktionsprüfungen, keine Störeinflüsse

$$v_2 = 2$$

passiver Korrosionsschutz

Bitumenbeschichtung, Alter der Beschichtung: 10 Jahre, letzte Zustandsüberprüfung vor 5 Jahren ergab leichte bis mittlere Beschädigungen der Umhüllung und leichten Korrosionsabtrag am Rohr

$$v_3 = 3$$

$$L_{\text{ext. Korr./3}} = \eta_{v1}v_{1/3} + \eta_{v2}v_{2/3} + \eta_{v3}v_{3/3} = 0,2 \cdot 2 + 0,4 \cdot 2 + 0,4 \cdot 3 = 2,4$$

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt praktischerweise in einer entsprechenden Auftragung der ermittelten Bewertungsvariablen und des Risikoparameters für jeden Trassenabschnitt.

Bewertungsvariable	Wertigkeitsfaktor				
Umgebungsbedingungen	$\eta_{v1} = 0,2$				3
					2
kathodischer Korrosionsschutz	$\eta_{v2} = 0,4$				1
					0
					3
passiver Korrosionsschutz	$\eta_{v3} = 0,4$				2
					1
					0
Risikoparameter $L_{\text{ext. Korr.}}$					3
		1,4		2,4	2
			0,4		1
					0
		Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	

In diesem Beispiel ist der Wert für den Risikoparameter " $L_{\text{Ext.Korr.}}$ " im Abschnitt 3 am größten und gibt so Hinweise auf Schwachstellen hinsichtlich des Korrosionsschutzes. Auf gleiche Weise ist für jeden Pipelineabschnitt die Bewertung der einzelnen Risikoparameter vorzunehmen. Es ist zu erkennen, daß mit dieser Vorgehensweise eine Ermittlung von kritischen Pipelinebereichen möglich ist und die Ergebnisse genutzt werden können, um schon in dieser Bearbeitungsphase gezielt Maßnahmen zur Reduzierung der Werte einzelner Risikoparameter festzulegen.

4.2.2.5 Ermittlung der Leckagewahrscheinlichkeit R_{Leck}

Die Leckagewahrscheinlichkeit ist inhaltlich gleichzusetzen mit der Versagensrate von Rohrfernleitungen. Im Rahmen der retrospektiven Untersuchungen, in denen Schadensfälle statistisch ausgewertet wurden, sind Werte für Versagensraten differenziert nach Schadensursache ermittelt worden (Tabelle 4.7). Diese Werte für Versagensraten bilden die Grundlage für die Berechnung der Leckagewahrscheinlichkeiten. Es ist jedoch erforderlich, diese Versagensraten durch fortlaufende Auswertung von Schadensereignissen ständig zu aktualisieren. Für die Durchführung der Risikoanalyse bzw. zur Bestimmung spezifischer Schadenseintrittswahrscheinlichkeiten stellen die ermittelten Daten eine ausreichende Basis dar, da sich das Verhältnis zwischen den einzelnen Schadensursachen nicht wesentlich ändern wird.

Tabelle 4.7: Anteilige Versagensraten in Abhängigkeit der Gefährdungsquelle (statistische Auswertung 1971-2000)	
/54, 38, 201/	
Gefährdungsquelle (n) (Schadensursache)	Versagensrate R_n $[\text{km a}]^{-1}$
Externe Korrosion	$1,05 \cdot 10^{-4}$
Interne Korrosion	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Einwirkungen Dritter	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Bodenbewegungen	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Mechanische Fehler	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Betriebliche Fehler	$4,6 \cdot 10^{-5}$
statistische Leckagewahrscheinlichkeit $R_{\text{Leck.stat.}}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$

Die Berechnung der Leckagewahrscheinlichkeit erfolgt nach folgender Gleichung:

$$R_{\text{Leck}} = (R_{\text{ext. Korr.}} \cdot L_{\text{ext. Korr.}} + R_{\text{int. Korr.}} \cdot L_{\text{int. Korr.}} + R_{\text{Bodenbew.}} \cdot L_{\text{Bodenbew.}} + R_{\text{mech. Fehler}} \cdot L_{\text{mech Fehler}} + R_{\text{betriebl. Fehler}} \cdot L_{\text{betriebl. Fehler}}) \cdot l_{\text{Abschnitt}} \quad (4.7)$$

$l_{\text{Abschnitt}}$ ist dabei die Länge des untersuchten Abschnittes (in km).

Als Ergebnis erhält man für den Pipelineabschnitt einen Wert für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens (Leckage), der sich zum einen aus der differenzierten Untersuchung des konkret vorliegenden Systems ergibt und die statistische Wahrscheinlichkeit für eine Schadensursache berücksichtigt. Eine Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist für die weitere Betrachtung nicht erforderlich. Es ist deshalb sinnvoll, für die Ermittlung kritischer Pipelineabschnitte eine relative Leckagewahrscheinlichkeit $R_{\text{Leck/rel.}}$ zu definieren:

$$R_{\text{Leck/rel.}} = \frac{R_{\text{Leck}}}{(R_{\text{Leck/stat.}}) \cdot l_{\text{Abschnitt}}} \quad (4.8)$$

$R_{\text{Leck/rel.}}$ stellt einen Indikator dar, der angibt, welche Bereiche im Vergleich zu anderen Pipelineabschnitten bzw. im Verhältnis zum Stand der Technik bei anderen Pipelineanlagen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Schadensfälle aufweisen. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

$R_{\text{Leck/rel.}} < 1$ -> Der Pipelineabschnitt weist eine durchschnittlich geringere Schadenswahrscheinlichkeit auf

$R_{\text{Leck/rel.}} > 1$ -> Der Pipelineabschnitt weist eine durchschnittlich höhere Schadenswahrscheinlichkeit auf

Beispiel:

Für 3 Pipelineabschnitte wurden im Rahmen der sicherheitstechnischen Untersuchungen folgende Werte für die Risikoparameter ermittelt:

Risikoparameter	1. Abschnitt (1 km)	2. Abschnitt (1 km)	3. Abschnitt (1 km)
$L_{\text{ext. Korr.}}$	1,4	0,4	2,4
$L_{\text{int. Korr.}}$	0,8	0,4	0,4
$L_{\text{ext. Einw.}}$	1,8	0,6	1,2
$L_{\text{Bodenbeweg.}}$	0,4	0,2	1,4
$L_{\text{mechan. Fehler}}$	1,3	1,3	1,3
$L_{\text{betriebl. Fehler}}$	1	1	1,5

Aus diesen Werten werden für jeden Abschnitt nach den Formeln 4.7 und 4.8 und auf Grundlage der Werte für R_n aus Tabelle 4.7 R_{Leck} sowie $R_{\text{Leck/rel.}}$ berechnet

	1. Abschnitt (1 km)	2. Abschnitt (1 km)	3. Abschnitt (1 km)
$R_{\text{Leck}} [1/a]$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
$R_{\text{Leck/rel.}} [-]$	1,37	0,71	1,38

Für die Bestimmung sicherheitstechnischer Schwachstellen bei einer Pipeline und Graduierung von Pipelineabschnitten eignet sich vor allem die Ermittlung und Darstellung der einzelnen Risikoparameter und der Bewertungsvariablen, da diese wesentlich aussagekräftiger sind als ein ermittelter Wert für die Leckagewahrscheinlichkeit.

4.2.3 Bestimmung der Schadensauswirkungen

4.2.3.1 Vorbemerkung

Im Rahmen der Risikoklassifizierung der zu untersuchenden Pipelineabschnitte sind die potentiellen Auswirkungen von Stoffaustritten abzuschätzen. Dies erfolgt mit Hilfe der Risikoparameter S_{Person} und S_{Umwelt} , die die potentiellen Auswirkungen auf Menschen und die Umwelt charakterisieren. Die Bestimmung der Parameter S_{Person} und S_{Umwelt} ist bei Transportstoffen relevant, die aufgrund ihrer Toxizität, Brennbarkeit, Wassergefährdung usw. potentiell Schäden an Personen bzw. der Umwelt verursachen können.

4.2.3.2 Ermittlung des Risikoparameters S_{Person}

Der Risikoparameter S_{Person} beschreibt die Möglichkeit einer Schädigung von Personen bei einer Stoffemission und ist bei brennbaren und toxischen Transportstoffen festzulegen. Es wird grundsätzlich ein Bereich von 500m beidseitig der Leitungsanlage entlang des Trassenverlaufes als Gefährdungsbereich definiert. Damit werden weitestgehend sämtliche schädigenden Wirkungen von Stoffemissionen auf Personen berücksichtigt. Dieser Bereich kann jedoch reduziert werden oder ist zu erweitern, wenn dies die Anlagenspezifika (Nennweite, Druck, Gefährlichkeit des Transportstoffes) erfordert.

Es sind folgende Schutzobjekte innerhalb des Gefährdungsbereiches zu berücksichtigen:

- | | |
|---------------------------------|---|
| bewohnte Gebietsart: | Kreuzung öffentliche Verkehrsflächen |
| - Wohngebiet (Stadt, Gemeinde) | - Autobahnen, Fernverkehrsstraßen, Nebenstraßen |
| - Gewerbegebiet/Industriegebiet | - Schienenwege |
| - landwirtschaftliche Betriebe | |

Besondere Schutzobjekte

- Sportstätten/Freibäder
- Krankenhäuser/Schulen/Kindergärten
- Versammlungsplätze

Der Parameter S_{Person} ist abhängig von der Anzahl der bei einem Stoffaustritt betroffenen Personen, von deren Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Gefährdungsbereich, vom Abstand der Personen vom Unfallort sowie der Möglichkeit, durch Maßnahmen der Gefahrenabwehr eine Schadensminimierung vorzunehmen. Bei genügender Erfahrungen und entsprechendem Fachwissen können die Pipelineabschnitte direkt durch Bewertung des Parameters S_{Person} klassifiziert werden (Tabelle 4.8).

Anderenfalls oder zur Unterstützung bzw. als Entscheidungshilfe kann S_{Person} nach folgender Vorgehensweise bestimmt werden:

Es werden folgende Variablen definiert:

- P - durchschnittliche Anzahl der betroffenen Personen (max. 100 Personen)
- β - Parameter zur Charakterisierung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit
- r - minimaler Abstand der Schutzobjekte zur Gefahrenstelle [m], (max. 500 m, zu betrachten sind mindestens 30 m)
- ϕ - Parameter zur Charakterisierung der Möglichkeit zur Schadensminimierung/-begrenzung am betrachteten Pipelineabschnitt

Für den Parameter β (Aufenthaltswahrscheinlichkeit) gelten folgende Festlegungen /38/:

- Wohngebiete, besondere Schutzobjekte: $\beta = 0,85..0,6$
- Verkehrsflächen mit hoher Verkehrsfrequenz: $\beta = 0,6..0,4$
- Gewerbe und Industriezonen: $\beta = 0,4..0,25$
- Verkehrsflächen mit geringer Verkehrsfrequenz: $\beta = 0,3..0,1$

Die Möglichkeit bzw. Effektivität einer Schadensbegrenzung bzw. Schadensminimierung (insbesondere Leckageerkennung und -ortung sowie Gefahrenabwehr) wird durch den Parameter ϕ berücksichtigt:

- $\phi = 1$ keine effektive Schadensbegrenzung bzw. -minimierung möglich
- $\phi = 0,9..0,8$ Schadensbegrenzung, -minimierung möglich
- $\phi = 0,8..0,7$ effektive Schadensbegrenzung, -minimierung gegeben

Für stationäre Schutzobjekte kann S_{Person} mit folgendem Ansatz bestimmt werden

$$S_{\text{Person}} = - \frac{\phi}{\log\left(\frac{P \cdot \beta}{r^2}\right)} \quad (4.9)$$

Da bei den Auswirkungen von Stoffaustritten (Wärmestrahlung, Stoffausbreitung) der Abstand zum Schutzobjekt r einen erheblichen Einfluß hat, wird dies bei der Ermittlung von S_{Person} durch eine quadratische Abhängigkeit berücksichtigt.

Für Kreuzungen mit öffentlichen Verkehrswegen kann S_{Person} in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (f_v - [Fahrzeuge/24h] im Jahresmittel) durch folgenden Zusammenhang bestimmt werden.

$$S_{\text{Person}} = \frac{\log(f_v)}{C} \quad (4.10)$$

Eine Parameterbetrachtung zu den Gleichungen (4.9) und (4.10) ist in Anlage 4 enthalten. Bei der Kreuzung anderer Verkehrswege ist S_{Person} in Abhängigkeit der Verkehrsdichte direkt festzulegen. Als Verkehrswege mit geringer Verkehrsdichte gelten:

- Straßen mit einer Verkehrsbelastung von weniger als 250 Fahrzeugen innerhalb von 24 Stunden und mit einer Verkehrsbelastung von höchstens 30 Fahrzeugen in der Stunde
- Eisenbahnstrecken, die ausschließlich dem Güterverkehr dienen, mit einer Streckenbelastung von höchstens 24 Güterzügen in 24 Stunden in jeder Richtung
- Seil- und Schwebbahnen, die ausschließlich dem Güterverkehr dienen
- Gewässer, die weder dem gewerblichen Personen- noch Güterverkehr dienen

Es ist zu berücksichtigen, daß S_{Person} lediglich ein **Bewertungsparameter** ist, der für die Ermittlung kritischer Trassenabschnitte verwendet wird und einen Vergleich des jeweils vorliegenden Schädigungspotentials für Menschen, die sich in der Umgebung wahrscheinlicher Schadensstellen aufhalten, erlauben soll. Je höher der Wert ist, desto kritischer ist dieser Trassenabschnitt in Bezug auf die Auswirkungen von Stoffaustritten auf Personen. Es gelten folgende Kriterien

Tabelle 4.8: Kriterien zur Klassifizierung der Trassenabschnitte mit dem Parameter S_{Person}	
S_{Person}	
$S_{\text{Person}} < 0,2$	unkritische Abschnitte
$S_{\text{Person}} = 0,2 \dots 0,35$	Abschnitte mit Gefährdungsmöglichkeiten für Personen
$S_{\text{Person}} > 0,35$	Abschnitte mit hohem Gefährdungspotential (meist viele Menschen innerhalb des Gefährdungsbereiches)

4.2.3.3 Ermittlung des Risikoparameters S_{Umwelt}

Der Risikoparameter S_{Umwelt} charakterisiert, welche Auswirkungen Leckagen auf die Umgebung (Boden, Gewässer) haben können und ist zu ermitteln, wenn auf Grund der Stoffeigenschaften eine Schädigung für die Umwelt zu erwarten ist. Der Risikoparameter hängt im wesentlichen von der Sensibilität der unmittelbaren Umgebung ab, wobei auch die Möglichkeiten der Schadensbegrenzung und -beseitigung zu berücksichtigen sind. Es gelten folgende Kriterien für den Wert von S_{Umwelt}

$S_{\text{Umwelt}} < 0,2$	unsensible Gebiete, landwirtschaftlich genutzte Flächen, Nähe bzw. Kreuzung von Gewässern bei Transportstoffen mit geringer Wassergefährdung, geringer Stoffdurchsatz
$S_{\text{Umwelt}} = 0,2 \dots 0,35$	sensible Gebiete, Nähe zu besonderen Schutzgebieten < 100 m, Nähe und Kreuzung von Gewässern bei Transportstoff mit mittlerer Wassergefährdung
$S_{\text{Umwelt}} > 0,35$	besonders sensible Gebiete, Nähe zu Gewässern < 50 m, Nähe und Kreuzung von Gewässern mit hoher Wassergefährdung, hoher Stoffdurchsatz, Querung besonderer Schutzgebiete: <ol style="list-style-type: none"> 1. Trinkwasserschutzgebiete 2. Naturschutzgebiete 3. Landschaftsschutzgebiete/geschützter Landschaftsbestandteile 4. Nationalparks 5. Biosphärenreservate/Biotopverbundflächen

Die Festlegung des Risikoparameters muss anhand von Kartenmaterial, unter Einbeziehung der trassenspezifischen Angaben zur Gebietssensibilität erfolgen. Er dient ebenfalls dazu, die kritischen Trassenbereiche zu ermitteln und darzustellen.

4.2.3.4 Ermittlung des Schadensausmaßes R_{Schad}

Da in der Regel davon auszugehen ist, daß eine Gefährdung aufgrund der Stoffeigenschaften entweder für Personen oder die Umwelt dominiert, ergibt sich R_{Schad} aus dem Maximum von S_{Person} und S_{Umwelt} .

$$R_{\text{Schad}} = \max (S_{\text{Person}}, S_{\text{Umwelt}})$$

Der Parameter R_{Schad} ist für den gesamten Trassenverlauf zu bestimmen, um die Bereiche mit erhöhtem Schädigungspotential bei einem Stoffaustritt zu ermitteln. Der Wert für R_{Schad} beeinflusst wesentlich die Entscheidung über die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zu den Auswirkungen von Schadensfällen. Für Bereiche mit einem geringen Schädigungspotential ($R_{\text{Schad}} \leq 0,2$) werden demnach keine weiteren Untersuchungen erforderlich sein.

Beispiel:

Für eine Erdgasfernleitung wurden für 3 Trassenabschnitte im Rahmen einer Trassenbegehung und anhand von Kartenmaterial folgende Daten ermittelt:

	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3
Besonderheiten des Trassenabschnittes	unbewohntes Gebiet, landwirtschaftliche Nutzung	In 200 m Entfernung Gehöft, 7 Einwohner	Kreuzung einer Bundesstraße $f_v=8200$ PKW/24h
β	/	0,6	/
P	/	7	/
S_{Person}		0,251	Kreuzung: 0,34
S_{Umwelt}	0,15		
R_{Schad}	0,15	0,251	0,34

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt wiederum durch abschnittsweise Auftragung der ermittelten Werte.

S_{Umwelt}				0,3
				0,2
				0,1
S_{Person}				0,3
				0,2
				0,1
R_{Schad}				0,3
				0,2
				0,1
	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	

Im Abschnitt 3 sind gegenüber den anderen Abschnitten bei einem Pipelineversagen erheblich größere Schadenswirkungen zu erwarten. Da in Abschnitt 2 zwar Gefährdungsmöglichkeiten für Personen bestehen, sich jedoch keine besonderen Schutzobjekte mit großen Menschenansammlungen im Gefährdungsbereich befinden, sind hier nur weitere Untersuchungen in Bezug auf die Schadensauswirkungen notwendig, wenn auch dieser Pipelineabschnitt eine erhöhte Leckgewahrscheinlichkeit aufweist.

4.2.4 Ermittlung des Risikobereiches

Für die Ermittlung kritischer Trassenabschnitte ist die Angabe qualitativer Risikowerte für die praktische Anwendung ungeeignet. Eine bessere Handhabung wird durch die Graduierung in Risikobereiche erreicht, aus denen die Notwendigkeit weitergehender Untersuchungen abgeleitet werden kann.

Der für das Pipelinesegment zu ermittelnde Risikobereich ergibt sich demnach aus der Kombination der Parameter „Leckagewahrscheinlichkeit“ R_{Leck} mit dem Parameter „Schadensauswirkungen“ R_{Schad} .

$$\text{Risikobereich} = f(R_{\text{Leck}}, R_{\text{Schad}}) \quad (4.11)$$

Für Pipelineabschnitte lassen sich grundsätzlich 5 Risikobereiche festlegen. In folgender Abbildung sind diese Bereiche in Abhängigkeit der Leckagewahrscheinlichkeit und der Schadensauswirkungen dargestellt:

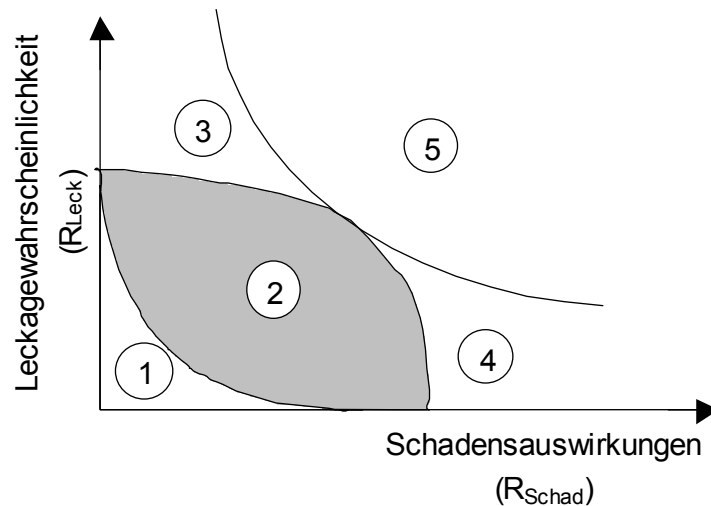


Abbildung 4.4 : Risikobereiche für Pipelineabschnitte

Tabelle 4.9: Definition der Risikobereiche	
Risikobereich	prinzipielle Merkmale
1	Ideale und nur auf begrenzte Trassenabschnitte realisierbare Schutzkonzeption
2	Übliches Risikoniveau, Möglichkeit zur Risikominimierung durch differenzierte Sicherheitsmaßnahmen -> kein Handlungszwang
3	relativ günstige Trassenbedingungen bzw. ausgeprägter Tertiärschutz jedoch Möglichkeit zur Verbesserung der Anlagenstruktur und der sicherheitstechnischen Absicherung -> ggf. Handlungszwang
4	Ausreichend sichere Anlagenstruktur jedoch ungenügender Tertiärschutz in Verbindung mit ungünstigen Trassenbedingungen damit Zwang zur Verbesserung des Tertiärschutzes -> ggf. Handlungszwang
5	Sicherheitstechnisch unakzeptable Sicherheits- und Schutzkonzeption, unmittelbarer Zwang zur Verbesserung der Sicherheitstruktur und des Tertiärschutzes. -> Handlungszwang!

Der resultierende Risikobereich läßt sich mit Hilfe der folgenden Matrix bestimmen:

		$R_{Leck/rel.}$		
		$< 0,7$	$0,7..1,3$	$> 1,3$
R_{Schad}	$< 0,2$	1	2	3
	$0,2...0,35$	2	$\frac{3}{4}$	5
	$> 0,35$	4	5	5

Abbildung 4.5: Matrix zur Ermittlung des Risikobereiches

Der ermittelte Risikobereich eines Pipelinesegementes gibt Aufschluß über das im Vergleich zu anderen Trassenabschnitten vorhandene Risiko für Personen und Umwelt, welches sich unter Einbeziehung anlagen- und umgebungsspezifischer Bedingungen ergibt. Ist ein Pipelineabschnitt in einen Risikobereich 3 oder 4 eingestuft worden, bedeutet das jedoch nicht zwangsläufig, daß ein inakzeptables Risiko vorliegt, sondern daß weitergehende Untersuchungen erforderlich sind. Erst im Ergebnis dieser Untersuchungen ist zu entscheiden,

ob und welche Maßnahmen zur Risikoreduzierung erforderlich sind. Für den Anlagenbetreiber/ -planer besteht aber die Möglichkeit, im Ergebnis der durchgeführten Risikoklassifizierung durch entsprechende Maßnahmen gezielt Einfluß auf die Risikoklassifizierung zu nehmen. Dies ist durch Reduzierung der Leckagewahrscheinlichkeit (vorwiegend technische Sicherheitsmaßnahmen), erweiterte Gefahrenabwehr oder, sofern sich die Anlage noch in der Planung befindet, durch eine entsprechende Trassenplanung zu realisieren.

In Anlage 5 ist am Beispiel einer konkreten Pipelineanlage die Klassifizierung der Pipelineabschnitte in Risikobereiche durchgeführt worden.

4.2.5 Risikountersuchung an kritischen Pipelineabschnitten

Die Klassifizierung der Pipelineabschnitte ist Voraussetzung für eine weiterführende Untersuchung, da es praktisch nicht vertretbar sein wird, aufgrund des enormen Aufwandes (Anlagenausdehnungen) alle Pipelineabschnitte einer vertiefenden Risikobetrachtung zu unterziehen. Die Untersuchung ist deshalb nur für Pipelineabschnitte weiterzuführen, die in einen Risikobereich > 2 klassifiziert wurden. Eine Weiterführung der Untersuchungen für kritische Abschnitte ist des weiteren notwendig, da man zwar durch konkrete Einbeziehung der anlagentechnischen Parameter die Wahrscheinlichkeit eines Schadens relativ differenziert ermittelt hat, jedoch im Rahmen der Auswirkungsbetrachtung nur die potentielle Personen- und Umweltgefährdung aufgrund von Abstandsbetrachtungen, Anzahl und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Personen bzw. Gebietsklassen festgestellt hat. Erst differenzierte Untersuchungen zu den Auswirkungen der Stoffaustritte unter Berücksichtigung der Stoffeigenschaften, Austrittsmengen, der möglichen Schadensentwicklung unter Einbeziehung der Gefahrenabwehr lassen Beurteilungen über die Akzeptanz des von der Anlage ausgehenden Risikos zu.

Die Abschätzung der Auswirkungen von Stoffaustritten erfolgt vordergründig unter Einbeziehung physikalischer Modelle. Dabei hängt der Umfang und der Inhalt der erforderlichen Auswirkungsbetrachtungen wesentlich von den Gefährlichkeitsmerkmalen des Transportstoffes ab. In folgender Tabelle sind die Untersuchungsschwerpunkte für verschiedene Fernleitungsarten zusammengefaßt.

Tabelle 4.10: Schwerpunkte der Untersuchungen an kritischen Leitungsabschnitten	
Fernleitungsart	Untersuchungsschwerpunkte
Hochdruckleitungen mit brennbaren Gasen	<ul style="list-style-type: none"> - Ausflussrate - (Ausbreitungsbetrachtungen) - Zündwahrscheinlichkeit - Wärmefluß aus Fackelbrand/Feuerball/Gaswolkenbrand
Hochdruckleitungen mit toxischen Stoffen	<ul style="list-style-type: none"> - Ausflussrate - Verdampfung/Verdunstung (bei Flüssigkeiten) - Ausbreitungsbetrachtung/Konzentrationsverlauf
Fernleitungen mit wassergefährdenden Flüssigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Ausflussrate - Ausbreitungsbetrachtungen

Im folgenden wird auf die grundlegenden Mechanismen, die bei der Auswirkungsbetrachtung zu berücksichtigen sind, eingegangen. Dabei wird vordergründig auf Hochdruckleitungen für brennbare Gase orientiert, da hier neben dem Austrittsmaßestrom auch noch die Phänomene

der Zündung und Wärmestrahlung zu beachten sind. Berücksichtigt werden demnach vorwiegend Schäden an Personen.

Das Ziel der Untersuchungen ist es, den Bereich um eine Schadensstelle zu ermitteln, in dem Schäden an Personen zu erwarten sind. Dieser Gefährdungsradius ergibt sich in Abhängigkeit der Transportstoffeigenschaften aus den differenzierten Untersuchungen zu den Schadensauswirkungen.

Die Lösung und Bewertung der einzelnen Problemstellungen (Ausflußrate, Fackelbrand, Feuerball) muß unter Zuhilfenahme verifizierter Modellansätze und verfügbarer Rechenprogramme erfolgen, worauf in den Ausführungen an entsprechender Stelle verwiesen wird.

4.2.5.1 Ermittlung der Ausflussrate

Die Anfangsausflussrate einer Gasleitung hängt primär von der Leckgröße und dem Innendruck ab. Bei einem Totalbruch muss für die Leckgröße der doppelte Leitungsquerschnitt angenommen werden. Die Auswertungen von Schadensfällen zeigen, daß bei Flüssigkeitsleitungen sowie bei Gasleitungen mit großen Durchmessern hauptsächlich Stoffaustritte durch kleinere Leckdurchmesser auftreten. Bruchmechanische Rechnungen haben ergeben, daß insbesondere bei Leitungen mit großen Nennweiten sowie bei Pipelines aus zähen Werkstoffen bei internen Überbeanspruchungen von einem Leck-vor-Bruch-Verhalten auszugehen ist /144-146/.

Aus Tabelle 4.11 ist zu entnehmen, daß der Leckdurchmesser und die Wahrscheinlichkeit eines Totalbruches wesentlich von den Gefährdungseinflüssen abhängig sind. Vorwiegend bei Bodenbewegungen und bei Einwirkungen Dritter als Ursache treten Totalbrüche häufiger auf.

Tabelle 4.11: Verteilung der Leckgröße [%] in Abhängigkeit der Unfallursache für Erdgasleitungen			
Unfallursache	Leckdurchmesser ≤ 2 cm	Leckdurchmesser > 2 cm	Totalbruch
Einwirkungen Dritter	25%	56%	19%
Mechanische Fehler	69%	25%	6%
Korrosion	97%	3%	<1%
Bodenbewegungen	29%	31%	40%
Betriebliche Fehler	74%	25%	<1%

Die Festlegung des Leckquerschnittes sollte deshalb unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Bedingungen und in Abhängigkeit der am wahrscheinlichsten anzunehmenden Schadensursache festgelegt werden. Dies kann auf Grundlage der für alle Pipelineabschnitte ermittelten Risikoparameter für die Leckagewahrscheinlichkeit erfolgen. Totalversagen von Rohrleitungen sind demnach nur dann anzunehmen, wenn die Untersuchungen für den betrachteten Pipelineabschnitt ergeben haben, daß Bodenbewegungen oder unter bestimmten Bedingungen auch Einwirkungen Dritter als Schadensursache wahrscheinlich sind. Bei den Gefährdungsquellen Korrosion, betriebliche und mechanische Fehler kann der Leckquerschnitt unter Anwendung verschiedener Annahmen und Modelle unter Beachtung der Geltungsbereiche festgelegt werden, z.B.:

- Leckfläche = $0,01 D^2$ (D - Leitungsdurchmesser) oder
- Leckfläche = 100 mm^2 bei Leitungen > DN 100
- Leckfläche, die durch einen Baggerzahn oder Erdbohrer verursacht wird
- Spaltförmiger Riß bzw. Flanschleckagen nach Strohmeier /227/
- Leckfläche = $0,00035 D^{2,2}$ (D - Leitungsdurchmesser [mm])

Die Anfangsausflußrate hängt primär von der Leckgröße und vom Innendruck ab. Sie nimmt durch die Wandreibung zuerst rasch ab und erreicht dann einen beinahe konstanten Wert. Zur Ermittlung der Ausflußrate stehen verschiedener Rechenmodelle /56,226/ zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist dabei der Zustand des Transportstoffes (gasförmig, verflüssigtes Gas, flüssig). In Abbildung 4.6 ist der Verlauf der Ausflußrate beispielhaft für eine DN 1000 Gasleitung (60 bar) dargestellt.

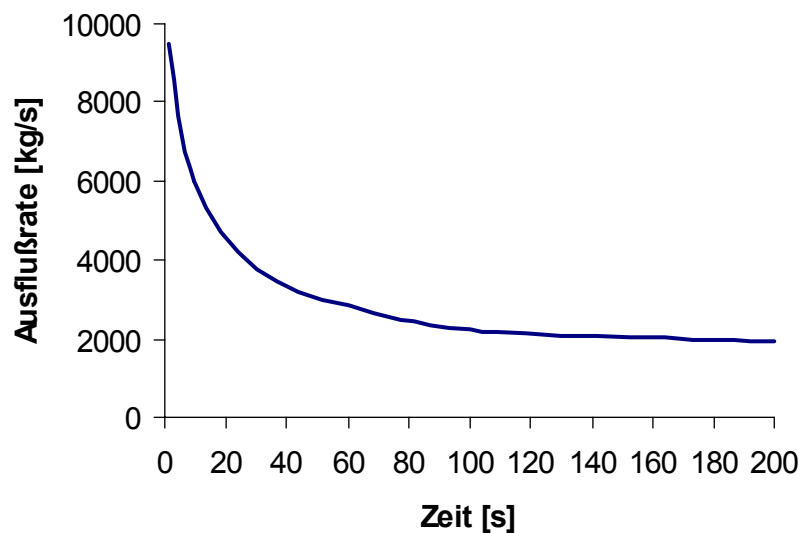


Abbildung 4.6: Ausflußrate als Funktion der Zeit bei einem Totalbruch einer DN 1000 Gasleitung (60 bar)

Die Gesamtmenge des austretenden Stoffes hängt neben dessen Zustand, Leitungsdurchmesser und Druck wesentlich von der Länge des absperbaren Teilabschnittes und der Zeit bis zum Schließen der Absperrarmaturen ab.

4.2.5.2 Zündung und Zündwahrscheinlichkeit bei brennbaren Gasen

Beim Austritt brennbarer Gase ist die Möglichkeit der Zündung des entstehenden Brenngas-Luft-Gemisches zu berücksichtigen. Ein Zündausschluß im Sinne der Vermeidung wirksamer Zündquellen durch gezielte Maßnahmen ist bei allgemein zugänglichen Leitungsabschnitten grundsätzlich nicht möglich. Dennoch ist die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung eines austretenden brennbaren Stoffes differenziert nach der Möglichkeit der Bildung eines brennbaren Luft-Brennstoff-Gemisches und dem Vorhandensein wirksamer Zündquellen zu betrachten. Als Zündquellen müssen im Wesentlichen mechanisch erzeugte Funken (z.B. durch Trümmerwurf), elektrostatische Entladung und Partikelzündung berücksichtigt werden, wobei sich die Zündwahrscheinlichkeit mit Zunahme des Betriebsdruckes und des Durchmessers der Pipeline erhöht. Die Zündwahrscheinlichkeit erhöht sich ebenfalls, wenn die Leckage in unmittelbarer Nähe zu besiedelten Gebieten oder Verkehrswegen auftritt, da hier zusätzlich mit "externen" Zündquellen zu rechnen ist.

Da die Auswirkungsbetrachtung im Rahmen der weiterführenden Risikountersuchung i.d.R. bei Leckagen in dichter besiedelten Gebieten durchgeführt wird, ist von einer Zündwahrscheinlichkeit von 90 % auszugehen /59/. Schadensstatistiken bestätigen, daß bei Stoffaustritten aus Ölpipelines eine Entzündung unwahrscheinlich ist /42, 43, 46/.

4.2.5.3 Wärmefluß aus Fackelbrand und Feuerball sowie Auswirkungen auf Menschen

Bei einem Gasaustritt mit anschließender Zündung brennt das Gas im allgemeinen als Fackelbrand ab. Die Größe der Flamme ist von Leckgröße und vom Überdruck abhängig. Bei einem Totalversagen der Leitung strömt das Gas aus beiden Enden aus und verwirbelt sich stark. Bei kurz verzögerter Zündung kann in der Anfangsphase eine kugelförmige Abbrandform entstehen (Feuerball). Erfolgt keine sofortige Zündung, kann sich das ausströmende Gas verteilen. Bei Gasen schwerer als Luft erfolgt die Ausbreitung in Bodennähe. Bei einer Zündung brennt der zündfähige Bereich deflagrationsartig ab und geht in einen Fackelbrand über.

In der Literatur werden einige Modelle und Rechenprogramme (BLEVE, EFFECTS, 8FEUXX) vorgestellt, mit denen der Wärmefluß bzw. die Strahlungsdosis bei verschiedenen Brandszenarien abgeschätzt werden kann /56, 218, 225, 226/. In Abbildung 4.7 ist der Wärmefluss in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schadensstelle beispielhaft für eine DN 750 Gasleitung (70 bar) dargestellt.

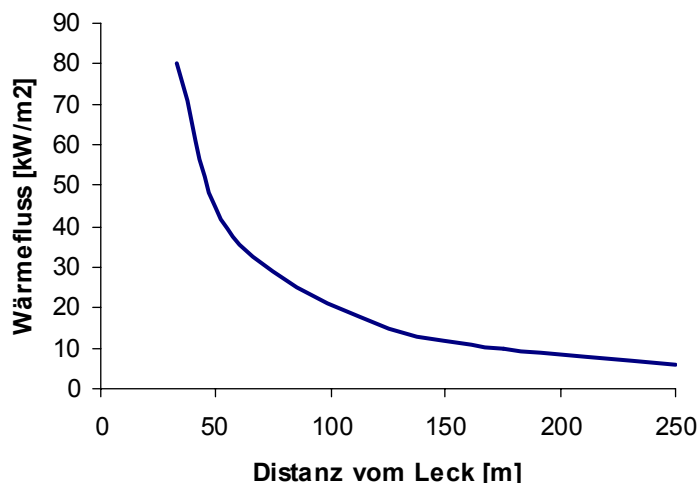


Abbildung 4.7: Wärmefluss eines Fackelbrandes nach einem Totalversagen für eine Gasleitung (DN 750, 70 bar)

Ziel dieser Berechnungen ist es, den Bereich um eine potentielle Schadenstelle zu ermitteln, in dem Personenschäden zu erwarten sind (Gefährdungsradius). Aus diesem Grund sind im folgenden die Auswirkungen der Hitzestrahlung auf den Mensch zu untersuchen.

Für die Auswirkungen der Hitzestrahlung auf den Menschen ist die empfangene Wärmestrahlungsdosis (Strahlungsintensität und Expositionszeit) maßgebend. Für die Ermittlung der bei einem Unfall einwirkenden Wärmestrahlungsdosis müssen verschiedene Randbedingungen berücksichtigt werden, die im allgemeinen nicht genau bekannt sind (Fluchtmöglichkeiten, Schutzwirkung durch Bekleidung, Gebäude usw.). Für die Abschätzung der Auswirkungen auf Menschen sind deshalb Vereinfachungen anzunehmen:

- Expositionszeit 30 s
- Aufenthalt im Freien
- Schutzwirkung der Kleidung wird vernachlässigt

Als weitere Grundlage dienen Untersuchungen zur Letalität in Abhängigkeit des Wärmeflusses /216, 217/. Eine Letalität von 50% bedeutet, daß die Hälfte der dem Wärmefluss ausgesetzten Personen bei länger dauernder Exposition (30 s) tödlich verletzt wird.

Tabelle 4.12: Letalität in Abhängigkeit des Wärmeflusses	
Letalität bei 30 s Einwirkzeit	Wärmefluß W
1%	15 kWm ⁻²
50%	27 kWm ⁻²
99%	57 kWm ⁻²

Abbildung 4.8 zeigt die Letalitätsverläufe als Funktion der Expositionszeit für verschiedene Wärmeflüsse.

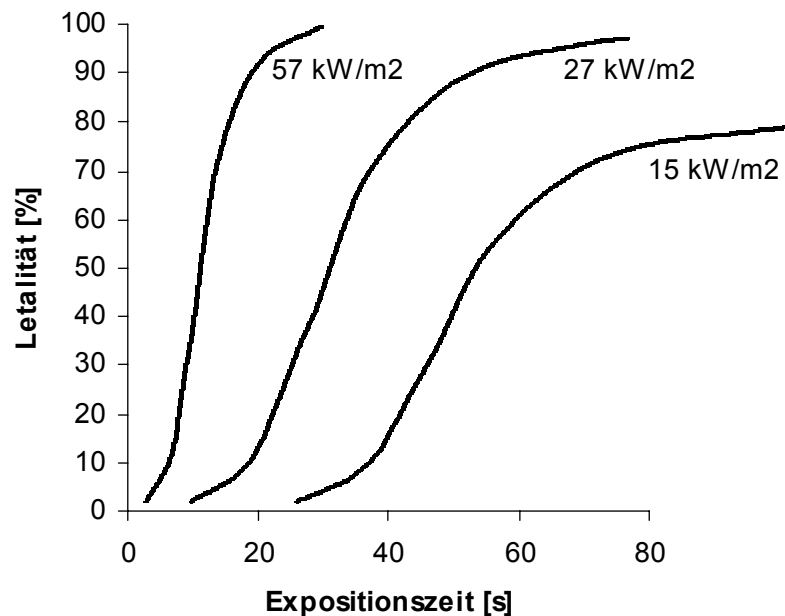


Abbildung 4.8: Letalität als Funktion der Expositionszeit für verschiedene Wärmeflüsse

Da bei einem Feuerball die Hitzestrahlung sehr stark ist aber nicht lange anhält, kann als Gefährdungsradius (Schäden an Personen) der 3-fache Feuerballradius angenommen werden /220, 225, 226/. Der Radius eines Feuerballs ergibt sich nach folgender Formel:

$$R_f = 2,75 A M_g^{0,333} \quad (4.12)$$

M_g ist dabei die reagierende Gasmenge.

Folgende Tabelle enthält beispielhaft die Gefährdungsradien für Feuerbälle (Totalversagen, 10 s verzögerte Zündung) und Fackelbrände verschiedener Erdgasleitungen:

Tabelle 4.13: Gefährdungsradien für Feuerbälle und Fackelbrände		
Druck / Nennweite	Gefährdungsradius (3xR_f) bei einem Feuerball	Distanz bis zu einem Wärmefluss von 27 kWm⁻² bei einem Fackelbrand
25 bar / DN 150	61 m	10 m
25 bar / DN 300	97 m	20 m
25 bar / DN 400	113 m	25 m
70 bar / DN 300	137 m	33 m
70 bar / DN 400	159 m	40 m
70 bar / DN 750	252 m	77 m
70 bar / DN 1500	399 m	147 m

4.2.5.4 Ausbreitung toxischer und brennbarer Gase und Flüssigkeiten

Bei Hochdruckleitungen breiten sich Gase bei einem Schadensfall in der Regel auf dem Luftpfad aus (Kraterbildung). Wesentliche Einflußgrößen auf die Ausbreitung der Gase sind:

- Gasdichte
- Wetter- /Windverhältnisse; Windgeschwindigkeit
- Umgebungsbeschaffenheit
- Austrittsimpuls

Mit Hilfe von Modellen zur Ausbreitungsberechnung /152-155/ wird der Konzentrationsverlauf ab der Leckagestelle ermittelt. Im Ergebnis erhält man einen Bereich, in dem das Gas über einer definierten Grenzkonzentration vorliegt.

Als Grenzkonzentration ist z.B. der AEGL2-Wert (Acute Exposure Guideline Limit) bei toxischen, die untere Explosionsgrenze bei brennbaren Gasen zu verwenden. Der AEGL2-Wert ist die luftgetragene Stoffkonzentration, ab der die allgemeine Bevölkerung, irreversible oder andere schwerwiegende lang andauernde Schädigungen oder eingeschränkte Fluchtmöglichkeit erleidet.

Aufgrund der überwiegenden Erdverlegung der Pipelinerohre ist bei Austritt von Flüssigkeiten vor einer Luftpfad- oder Wasserpfadausbreitung die Stoffausbreitung im Boden zu betrachten. In der Regel ist nur bei Erdaushubarbeiten als Schadensursache sowie bei sehr hohen Betriebsdrücken (Kraterbildung) von einer sofortiger Ausbreitung über den Luftpfad auszugehen (Freistrah, Lachenverdampfung). Abgesehen von wenigen spezifischen Modellansätzen sind noch keine anerkannten und allgemeingültigen Berechnungsmethoden zur Stoffausbreitung flüssiger Medien im Boden bei einem angenommenen Schadensfall verfügbar. Aus diesem Grund ist die Vorhersage, an welcher Stelle, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Intensität ein flüssiger Leckagestrom an die Oberfläche tritt, nicht oder nur mit großen Unsicherheiten möglich.

4.2.5.5 Verdampfung/Verdunstung

Treten Flüssigkeiten mit einem geringen Dampfdruck aus, so ist nicht die gesamte Austrittsmenge für die Bestimmung der Auswirkungen anzunehmen. Nach dem Austrittsvorgang schließt sich im Regelfall ein Verdampfungsvorgang aus der sich bildenden Lache an. Bei einem Freistrah ist das Ausregnen aus dem Flüssigkeitsstrahl zu berücksichtigen. Erst die dann entstehende Gaswolke ist auswirkungsbestimmend. Für den komplexen Vorgang der Verdampfung aus Lachen sind Modellansätze und Rechenprogramme anzuwenden /226/. Mittels Ausbreitungsrechnung kann anschließend ein Gefährdungsradius festgelegt werden.

4.2.5.6 Bewertung der Ergebnisse

Im Ergebnis der Untersuchungen lassen sich für jeden betrachteten Pipelineabschnitt Bereiche definieren, in denen mit Personenschäden (ggf. gestuft nach Letalität) zu rechnen ist. In Abhängigkeit der für diesen Bereich ermittelten Anzahl anwesender Personen (Bevölkerungsdichte, Aufenthaltswahrscheinlichkeit, besondere Schutzobjekte, Verkehrsfrequenz usw.) läßt sich eine Abschätzung über die Anzahl der betroffenen Personen vornehmen. Entsprechende Modellansätze werden in /225, 226/ angeführt.

Bei brennbaren Gasen ist zur Bewertung des vorhandenen Risikos neben der Wahrscheinlichkeit eines Schadens, die schon im Rahmen der Risikoklassifizierung evaluiert wurde, die Zündwahrscheinlichkeit einzubeziehen.

$$\text{Risiko} = \text{Leckgewahrscheinlichkeit} \times \text{Zündwahrscheinlichkeit} \times \text{Anzahl der betroffenen Personen}$$

Für toxische Gase ergibt sich das Risiko aus

$$\text{Risiko} = \text{Leckgewahrscheinlichkeit} \times \text{Anzahl der betroffenen Personen}$$

Um zu entscheiden, ab welchem Schaden betroffene Personen in die Risikountersuchung einzubeziehen sind, eignet sich der nach Störfall-Verordnung /224/ definierte Begriff der "ernsten Gefahr", die bezogen auf das Schutzziel "Mensch" bei Verlust eines Menschenlebens bzw. der Gesundheitsbeeinträchtigung einer größeren Anzahl von Menschen vorliegt. Als "Anzahl betroffener Personen" sind folglich die bei einem Schadensfall tödlich bzw. irreversibel verletzten Menschen zu berücksichtigen.

Die "ernste Gefahr" für das Schutzziel "Umwelt" liegt dann vor, wenn Schäden insbesondere an Tieren und Pflanzen, am Boden und am Wasser drohen und sie deren Bestand oder Nutzbarkeit in der Weise so verändern würden, daß das Gemeinwohl beeinträchtigt würde. Bei Pipelineanlagen mit wassergefährdenden Stoffen ist bei Stoffaustritten eine unmittelbare Gefahr für das aquatische Ökosystem gegeben. Für sensible Bereiche würde dies praktischerweise eine Quasi-Nullemission bedeuten. Maßgebend für die Beurteilung des Risikos ist bei diesen Systemen deshalb vordergründig die Leckgewahrscheinlichkeit und die Effektivität der Alarm- und Gefahrenabwehr sowie die Ausflußbegrenzung.

Als schwierig gestaltet sich die Entscheidung über die Akzeptanz des ermittelten Risikos. Der Grund dafür ist, daß verbindliche (qualitative) Vorgaben zur Risikoakzeptanz nicht vorliegen. Deshalb wird eine Ermittlung von Risikowerten nicht angestrebt, da Grenzwerte für ein akzeptables Risiko nicht festgelegt sind.

Bei der Entscheidung über die Vertretbarkeit sind neben einer technischen Beurteilung auch gesellschaftliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Alternativ sollte demnach vorwiegend ein Risikovergleich unter Berücksichtigung der konkreten Bedingungen (Vergleich mit Stand der Technik, Qualität der technischen Ausführung der Anlage usw.) erfolgen.

Als Orientierung für die Entscheidung über die Akzeptanz des Risikos werden folgende Grenzwerte vorgeschlagen:

Inakzeptables Risiko bei:

- 1 Toter, irreversibler Verletzter bzw. mehrere Verletzte bei einem ermittelten Wert für $R_{\text{Leck/rel.}} > 1,3$
- mehrere Tote bzw. irreversibel Verletzte bei einem ermittelten Wert für $R_{\text{Leck/rel.}} > 0,7$
- Querungen von Gewässern, sensible Gebiete, keine zusätzlichen Maßnahmen zur Leckageerkennung, Ausflußbegrenzung und Gefahrenabwehr bei einem $R_{\text{Leck/rel.}} > 0,7$
- weniger sensible Gebiete bei einem $R_{\text{Leck/rel.}} > 1,3$

Wird für einen Pipelineabschnitt ein inakzeptables Risiko festgestellt, sind entsprechende risikominimierende Maßnahmen erforderlich. In einem iterativen Prozeß ist sicherheitsanalytisch zu ermitteln, ob eine ausreichende Reduzierung des Risikos erreicht wurde.

4.3 Eignung und Anwendung der Methode

Das vorgestellte Konzept zur Risikoanalyse ermöglicht die abschnittsdifferenzierte Untersuchung unter der umfassenden Einbeziehung der relevanten Einflußfaktoren und ist Voraussetzung zur Ermittlung sicherheitstechnischer Defizite und erforderlicher Sicherheitsmaßnahmen.

Da schon bei der *Risikoklassifizierung* im Rahmen der Ermittlung der Leckagewahrscheinlichkeit eine weitgehende Einbeziehung der anlagen- und umgebungsspezifischen Einflußfaktoren erfolgt, können hier schon die wesentlichen sicherheitstechnischen Defizite ermittelt werden und gezielte Maßnahmen zur Risikominimierung abgeleitet werden. Die Methodik ist sowohl für Anlagenplaner als auch für Betreiber älterer Anlagen geeignet. Die Effektivität sicherheitstechnischer Maßnahmen sowie die Möglichkeiten der Einflußnahme auf die Anlagensicherheit sind jedoch im Rahmen der Anlagenplanung größer, so daß schon in dieser Phase die Risikountersuchung erfolgen sollte. Die sicherheitstechnischen Maßnahmen müssen sich an den konkreten Defiziten und spezifischen Trassenbedingungen orientieren. Damit ergeben sich differenzierte Möglichkeiten zur Einflußnahme auf die Anlagen- und Trassengestaltung in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und des Anlagenstatus (Planung/Errichtung und Betrieb/Sanierung). Während für neu errichtete Anlagen die Festlegung der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen in der Planungsphase entschieden wird, wobei hier erweiterte Möglichkeiten z.B. angepaßte Dimensionierung, Verlegetiefe und sicherheitsbezogene Trassenführung zur Verfügung stehen, muß die Aufgabe in der Nutzungsphase darin bestehen, Schwachstellen und kritische Leitungsabschnitte zu ermitteln, um eine Anpassung der Sicherheitsstruktur, vornehmlich im Tertiärschutzbereich, vorzunehmen.

Eine laufende Fortführung der Untersuchungen ist Voraussetzung für die Gewährleistung eines langfristig hohen Sicherheitsniveaus. Eine lückenlose Dokumentation ermöglicht es, die Untersuchungsergebnisse auch Dritten (z.B. Behörden) in vereinfachter Form zugänglich zu machen.

Es ist zu berücksichtigen, daß die Zuverlässigkeit der Aussagen über das Risiko primär von der Genauigkeit und Verfügbarkeit der erforderlichen Daten abhängig ist. Dies setzt ein strukturiertes Datenkonzept und eine ständige Datenaktualisierung voraus. Einzubeziehen ist dabei die fortlaufende Auswertung von Schadensereignissen.

Bei der Erarbeitung der Methode wurde bewußt auf eine durchgängige "Quantifizierung" des Risikos verzichtet, da dies für die Zielstellung nicht notwendig und nicht zweckdienlich ist.

Ein Wert für ein Risiko wäre dann erforderlich, wenn die Untersuchungsergebnisse Nicht-Fachleuten zugänglich gemacht werden sollen. Damit besteht jedoch die Gefahr der Fehlinterpretation und damit verbunden z.B. die Annahme einer nicht vorhandene Sicherheit. Voraussetzung ist, daß die Untersuchungen von einer Gruppe erfahrener Spezialisten durchzuführen sind, da eine Vielzahl fachlich unterschiedlicher und teilweise konträrer Bereiche zu berücksichtigen ist. Gleichfalls erfordern die Interpretation der ermittelten Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz des Risikos sowie die Festlegung der abzuleitenden Maßnahmen ein hohes Maß an ingenieurtechnischer Kompetenz und fachbezogenem Wissen.

Offene Probleme bestehen derzeit noch im Rahmen der Auswirkungsbetrachtungen bei speziellen Schadensfällen, insbesondere an Leitungen für verflüssigte Gase (hier vornehmlich das Phänomen der Bodenvereisung und damit Behinderung des Stoffaustrittes) sowie bei kleineren Leckquerschnitten (keine Kraterbildung) und der daraus resultierenden Stoffdiffusion durch den Boden. Hier besteht die Notwendigkeit für weiterführende Untersuchungen.