

Bundesanstalt für  
Materialforschung und  
-prüfung (BAM)

Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS)

TÜV Industrie Service GmbH  
TÜV Energie- und System-  
technik GmbH  
TÜV SÜD Gruppe

**Abschlussbericht des F+E-Vorhabens**  
**Risikoabschätzung Chlorklagerung/  
Chlortransport unter Einbeziehung  
der Seveso II-Richtlinie und der  
Störfallverordnung (2000)**

erarbeitet durch

**BAM, GRS und TÜV Süd**

**Teil 1: Textband**

Dieser Bericht wurde nach bestem Wissen und mit der erforderlichen Sorgfalt entsprechend dem Kenntnisstand der Autoren zum Projektstand 17. 12. 2002 abgefasst. Die in dem Bericht geäußerten Ansichten und Meinungen der Autoren müssen nicht mit denen ihrer Organisationen übereinstimmen. Eine Haftung für die Richtigkeit der Angaben in dem Bericht wird nicht übernommen.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die vollständige oder auszugsweise Veröffentlichung bzw. Vervielfältigung des Berichts bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der beteiligten Organisationen.

Impressum

Forschungsbericht 269:

**Abschlussbericht des F+E-Vorhabens  
Risikoabschätzung Chlorklagerung/Chlortransport  
unter Einbeziehung der Seveso II-Richtlinie  
und der Störfallverordnung (2000)**

2005

Herausgeber:

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-mail: [info@bam.de](mailto:info@bam.de)

Internet: [www.bam.de](http://www.bam.de)

Copyright © 2005 by Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Verlag und Vertrieb:

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

27568 Bremerhaven

Telefon: +49 471 94544-0

Telefax: +49 471 94544-77/-88

Umschlag: Lutz Mittenzwei

ISSN 0938-5533

ISBN 3-86509-319-1

**F+E-Vorhaben**  
**Risikoabschätzung Chlorlagerung/Chlortransport**  
**unter Einbeziehung der Seveso II-Richtlinie**  
**und der Störfallverordnung (2000)**

**Revisionsverzeichnis**

**Revision 0.0** vom 5.2.2003, Dr. Jörg Loock, TÜV SÜD

Vorläufige Endfassung

**Revision 0.1** vom 11.05.2004, Achim Scholz, TÜV SÜD

Endfassung

Änderungen zu Rev. 0.0:

***Textband:***

Kap. 6.4.1: Abb. „SHEL“ an das Ende des Kap.

Abb. „Aufgabenanalyse“ eingefügt.

Abb. „Dekompositionsmethode“ eingefügt.

Kap. 6.5.1.2: letzter Absatz aus Original Seel/Spitzer eingefügt

Kap. 6.9: „Geplante Maßnahmen des Betreibers“ gestrichen, da leer

Kap. 10: Zusammenfassung neu

Alle Kapitel: redaktionelle Überarbeitung, Formatierung

Deckblatt, Vorwort, Kap. 1: Berücksichtigung TÜV-Umfirmierung

Klausel zu Haftung und Urheberrechten

***Anlagenband:***

Abbildungen zu Kap. 3 entfernt, da im Textband enthalten

**F+E-Vorhaben**  
**Risikoabschätzung Chlorlagerung/Chlortransport**  
**unter Einbeziehung der Seveso II-Richtlinie**  
**und der Störfallverordnung (2000)**

**Revisionsverzeichnis**

**Revision 1.0** vom 10.09.2004, Achim Scholz, TÜV SÜD

Durch die beteiligten Organisationen freigegebene Endfassung

Änderungen zu Rev. 0.1:

**Textband:**

Kap. 2: Neue Firmenbezeichnung TÜV ET BW

Tab. 6.6: Seitenumbruch korrigiert

Kap. 9.2.2.3 : Änderungsvorschlag von Frau Spitzer übernommen

**Anlagenband:**

Keine Änderungen

**Ersteller:** Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Garching  
TÜV Industrie Service – TÜV Süd Gruppe, München  
TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH - TÜV Süd Gruppe, Mannheim

---

**Projektstand:** 17.12.2002  
**Berichtsrevision:** Rev. 1.0 vom September 2004

---

**Autoren :** Günter Burgbacher, TÜV SÜD  
(alphabetisch) Dr. Peter Kafka, GRS  
Gerhard Klein, TÜV SÜD  
Dr. Rainer Konersmann, BAM  
Dr. Jörg Loock, TÜV SÜD  
Dr. Michael Rupp, TÜV SÜD  
Achim Scholz, TÜV SÜD  
Hans Seel, GRS  
Cornelia Spitzer, TÜV SÜD

## **Vorwort**

Die "Seveso-II-Richtlinie" (96/82/EC) des Europäischen Rates [V /1/] ist das Schlüsselement der europäischen Gesetzgebung zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen. Die Umsetzung dieser Richtlinie in deutsches Recht erfolgte am 3. Mai 2000 mit der Novellierung der 12. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung) [V /2/]

Die Störfall-Verordnung fordert von Betreibern, die unter den vollen Anwendungsbereich dieser Verordnung fallen, die Erstellung eines sogenannten Sicherheitsberichts. Ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitsberichts sind die Ermittlung und Analyse der Risiken von Störfällen und die Festlegung von Mitteln zur Verhinderung solcher Störfälle sowie eine eingehende Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit und den Bedingungen für ihr Eintreten.

Berücksichtigt man die in der Richtlinie ebenfalls festgelegte Bestimmung des Begriffes "Risiko" (risk) als die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb einer bestimmten Zeitspanne oder unter bestimmten Umständen (probability, frequency) eine bestimmte Wirkung (consequence, severity) eintritt, dann wird klar, dass der risikobasierte Ansatz bei der zukünftigen, europäischen und damit auch der deutschen "Störfallvorsorge" immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Aus diesem Grund haben die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln, und der TÜV Süd, München, vereinbart, eine vergleichende Untersuchung (Risikostudie) an einer realen Anlage zur Lagerung - einschließlich des Transports - von Chlor als für die Studie geeigneten gefährlichen Stoff durchzuführen.

In diesem Band sind die Texte bzw. Tabellen wiedergegeben. Abbildungen, auf die im Text Bezug genommen wird, sind in Teil 2 (Anlagenband) unter den jeweiligen Kapitelüberschriften enthalten.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Durchführung</b> .....	<b>2-1</b>
<b>3</b>	<b>Anlagentechnik und Systembeschreibung</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.1</b>	<b>Verfahren</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.2</b>	<b>Anlagenteile</b> .....	<b>3-4</b>
3.2.1	Lagertanks .....	3-4
3.2.2	Rohrleitungen und Armaturen .....	3-4
3.2.3	Pumpen .....	3-4
3.2.4	Kompressor .....	3-5
3.2.5	Fernbedienbare Anlagenteile .....	3-5
3.2.6	Druckabsicherung.....	3-5
<b>3.3</b>	<b>Anlagenbetrieb</b> .....	<b>3-6</b>
3.3.1	Betriebszustände .....	3-6
3.3.2	Chlorübernahme.....	3-6
3.3.3	Prüfung/Wartung/Instandhaltung.....	3-7
3.3.4	Funktionstest der Chlornotpumpe .....	3-7
<b>3.4</b>	<b>Eingrenzung der Untersuchung / Systemgrenzen für die Analyse</b> .....	<b>3-7</b>
3.4.1	Rohrleitungslängen.....	3-8
<b>3.5</b>	<b>Grundstellungen von Armaturen</b> .....	<b>3-13</b>
<b>4</b>	<b>Stoffbeschreibung - Der Umgang mit Chlor -</b> .....	<b>4-1</b>
<b>4.1</b>	<b>Physikalische und chemische Eigenschaften</b> .....	<b>4-1</b>
<b>4.2</b>	<b>Toxikologische Eigenschaften</b> .....	<b>4-2</b>
<b>4.3</b>	<b>Störfälle mit Chlor</b> .....	<b>4-3</b>
<b>5</b>	<b>PAAG-Verfahren/HAZOP und ZHA</b> .....	<b>5-1</b>
<b>5.1</b>	<b>Methodische Aspekte</b> .....	<b>5-1</b>
5.1.1	PAAG/HAZOP-Verfahren .....	5-1
5.1.2	ZHA (Zurich Hazard Analysis) - Methode .....	5-2
<b>5.2</b>	<b>Gefahrenidentifikation</b> .....	<b>5-2</b>
5.2.1	PAAG/HAZOP-Verfahren .....	5-2
5.2.2	ZHA-Methode .....	5-3
<b>5.3</b>	<b>Gefahren- und Risikobewertung</b> .....	<b>5-3</b>
5.3.1	PAAG/HAZOP-Verfahren .....	5-3
5.3.2	ZHA-Methode .....	5-3
<b>5.4</b>	<b>Durchführung der Analyse und Ergebnisse</b> .....	<b>5-3</b>
5.4.1	PAAG/HAZOP-Verfahren .....	5-3

5.4.1.1	Durchführung der Analyse .....	5-3
5.4.1.2	Randbedingungen, Begrenzungen der Analyse .....	5-4
5.4.1.3	Abweichungen vom Regelwerk .....	5-4
5.4.1.4	Ergebnisse .....	5-6
5.4.2	ZHA-Methode .....	5-8
5.4.2.1	Durchführung der Analyse .....	5-8
5.4.2.2	Randbedingungen, Begrenzungen der Analyse .....	5-9
5.4.2.3	Ergebnisse .....	5-9
<b>6</b>	<b>Quantitative Risikoanalyse (QRA) .....</b>	<b>6-1</b>
<b>6.1</b>	<b>Methodische Aspekte .....</b>	<b>6-2</b>
<b>6.2</b>	<b>Identifikation auslösender Ereignisse .....</b>	<b>6-3</b>
6.2.1	Master Logic .....	6-3
6.2.2	Untersuchte auslösende Ereignisse .....	6-5
6.2.3	Vernachlässigungen bei der Analyse .....	6-6
6.2.4	Leckgrößen und Ausströmraten .....	6-8
<b>6.3</b>	<b>Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse .....</b>	<b>6-9</b>
6.3.1	Sicherheitsfunktionen/Ereignisablauf .....	6-9
6.3.2	Ereignisablaufdiagramme .....	6-15
6.3.3	Fehlerbäume .....	6-16
<b>6.4</b>	<b>Personalhandlungen .....</b>	<b>6-17</b>
6.4.1	Methoden und Techniken .....	6-18
6.4.2	Analyse der Arbeitsumgebung .....	6-24
6.4.2.1	Betriebsbegehungen .....	6-24
6.4.2.2	Betriebs- und Systemziele, -funktionen .....	6-28
6.4.2.3	Arbeitsanweisungen und Prozeduren .....	6-29
6.4.2.4	Einflussfaktoren .....	6-31
6.4.2.5	Aufgabenanalyse .....	6-31
6.4.3	Arbeitsergebnisse .....	6-36
6.4.4	Retrospektive Analyse .....	6-36
6.4.5	Bewertung von fehlerhaften Personalhandlungen .....	6-37
6.4.6	Zusammenfassung .....	6-37
<b>6.5</b>	<b>Zuverlässigkeitsdaten .....</b>	<b>6-44</b>
6.5.1	Allgemeines zur Vorgehensweise .....	6-44
6.5.1.1	Verteilungen .....	6-44
6.5.1.2	Komponenten, Ausfallarten und -ursachen .....	6-44
6.5.1.3	Anmerkung zu Lecks in Armaturen und passiven Komponenten (mit Ausnahme von Rohrleitungen) .....	6-46
6.5.1.4	Bezeichnungen .....	6-47
<b>6.6</b>	<b>Ereignisablaufquantifizierung .....</b>	<b>6-55</b>
6.6.1	Häufigkeiten von LOC .....	6-55
6.6.2	Nichtverfügbarkeit von Sicherheitsfunktionen .....	6-67
6.6.3	Häufigkeit von Freisetzungen/Freisetzungsmatrix .....	6-67
<b>6.7</b>	<b>Unsicherheits-, Importanz- und Sensitivitätsanalysen .....</b>	<b>6-70</b>

<b>6.8</b>	<b>Zusammenfassung und Bewertung</b> .....	<b>6-70</b>
<b>7</b>	<b>Risikoabschätzung Schienentransport von Chlor</b> .....	<b>7-1</b>
<b>7.1</b>	<b>Methodische Aspekte und Datenprobleme</b> .....	<b>7-1</b>
<b>7.2</b>	<b>Gefahrenidentifikation</b> .....	<b>7-7</b>
7.2.1	Notfallmanagement .....	7-9
<b>7.3</b>	<b>Gefahrenbewertung</b> .....	<b>7-10</b>
7.3.1	Auswertung von Literaturangaben .....	7-11
7.3.2	Auswertung der Gefahrgutunfall - Datenbank GUNDI .....	7-13
7.3.2.1	Gefahrenbewertung Zugbetrieb .....	7-19
7.3.2.2	Gefahrenbewertung Rangierbetrieb .....	7-20
<b>7.4</b>	<b>Risikobewertung Schienentransport</b> .....	<b>7-22</b>
<b>7.5</b>	<b>Untersuchung des Rangierbetriebs auf einem Werksgelände</b> .....	<b>7-26</b>
<b>8</b>	<b>Sicherheitsmanagementsystem (SMS)</b> .....	<b>8-1</b>
<b>8.1</b>	<b>Integriertes Managementsystem</b> .....	<b>8-1</b>
<b>9</b>	<b>Methodenvergleich</b> .....	<b>9-1</b>
<b>9.1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9-1</b>
<b>9.2</b>	<b>Einzelheiten zum Methodenvergleich</b> .....	<b>9-1</b>
9.2.1	Identifikation der Gefahren / Risiken .....	9-1
9.2.1.1	Systematisch / ganzheitlich (Analyselogik, interne/externe Ereignisse) .....	9-1
9.2.1.2	Nachvollziehbarkeit (Randbedingungen, Vernachlässigungen) .....	9-1
9.2.1.3	Nutzung der Betriebserfahrung (implizit, explizit) .....	9-2
9.2.1.4	Nutzung der Teamerfahrung (Fachrichtungen, Erfahrung) .....	9-2
9.2.2	Bewertung der Gefahren / Risiko .....	9-2
9.2.2.1	Systemanalyse (Funktions- und Ausfallverhalten) .....	9-2
9.2.2.2	Zuverlässigkeitsanalyse (Wirksamkeit und Verfügbarkeit) .....	9-3
9.2.2.3	Bewertung des „Faktors Mensch“ (Human Factor, HF) (Verhinderung und Beherrschung von Störfällen) .....	9-3
9.2.2.4	Instandhaltung (Prüfung, Wartung und Reparatur) .....	9-3
9.2.2.5	Gegenmaßnahmen (Schutz- und Sicherheitssysteme) .....	9-4
9.2.2.6	Notfallmaßnahmen (Planung, Alarmierung, Einsatz) .....	9-4
9.2.3	Quantifizierung der Gefahren / Risiken .....	9-5
9.2.3.1	Art der Auswirkung (Sachschaden, Verletzung, Tod) .....	9-5
9.2.3.2	Schwere der Auswirkung (Höhe des Sachschadens, Anzahl der Betroffenen) .....	9-5
9.2.3.3	Eintrittshäufigkeit einer Auswirkung ( $H_{Ai-n, Si-m}$ ) .....	9-6
9.2.3.4	Datenbasis (Zuverlässigkeitskenngrößen, Anweisungen, Manuals) .....	9-6
9.2.3.5	Importanzen (relative Wichtigkeit einzelner Elemente) .....	9-6
9.2.3.6	Vollständigkeit (Wissenstand, Vernachlässigungen) .....	9-6
9.2.3.7	Unsicherheiten (Parameter- und Modellunsicherheiten) .....	9-6
9.2.4	Darstellung der Gefahren / Risiken .....	9-6
9.2.4.1	Detaillierungsgrad (Art und Komponenten der Risiken) .....	9-7
9.2.4.2	Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit .....	9-7
9.2.4.3	Nachvollziehbarkeit (Randbedingungen, Vernachlässigungen) .....	9-7
9.2.5	Aufwand / Nutzen / Anwendung .....	9-7

9.2.5.1	Aufwand (Einarbeitung, Bearbeitung, Dokumentation).....	9-7
9.2.5.2	Update / lebendes Dokument (Listen, Formblätter, PC Stützung) .....	9-8
9.2.5.3	Anwendbarkeit (Auslegung, Betriebsführung, Begutachtung).....	9-8
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>10-1</b>
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>11-1</b>

## 1 Einleitung

Die Erfahrungen des Chemieunfalls in Seveso waren ein wesentlicher Grund für die Schaffung der rechtlichen Anforderungen an die Sicherheit von Industrieanlagen Anfang der 80er Jahre. Mit der Störfall-Verordnung im Jahr 1980 [1 /1/] (12. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz) und der Seveso-Richtlinie der EG im Jahr 1982 [1 /2/] wurden neue Pflichten für die Betreiber von gefährlichen Industrieanlagen eingeführt.

Nachdem die Störfall-Verordnung und die Seveso-Richtlinie aufgrund der Erfahrungen weiterer schwerer Chemieunfälle (u.a. Brand bei Sandoz, Basel) mehrfach ergänzt und verschärft worden waren, hat die EG in den letzten Jahren eine grundlegende Neufassung der Seveso-Richtlinie erarbeitet. Diese in Deutschland als Seveso-II-Richtlinie [V /1/] bezeichnete Richtlinie wurde 1996 vom EU-Ministerrat verabschiedet und am 03. Mai 2000 als „neue“ Störfall-Verordnung [V /2/] in deutsches Recht umgesetzt.

In der Seveso-II-Richtlinie werden zur Ermittlung und Analyse der Risiken bzw. der Gefahren von Störfällen in verfahrenstechnischen Anlagen die Anwendung systematischer deterministischer oder probabilistischer Methoden und Verfahren gefordert ("risk shall mean the likelihood of a specific effect occurring within a specified period or in specified circumstances").



## 2 Zielsetzung und Durchführung

An einem konkreten Anwendungsbeispiel - hier ein Chlorklager - sollen Aussagen zum Einsatz der unten genannten Methoden getroffen werden. Dies betrifft insbesondere die Anwendbarkeit, die Qualität und Vollständigkeit der Untersuchungsergebnisse sowie die Verhältnismäßigkeit der finanziellen Mittel.

Aufgrund der Häufigkeit der Anwendung wurde folgende Methoden ausgewählt:

- ◆ HAZOP/PAAG - (Hazard and Operability study) - (induktiv, deterministisch) [2 /1/, 2 /2/, 2 /3/]
- ◆ ZHA - Zurich Hazard Analysis, Risk Matrix - (induktiv, deterministisch) [2 /4/]
- ◆ QRA – Quantitative Risk Assessment (integral, probabilistisch)

Damit können die Ergebnisse vergleichsweise in qualitativer, semi-quantitativer und in quantitativer Form ermittelt werden.

Der Untersuchungsumfang erstreckt sich auf das Chlorklager einschließlich der Eisenbahnkesselwagen- (EKW) Entladestation - nachfolgend Anlagentechnik genannt -, den innerbetrieblichen Rangierbetrieb und den Transport vom Chlorerzeuger zum Chlorverbraucher - nachfolgend Transport genannt.

Aufgrund des begrenzten Budgets wurde mit dem Anlagenbetreiber vereinbart, die Konsequenzanalyse mit der Darstellung der Freisetzungsmatrix abzuschließen.

Entsprechend der Zielsetzung wurde folgende Aufgabenzuordnung zwischen den Projektpartnern vereinbart:

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| ◆ <b>HAZOP/ZH-Analyse:</b>        | TÜV Industrie Service GmbH TÜV Süd Gruppe,<br>Abteilung Anlagensicherheit und Störfallvorsorge |
| ◆ <b>QRA:</b>                     |  |
| – Systemanalyse                   | Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS)   |
| – Human-Factor-Analyse            | TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH<br>Baden-Württemberg, TÜV Süd Gruppe                       |
| – Zuverlässigkeits-<br>kenngrößen | TÜV Industrie Service GmbH TÜV Süd Gruppe<br>Geschäftsbereich Energie- und Technologie         |
| - Transportrisiko                 | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung<br>(BAM)                                      |

Alle wichtigen Fragen wurden mit dem Anlagenbetreiber diskutiert, insbesondere im Rahmen der Vor-Ort-Analysen. Die Untersuchungsergebnisse wurden in gemeinsamen Projektgesprächen diskutiert. Der Projektlauf ist in Abb. 2-1 dargestellt.

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben "Risikoabschätzung an einem Chlorklager";  
Abschlussbericht, Rev. 1.0 vom September 2004

Seite 2-2

Begriffe, Terminologien, Ablauf der Untersuchung folgen im Wesentlichen der Veröffentlichung nach [2 /5/].

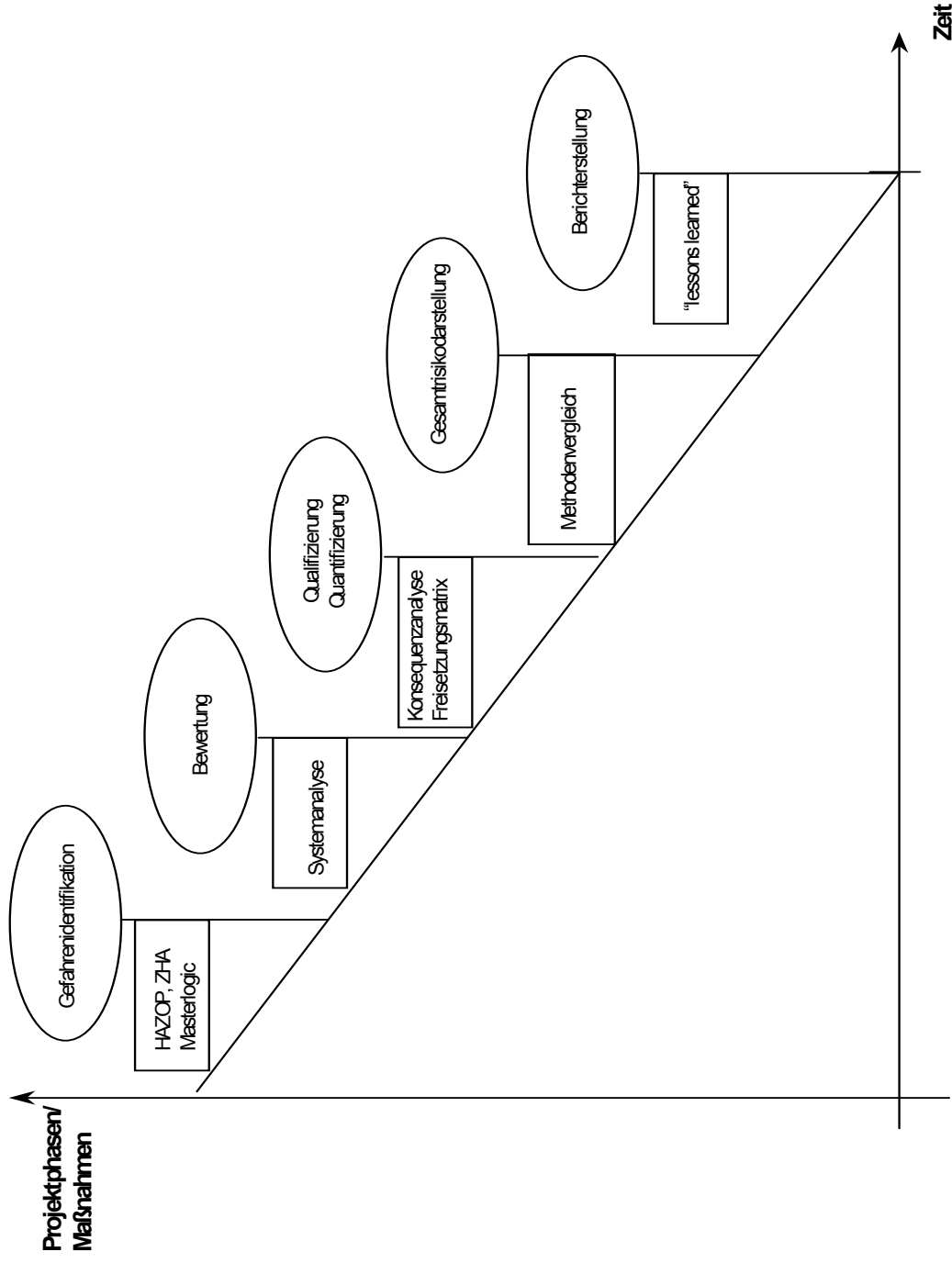


Abb. 2-1: Projektphasen und Meilensteine RISK ASSESSMENT Projekt BAM/GRS/TÜV SÜD



### **3 Anlagentechnik und Systembeschreibung**

#### **3.1 Verfahren**

Das betrachtete Chlorklager dient zur Lagerung von unter Druck verflüssigtem Chlor. Aus dem Lager werden mehrere Produktionsanlagen mit Chlor versorgt.

Das Lager wird in unregelmäßigen Abständen je nach dem zu erwarteten Verbrauch aus Eisenbahnkesselwägen (EKW) befüllt. Die Befüllung der Lagertanks erfolgt im Gaspendelverfahren aufgrund des Druckgefälles zwischen EKW und Lagertank. Der EKW wird über einen Gelenkarm angeschlossen. Zum Aufbau des Druckgefälles kann je nach Umgebungsbedingungen der EKW mit warmem Wasser berieselt werden bzw. die Lagertanks über die Solekühlung heruntergekühlt werden.

Aus den beiden Lagertanks wird das Chlor über eine Pumpe (jeweils eine pro Tank) in die beiden Chlorvorlagen gefördert. Aus den Chlorvorlagen wird das Chlor mit den Einsatzpumpen der Anlagen in den Prozess gefördert. Evtl. nicht benötigtes Chlor fließt zurück in die Lagerbehälter.

Im Fall einer Behälterleckage kann den Inhalt eines Lagertanks in den betriebsmäßig leeren Nottank mit der Notpumpe bzw. den Tankpumpen gefördert werden.

Die Anlage ist in den Abb. 3-1 und Abb. 3-2 dargestellt.

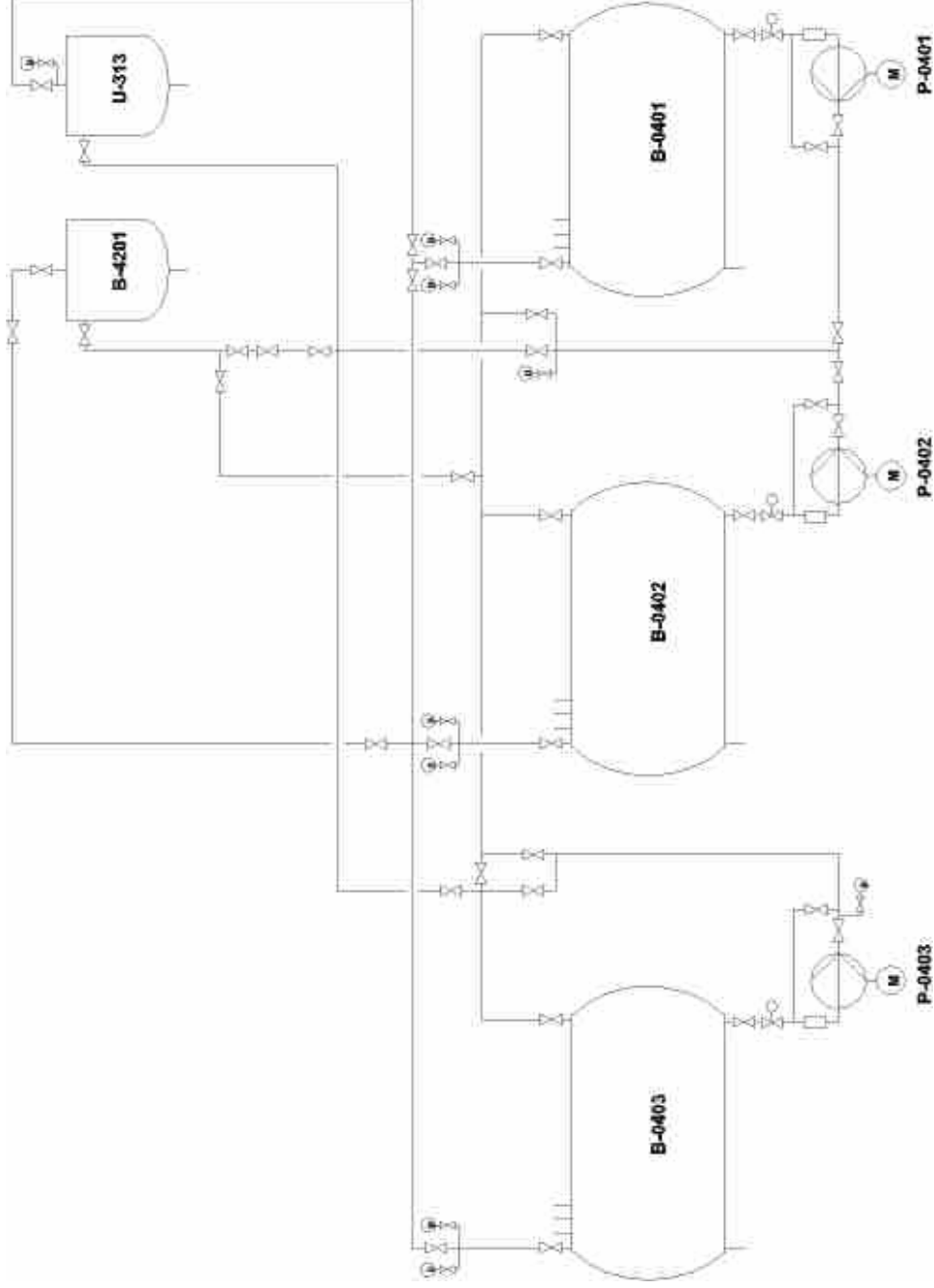


Abb. 3-1: Anlagenschema Teil 1: Lagertanks, Nottank, Chlorpumpen, Chlorvorlagen

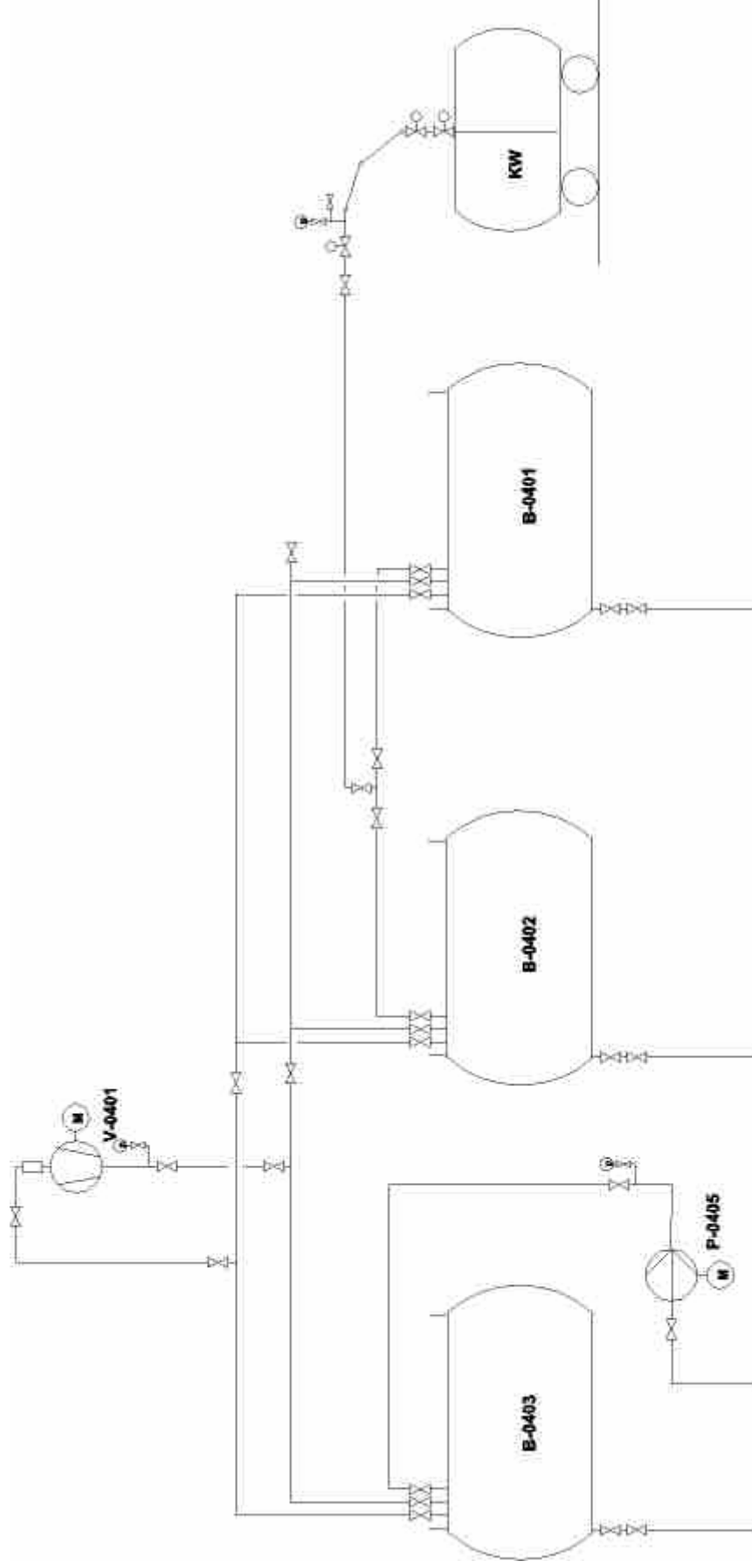


Abb. 3-2: Anlagenschema Teil 2: Kesselwagen, Lagertanks, Nottank, Chlornotpumpe, Chlorkompressor

## 3.2 Anlagenteile

### 3.2.1 Lagertanks

Die beiden Lagertanks und der Nottank haben eine Kapazität von je 20 m<sup>3</sup>. Die Lagertanks sind als liegende zylindrische Behälter ausgeführt und auf je zwei Betonsockeln in einer gemeinsamen Betonauffangwanne aufgestellt. Das Volumen der Auffangwanne ist groß genug, um den Inhalt der Lagertanks aufzunehmen.

Die Tanks sind aus herkömmlichen Baustählen gefertigt und für einen Überdruck von 16 bar bzw. Vollvakuum ausgelegt. Die maximal zulässige Betriebstemperatur beträgt 50 °C. Die Tanks sind isoliert und mit innenliegenden Kühlschlangen versehen, die an einen Sole-Kühlkreislauf angeschlossen sind (Soletemperatur Vorlauf min. -27 °C, normal -22 °C).

### 3.2.2 Rohrleitungen und Armaturen

Die Lagertanks sind durch Rohrleitungen untereinander und mit den beiden Chlorvorlagen der Chlor verbrauchenden Produktionsanlagen verbunden.

Die Chlor führenden Rohrleitungen sind aus Normalstahl St 35.8 für einen Nenndruck PN40 gefertigt und weisen folgende Nennweiten auf:

- ◆ NW25 (zwischen Lagertanks und Chlorvorlagen, Chlorkompressor-Druckleitung)
- ◆ NW32 (Chlorkompressor-Saugleitung)
- ◆ NW40 (Chlorverladearm mit Leitungen bis zu den Lagertanks)
- ◆ NW50 (Notumpump-Druckleitung)
- ◆ NW80 (Notumpump-Saugleitung)

In die Rohrleitungen sind folgende Armaturen eingebaut:

- ◆ 85 Handarmaturen
- ◆ 6 fernbedienbare, pneumatisch betätigte Armaturen.

Die Armaturen sind mit Stopfbuchsdichtung und Faltenbalg versehen. Die fernbedienbaren, pneumatischen Armaturen an den Lagertankauslassstutzen schließen durch Federkraft bei Ausfall der Steuerluftversorgung (Fail-Safe-Stellung). Die Armaturen besitzen Zulassungen nach EURO CHLOR. Flanschverbindungen sind in Nut und Feder ausgeführt und mit geeigneten hochwertigen Dichtungen versehen.

### 3.2.3 Pumpen

Zur Förderung des Chlors sind zwei Chlorpumpen (Nullförderhöhe ca. 20 bar) vorhanden. Für das Notumpumpen in den Nottank gibt es eine Chlornotpumpe mit hoher Förderleistung (27 m<sup>3</sup>/h). Eine weitere Chlorpumpe dient der Rückförderung aus dem Nottank in die Lagertanks. Alle Pumpen sind Spaltröhropumpen. Pumpenlaufräder und Gehäuse in sind Edelstahl ausgeführt. Vor den Chlorpumpen (mit Ausnahme der Notpumpe) ist jeweils ein Filter eingebaut. Es handelt sich hierbei um ein Metallsieb aus Edelstahl ( DN 25 /PN 40, Werkstoffe: Gehäuse 1.0619(GS-C-25), Sieb 1.4571) und entspricht damit einer üblichen Rohrleitung.

Steht die Chlornotpumpe im Anforderungsfall nicht zur Verfügung, kann das Notumpumpen auch mit Hilfe einer Förderpumpe erfolgen. Aufgrund der geringeren Fördermenge dauert der Umpumpvorgang jedoch entsprechend länger.

Gasphaseneintrag in die Chlorpumpen ist für die Funktion der Pumpen unkritisch und damit sicherheitstechnisch unbedenklich.

### **3.2.4 Kompressor**

Zur Vorbereitung einer Tankrevision werden Chlorgasreste mittels eines Chlorkompressors, dem ein Filter vorgelagert ist, aus dem relevanten Tank abgesaugt und in den anderen Lagertank gefördert. Der Chlorkompressor wird ausschließlich für diesen Zweck an die entsprechenden (ansonsten mit Blindflanschen versehenen) Anschlüsse montiert, danach wieder demontiert und eingelagert.

Der Chlorkompressor ist als Membran-Kolbenkompressor ausgeführt. Er besitzt eine dreifache Membran mit Zwischenraumüberwachung. Bei Membranbruch erfolgt eine automatische Kompressorabschaltung.

### **3.2.5 Fernbedienbare Anlagenteile**

Von der Warte aus können die beiden Chlorpumpen abgeschaltet und die beiden Notabsperrentile an den Lagertankauslassstutzen geschlossen werden. Bei der Auslösung schließen die Armaturen durch Federkraft.

Während einer Chlorübernahme können von vier verschiedenen Stellen im Lagerbereich aus die beiden pneumatisch betätigten Schnellschlussventile im Chlorverladearm sowie das Auslassventil am Kesselwagen fernbetätigt geschlossen werden. Diese Ventile schließen auch selbsttätig bei einem Ansprechen der Verschiebesicherung (Magnetsensor) des Kesselwagens, die vor Beginn der Übernahme angebracht wird.

### **3.2.6 Druckabsicherung**

Die Druckbehälter des Chlorklagers (Lagertanks und Nottank mit einem Auslegungsdruck von 17 bar (absolut) ) und die Kesselwagen (Auslegungsdruck 19 bar (absolut) ) weisen - wie in der Chlortechnologie üblich - keine Druckabsicherung auf.

Auf beiden Lagertanks ist jeweils ein örtlich anzeigendes Kontaktmanometer angebracht. Bei Erreichen eines eingestellten Grenzwerts "Druck hoch" erfolgt ein Alarm in der Messwarte. Die Absperrarmaturen in den Messleitungen, die zu den Manometern führen, sind in offener Stellung jeweils durch eine Plombe gesichert.

Zusätzlich ist eine weitere Druckmessung installiert, die bei "Aktivierung" eines Lagertanks entsprechend manuell zugeschaltet wird. Der gemessene Druckverlauf wird auf einem Schreiber festgehalten.

### 3.3 Anlagenbetrieb

#### 3.3.1 Betriebszustände

Folgende sechs Anlagenbetriebszustände können vorliegen:

**Tab. 3-1: Betriebszustände**

Zustand	Lagern	Entnahme	Übernahme	Revision
I	ja	nein	nein	nein
II	ja	nein	nein	ja
III	ja	nein	ja	nein
IV	ja	ja	nein	nein
V	ja	ja	nein	ja
VI	ja	ja	ja	nein

Die Zustände "Chlorübernahme" und "Tankrevision" liegen also nie gleichzeitig vor.

Es wird immer nur ein Lagertank einer Revision unterzogen. In einem solchen Fall steht ein Tank für die Versorgung der Produktion zur Verfügung, ein weiterer ist leer und dient als Nottank.

Vor Revision des Nottanks wird die Chlornotpumpe druckseitig auf den leeren Lagertank geschaltet.

#### 3.3.2 Chlorübernahme

Es erfolgen ca. 50 Chlorübernahmen pro Jahr mit einer durchschnittlichen Dauer von ca. 6 Stunden.

Vor einer Chlorübernahme wird der Chlorverladearm mit Chlorgas aus dem zu befüllenden Lagertank gefüllt und der Anschluss am Kesselwagen mit Ammoniak auf Dichtheit überprüft. Der Kesselwagen wird während der Chlorübernahme mit Gleisschuhen gegen unbeabsichtigtes Verschieben gesichert und durch Aufstellen eines weiteren Kesselwagens auf dem Nachbargleis vor dem Aufprall anderer Fahrzeuge geschützt. Eine Verschiebesicherung (Magnetsensor) spricht an, wenn der Kesselwagen sich um wenige Millimeter bewegt. In einem solchen Fall werden die Schnellschlussventile im Verladearm und das Kesselwagenventil automatisch geschlossen.

Während der Chlorübernahme wird der Füllstand (gemessen über Kraftmessdosen, auf denen die Lagertanks stehen) im entsprechenden Lagertank in der Messwarte überwacht und das Vor-Ort-Personal gemeldet. Hierzu dienen eine Digitalanzeige und eine Schreiberaufzeichnung des Füllstands in Prozent. Bei "Füllstand hoch" wird automatisch alarmiert.

#### Anmerkung zur Logistik:

Da das Gefahrenpotential aufgrund von Übernahmeprozessen direkt proportional der Häufigkeit der Übernahmeprozesse ist, sollten diese so selten wie möglich erfolgen. Die beste Strategie angesichts der Kapazitäten der Kesselwagen für Chlortransporte (kleine Kesselwagen: max. 24 t bzw. große Kesselwagen: max. 57 t) und der Lagertanks ( $2 \times 20 \text{ m}^3 \approx 2 \times 28 \text{ t}$ ) wäre die Anlieferung in teilweise befüllten großen Kesselwagen, deren Inhalt so bemessen ist, dass er bei einem einzigen Übernahmeprozess geleert und die Lagertanks vollständig gefüllt werden. Eine solche Strategie ist allerdings nach Angabe des Anlagenbetreibers nicht realisierbar.

### 3.3.3 Prüfung/Wartung/Instandhaltung

Das Lager wird alle 2 Stunden von einem Mitarbeiter abgegangen. Dabei wird der Druck in den Lagertanks kontrolliert und protokolliert. Eventuelle Leckagen können aufgrund der niedrigen Geruchsschwelle von Chlor bemerkt werden. Zu ihrer Lokalisierung sind im Bereich des Chlorklagers an zahlreichen Stellen Spritzfläschchen mit Ammoniakwasser aufgestellt. Ammoniakwasser bildet in Verbindung mit elementarem Chlor einen intensiven weißen Nebel (Ammoniumchloriddämpfe, Salmiak).

Folgende Wartungen, Instandhaltungen bzw. Prüfungen werden durchgeführt:

- Jährliche Revision des Chlorverladearms durch den Hersteller
- Druckprüfung der Rohrleitungen gemäß TRR alle 5 Jahre
- Sichtprüfung von innen, Wanddickenmessung und Druckprüfung mit Wasser der Lagertanks gemäß Druckbehälterverordnung durch den zuständigen TÜV alle 5 Jahre
- Zukünftig vorgesehen: Jährlich Sichtprüfung der Lagertanks von außen nach Entfernung der Isolierung

### 3.3.4 Funktionstest der Chlornotpumpe

Das Notpumpen von Chlor wird einmal jährlich geübt. Dabei werden die betreffenden Komponenten angefordert. Für die übrige Zeit erhält die Chlornotpumpe eine sogenannte Stickstoffüberlagerung, d. h. die letzte saugseitige und die erste druckseitige Armatur werden geschlossen und die Pumpe und der abgesperrte Rohrleitungsabschnitt werden mit Stickstoff beaufschlagt (Inertisierung). Der aufgegebenen Stickstoffdruck kann an einem Manometer vor Ort überwacht werden.

Bisher musste das Notpumpen noch nicht im Ernstfall durchgeführt werden.

## 3.4 Eingrenzung der Untersuchung / Systemgrenzen für die Analyse

Entsprechend der Aufgabenstellung des Gesamtprojektes (siehe Kap. 2) sind die hier beschriebenen Methoden zur Ermittlung und Analyse der Risiken von Störfällen auf einen definierten Bereich des Gesamtbetriebes, das Chlorklager beschränkt. Des Weiteren wurden umgebungs-

bedingte Gefahrenquellen, wie z.B. benachbarte Anlagen oder naturbedingte Gefahrenquellen nur eingeschränkt betrachtet.

Die hier beschriebene Vorgehensweise und Eingrenzung der Untersuchung erhebt somit nicht den Anspruch einer vollständigen Abarbeitung aller sicherheitstechnischen Erfordernissen, sondern es soll exemplarisch gezeigt werden, wie und mit welchen Methoden und Werkzeugen in geeigneter Weise Risikoermittlungen durchgeführt werden können.

Folgende "Anlagenteile" werden definitionsgemäß in die Analyse einbezogen:

- Kesselwagen
- Chlorverladearm mit Armaturen
- Lagertanks mit Rohrleitungen, Armaturen und Chlorpumpen mit Chlorfiltern (bis einschließlich der jeweils letzten Armatur vor den Chlorvorlagen)
- Nottank mit Rohrleitungen, Armaturen und Chlornotpumpe

Der innerbetriebliche Transport wird in Kap. 7.5 näher beschrieben.

### **3.4.1 Rohrleitungslängen**

In dem untersuchten System sind folgende Rohrleitungen in den entsprechend einer ingenieurmäßigen Schätzung angegebenen Längen vorhanden:

- ◆ NW25: ca. 300 m
- ◆ NW32: ca. 10 m
- ◆ NW40: ca. 20 m
- ◆ NW50: ca. 15 m
- ◆ NW80: ca. 10 m

Das gesamte Rohrleitungsnetz wurde in einzelne Abschnitte unterteilt, deren Grenzen jeweils Absperrarmaturen bzw. Behälter darstellen. Die Zuordnung dieser Lecklagen zum System ergibt sich aus den Abb. 3-3 bis Abb. 3-6, in denen die entsprechenden Lecklagen-Nummern eingezeichnet sind. Zum schnelleren Auffinden einer bestimmten Lecklage sind die Abb. 3-3 bis Abb. 3-6 mit einem Koordinatensystem versehen, auf das in Kapitel 6.3 Bezug genommen wird.

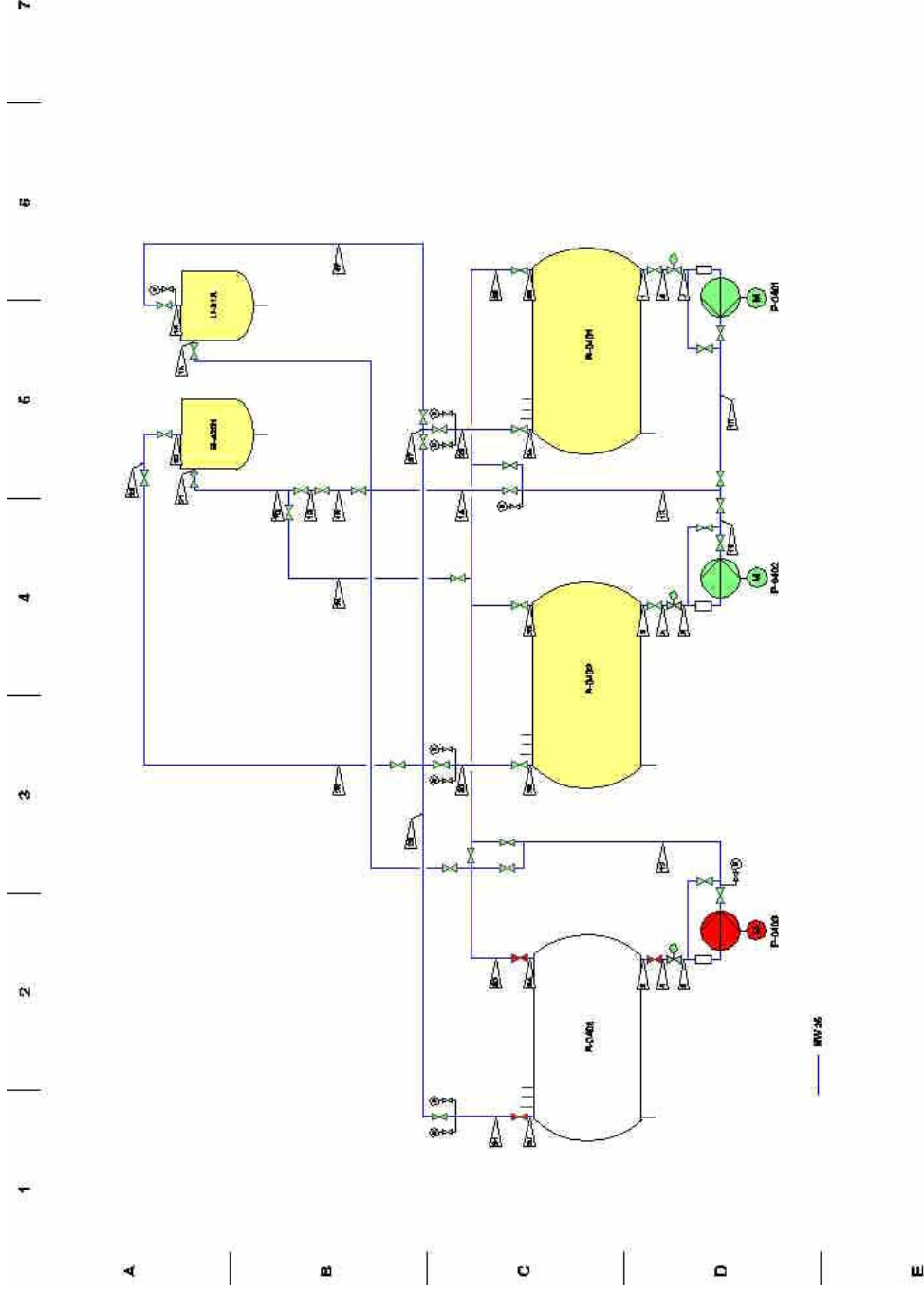


Abb. 3-3: Lagertanks, Nottanks, Chlorvorlagen, Chlorpumpen mit Rohrleitungen und Armaturen

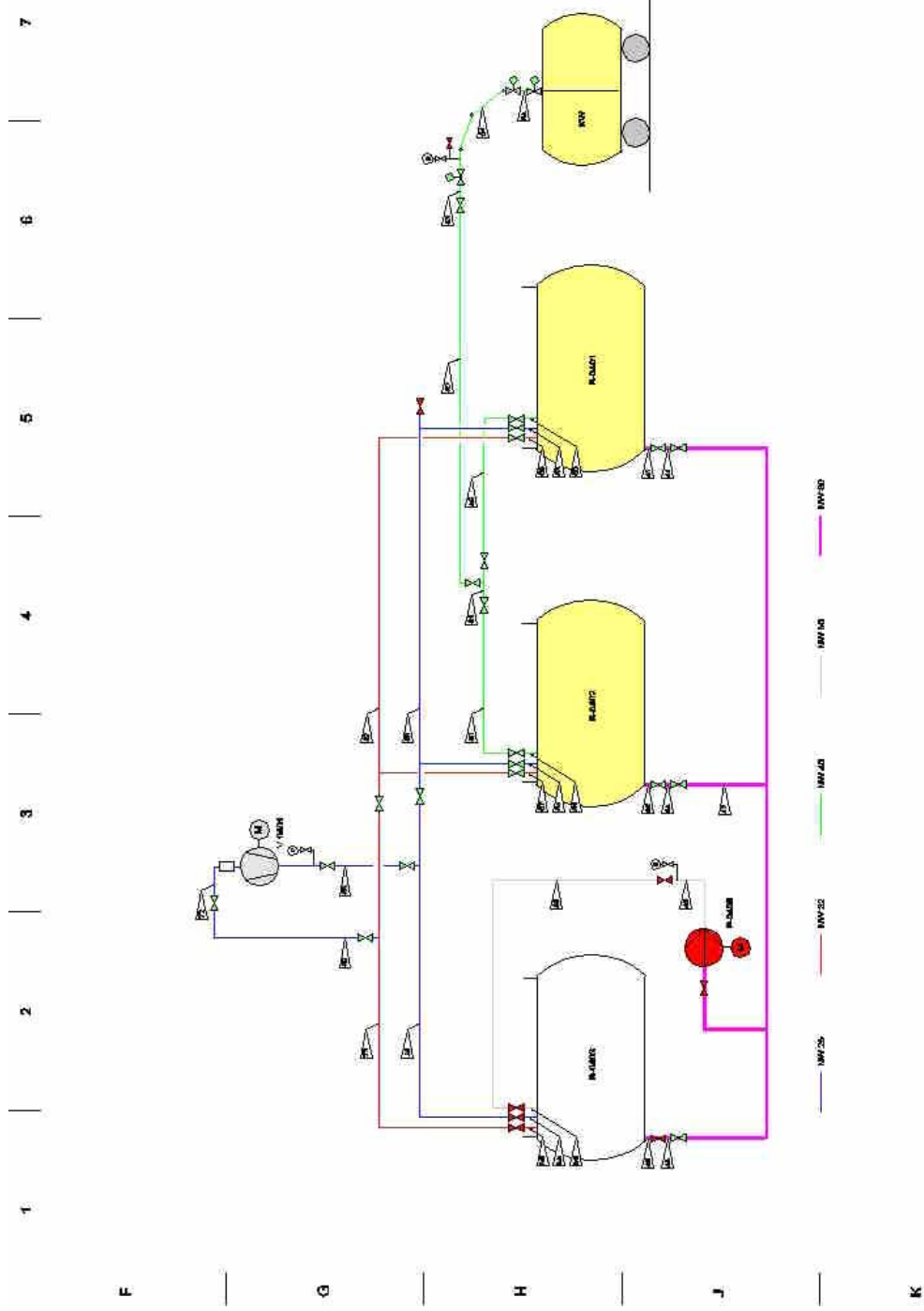


Abb. 3-4: Kesselwagen, Lagertanks, Nottank, Chlornotpumpe, Chlorkompressor mit Rohrleitungen und Armaturen

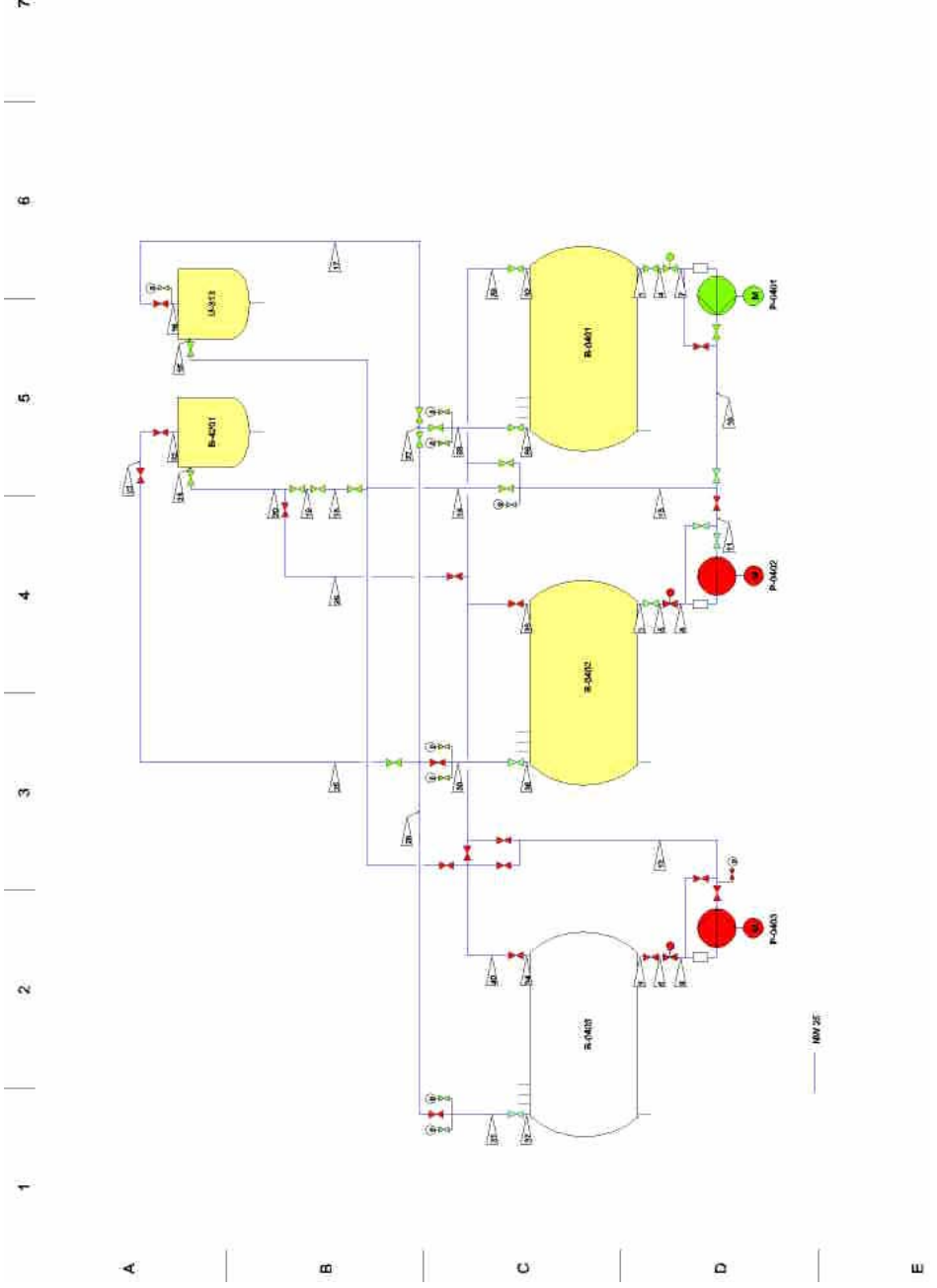


Abb. 3-5: Lagertanks, Nottank, Chlorpumpen, Chlorvorlagen mit zugehörigen Rohrleitungen und Armaturen - Bedienung der Vorlagen U-- 313 und B-4201 aus B-0401 -

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben "Risikoabschätzung an einem Chlorlager";  
Abschlussbericht, Rev. 1.0 vom September 2004

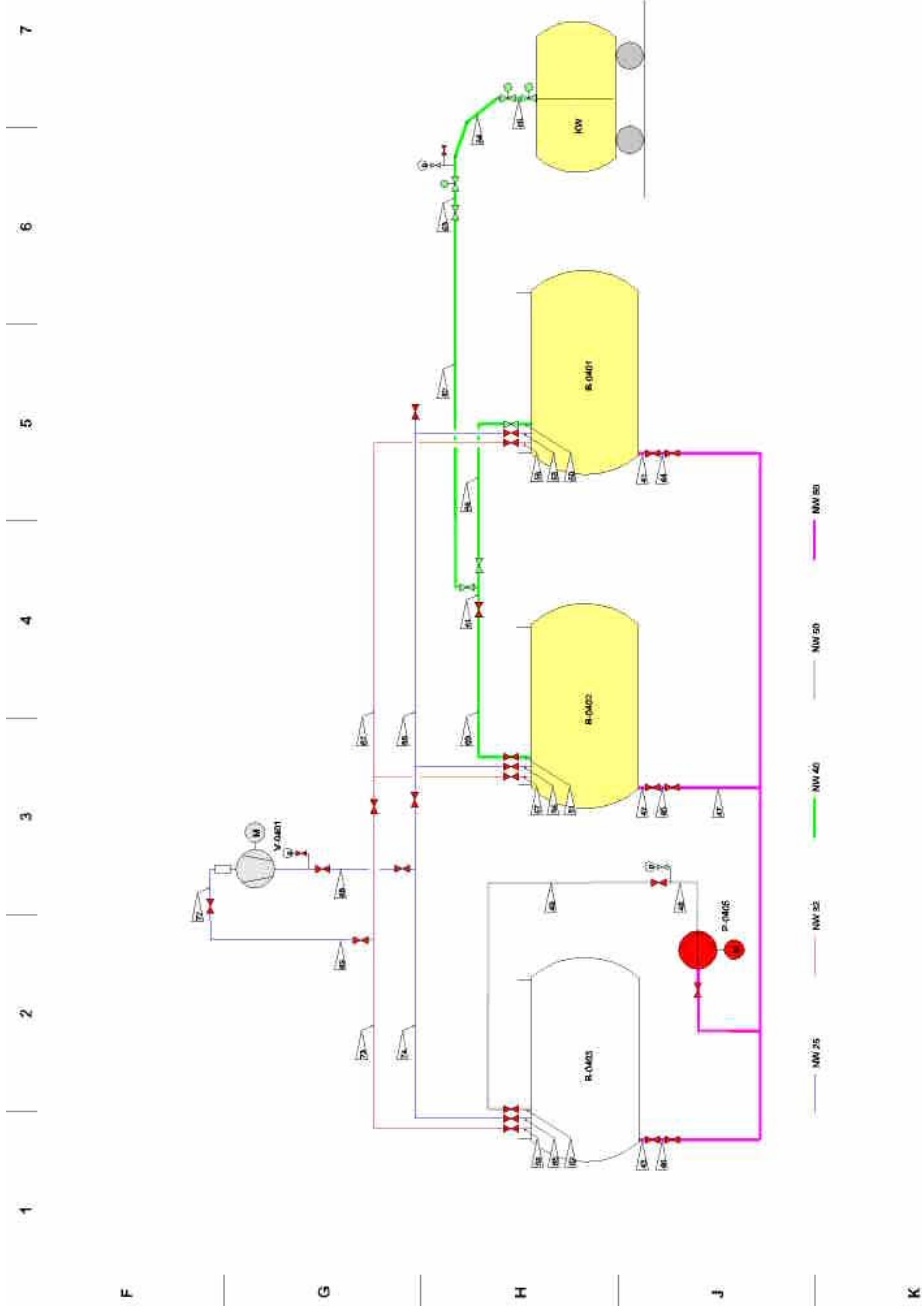


Abb. 3-6: Kesselwagen, Lagertanks, Nottank, Chlornotpumpe, Chlorkompressor mit zugehörigen Rohrleitungen und Armaturen - Chlorübernahme B-0401 -

### 3.5 Grundstellungen von Armaturen

In den Abb. 3-5 und Abb. 3-6 sind die Armaturenstellungen und Pumpenbetriebszustände laut Angabe des Betreibers in den Betriebszuständen

- ◆ Bedienung der Chlorvorlagen aus dem Lagertank B-0401
- ◆ Chlorübernahme in den Lagertank B-0401

farbig gekennzeichnet, wobei grün offen/Betrieb und rot geschlossen/Stillstand bedeuten.

Findet keine Chlorübernahme statt, sind laut Betreiberangaben alle Armaturen in Abb. 3-6 geschlossen.

Unter Berücksichtigung der Armaturenstellungen nach Betreiberangabe sind im Normalbetrieb der Anlage 44 (von insgesamt 85) Handarmaturen, 2 (von 6) pneumatisch betätigte Armaturen, 1 (von 4) Pumpe, 1 (von 4) Filter und 84 (von 208) Flansche mit Chlor beaufschlagt.

Es gibt keine explizit (z. B.) vorgeschriebenen Grundstellungen der Armaturen im Chlorklager. Maßnahmen zur Überprüfung und Sicherstellung derselben sind nicht in schriftlichen Anweisungen für das Bedienpersonal festgelegt. Eine Ausnahme hinsichtlich der Sicherstellung der Grundstellung bilden die Absperrarmaturen in den Messleitungen, die zu den Manometern führen. Diese sind in offener Stellung jeweils durch eine Plombe gesichert.



#### 4 Stoffbeschreibung - Der Umgang mit Chlor -


Chlor ist nach Fluor das reaktionsfähigste aller nichtmetallischen Elemente, weshalb es in der Natur ungebunden praktisch nicht vorkommt. Jedoch ist die hohe Reaktionsfähigkeit auch gleichzeitig die Ursache für seine Verbreitung in der chemischen Industrie. Die physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften von Chlor sind ausführlich untersucht worden. Die wichtigsten sind nachfolgend kurz dargestellt (4 /1/).

##### 4.1 Physikalische und chemische Eigenschaften

Unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) liegt Chlor als gelbgrünes Gas vor. Seine relative Dichte zu Luft beträgt 2,5, weshalb es bei atmosphärischen Ausbreitungen in ausreichender Konzentration ein fluiddynamisches Verhalten aufweist.

Die wichtigsten Stoffinformationen über Chlor sind der Tab. 4-1 zu entnehmen.

Tab. 4-1 Stoffinformationen von Chlor (4 /2/)

<b>Kennnummern</b>	<b>EG-Nr.</b>	017-001-00-7	<b>Kemlerzahl</b>	266
	<b>CAS-Nr.</b>	7782-50-5	<b>UN-Nr.</b>	1017
	<b>StörfallV Nr.</b>	26 (Anh. 1)	<b>Gefahrklasse</b>	2/3 at
<b>Stoffdaten / Sicherheitsdaten</b>	<b>Molare Masse</b>	70,906 g/mol	<b>Schmelzpunkt</b>	-101,6 °C
	<b>Krit. Temp.</b>	+144 °C	<b>Siedepunkt</b>	-34,05 °C
	<b>Krit. Druck</b>	76 bar	<b>rel. Gasdichte</b>	d = 2,49
<b>Aussehen</b>	<b>Aggregatzustand / Farbe</b>	grünlich gelbes Gas		
	<b>Geruch / Geruchs- schwelle</b>	stehender Geruch riechbar 0,2 - 5 mg/h³ (ppm)		
	<b>Gas</b>	schwerer als Luft		
<b>Ökologie</b>	<b>Wasser</b>	das Gas ist wasserlöslich wassergefährdender Stoff WGK 2		
	<b>Gas</b>	Emissionsklasse II		
<b>Umgang</b>	<b>Warnsymbole</b>			
	<b>MAK-Wert</b>	0,5 ml/m³ (ppm) = 1,5 mg/m³ Spitzenbegrenzung Kat. I		
<b>Besondere Angaben</b>	Wird als Flüssiggas in Stahlflaschen in den Handel gebracht, Kennfarbe grau.			

##### Besondere Gefahren

R-Sätze: 23 - 36/37/38

Giftig beim Einatmen. Reizt die Augen, Atmungsorgane und die Haut.

### Sicherheitsratschläge

S-Sätze: (1/2) 7/9 - 45

(Unter Verschluss und für Kinder unzugänglich aufbewahren.) Behälter dicht geschlossen an einem gut gelüfteten Ort aufbewahren. Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, diese Hinweise vorzeigen). Schutzbrille, Handschuhe und Atemfilter B bereithalten.

Flüssigchlor besitzt einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. So vergrößert sich sein Volumen bei einer Erwärmung vom Siedepunkt (-34°C) auf 50°C nahezu um 20%. Hieraus ergeben sich mögliche Gefahren bei Flüssigchloreinschlüssen, z. B. in Behältern oder Rohrleitungen unter gleichzeitiger Temperaturerhöhung.

Schon bei Normaltemperaturen reagiert Chlor mit einer Vielzahl von Elementen bzw. Verbindungen heftig unter z. T. sehr starker Wärmeentwicklung. Die Reaktionsfähigkeit steigt hierbei mit zunehmender Temperatur.

### 4.2 Toxikologische Eigenschaften

Chlor ist ein Reizgas mit stark ausgeprägten gewebeschädigenden Eigenschaften, jedoch ohne resorptive Wirkung.

Seine toxikologische Wirkung beruht im wesentlichen auf der Bildung von Salzsäure und hypochloriger Säure mit der Feuchtigkeit der Schleimhäute (Augen, Nase, Mund, Atemtrakt).

Die Schädigungen durch Chlor bei inhalativer Aufnahme entstehen vorwiegend an den oberen und mittleren Atemwegen. Bei hohen Konzentrationen bzw. Dosen dringt das Chlor auch bis in den Alveolarbereich vor, wodurch die Gefahr eines Lungenödems besteht. Die Wirkung von Chlor in geringen Konzentrationen bei Kurzzeitexpositionen zeigt Tab. 4-2.

**Tab. 4-2: Wirkung geringer Chlorkonzentrationen auf den Menschen bei Kurzzeitexposition im Experiment**

Chlorkonzentration		Symptome	Veröffentlichung
Ppm	mg/m <sup>3</sup>		
0,02 - 0,5	0,06 - 1,5	Geruchsschwelle für junge, gesunde Personen	Rupp, Henschler 1967
0,27	0,81	untere Grenze der Geruchswahrnehmung	Tachirow 1957
0,5	1,5	geruchlos	Lehmann 1887
0,5 - 5	1,5 - 15	Geruchsschwelle	Smolczyk 1930
1	3	unschädlich, schon etwas reizend, aber unbedenklich und wenig lästig.	Lehman 1887
1 - 2	3 - 6	Arbeit nicht gestört	Matt 1889
2 - 3	6 - 9	Arbeit noch möglich, Aufenthalt aber lästig	Matt 1889
4	12	Arbeit unmöglich	Matt 1889
17	51	Grenze des Erträglichen	Herbst 1928

Im Vergleich zu den darin dargestellten Werten beträgt der MAK-Wert für Chlor entsprechend TRGS 900 0,5 ppm.

Ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf Störfallfreisetzungen von Chlor betrifft die Wirkung bei höheren Konzentrationsbereichen bzw. größeren Expositionszeiten. Als Grenzwerte hierfür lassen sich die ERPG und IDLH-Werte heranziehen. Sie betragen für Chlor:

**ERPG: Emergency Response Planning Guidelines for Air Contaminants:**

- ERPG-1: 1 ppm (Expositionszeit bis zu einer Stunde; bei nahezu allen Exponierten höchstens schwache und vorübergehende Gesundheitseffekte)
- ERPG-2: 3 ppm (Expositionszeit bis zu einer Stunde; bei nahezu allen Exponierten keine irreversiblen oder ernstesten Gesundheitseffekte und Symptome, die die Fähigkeit für eigene Schutzaktionen einschränken)
- ERPG-3: 20 ppm (Expositionszeit bis zu einer Stunde; bei nahezu allen Exponierten keine lebensbedrohlichen Gesundheitseffekte)

**IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health**

- 25 ppm (Expositionszeit bis zu 30 Minuten; Fluchtmöglichkeiten gegeben, keine lebensgefährlichen oder irreversiblen Schäden)

### 4.3 Störfälle mit Chlor

Die Berücksichtigung von konkreten Störungs- oder Störfalldaten ist für die Durchführung von Risikoanalysen unerlässlich, wenn man sich nicht ausschließlich auf theoretischem Feld bewegen will. Es werden daher verschiedene Störfallinformationssysteme analysiert.

#### Chlorfreisetzungen bei der Lagerung und beim Umfüllen von Chlor

Die Auswertungen der vorliegenden Jahresberichte (1982 bis 1998 (4 /3/)) der zentralen Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen (ZEMA), des Umweltbundesamtes, Berlin, zeigen für die hier zu untersuchenden Bereiche - Lagerung und EKW-Umfüllstelle - bei insgesamt 7 über diesen Zeitraum gemeldeten Störfällen die nachstehende Schadenscharakteristik (Tab. 4-3)

**Tab. 4-3: Auswertung ZEMA-Berichte 1982 - 1998**

Anlagenbereich/ Komponente	Chlorfreisetzung durch	Ursachen	Schwere des Ereignisses
Umfüllen / Chlorkompressor	Öl/Chlorgasreaktion und Chloreisenbrand	techn. Fehler	Personen (2)-, Sach-, Umweltschaden
Umfüllen / Anschlussflansch EKW	Leckage	Bedienungsfehler	Personenschaden (28)
Rohrleitung, Lagerung - Verdampferstation	Leckage / Außenkorrosion	Wartungsfehler	Personenschaden (1)
Umfüllen / Druckschlauch	Schlauchabriss	techn. Fehler	Personenschaden (4)
Umfüllen / Anschlussstück EKW	Rohrleitungsabriss	techn. Fehler und Bedienungsfehler	Personenschaden (76)
Umfüllen / EKW	Fehlschaltung Gasphasenleitung, Chlor-Knallgas R.	Bedienungsfehler	Personenschaden (5)
Lagerung / Rohrleitung	Schweiß-/ Brennarbeiten, Chloreisenbrand	Bedienungsfehler	Personenschaden (186)

Weitere 15 Störfälle waren in anderen Produktionsbereichen (z. B. Chlorherstellung) zu verzeichnen. Bei insgesamt 22 Chlor-Störfällen ergibt sich somit ein Chloranteil von etwa 8 % am gemeldeten Störfallgeschehen. In allen Fällen wurden Personenschäden, nur in einem Fall wurde ein Umweltschaden angezeigt.

Unter den Verletzten (Tote sind nicht zu beklagen) befanden sich sowohl Einsatzkräfte und Beschäftigte als auch - in einem Fall – Personen aus der Bevölkerung. Rund 60 % der Störfälle sind fehlerhaften Personalhandlungen zuzuschreiben, rund 40 % waren technischer Natur.

Vergleichbare Daten sind ebenfalls in 4 /1/ dokumentiert. Hier wurde auch die Anzahl der Befüll- und Entleervorgänge mit etwa 10000 pro Jahr ermittelt. Legt man diesen Wert zugrunde, so ergibt sich die Eintrittshäufigkeit eines Störfalles zu  $1,8 \times 10^{-5}$ / Umfüllvorgänge.

Innerhalb der EU sind für Deutschland zwei und Frankreich acht Chlorfreisetzungen ausgewiesen! Lagerung und Umfüllen sind dabei mit 30 % beteiligt.

Eine Auswertung katastrophalen Versagens (Loss of containment, LOC) von Druckbehältern zum Lagern von Chlor ist in 4 /4/ aufgeführt.

Weltweit sind 10 LOC's für den Zeitraum 1917 bis 1989 dokumentiert (4 /5/). Die Eintrittshäufigkeit des Versagens von Druckbehältern wird heute zwischen  $1 \times 10^{-5}$  /Jahr (teilweises Ausströmen) und  $5 \times 10^{-7}$  /Jahr (Freisetzung Gesamthalt) diskutiert (4 /6/).

#### Chlorfreisetzungen beim Schienentransport mit Eisenbahnkesselwagen (EKW)

Konkrete Daten zu Unfällen beim Transport von Chlor in EKW (entsprechend ZEMA-Berichten) konnten - trotz intensiver Bemühungen insbesondere bezüglich der Unfallstatistiken der Deutschen Bahn - nicht beschafft werden. Vielleicht sind sie auch nicht verfügbar. Es wird deshalb bezüglich der Ermittlung generischer Daten auf (4 /1/) verwiesen. Dementsprechend ist das

Versagen von Tanks durch Unfälle im Zugbetrieb - vor allem durch Auffahr- und Aufprallereignisse auf  $7,2 \times 10^{-3}$  /Jahr zu veranschlagen, d. h. etwa alle 140 Jahre. Es wird in diesem Zusammenhang jedoch auch darauf hingewiesen, dass bisher kein EKW-Unfall mit Chlor dokumentiert ist, der mit Todes- oder sonstigen katastrophalen Folgen verbunden war.



## **5 PAAG-Verfahren/HAZOP und ZHA**

### **5.1 Methodische Aspekte**

#### **5.1.1 PAAG/HAZOP-Verfahren**

Das PAAG/HAZOP-Verfahren ist die bekannteste und am weitesten angewandte Methode zur systematischen Gefahrenanalyse in verfahrenstechnischen Anlagen. Es wurde in den 60er Jahren von ICI in England eingeführt und wird seit den 70er in Deutschland von der BG Chemie propagiert. Der Anwendungsbereich des PAAG/HAZOP-Verfahrens beschränkt sich jedoch nicht nur auf verfahrenstechnische Anlagen sondern es kann auf jedes System mit definierter Sollfunktion angewandt werden.

Das PAAG/HAZOP-Verfahren besteht aus einem methodischen "Brainstorming" eines Teams von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen. Das betrachtete System wird in überschaubare Sollfunktionen gegliedert. Durch systematische Anwendung eines vorgegebenen Satzes von Leitworten sucht dann das Team nach unerwünschten Abweichungen von der Sollfunktion. Aus den so gefundenen hypothetischen Störungen werden durch die Frage nach möglichen Ursachen realistischen Störungen abgegrenzt. Realistische Störungen mit relevanten Auswirkungen werden weiter verfolgt mit dem Ziel, wirksame Gegenmaßnahmen zu entwickeln.

Die Zusammensetzung des Teams richtet sich nach dem Projektstadium und speziellen Fragestellungen der Prüfung. Um eine sinnvolle Durchführung zu garantieren, sollte die Anzahl der Mitglieder des Prüfteams nicht zu groß gewählt werden.

Bei der Durchführung einer PAAG/HAZOP-Studie ist ein unabhängiger Teamleiter erforderlich. Seine wesentliche Aufgabe besteht darin bei den Treffen des Prüfungsteams für eine systematische und strukturierte Vorgehensweise zu sorgen, die Teammitglieder zu kreativer Arbeitsweise zu motivieren und für einen zügigen Fortgang der Untersuchung zu sorgen. Außerdem hilft der Teamleiter bei der Vorbereitung der Prüfung und koordiniert die Erstellung eines Berichtes über die Durchführung der Studie.

Die besonderen Vorteile des PAAG/HAZOP-Verfahrens liegen in der systematischen Vorgehensweise und in der Breite der Suche nach möglichen Gefahrenquellen beim Betrieb von Anlagen.

Das PAAG/HAZOP-Verfahren stellt ein wirksames und effektives Instrument zur

- Erhöhung der Anlagensicherheit und -verfügbarkeit
  - Verbesserung des Anlagenbetriebs und der Betriebsvorschriften
  - Vertiefung des Verständnisses des Systemverhaltens
- dar.

### **5.1.2 ZHA (Zurich Hazard Analysis) - Methode**

Die ZHA-Methode wurde von der "Zürich" Versicherungsgesellschaft Anfang der 80er Jahre entwickelt, um den Erfordernissen der Versicherungskunden im Hinblick auf Risk Management gerecht zu werden.

Die Methode besteht aus folgenden Schritten

1. Definition des Analysenumfangs.

In diesem Schritt werden das physikalische System, Teile, Komponenten oder Elemente, die in die Analyse eingeschlossen werden sollen, identifiziert. Daran schließt sich die Sammlung der notwendigen Dokumentation und Information und die Auswahl eines geeigneten Teamleiters an. Der Teamleiter übernimmt die hauptsächliche Verantwortung für die Durchführung des Restes der Analyse, deren nächster Schritt die Auswahl eines Teams von Experten für den identifizierten Untersuchungsumfang ist.

2. Gefahrenerkennung und Erstellung des Gefahrenkataloges.

Die Gefahrenerkennung wird im Team mit Hilfe der sog. "Tickler-Liste" (Schlagwortliste, Denkanstoß-Liste) durchgeführt und bezieht sich auf alle Aspekte des zu untersuchenden Systems, wie z. B. gefährliche Eigenschaften von Stoffen, betriebliche Störungen, äußere Einwirkungen, Bedienungsfehler.

3. Gefahrenbewertung.

Für die ermittelten Gefahrenszenarien werden unter Berücksichtigung der vorhandenen Maßnahmen zur Gefahrenverhinderung im Team qualitative Angaben zur Eintrittswahrscheinlichkeit (auf einer Skala von "A" = häufig bis "F" = unmöglich) und zur Tragweite (auf einer Skala von "I" = katastrophal bis "IV" = unbedeutend) gemacht. Die so ermittelten Risikowerte werden in einer Risikomatrix eingetragen und stellen das "Risiko-Profil" des betrachteten Systems dar.

4. Festlegen des akzeptablen Risikos

In die Risikomatrix wird vom Team die Kurve für das akzeptable Risiko, das sich z. B. nach Rechtsnormen oder firmeninternen Vorgaben richtet, eingetragen.

5. Festlegen der erforderlichen Maßnahmen

Für die Szenarien, für die ein nicht akzeptables Risiko abgeschätzt wird, müssen entsprechende Gegenmaßnahmen zur Reduktion des Risikos festgelegt werden.

## **5.2 Gefahrenidentifikation**

### **5.2.1 PAAG/HAZOP-Verfahren**

Die Gefahrenidentifikation erfolgt über die Schritte

- Definition der Sollfunktion
- Ermittlung möglicher Abweichungen der Sollfunktion durch Anwendung der Leitworte auf die Sollfunktion
- Auffinden der Ursachen für die als möglich erkannten Abweichungen

## **5.2.2 ZHA-Methode**

Die Gefahrenidentifikation erfolgt mit Hilfe der sog. Tickler-Liste. Dazu wird das betrachtete System auf vorher festgelegten Pfaden, wie z. B. Materialfluss oder Energiefluss untersucht. Die Tickler-Liste ist eine offene Schlagwortliste zu den Aspekten

- Gefährliche Eigenschaften von Stoffen,
- Arten von Störungen
- Einwirkungen von Außen
- Lebenszyklus der Anlage

## **5.3 Gefahren- und Risikobewertung**

### **5.3.1 PAAG/HAZOP-Verfahren**

Für das "klassische" PAAG/HAZOP-Verfahren ist eine Risikobewertung nicht vorgesehen. Das PAAG/HAZOP-Verfahren lässt sich jedoch leicht um eine qualitative Risikoabschätzung anhand einer Risiko-Matrix analog zur ZHA erweitern.

### **5.3.2 ZHA-Methode**

Eine Gefahrenbewertung bei der ZHA-Methode erfolgt über die qualitative Risikoabschätzung

## **5.4 Durchführung der Analyse und Ergebnisse**

### **5.4.1 PAAG/HAZOP-Verfahren**

#### **5.4.1.1 Durchführung der Analyse**

Die Untersuchung nach dem PAAG/HAZOP-Verfahren wurde an 2 Tagen durchgeführt.

An der PAAG/HAZOP-Untersuchung nahmen seitens des Betreibers der Betriebsleiter und der Störfallbeauftragte teil. Mitarbeiter aus anderen Abteilungen standen für Rückfragen auf Abruf bereit. Außerdem gehörten dem Untersuchungsteam ein Moderator und ein Protokollant an. Mit Hilfe von rechnergestützten Modulen wurde die Dokumentation während der HAZOP-Sitzung online erstellt und über einen Beamer auf eine Leinwand projiziert. Hierdurch wurde für alle Team-Mitglieder eine sofortige Nachvollziehbarkeit ermöglicht und damit eine effektive Durchführung der Analyse gewährleistet.

Die Anlage wurde in überschaubare, verfahrenstechnisch zusammenhängende Sektionen eingeteilt. Dabei wurden primär sicherheitstechnisch bedeutsame Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt betrachtet.

In den Kopfzeilen der PAAG/HAZOP-Listen wurden die Auslegungs- und Betriebsdaten der wichtigsten Anlagenteile sowie die Sollfunktion der Sektion aufgeführt.

Anhand der verfahrensspezifischen Leitworte wurden die Abweichungen der Sollfunktion hinterfragt, die Ursachen ermittelt, die Auswirkungen abgeschätzt, Maßnahmen zur Erkennung der Abweichung und die Gegenmaßnahmen beschrieben. Sofern zur Bewertung der getroffenen Gegenmaßnahmen erforderlich, wurden qualitative Risiko-Abschätzungen in Anlehnung an die DIN 19250 durchgeführt.

Zur Bewertung der nach dem PAAG/HAZOP-Verfahren ermittelten Störungen, wurde eine qualitative Risiko-Abschätzung jeder Störung anhand einer Risiko-Matrix durchgeführt.

#### **5.4.1.2 Randbedingungen, Begrenzungen der Analyse**

Bei der Durchführung der PAAG/HAZOP-Studie wurde die Gültigkeit allgemeiner Maßnahmen zur Störfallverhinderung und Störfallbegrenzung wie z. B.

- Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosion
- Maßnahmen zur Vermeidung von Bränden und Explosionen
- Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter
- Vorkehrungen gegen Fehlbedienungen
- Vorkehrungen gegen Fehlverhalten
- Maßnahmen gegen umgebungsbedingte Gefahrenquellen
- Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen insbes. Feuerwehr/Gaswehr

vorausgesetzt. Die genannten Maßnahmen sind in der Sicherheitsanalyse des Lager beschrieben.

#### **5.4.1.3 Abweichungen vom Regelwerk**

Bei der Durchführung der PAAG/HAZOP-Analyse ergaben sich für die betrachtete Anlage einige Abweichungen vom technischen Regelwerk insbesondere der TRB 610 "Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern von Gasen" Ausgabe November 1995 (BArbBl. 11/1995, S. 56) und der TRB 851 "Füllanlagen zum Abfüllen von Druckgasen aus Druckgasbehältern in Druckbehälter / Errichten" Ausgabe Februar 1997 (BArbBl. 2/1997, S. 50).

Außerdem wird empfohlen, Chlorsensoren in den 4 Windrichtungen zu installieren, die beim Ansprechen zum automatischen Schließen der Schnellschlussventile in den relevanten Leitungen und an den Lagerbehältern führen.

Abweichung sind im Folgenden kursiv dargestellt.

#### **5.4.1.3.1 Automatische Überfüllsicherung (TRB 610 Nr. 5.2.1.4)**

- ◆ Angelieferte EKW haben 24 bzw. 57 t.. Eine Übernahme von Chlor erfolgt nur bei Campaignenbeginn im größten Chlorverbraucher. Bestellung erfolgt nur wenn sichergestellt ist, dass genügend Freiraum im Lager vorhanden ist.
- ◆ Erkennung der Überfüllung durch
  - Druckalarne PIAH 015/016 (Ansprechdruck 8 bar)
  - Kontinuierliche Gewichtsmessung WR (keine Standänderung, Beobachtung in Messwarte)
- ◆ Befüllung erfolgt nach Betriebsanweisung
- ◆ Personalpräsenz (Anzeige Manometer PI vor Ort), Füllstand wird alle 10 Minuten aus der Messwarte durchgegeben und quittiert
- ◆ Bedienereingriff (Unterbrechung der Entnahme aus EKW) über Not-Aus

*Da das Volumen der EKW größer sein kann als das Fassungsvermögen eines Lagertanks und daher eine Überfüllung nicht mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden kann, ist die Absicherung gegen Überfüllen als MSR-Schutzeinrichtung nach VDI 2180 einzustufen und entsprechend auszuführen.*

#### **5.4.1.3.2 Totmannschalter (TRB 851 Nr. 5.2.1.3)**

- ◆ Unterbrechung der Entnahme aus EKW (Not-Aus) über Totmannschalter im Funkgerät (nach Angaben des Betreibers vorgesehen)
- ◆ Standübermittlung aus der Messwarte alle 10 Minuten mit Quittierung vor Ort.

#### **5.4.1.3.3 Rohrleitungsanschlüsse (TRB 610 Nr. 5.2.1.5)**

In den Flüssigentnahmeleitungen der Chlorlagertanks sind fernbedienbare Absperrarmaturen vorhanden. Alle anderen Rohrleitungsanschlüsse der Lagertanks sind mit Handabsperrarmaturen versehen.

*Nach TRB 610 Nr. 5.2.1.5 ist in allen Füll-, Entnahme- und Gaspendelleitungen je eine Handabsperrarmatur und eine fernbetätigbare Absperrarmatur erforderlich.  
Abweichungen vom Regelwerk sind hier u. E. nicht zulässig.*

#### 5.4.1.4 Ergebnisse

In Tab. 5-1 sind die über das PAAG/HAZOP-Verfahren ermittelten Störungen mit den schwersten Auswirkungen aufgeführt.

Die Tabelle ist wie folgt zu lesen:

- ◆ Lfd. Nr.: Setzt sich zusammen aus der PAAG-Sektion (S ...) und der Nummer innerhalb der jeweiligen Sektion
- ◆ Risiko: Gibt die Einstufung gemäß Spalte P und S der PAAG-Tabellen wieder.<sup>1</sup>
- ◆ Störung: Festgestellte Störung gemäß PAAG-Tabellen
- ◆ Auswirkung: Festgestellte Auswirkung gemäß PAAG-Tabellen

Die Sortierung erfolgte nach dem abgeschätzten Risiko.

Zum näheren Verständnis wird auf Kap. 5 des Anlagenbandes verwiesen.

---

<sup>1</sup>

Wahrscheinlichkeit (P) A: Häufig, B: Oft, C: Gelegentlich, D: Selten, E: Unwahrscheinlich, F: Praktisch unmöglich  
Tragweite (S): I: Katastrophal, II: Kritisch, III: Klein, IV: Unbedeutend

**Tab. 5-1: Ereignisse mit den schwerste Auswirkungen**

Lfd Nr.	Risiko	Störung	Auswirkung
S10 C.02	D II	Leckagen	Stofffreisetzung (flüssig)
S6 A.01	E II	Behälter undicht	Stofffreisetzung (flüssig)
S1 A.01	E II	Befüllarm nicht angeschlossen	Chlorfreisetzung (flüssig) aus EKW
S1 C.01	E II	Leckage durch Dichtungsversagen	Stofffreisetzung (flüssig)
S1 C.02	E II	Leckage durch mechanische Beschädigung (Anfahren des EKW)	Stofffreisetzung (flüssig)
S2 C.01	E II	R-003 bzw. R-006 offen	Stofffreisetzung (flüssig)
S3 A.01	E II	Leckage des Behälters	Stofffreisetzung (flüssig oder gasförmig)
S3 B.01	E II	Überfüllung des Behälters durch Bedienfehler	Druckaufbau und ggf. Stofffreisetzung sofern der Tank eingeblockt wird
S4 C.02	E II	Leckage	Stofffreisetzung (flüssig oder gasförmig)
S5 A.01	E II	Handventile auf Saugseite geschlossen	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S5 A.02	E II	Ausfall Notpumpe P-0405	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S5 A.03	E II	Handventile auf Druckseite geschlossen	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S5 A.04	E II	Verstopfung	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S5 A.05	E II	Leckage	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S5 C.01	E II	zu hoher Druckverlust	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.

Lfd Nr.	Risiko	Störung	Auswirkung
S5 D.03	E II	Förderung sowohl in Nottank als auch in nicht havarierten Lagertank	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stofffreisetzung kann nicht gestoppt werden.
S7 C.02	E II	Leckage	Stofffreisetzung (flüssig)
S9 A.03	E II	Membranbruch Verdichter	Absaugung unterbrochen
S9 D.01	E II	Tropfeintrag Verdichter	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Abschaltung über el. Stromwächter</li> <li>•Absaugung unterbrochen</li> </ul>
S1 F.01	F II	Druck im System höher als im EKW	Druckanstieg im EKW
S1 G.01	F II	Chlor-EKW ist mit anderem Stoff befüllt worden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unzulässiger Druck</li> <li>• unzulässige Temperatur /Mischung(exotherme Reaktion)</li> </ul>
S2 A.02	F II	Rohrleitungsabriss	Stofffreisetzung (flüssig)
S2 F.01	F II	Druck im System höher als im EKW	Druckanstieg im EKW
S3 B.02	F II	unzulässiger Wärmeeintrag durch Chlorbefüllung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unzulässig hoher Druck</li> <li>• Stofffreisetzung (flüssig)</li> </ul>
S4 A.06	F II	Magnetpumpe defekt, Spalttopf undicht	Stofffreisetzung (flüssig)
S6 B.01	F II	Bedienungsfehler (Entleerung in vollen Nottank oder Entleerung von zwei Lagertanks in Nottank)	Überdruck im Nottank
S7 A.05	F II	Magnetpumpe defekt, Spalttopf undicht	Stofffreisetzung (flüssig)
S10 A.01	F II	Ventile geschlossen	Druckanstieg in den Vorlagen
S10 C.01	F II	Verstopfungen	Druckanstieg in den Vorlagen
S4 G.02	F I	Reibung durch Kontakt	Brand, Stofffreisetzung (gasförmig)

Alle Details sowie die PAAG-Tabellen sind in Kap. 5 des Anlagenbandes enthalten.

## 5.4.2 ZHA-Methode

### 5.4.2.1 Durchführung der Analyse

Die Untersuchung nach der ZHA-Methode wurde an 2 Tagen (je ca. 6 Stunden pro Tag) durchgeführt.

An der ZH-Analyse nahmen seitens des Betreibers der Betriebsleiter und der Störfallbeauftragte teil. Mitarbeiter aus anderen Abteilungen standen für Rückfragen auf Abruf bereit. Außerdem gehörten dem Untersuchungsteam ein Moderator und ein Protokollant an. Die Dokumentation wurde mit Hilfe des PC-Programms ZHA NT 2.0b erstellt.

#### 5.4.2.2 Randbedingungen, Begrenzungen der Analyse

Es wurde der Stoffstrom Chlor von der Entladung aus dem EKW über die Lagerung bis zu den Vorlagebehältern verfolgt. Es wurden alle betriebsmäßig möglichen Vorgänge (Befüllen, Entleeren, Notentleeren, Revision etc.) betrachtet. Die Analyse wurde mit Hilfe der Checkliste ("Tickler-Liste") aus dem PC-Programm ZHA NT 2.0b durchgeführt.

#### 5.4.2.3 Ergebnisse

In der folgenden Tabelle sind die über die ZHA ermittelten Störungen mit den schwersten Auswirkungen aufgeführt.

Die Tabelle ist wie folgt zu lesen:

- ◆ ZHA-Nr.: Identifikationsnummer innerhalb der ZH-Analyse
- ◆ Risiko: Gibt die Einstufung gemäß der Spalte Wahrscheinlichkeit und Tragweite wieder.<sup>2</sup>
- ◆ Gefahr: Auslösendes Moment für die Gefahrenquelle
- ◆ Auslöser: aktiviert die Gefahrenquelle
- ◆ Auswirkung: Festgestellte Auswirkung gemäß ZHA-Tabellen

Die Sortierung erfolgte nach dem abgeschätzten Risiko.

Zum näheren Verständnis wird auf Kap. 5 des Anlagenbandes verwiesen

**Tab. 5-2: Ereignisse mit den schwersten Auswirkungen**

ZHA Nr.	Risiko	Gefahr	Auslöser	Auswirkung
1	D I	Chlor	Beimischungen (NCl <sub>3</sub> )	Behälterversagen durch Stoffzersetzung
3	E I	Chlor	Korrosion	Stofffreisetzung
4	E I	Chlor	z. B. Schneidflammen	Chlor-Eisen-Brand
9	E II	Not-Pumpe P-0405	Ausfall	mögliche Stofffreisetzung länger als im BGAP vorgesehen
12	E II	Ausfall Notstrom/Batterie	Diesel läuft nicht an Batterie leer (Batterie nur begrenzte Kapazität)	Anlage geht in Fail-Safe (Ventile pneumatisch/ Federkraft gesteuert) Not-Pumpe kann im Bedarfsfall nicht gestartet werden
19	E II	Außenkorrosion	Witterung (Feuchtigkeit)	Versagen von Wandungen, Stofffreisetzung
22	E II	Benachbarte	Trümmerwurf	Stofffreisetzung nach

<sup>2</sup> Wahrscheinlichkeit (P) A: Häufig, B: Oft, C: Gelegentlich, D: Selten, E: Unwahrscheinlich, F: Praktisch unmöglich  
 Tragweite (S): I: Katastrophal, II: Kritisch, III: Klein, IV: Unbedeutend

ZHA Nr.	Risiko	Gefahr	Auslöser	Auswirkung
		Anlagen		Behälterbeschädigung
26	E II	unzulässiger Füllstand	Mehrfachbefüllung	hoher Druck Stofffreisetzung durch Dichtungsversagen
27	E I	Entleerter Behälter	Anreicherung von Stickstofftrichlorid	Behälterversagen durch Reaktion, Dominoeffekt
28	E I	unzulässig hohe Temperatur/Druck im TKW	Dampfbeheizung	Behälterversagen TKW
32	D II	Chlor	Revisionsarbeiten am Rohrsystem	Chlorfreisetzung
33	D II	Korrosion	falsche Werkstoffe	Stofffreisetzung
34	E II	Falscher Stoff (Ammoniak)	Bedienungsfehler	Reaktion, Stofffreisetzung
35	E I	Wärmeeintrag	Schweißarbeiten	Chlor-Eisen-Brand
36	E II	Fehlbedienung	unvollständige, fehlerhafte, unklare, nicht vorhandene Betriebsanweisung	unzulässige Zustände, Stofffreisetzung
37	E II	Fehlbedienung	Fahrlässigkeit, Missachten von Vorschriften	unzulässige Zustände, Stofffreisetzung
38	D II	Arbeiten durch Fremdfirmen	Unsachgemäße Einweisung, Arbeiten ohne Erlaubnis	unzulässige Zustände, Stofffreisetzung
39	E II	Unvollständige Warnung beim Befüllen des Tanks	nicht erkannte Überfüllung (Gewichtsanzeige)	Überschreiten des zulässigen Füllstands und Freisetzung von 5 Liter Chlor aus Verladearm
40	E II	Kontakt mit Chlor	unvollständige Warnungen und Gefahrenhinweise	Verletzungen einer oder mehrerer Personen
41	E I	Kontakt mit Chlor	unvollständige Warnungen und Gefahrenhinweise im Gefahrenabwehrplan	Tod einer oder mehrerer Personen
42	E I	Korrosion	Mangelnde Chlorqualität	Stofffreisetzung
43	F II	Versagen von Bauteilen	Alterung	Stofffreisetzung

Alle Details sowie die ZHA-Tabellen sind in Kap. 5 des Anlagenbandes enthalten.

## 6 Quantitative Risikoanalyse (QRA)

Zielsetzung des Projektes ist es, eine Referenz-Sicherheitsbewertung bereitzustellen unter inhaltlicher Einbeziehung der o. a. EU-Richtlinie sowie der seit Mai dieses Jahres vorliegenden Umsetzung dieser Richtlinie in deutsche Rechts- und Verwaltungsvorschriften.

Aufgrund der Einordnung des Projektes als Forschungsvorhaben sowie der zeitlichen Randbedingungen für die Umsetzung von 6 /1/ können von einem Betreiber in der chemischen Industrie umfassende Unterlagen, Informationen und Daten entsprechend den diesbezüglichen Anforderungen im konkreten Fall weder erwartet noch gefordert werden.

Wichtig ist, zumindest die angesprochenen Themen im Hinblick auf eine mögliche weitere Bearbeitung mit aufzunehmen, auch wenn in diesem Projekt u. U. nur eine entsprechende Grobeinschätzung oder Empfehlung ausgesprochen wird. Die in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten basieren somit auf der vorliegenden Sicherheitsanalyse des Betreibers (6 /2/), auf weiteren schriftlichen Unterlagen, die vom Betreiber zur Verfügung gestellt wurden und auf Informationen, die anlässlich von Betriebsbegehungen oder telefonisch vom Betreiber mündlich mitgeteilt wurden (Stand: Mitte 2000).

Im Folgenden sind sicherheitsrelevante Ergänzungen hierzu aufgeführt, die entweder bereits vorhanden waren, aber vom Betreiber erst zu einem späteren Zeitpunkt mitgeteilt wurden, so dass sie nicht mehr in die Auswertung mit einfließen konnten oder die nach Angabe des Betreibers zwischenzeitlich - auch aufgrund von Zwischenergebnissen dieser Untersuchung - geplant sind bzw. bereits durchgeführt wurden:

1. Ergänzung und/oder Überarbeitung der betrieblichen Unterlagen, z. B. für die konkrete Durchführung von Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten
2. Schreiber bzgl. der Windrichtung und -geschwindigkeit in der Messwarte sind vorhanden
3. Ersatz der fest installierten Rufanlage durch eine mobile, personenbezogene Funkanlage wurde vorgenommen
4. Alarmierung: Messwarte kann direkt Feuerwehr alarmieren, nicht nur über bzw. von der Zentraleinheit beim Pfortner aus
5. Erstellung einer Betriebsanweisung, welche das Schließen der pneumatischen Notabsperrentile direkt am Flüssig-Lagertankauslassstutzen (von der Messwarte aus) regelt
6. Überprüfung und/oder Revision der Arbeitsanweisung (10-AA-03.DOC) Chlorübernahme: Entladen von Chlor-Kesselwagen
7. Die Einberufung eines Krisenstabes nach Auftreten eines LOC (Loss of Containment) ist im Rahmen des Gefahrenabwehrplans geregelt.
8. Erstellung einer Betriebsanweisung, welche das gasdichte Schließen des Pfortner-Häuschens regelt.
9. Ersatz der Chlorpumpen durch neue mit Temperaturüberwachung
10. Einsatz fernbetätigbarer Absperrarmaturen in allen Füll-, Entnahme- und Gaspendelleitungen der Chlorlagertanks
11. Chlornotpumpe verfügt über eine Temperaturüberwachung.

Definitionsgemäß sind in diesem Projekt sowohl der Analysegegenstand als auch der Untersuchungsumfang bzw. die -stufen eingeschränkt. Der Analysegegenstand ist ein Freiluft-Chlorlager mit drei Lagertanks (max. 50 t Chlor; gekühlt und druckverflüssigt; ein Tank leer als Notaufnahmetank) mit Rohrleitungen bis zu den Vorlagen (Übergang in die Produktion) innerhalb eines größeren Betriebes.

Der Untersuchungsumfang ist auf die Freisetzungsmatrix begrenzt, eine Risikoermittlung im eigentlichen Sinne wurde nicht durchgeführt. Des Weiteren werden keine Untersuchungen zu EVI (Einwirkungen von Innen) und EVA (Einwirkungen von Außen) durchgeführt; katastrophales Behälter- oder Rohrleitungsversagen (Bersten bzw. Abriss) bleiben außer Betracht.

Aus den genannten Randbedingungen ergibt sich, dass hier nur eine beispielhafte Anwendung methodischer Ansätze und Vorgehensweisen zur Durchführung einer Risikoanalyse, nachfolgend QRA (Quantitative Risk Assessment) genannt, durchgeführt werden kann, wie sie in Deutschland i. W. im kerntechnischen Bereich, in anderen Ländern jedoch auch in anderen Technologien (z. B. 6 /3/) etabliert und weit verbreitet ist. Ungeachtet des exemplarischen Charakters der Anwendung eines integralen, ganzheitlichen Ansatzes, wie er für die Sicherheitsbewertung und detaillierte quantitative Risikobewertung komplexer Systeme unter Einbeziehung der o. a. Richtlinien notwendig ist, liegt die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens darin, die Leistungsfähigkeit und das Potenzial der Methodik aufzuzeigen und schon in diesem Forschungsvorhaben erweiterte Erkenntnisse zur Verbesserung und Optimierung der Sicherheit und des Anlagenbetriebs zu gewinnen.

## **6.1 Methodische Aspekte**

Zunächst werden kurz einige allgemeine methodische Gesichtspunkte bezüglich der Durchführung einer QRA in der chemischen Industrie ausgeführt; in den nachfolgenden Kapiteln werden diese Punkte themenbezogen im Einzelnen erläutert.

Eine QRA beinhaltet die integrale Repräsentation und Analyse des Anlagenverhaltens in Reaktion auf ein Spektrum auslösender transients Ereignisse (Störungen) und Störfälle. Der wesentliche Unterschied zwischen einer rein deterministischen und einer integralen, probabilistischen Betrachtungsweise liegt darin, dass sich letztere aufgrund ihres Ansatzes nicht in einzelne Bestandteile zerlegen lässt. Das heißt, die komplexen Wechselwirkungen und die gegenseitigen Abhängigkeiten des Anlagenverhaltens werden repräsentiert und analysiert und resultieren somit in einer inhärenten Abhängigkeit der Modellierung in sich. Somit werden bei einer QRA sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte berücksichtigt und untersucht, die schon im qualitativ beschreibenden Teil erweiterte und neuartige Erkenntnisse liefern können.

Zunächst werden im Rahmen einer QRA die auslösenden Ereignisse identifiziert, d. h. die Störungen bzw. Störfälle, die zu analysieren sind. Dazu wird ein Verknüpfungsschema (Master Logic) herangezogen (vgl. z. B. 6 /3/).

Die identifizierten auslösenden Ereignisse werden dann unter Berücksichtigung von vorgesehenen Gegenmaßnahmen mit Hilfe der Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse dahingehend analysiert, mit welchen Häufigkeiten pro Jahr welche Mengen freigesetztes Chlor zu erwarten sind (Freisetzungsmatrix; ggf. auch zeit- und ortsabhängige Konzentrationsangaben). Die notwendige Differenzierung insbesondere der Ereignisablaufdiagramme ergibt sich hier bei der Analyse dieses Chlorlagers aus der Strategie der vorgesehenen manuellen Gegenmaßnahmen, die mit geeigneten Methoden und Techniken zu analysieren und zu bewerten sind.

Untersucht werden im Rahmen dieses Projektes solche auftretenden Leckagen bzw. Lecks (LOC) mit entsprechenden Eintrittshäufigkeiten, bei denen von einer Beeinträchtigung bzw. Gefährdung außerhalb des Betriebsgeländes auszugehen ist; d. h. die Untersuchung des reinen Berufsrisikos der Betriebszugehörigen ist nicht Gegenstand dieser QRA.

## 6.2 Identifikation auslösender Ereignisse

Der erste Arbeitspunkt einer QRA betrifft die Identifikation auslösender Ereignisse, d. h. der Störungen bzw. Störfälle, die zu analysieren sind. Dies geschieht mit Hilfe eines Verknüpfungsschemas (Master Logic; vgl. z. B. 6 /3/). Dieser methodische Ansatz stellt eine deduktive Analyse (TOP DOWN) dar, bei dem für ein zu definierendes TOP-Ereignis (hier: LOC) für alle Untersuchungsbereiche und Anlagenbetriebszustände auf mögliche Ursachen heruntergebrochen wird. Es gibt zwei Hauptkategorien von Ursachen bzw. Ereignissen, die zu einem LOC führen: solche, die in einem Strukturversagen resultieren, und solche, die zu einem Containment-Bypass führen. Generische Ursachen für einen LOC - für diese beiden Hauptkategorien - werden somit für eine konkrete Anlage weiter verfolgt, um mögliche anlagenspezifische Ursachen für einen LOC, wie

- ◆ mechanisches Versagen,
- ◆ Komponentenausfall,
- ◆ Bedienungsfehler,
- ◆ Instandhaltungsfehler etc.

als auslösende Ereignisse zu identifizieren.

Eine weitere Quelle zur Identifikation auslösender Ereignisse stellt eine Auswertung der Betriebserfahrung bezüglich

- ◆ Inspektion, Instandhaltung und Reparatur,
- ◆ Arbeits- und Verfahrensanweisungen sowie
- ◆ betrieblichen Störungen und Störfällen

dar. Des Weiteren können die Informationen und Erkenntnisse aus einschlägigen Datenbanken (z. B. 6 /4/, 6 /5/) herangezogen werden.

### 6.2.1 Master Logic

Zur Ermittlung der relevanten auslösenden Ereignisse wird eine so genannte Master Logic für das Versagen des sicheren Einschlusses aufgestellt, d. h. es wird deduktiv nach allen Ursachen gesucht, die einzeln oder in Kombination mit anderen zum so genannten „unerwünschten Ereignis“ - im vorliegenden Fall ein LOC („loss of containment“) in einem Chlorlager mit daraus resultierender Chlorfreisetzung - führen.

Das zu untersuchende System wird in drei Bereiche unterteilt:

- ◆ Übernahmbereich
  - Kesselwagen
  - Chlorverladearm
- ◆ Lagerbereich
  - Lagertanks
  - Kühlsystem

- Chlorkompressor
- Nottank
- Notumfüllpumpe
- ◆ Entnahmebereich
  - Chlorpumpen (Spaltrohr)
  - Chlorfilter vor Chlorpumpen

In allen drei Bereichen findet man:

- ◆ Rohrleitungen
- ◆ Armaturen (Faltenbalg, Stopfbuchsdichtung)
- ◆ Flansche (Dichtung)
- ◆ Schraubverbindungen
- ◆ Schweißnähte
- ◆ Messleitungen
- ◆ Messumformer

Speziell im Chlorverladearm gibt es Gelenke (Dichtung, Manschette).

Folgende Betriebszustände können unterschieden werden:

- ◆ Chlorübernahme (aus Kesselwagen)
- ◆ Lagern mit/ohne Entnahme von Chlor
- ◆ Rückführen aus Nottank
- ◆ Rückführen aus Chlorvorlagen
- ◆ Revision eines Lagertanks (Vorbereitung und Durchführung)

Für das Versagen des Einschlusses sind folgende Ursachen möglich:

- ◆ Überdruck in Lagertanks
  - Überfüllung
  - Druck im Kesselwagen zu hoch
  - Wasser zur Berieselung des Kesselwagens zu heiß
  - Rückströmung aus Produktionsbereich
  - Chemische Reaktion ( $\text{NCl}_3$ , Fremdstoffe, Stoffverwechslung)
  - Ausfall Kühlsystem
- ◆ Überdruck im Kesselwagen
  - Wasser zur Berieselung des Kesselwagens zu heiß
  - Druck in Lagertanks zu hoch
- ◆ Druckstoß
- ◆ Fehlöffnen Druckabsicherung
- ◆ Unterdruck
- ◆ Korrosion
  - von außen (unentdeckt unter Isolierung)
  - von innen (Feuchte im System)
  - Chloreisenbrand
- ◆ Erosion/Abrasion
- ◆ Materialermüdung
  - Schwingung
  - Alterung
- ◆ Heißlaufen von Pumpen
- ◆ Einwirkung von außen
  - Aufprall von Fahrzeugen/Transportgütern
  - Aufprall fallender Teile

- Flugzeugabsturz
- Explosion in der Umgebung
- Windlast
- Schnee-/Eislast
- Blitzschlag
- Brand
- Überflutung
- Bodensenkung
- Erdbeben
- Stromausfall
- ◆ hohe Temperatur
  - Ausfall Kühlsystem
  - extreme Wetterlage
- ◆ tiefe Temperatur (Sprödebruch)
  - extreme Wetterlage
- ◆ „Faktor Mensch“
  - Bedienungsfehler (Anlagenbetrieb)
  - Handlungsfehler (Inspektion, Wartung, Reparatur)
  - Konstruktionsfehler (Spezifikation, Ausführung)
  - Sabotage

Zur Herleitung einer Master Logic sind für jeden Systembereich in jedem möglichen Betriebszustand alle möglichen Ursachen für das Versagen des Einschusses zu prüfen. Auf diese Weise werden systematisch alle denkbaren auslösenden Ereignisse gefunden, die das Versagen des Einschusses verursachen können.

### 6.2.2 Untersuchte auslösende Ereignisse

Als mögliche auslösende Ereignisse für einen LOC werden Lecks in Behältern, Rohrleitungen mit Schweißnähten, Armaturen und Pumpen sowie Flanschen unterstellt. Als Ursachen für solche Lecks kommen in Betracht:

#### ◆ Überdruck

Überdruck könnte entstehen in Folge von Überfüllung eines Lagertanks bei der Chlorübernahme (z. B. bei Ausfall der Füllstands-Messeinrichtungen) oder durch Entnahme von Chlor aus einem Lagertank und Rücklauf in den anderen Lagertank und nachfolgenden Temperaturanstieg. Eine weitere mögliche Ursache wäre die Berieselung des Kesselwagens vor der Chlorübernahme mit zu heißem Wasser.

Bei Überdruck im System wären primär die Lagertanks gefährdet, da der Auslegungsdruck der Rohrleitungen wesentlich höher ist als der Auslegungsdruck der Tanks.

#### ◆ Korrosion

Korrosion kann am Lagertank und an Rohrleitungen von innen (verbleibende Feuchte nach einer Druckprobe) oder von außen (Witterungseinflüsse) auftreten.

#### ◆ Materialermüdung

Hiervon könnten - z. B. aufgrund von Schwingungen - insbesondere die Messleitungen zu den Manometern betroffen sein. In 6 /2/ wird allerdings festgestellt: „Schwingungen können nicht auftreten“.

◆ Chemische Reaktionen

Beim Heißlaufen einer Pumpe und Wärmeübergang auf den angrenzenden Rohrleitungsabschnitt könnte bei ca. 150°C ein Chloreisenbrand auftreten, durch den die Rohrleitung innerhalb kurzer Zeit zerstört würde. Hierbei ist es von Bedeutung, dass derzeit nur die Notpumpe eine Temperaturüberwachung und eine Temperaturschutzabschaltung aufweist. Die beiden Chlorförderpumpen werden derzeit gegen solche mit Temperaturabschaltung ausgetauscht. Oxidierbare Stoffe reagieren heftig mit Chlor, wodurch ebenfalls der sichere Einschluss des Chlors gefährdet werden könnte.

### 6.2.3 Vernachlässigungen bei der Analyse

Folgende in der Master Logic enthaltenen möglichen Ursachen für eine Freisetzung von Chlor werden aus den jeweils angegebenen Gründen nicht berücksichtigt bzw. vernachlässigt.

◆ Ausfall des Kühlsystems

Die Lagertanks haben einen Auslegungsdruck von 1,7 MPa, die übrigen Anlagenteile weisen höhere Auslegungsdrücke auf (Rohrleitungen: 4,0 MPa). Der Dampfdruck von Chlor beträgt 0,88 MPa bei 30°C und 1,43 MPa bei 50°C. Eine Erwärmung auf Umgebungstemperatur nach einem lange Zeit andauernden Ausfall des Kühlsystems bewirkt somit auch bei extremen Wetterlagen keinen unzulässig hohen Druck im Chlorklager.

Der Temperaturanstieg nach Ausfall des Kühlsystems erfolgt aufgrund der Isolierung langsam (wenige K/h), ein Ausfall der Kühlung durch die zentrale Kälteanlage würde nach Aussage des Betreibers kurzfristig entdeckt und müsste kurzfristig repariert werden, da die zentrale Kälteanlage auch für verschiedene Produktionsprozesse benötigt wird.

◆ Rückströmung aus der Produktion in das Chlorklager

Eine Rückströmung fremder Stoffe aus dem Produktionsprozess in die Vorlagen und in das Chlorklager kann vernachlässigt werden, da die Chlordosierpumpen, die aus den Chlorvorlagen fördern, als Membranpumpen ausgeführt sind und bei einem Ausfall eine Rückströmung verhindern. Die Mehrwegeventile hinter den Chlordosierpumpen sind konstruktiv so ausgeführt, dass der Weg von der Produktion zurück in die Chlorvorlage nicht freigeschaltet werden kann. Im übrigen befinden sich diese Anlagenteile außerhalb der vereinbarten Systemgrenzen, so dass die möglichen Auswirkungen eines Ausfalls im Rahmen dieses Projekts definitionsgemäß nicht untersucht werden.

◆ Stickstofftrichlorid-Problematik

Stickstofftrichlorid ( $\text{NCl}_3$ ) ist in Spuren im angelieferten Chlor enthalten. Es setzt sich am Lagertankboden ab, da es eine höhere Dichte als Chlor hat. Beim Verdampfen von flüssigem Chlor bleibt es im Lagertank zurück, da es einen höheren Siedepunkt als Chlor hat.

Eine gefährliche Anreicherung von  $\text{NCl}_3$  auf eine kritische Konzentration ist in dem untersuchten Chlorklager nicht möglich, da das Chlor in flüssiger Form aus dem Bodenbereich des Lagertanks entnommen wird. Ein Aufkonzentrieren durch Verdampfen von Chlor, wie es bei Entnahme in gasförmiger Form auftritt, ist daher ausgeschlossen. Unter Umständen vorhandene geringfügige Mengen würden zusammen mit dem entnommenen flüssigen Chlor aus dem Tank entfernt.

- ◆ **Leckagen an den Gelenken des Chlorverladearms**  
Leckagen an den Gelenken des Chlorverladearms, die nicht während der Chlorübernahme auftreten, werden vernachlässigt, da die Dichtigkeit dieser Gelenke unmittelbar vor der Übernahme überprüft wird. Dies geschieht durch Stickstoffspülung des unter Chlorgasdruck aus dem Lagertank stehenden Chlorverladearms und Überprüfung des austretenden Stickstoffs auf Chlorbeimengungen durch Geruchsprobe und Abspritzen mit Ammoniakwasser. Diese Überprüfung ist in der schriftlichen Prozedur für die Chlorübernahme jedoch nicht enthalten.
- ◆ **Überdruck in Kesselwagen infolge zu hohen Drucks im Lagertank**  
Die Kesselwagen haben mit 1,9 MPa einen höheren Auslegungsdruck als die Lagertanks (1,7 MPa). Daher ist beim Herstellen der Verbindung zwischen Kesselwagen und Lagertank zur Chlorübernahme ein Überdruckversagen des Kesselwagens durch zu hohen Druck im Lagertank auszuschließen.
- ◆ **Überdruck in Kesselwagen infolge zu hoher Temperatur**  
Ein solches Ereignis ist vorstellbar für den Fall, dass der Kesselwagen vor der Chlorübernahme mit (wesentlich) zu heißem Wasser berieselt wird. Dieses auslösende Ereignis wird bei den möglichen Ursachen für das Versagen eines Lagertanks bereits berücksichtigt („Wasser zur Berieselung des Kesselwagens zu heiß“) und muss daher nicht noch einmal betrachtet werden.
- ◆ **Überdruck in Lagertank infolge zu hohen Drucks im Kesselwagen**  
Beim Herstellen der Verbindung zwischen Kesselwagen und Lagertank könnte ein zu hoher Druck im Kesselwagen zum Überdruckversagen des Tanks führen. Bei üblichen Umgebungstemperaturen kann der Druck im Kesselwagen jedoch nicht höher sein als der Auslegungsdruck der Lagertanks (1,7 MPa), da der Dampfdruck von Chlor bei 50°C 1,43 MPa beträgt (bezüglich zu hohen Drucks im Kesselwagen aufgrund Berieselung mit zu heißem Wasser siehe oben).
- ◆ **Fehlöffnen Druckabsicherung**  
Wie in der Chlortechnologie üblich weisen weder Kesselwagen noch Chlorklager Vorrichtungen zur Druckabsicherung auf, ein Fehlöffnen ist daher nicht möglich.
- ◆ **Stoffverwechslung bei der Chlorübernahme**  
Die konstruktiven Gegebenheiten der Kesselwagen für Chlortransporte und des Chlorverladearms sind so aufeinander abgestimmt, dass der Anschluss des Verladearms an einen Kesselwagen zum Transport anderer Stoffe und damit eine Befüllung der Lagertanks mit einem anderen Stoff als Chlor auszuschließen ist. Dasselbe gilt für die Abfüllvorrichtungen beim Chlorhersteller.
- ◆ **Chlornotpumpe wird während des Stillstands undicht**  
Die Chlornotpumpe als Sicherheitssystem kommt erst dann zum Einsatz, wenn an bereits eine Leckage im Chlorklager aufgetreten ist. Wäre die Pumpe selbst dann ebenfalls undicht, so würde ihr Zuschalten dann lediglich zu einem zusätzlichen Austritt von Chlor, d. h. zu einer Erhöhung der Freisetzungsrates führen.  
Eine während des Stillstands auftretende Undichtigkeit der Chlornotpumpe könnte bemerkt werden, da in diesem Fall der Druck des zum Korrosionsschutz der Pumpe aufgeprägten Stickstoffs absinkt, was am entsprechenden Manometer vor Ort erkennbar wäre.

◆ Spröbruch bei tiefer Temperatur

Der Dampfdruck von Chlor beträgt bei 0°C nur 0,37 MPa. Stahl ist erst bei Temperaturen unter -40°C als Material zum Einschluss von druckverflüssigtem Chlor ungeeignet. Auch bei extremen Wetterlagen ist am Standort des Chlorklagers mit solchen Temperaturen nicht zu rechnen.

◆ Druckstoß

Aufgrund der geringen Fördermengen und der relativ großen Rohrleitungsquerschnitte sind die Strömungsgeschwindigkeiten gering. Das Auftreten starker Druckstöße aufgrund von Notabschaltungen ist daher nicht zu erwarten. In 6 /2/ Zitat ist heißt es hierzu: „Notabschaltungen verursachen nur geringfügige, keinesfalls zu Störungen führende Druckschwankungen“.

◆ Unterdruck

Aufgrund des Dampfdrucks von Chlor (Siedepunkt -34,1°C bei Atmosphärendruck) ist mit Absinken des Drucks in den Lagertanks unter Umgebungsdruck unter den gegebenen Randbedingungen nicht zu rechnen.

◆ Erosion und Abrasion an Tanks und Rohrleitungen

Wanddickenschwächung kann von innen durch Strömungskräfte oder von außen durch mechanischen Materialabtrag erfolgen. Diese Ursachen spielen für das Versagen von Rohrleitungen praktisch keine Rolle (vgl. Kapitel 6.5). In 6 /2/ ist hinsichtlich der Erosion ausgeführt, dass Tanks und Rohrleitungen so groß dimensioniert sind, dass keine Erosion aufgrund erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten auftreten kann.

◆ Einwirkungen von innen (EVI) und von außen (EVA)

EVI und EVA werden definitionsgemäß nicht betrachtet. Damit wird auch die nach 6 /6/ dominante Ursache für ein katastrophales Behälterversagen, das Erdbeben, nicht betrachtet. Ein solches katastrophales Behälterversagen wird daher nicht unterstellt. Ebenso bleiben Schäden infolge Aufpralls von Fahrzeugen, Transportgütern und fallender Teile definitionsgemäß außer Betracht.

#### **6.2.4 Leckgrößen und Ausströmraten**

Die nachfolgenden Angaben beziehen sich auf einen Druck im Lagertank von ca. 0,7 MPa. Dieser Druck entspricht einer Temperatur von etwas über 20°C, die aufgrund der Kühlung der Lagertanks und - bei Ausfall der Kühlung - aufgrund der Isolierung der Lagertanks als konservativer Wert angesehen werden kann.

Leckgrößen < 1 mm<sup>2</sup> verursachen in einem Abstand von 100 m auch bei Ausströmen von flüssigem Chlor lediglich unbedenkliche Chlorkonzentrationen. Diese Leckgrößen werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung daher nicht weiter betrachtet.

Leckgrößen > 50 mm<sup>2</sup> mit Ausströmung von flüssigem Chlor bedingen innerhalb des Chlorklagers und Betriebsgeländes innerhalb kürzester Zeit so hohe Chlorkonzentrationen, dass davon ausgegangen werden muss, dass Gegenmaßnahmen nur sehr zeitverzögert (Fremdfeuerwehren ohne Unterstützung des Betriebspersonals) zu erwarten sind.

Näher betrachtet werden daher folgende Leckgrößen mit den dazu gehörigen Ausströmraten für flüssiges bzw. gasförmiges Chlor:

Leckgröße [mm <sup>2</sup> ]	Ausströmrates flüssig [g/s]	Ausströmrates gasförmig [g/s]
1	12	1,2
3	36	3,6
5	60	6
10	120	12
20	240	24
30	360	36
50	600	60

### 6.3 Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse

Die in diesem Vorhaben angewandte Methode der Ereignisablaufanalyse unter Zugrundelegung von 6 /7/ zur Durchführung einer QRA ist problemadäquat.

Die Abhängigkeit verschiedener Schutz- bzw. Sicherheitsfunktionen im Ereignisablaufdiagramm (Modellierung der nur mittelbar benötigten, teilweise gemeinsamen, Systeme in den Fehlerbäumen) wird korrekt durch die Auswertung sämtlicher Fehlerbäume eines Ereignisablaufes als Gesamtfehlerbaum berücksichtigt. Damit erhält man bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Übergang eines auslösenden Ereignisses in die betrachteten Endereignisse (Anlagenschadenszustände bzw. Freisetzungskategorien). Durch Multiplikation dieser Wahrscheinlichkeiten mit der erwarteten Eintrittshäufigkeit eines auslösenden Ereignisses erhält man erwartete Eintrittshäufigkeiten von Endereignissen bzw. Sequenzen. Die Eintrittshäufigkeiten von gleichartigen oder ähnlichen Sequenzen werden zu der Gesamthäufigkeit einer Freisetzungskategorie addiert.

Die in diesem Vorhaben angewandte Methode der Fehlerbaumanalyse unter Zugrundelegung von 6 /8/ und 6 /9/ zur quantitativen Auswertung der Ereignisablaufdiagramme einer QRA entspricht ebenfalls dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Durch die Verwendung induktiver Analyseverfahren wird die Erstellung der Fehlerbäume unterstützt, in denen der Ausfall eines Systems auf die Ausfälle von Teilsystemen und deren Ausfälle auf die von Komponenten zurückgeführt wird.

#### 6.3.1 Sicherheitsfunktionen/Ereignisablauf

Im Falle des unerwünschten Ereignisses LOC tritt Chlor entsprechend der Leckgröße (mm<sup>2</sup>) mit einer bestimmten Ausströmrates (kg/s) aus dem Tanklager in die Umgebung aus.

Bei den untersuchten Leckgrößen bestehen für die Feuerwehr unter Vollschutz folgende Möglichkeiten, die Ausströmung von Chlor mengenmäßig und/oder zeitlich zu begrenzen:

- ◆ Absaugung des aus dem Leck ausströmenden Chlors
- ◆ Abdichten des Lecks durch geeignete Dichtungsmaterialien
- ◆ Absperren des Lecks durch Schließen von Armaturen
- ◆ Notpumpen des Chlors in den Nottank

Laut Auskunft des Betreibers ist die Absaugung von aus einem Leck ausströmendem flüssigem Chlor durch die Unterdruckanlage und Neutralisation im zentralen Abgaswäscher bis zu einer Leckgröße von maximal  $0,1 \text{ mm}^2$  wirksam. Diese Kategorie von Lecks wird in der vorliegenden Analyse nicht betrachtet.

Das Abdichten eines Lecks kann nach Aussage des Betreibers z. B. durch Anlegen einer Manschette an eine defekte Rohrleitung oder durch Einschlagen eines Holzkeils in das Leck erfolgen.

Bezüglich des Absperrens des Lecks ist die Lecklage wichtig. Es gibt absperrbare und nicht absperrbare Lecklagen. Die absperrbaren können durch Schließen von Armaturen (Handarmaturen bzw. pneumatisch betätigte Armaturen) von den Lagertanks und den Chlorvorlagen abgetrennt werden. Nach erfolgter Abtrennung wird dann lediglich der Chlorinhalt des nicht abgesperrten Rohrleitungsabschnitts freigesetzt. Je nach Lecklage müssen mehr oder weniger Armaturen geschlossen werden, um das Leck in alle Richtungen zu isolieren.

Für die (im Folgenden mit „pessimistisch“ bezeichnete) Annahme, dass sich praktisch alle Armaturen des Chlorlagers bei Eintritt des LOC in offener Stellung befinden (vgl. Abb. 3-3 und Abb. 3-4), zeigt Tab. 6-1 die jeweilige Art und Anzahl zu betätigender Armaturen.

Erläuterung der in Tab. 6-1 und Tab. 6-2 verwendeten Abkürzungen:

HA = Handarmatur (Betätigung vor Ort)

PA = pneumatisch betätigte Armatur (fernbedienbar)

LT = Lagertanks

CV = Chlorvorlagen

KW = Kesselwagen

Die zu jeder Lecklage angegebene Koordinate dient zum schnelleren Auffinden des betreffenden Rohrleitungsabschnitts in den schematischen Schaltplänen (Abb. 3-3 bis Abb. 3-6).

In den Tabellen 6-1 und 6-2 sowie 6-10 bis 6-13 sind die Angaben zu den Lecklagen 59a bis 65a *kursiv* gedruckt. Diese Angaben gelten für den Entladevorgang (Chlorübernahme), während die entsprechenden Angaben zu den Lecklagen 59 bis 65 für den Fall der Chlorentnahme für die Produktion gelten.

**Tab. 6-1: Absperrung bei pessimistischer Annahme über die Armaturenstellungen**

Leck-lage	Absperrung	alternative Absperrung	Gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
1	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	D6
2	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	D4
3	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	D2
4	1HA+1PA		LT + CV		D6
5	1HA+1PA		LT + CV		D4
6	1PA		LT + CV		D2
7	2HA+1PA	1HA+1PA	LT + CV		D6
8	2HA+1PA	1HA+1PA	LT + CV		D4
9	2HA		LT + CV		D2
10	3HA	1HA+1PA	LT + CV		D5
11	3HA	1HA+1PA	LT + CV		D4
12	2HA		LT + CV		D3
13	4HA		LT + CV		D4
14	4HA		LT + CV		C4
15	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				B5
16	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				A5
17	2HA		LT + CV		B6
18	2HA		LT + CV		B4
19	2HA		LT + CV		B4
20	3HA		LT + CV		B4
21	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				B4
22	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				A4
23	2HA		LT + CV		A4
24	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
25	2HA		LT + CV		B3
26	2HA		LT + CV		B4
27	3HA		LT + CV		B5
28	3HA		LT + CV		B3
29	2HA		LT + CV		C5
30	2HA		LT + CV		C3
31	1HA		LT + CV		C1
32	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C6
33	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C4
34	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	C2
35	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C5
36	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C3

Leck- lage	Absperrung	alternative Absperrung	Gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
37	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	C1
38	6HA	5HA	LT + CV		C6
39	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
40	3HA		LT + CV		C2
41	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	J5
42	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	J3
43	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	J1
44	2HA		LT + CV		J5
45	2HA		LT + CV		J3
46	1HA		LT + CV		J1
47	2HA		LT + CV		J3
48	nicht erforderlich		---	Vor.: Notpumpe inert.	J3
49	nicht erforderlich		---	Vor.: Notpumpe inert.	J3
50	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
51	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
52	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
53	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
54	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
55	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
56	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
57	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
58	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
59	2HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H5
60	2HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H3
61	2HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H4
62	1HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H5
63	1HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H6
64	1HA		LT + CV	kein Entladevorgang	H6
65	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H7
59a	2HA		KW + LT	Entladevorgang	H5
60a	2HA		KW + LT	Entladevorgang	H3
61a	3HA	2HA+1PA	KW + LT	Entladevorgang	H4
62a	2HA	1HA+1PA	KW + LT	Entladevorgang	H5
63a	1HA+1PA		KW + LT	Entladevorgang	H6
64a	2PA		KW + LT	Entladevorgang	H6
65a	2PA		KW + LT	Entladevorgang	H7
66	3HA		LT + CV		G3
67	3HA		LT + CV		G3

Leck-lage	Absperrung	alternative Absperrung	Gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
68	2HA		LT + CV		G3
69	2HA		LT + CV		G2
70	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
71	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
72	2HA		LT + CV		F3
73	2HA		LT + CV		G2
74	2HA		LT + CV		G2

Für die Konfiguration der Armaturenstellungen, die vom Betreiber für den Normalbetrieb des Chlorlagers bzw. die Chlorübernahme angegeben wird (vgl. Abb. 3-5 und Abb. 3-6) und die im Folgenden mit „realistisch“ bezeichnet wird, ist der entsprechende Sachverhalt in Tab. 6-2 dargestellt.

**Tab. 6-2: Absperrung bei realistischer Annahme über die Armaturenstellungen**

Leck-lage	Absperrung	alternative Absperrung	gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
1	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	D6
2	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	D4
3	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	D2
4	1HA+1PA		LT + CV		D6
5	1HA		LT + CV		D4
6	nicht erforderlich		---		D2
7	1HA+1PA		LT + CV		D6
8	nicht erforderlich		---		D4
9	nicht erforderlich		---		D2
10	2HA	1HA+1PA	LT + CV		D5
11	nicht erforderlich		---		D4
12	nicht erforderlich		---		D3
13	3HA		LT + CV		D4
14	3HA		LT + CV		C4
15	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				B5
16	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				A5
17	1HA		LT + CV		B6
18	2HA		LT + CV		B4
19	2HA		LT + CV		B4
20	2HA		LT + CV		B4
21	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				B4
22	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				A4

Leck- lage	Absperrung	alternative Absperrung	gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
23	nicht erforderlich		---		A4
24	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
25	1HA		LT + CV		B3
26	nicht erforderlich		---		B4
27	1HA		LT + CV		B5
28	1HA		LT + CV		B3
29	1HA		LT + CV		C5
30	1HA		LT + CV		C3
31	nicht erforderlich		---		C1
32	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C6
33	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C4
34	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	C2
35	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C5
36	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	C3
37	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	C1
38	2HA		LT + CV		C6
39	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
40	nicht erforderlich		---		C2
41	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	J5
42	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	J3
43	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	J1
44	nicht erforderlich		---		J5
45	nicht erforderlich		---		J3
46	nicht erforderlich		---		J1
47	nicht erforderlich		---		J3
48	nicht erforderlich		---	Vor.: Notpumpe intert	J3
49	nicht erforderlich		---	Vor.: Notpumpe intert	J3
50	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
51	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
52	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
53	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
54	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
55	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
56	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H5
57	nicht möglich		LT + CV	deckt Tankleck mit ab	H3
58	nicht erforderlich		---	Vor.: Nottank ist leer	H1
59	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H5
60	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H3

Leck- lage	Absperrung	alternative Absperrung	gefährdetes Inventar	Kommentar	Koordinate
61	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H4
62	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H5
63	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H6
64	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H6
65	nicht erforderlich		---	kein Entladevorgang	H7
59a	2HA		KW + LT	Entladevorgang	H5
60a	nicht erforderlich		---	Entladevorgang	H3
61a	2HA	1HA+1PA	KW + LT	Entladevorgang	H4
62a	2HA	1HA+1PA	KW + LT	Entladevorgang	H5
63a	1HA+1PA		KW + LT	Entladevorgang	H6
64a	2PA		KW + LT	Entladevorgang	H6
65a	2PA		KW + LT	Entladevorgang	H7
66	nicht erforderlich		---		G3
67	nicht erforderlich		---		G3
68	nicht erforderlich		---		G3
69	nicht erforderlich		---		G2
70	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
71	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
72	nicht erforderlich		---		F3
73	nicht erforderlich		---		G2
74	nicht erforderlich		---		G2

Mit Hilfe des „Notumpumpens“ kann das Inventar eines Lagertanks in den Nottank befördert werden. Die Chlornotpumpe fördert pro Stunde ca. 27 m<sup>3</sup> flüssiges Chlor. Das Umpumpen des Inhalts eines vollen Lagertanks (20 m<sup>3</sup>) dauert somit ca. 45 Minuten.

Zur Verminderung der Ausbreitung von Chlor in die Umgebung des Lagers ist für den Fall einer Chlorfreisetzung das Erstellen so genannter Wasservorhänge durch die Feuerwehr vorgesehen. Hierbei handelt es sich jedoch im Sinn der vorliegenden Analyse nicht um eine Sicherheitsfunktion zur Beherrschung des LOC sondern lediglich um eine schadensbegrenzende Maßnahme. Die Zuverlässigkeit dieser Maßnahme wird daher nicht quantifiziert.

### 6.3.2 Ereignisablaufdiagramme

Aufgrund der geringen Zahl von Schutz- bzw. Sicherheitsfunktionen ist das Ereignisablaufdiagramm (Abb. 6-5 im Anhang) sehr einfach strukturiert. Eine stärkere Differenzierung ergäbe sich durch die Integration der vorgesehenen manuellen Gegenmaßnahmen (vgl. Kap. 6.4), bei der abhängig vom Erfolg bzw. Nicht-Erfolg vorgesehener Personalhandlungen eine anlagen-spezifische und ereignisablaufabhängige Modellierung und Bewertung vorzunehmen ist.

### 6.3.3 Fehlerbäume

In den Fehlerbäumen (Abb. 6-6 bis Abb. 6-28 im Anhang) sind die Ausfälle abgebildet, die zum Versagen der Sicherheitsfunktionen „Absperren des Lecks durch Schließen von Armaturen“ bzw. „Notumpumpen des Chlors in den Nottank“ führen.

Für das Abdichten eines Lecks existiert kein verfahrenstechnischer Fehlerbaum, da hierfür ausschließlich die Nichtverfügbarkeit von Personalhandlungen zu berücksichtigen ist (vgl. Kap. 6.4).

Für das erfolgreiche Absperren sind sowohl Personalmaßnahmen als auch die Funktion der entsprechenden Armaturen erforderlich. Für die Personalmaßnahmen sind in den Fehlerbäumen bisher lediglich Ersatzelemente (Symbol: Raute) vorgesehen. Die entsprechenden logischen Verknüpfungen müssen für die Auswertung noch entwickelt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an das Absperren werden die verschiedenen Lecklagen kategorisiert und zu entsprechenden Gruppen zusammengefasst (siehe Tab. 6-3).

**Tab. 6-3: Kategorisierung u. Gruppierung der Lecklagen**

Gruppe	Lecklage(n)
1	4, 5, 7m <sup>3)</sup>
2	6
3	7, 8
4	9, 12, 17, 18, 19, 23, 25, 26, 29, 30, 44, 45, 47, 59, 60, 61, 68, 69, 72, 73, 74, 20m, 38m
5	10, 11
6	10m
7	20, 27, 28, 40, 66, 67, 13m, 14m
8	31, 46, 62, 63, 64, 5m, 17m, 25m, 27m, 28m, 29m, 30m
9	38
10	59a <sup>4)</sup>
11	61a
12	62a, 61am
13	63a
14	64a

Jede dieser 14 Gruppen ist in den Fehlerbäumen (Abb. 6-6 bis Abb. 6-28 im Anhang) berücksichtigt.

<sup>3</sup> Lecklage-Angaben ohne Zusatz beziehen sich auf die pessimistische Annahme, dass alle Armaturen offen stehen, Lecklage-Angaben mit dem Zusatz "m" auf die vom Betreiber angegebenen Armaturenstellungen.

<sup>4</sup> Lecklage-Angaben mit dem Zusatz "a" beziehen sich auf den Betriebszustand "Chlorübernahme".

Voraussetzung für das „Notumpumpen“ ist - neben den erforderlichen Handlungen des Personals und der Funktionsfähigkeit der zu betätigenden Armaturen - zusätzlich die Funktion der Chlornotpumpe.

#### **6.4 Personalhandlungen**

Die Analyse und Bewertung von Handlungen und Maßnahmen der Betriebszugehörigen (Personal) während des Normalbetriebs und bei auftretenden Störungen bzw. Störfällen - nicht per se, sondern in der Wechselwirkung mit der Arbeitsumgebung - wird als Human-Factors (HF)-Analyse bezeichnet.

Fehler bei der Bedienung störfallrelevanter Anlagen ("Human Factors") sind auch nach Einschätzung der Störfall-Kommission des Bundesumweltministeriums ein bedeutsamer Faktor bei der Bewertung der Anlagensicherheit 6 /10/.

Dort wurden auf breiter Basis die bestehenden unterschiedlichen Lösungsansätze diskutiert und wünschenswerte und mögliche weitere Verbesserungen in der Behandlung und Bewertung vorgeschlagen.

Gleichwohl stehen auch heute schon Methoden zur Verfügung, um diesen Themenbereich für Industrieanlagen bewerten zu können.

Die HF-Analyse ist für die hier durchzuführende QRA von besonderer Relevanz, da **alle** vorgesehenen Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC, d. h. einer Störung bzw. eines Störfalles vom Personal durchzuführen sind, also keine automatischen Sicherheitsfunktionen bestehen. Die Analyse der Auswirkungen fehlerhafter Personalhandlungen vor Auftreten eines LOC ist ebenfalls Gegenstand der HF-Analyse.

Für die Durchführung der HF-Analyse werden - entsprechend der jeweiligen Fragestellung - verschiedene Methoden und Techniken angewandt, die nachfolgend kurz erläutert werden; dabei wird die grundlegende Struktur, innerhalb derer diese spezifischen Methoden und Techniken zum Einsatz kommen und untereinander verbunden werden, zunächst kurz dargestellt.

#### **Einordnung und Struktur**

Die Analyse und Bewertung von Maßnahmen des Personals während des normalen Betriebs und bei Störungen bzw. Störfällen wird in folgende Handlungskategorien unterteilt:

- A Personalhandlungen vor Eintritt eines auslösenden Ereignisses während des bestimmungsgemäßen Betriebs,
- B Personalhandlungen, die ein auslösendes Ereignis zur Folge haben; insbesondere jene, die zusätzlich den Ausfall sicherheitsrelevanter Einrichtungen bzw. Systeme verursachen,
- C Personalhandlungen nach Eintritt eines auslösenden Ereignisses (Störung bzw. Störfall).

Grundsätzlich sind die folgenden Aspekte zu untersuchen und zu bewerten:

- Schichtbesetzung, Personalverteilung, -bedarf, generelle Strategie, Aufgabenverteilung,
- wesentliche Aufgaben, Reihenfolge, Zeitbedarf; Informationsgespräche oder -begehung,
- Schulung, Unterweisung, Übungen.

Ziel dieser Untersuchungen und Analysen ist eine Handlungsmodellierung für alle Betriebszustände und Ausgangssituationen.

Zur Durchführung dieser HF-Analyse ist zunächst eine Analyse der Arbeitsumgebung durchzuführen. Dies beinhaltet die Erfassung und Analyse von Informationen und Daten des konkreten Betriebes bzw. Betriebsbereiches, für welche die QRA durchzuführen ist. Dazu werden vor allem folgende Arbeiten durchgeführt:

- Betriebsbegehungen, bei denen generelle Informationen zu Anlagenlayout (allgemein), Warten, administrative Regelungen etc. gesammelt werden,
- die Erfassung und Beschreibung der übergeordneten Betriebs- und Systemziele sowie der entsprechenden Funktionen,
- die Analyse der vorhandenen Arbeitsanweisungen und Prozeduren, welche HF-bezogene Aspekte aufweisen,
- die Analyse umgebungs- und kontextabhängiger Bedingungen und Einflussfaktoren, welche möglicherweise die Durchführung von Personalhandlungen beeinflussen und
- die Aufgabenanalyse, bei der die konkreten Handlungen und Maßnahmen des Personals ("aktuelle Manifestation bei der Durchführung") analysiert werden.

Für die Analyse der vorhandenen Arbeitsanweisungen und Prozeduren wird zur Strukturierung und Klassifizierung der Arbeitsumgebung und der Mensch-Maschine/Umgebungs-Interaktion die Technik SHEL 6 /11/ eingesetzt.

Für die Durchführung der Aufgabenanalyse kann eine hierarchische Methode 6 /11/ sowie eine Dekompositionsmethode (tabellarisch) 6 /12/ zum Einsatz kommen.

Nach der Analyse der Arbeitsumgebung ist auf Basis einer Auswertung der Betriebserfahrung eine retrospektive Analyse von aufgetretenen Störungen bzw. Störfällen zielführend, um zusätzlich Ergebnisse und Erkenntnisse aus der konkreten Arbeitsumgebung für die Durchführung der prospektiven Analyse (QRA) nutzen zu können; für die Durchführung dieser Arbeiten kann die Methodik HERMES 6 /13/, 6 /14/ genutzt werden.

Die Informationen, Ergebnisse und Erkenntnisse der Analyse der Arbeitsumgebung und einer retrospektiven Analyse fließen nun zusammen in die Durchführung der prospektiven Analyse ein, d. h. in die detaillierte qualitative und quantitative Analyse und Bewertung von fehlerhaften Personalhandlungen. Dazu können die Methoden bzw. das Verfahren THERP 6 /15/ und ASEP 6 /16/ herangezogen werden.

Abschließend ist die Integration der HF-Analyse mit der Systemtechnik für die Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse durchzuführen.

#### **6.4.1 Methoden und Techniken**

Nachfolgend werden die o. a. Methoden und Techniken kurz skizziert, insbesondere im Hinblick auf die jeweilige Zielsetzung.

## SHEL

Die Technik SHEL 6 /11/ wird angewandt, um vorhandene Arbeitsanweisungen und Prozeduren zu analysieren im Hinblick auf die Interaktion, d. h. die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Elementen in einer Arbeitsumgebung. SHEL bietet die vollständige Struktur als auch eine generische Taxonomie, um eine Arbeitsumgebung und ein technologisches System zu strukturieren und zu klassifizieren, wobei der Schwerpunkt bei der HF-Analyse auf der Interaktion des Menschen mit der Umgebung liegt.

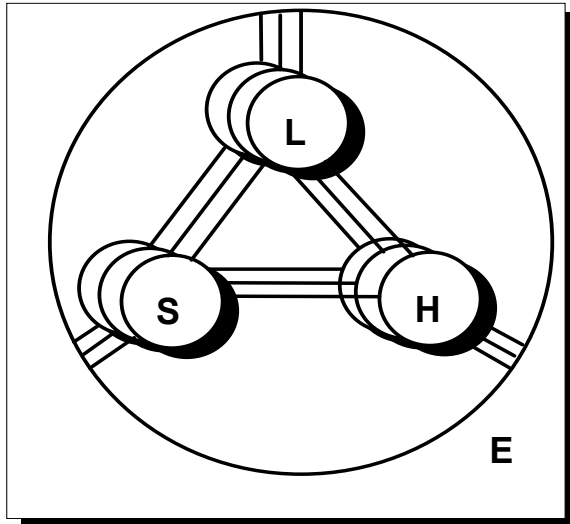
Es gibt vier verschiedene Elemente in einem Mensch-Maschine/(Arbeits-) Umgebungs-System, deren Interaktion, d. h. Verbindung bzw. Wechselwirkung untersucht und erfasst wird. Dadurch kann z. B. eine Prozedur, wie die *Chlorübernahme* (vgl. Kapitel 6.4.2.3 dieses Berichtes) vor einer Beobachtung strukturiert und klassifiziert werden, um ausgewählte HF-relevante Gesichtspunkte und mögliche Einflussfaktoren zu identifizieren.

Die schematische Darstellung der Technik SHEL ist in Abb. 6-7 dargelegt. Die vier Elemente, deren jeweilige Interaktion bei der Durchführung einer Prozedur z. B. erfasst wird, sind:

<b>S</b>	Software:	Regeln, Anweisungen, Anleitungen, Gesetze, Praktiken, Gebräuche
<b>H</b>	Hardware:	Ausrüstung, Geräte, Bedienschnittstellen, -elemente, Anzeigen, Maschinen
<b>E</b>	Environment:	Arbeitsumfeld (physikalische, organisatorische, ökonomische, politische Aspekte)
<b>L</b>	Liveware:	Menschen.

Dabei ist zu beachten, dass es mehrere "Einheiten" *Liveware*, *Hardware* und *Software*, die miteinander in Verbindung stehen, geben kann (z. B. Personal in Warte und vor Ort); das Arbeitsumfeld *Environment* gibt es für einen konkreten Betrieb nur einmal.

Als mögliche Kombinationen zwischen den vier Elementen in der SHEL-Strukturierung sind somit vorstellbar: L-S, L-H, L-E, L-L, S-H, S-E, H-H und H-E, wobei der Schwerpunkt auf den ersten vier Interaktionen liegt.



**Abb. 6-1: Die Technik SHEL (6 /10/)<sup>5</sup>**

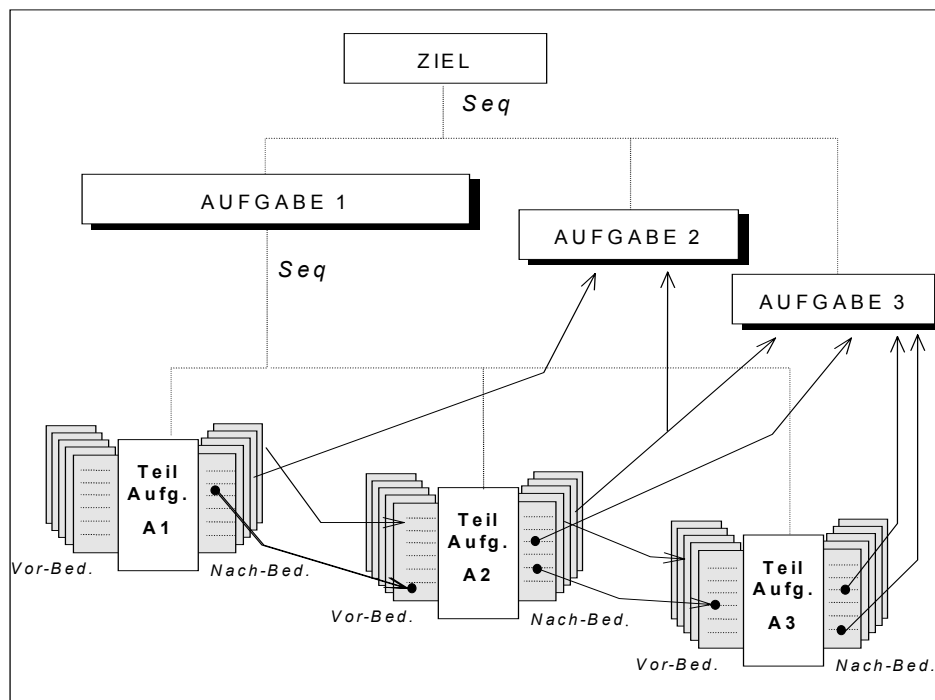
### **Hierarchische Aufgabenanalyse**

Eine hierarchische Aufgabenanalyse eignet sich insbesondere dann, wenn es für die Durchführung von Maßnahmen keine schriftlichen betrieblichen Unterlagen oder keine vorgeplanten Prozeduren gibt. In einer systematischen Vorgehensweise (vgl. Abb. 6-2) wird abhängig von einer durch eine Prozedur zu erreichenden Zielsetzung rekursiv eine Planung entwickelt, bei der Aufgaben und Teilaufgaben identifiziert werden; dabei können die jeweiligen Bedingungen bzw. Verhältnisse vor und nach Durchführung einer (Teil-)Aufgabe analysiert, erfasst und berücksichtigt werden.

Neben der Anwendung in einer HF-Analyse für eine QRA eignet sich eine hierarchische Aufgabenanalyse insbesondere für die Entwicklung von Prozeduren und betrieblichen Unterlagen.

<sup>5</sup>

S: Software, H: Hardware, E: Environment, L: Liveware



**Abb. 6-2: Grundstruktur einer hierarchischen Aufgabenanalyse (6 /11/)**

### **Dekompositionsmethode (tabellarisch)**

Die Dekompositionsmethode in einer tabellarischen Form 6 /12/ kommt für die Analyse von Aufgaben zum Einsatz, für die es detaillierte schriftliche Anweisungen gibt. Eine Vorlage für die Durchführung einer derartigen Aufgabenanalyse ist in Abb. 6-3 gezeigt.

Die durchzuführenden Aufgaben werden bei dieser Dekompositionsmethode heruntergebrochen in Einzelmaßnahmen (-handlungen, Aufgabenbestandteile). Zusätzlich werden für jede dieser Einzelhandlungen die potentiellen Fehlermöglichkeiten identifiziert, d. h. mögliche Unterlassungs- und Ausführungsfehler werden im Einzelnen ermittelt.

Zu beachten ist dabei, dass mit dieser Methode Fehlermöglichkeiten, die sich aus der heruntergebrochenen tabellarischen Form einer schriftlichen Anweisung nicht ergeben - z. B. im kognitiven Bereich, wie Diagnose, Entscheidungsfindung oder administrative Vorgaben oder Praktiken - nicht erfasst werden.

**Aufgabenanalyse (tabellarisch)**

Schritt [Vorgabe, Arbeitsan- weisung]	Betriebsteil	Maßnahme	Armatur, Betätigungsbaustein, -feld, -hinweis, Anzeige	Platz/Ort	Notizen (u. a. Kontrollen)	Zeiten	unabhängbare Voraussetzung	Meldungen	Fehlermöglichkeiten

**Abb. 6-3: Vorlage für die Durchführung der Dekompositionsmethode (tabellarisch) (6 /12/)**

## **HERMES**

Die Auswertung der Betriebserfahrung für eine retrospektive Analyse von aufgetretenen Störungen bzw. Störfällen kann unter Nutzung der Methodik HERMES 6 /13/, 6 /14/ durchgeführt werden.

Die Methodik HERMES beinhaltet ein umfassendes, konsistentes Instrumentarium zur Durchführung systematischer Sicherheitsanalysen sowohl retro- als auch prospektiver Art. Ein wesentliches Merkmal stellt insbesondere die Berücksichtigung des kognitiven Aspektes menschlichen Handelns in der dynamischen Wechselwirkung mit der Arbeitsumgebung dar.

Die grundlegenden Schritte bei einer retrospektiven Analyse der Betriebserfahrung beinhalten

- die Identifizierung von fehlerhaften Aktionen (Handlungen) sowie
- die eigentliche Ursachenanalyse, bei der die kausalen Zusammenhänge festgestellt werden.

Für die Identifizierung von fehlerhaften Aktionen ist zunächst eine Informationssammlung und -erfassung durchzuführen. Danach erfolgt eine strukturierte, zeitorientierte Ereignisablaufdarstellung. Die fehlerhaften Aktionen werden dann aufgedeckt durch den Vergleich der realen Handlungssequenz mit den vorgesehenen, durchzuführenden Prozeduren.

Für die Analyse der kausalen Zusammenhänge sind zunächst die aufgetretenen Fehlerarten zu identifizieren. Danach erfolgt die Anwendung einer Taxonomie und des dazu korrelierten Modells mit dem Ziel der Identifikation von komplexen Ursachen, die jeweils zu Fehlhandlungen beigetragen haben.

## **THERP**

Der Anwendungsbereich von THERP 6 /15/ bezieht sich insbesondere auf die Bewertung von fertigungs- und regelbasiertem Verhalten bei Maßnahmen, die in betrieblichen Unterlagen beschrieben sind; bei der quantitativen Bewertung ist auf eine sorgfältige Anwendung der Daten aus 6 /15/ zu achten, besonders im Hinblick auf die Berücksichtigung betriebsspezifischer und ereignisabhängiger Randbedingungen.

Das Verfahren THERP wird in vier Phasen durchgeführt, von denen die beiden ersteren qualitativer Art sind und diesbezüglich den in anderen Ansätzen und Methoden vorgesehenen Prozeduren ähneln (vgl. auch Einführung in Kapitel 6.4 dieses Berichtes). Die quantitative Bewertung von Personalhandlungen und ihre Einbindung in die System- bzw. Ereignisablaufanalyse stellen dagegen eine Besonderheit des Verfahrens THERP dar.

Die qualitative Bewertung beinhaltet eine zehn Punkte umfassende Analyse des Mensch/Maschine-Systems, bei der u. a. eine detaillierte Aufgabenanalyse durchgeführt wird. Außerdem werden bei entsprechenden Gesprächen oder Begehungen Durchführungscharakteristiken, Aufgabenverteilungen, Personalbedarf, -zuordnungen, Zeitangaben bzw. -budgets, verfügbare Informationen etc. identifiziert. Nach dem Herunterbrechen jeder Aufgabe in Aufgabenbestandteile (-einheiten) und der Identifikation potentieller Fehler können HRA-Ereignisbäume entwickelt werden.

Im quantitativen Teil werden Wahrscheinlichkeiten für Fehlerereignisse (Human Error Probabilities, HEP) geschätzt, die im wesentlichen auf der Datenbasis des THERP-Handbuches basieren. Die in Kapitel 20 des Handbuches enthaltenen Daten wurden aus einer Mischung von em-

pirischen Daten und Bewertungen durch die Autoren dieser Technik abgeleitet und schließen eine implizite Klassifizierung von menschlichen Fehlhandlungen ein. Prinzipiell lassen sich die mit THERP quantifizierbaren Fehlhandlungen auf zwei Fehlerarten reduzieren: Unterlassungsfehler und Durchführungsfehler. Im Hinblick auf die Diagnose wurden für die Wartenmannschaft gemeinsam in 6 /15/ HEPs für eine adäquate Reaktion (Wahrnehmen, Erkennen, Entscheiden) auf ein anomales Ereignis in Abhängigkeit von der Zeit seit Anstehen eines entsprechenden Alarms global und vorläufig abgeschätzt. Kognitive Aspekte von Personalhandlungen können nur bis zu einem gewissen Grad durch Abhängigkeitsmodelle sowie Einflussgrößen (Performance Shaping Factors, PSF) berücksichtigt werden. Die HRA-Ereignisbäume werden dann am Ende des quantitativen Prozesses ausgewertet, wobei die Möglichkeit, Fehler zu entdecken und wieder auszugleichen, noch untersucht und in den HRA-Ereignisbäumen berücksichtigt werden kann.

### **ASEP**

Für die Bewertung von Personalhandlungen stehen auch Screening-Verfahren, z. B. ASEP 6 /16/, zur Verfügung, deren Anwendung mit einem deutlich geringeren Arbeitsaufwand im Vergleich zu einer vollständigen THERP-Analyse verbunden ist.

ASEP wurde von Swain selbst als "Kurzversion" der Konzepte, Methoden, Modelle und Daten des von ihm maßgeblich erarbeiteten THERP-Handbuches entwickelt (im Auftrag der US-NRC) mit der Intention, Systemanalytiker in die Lage zu versetzen, mit minimaler Unterstützung von HF-Analysten konservativ abdeckende HEPs zur Integration in QRAs abzuschätzen. Unter Beachtung des Anwendungsbereiches sowie der Anleitungen von ASEP werden mit dieser "Kurzversion von THERP" - je nach untersuchten Personalhandlungen z. T. deutlich - konservativere Werte im Vergleich zu einer umfangreichen, vollständigen THERP-Analyse ermittelt.

Sind die Ergebnisse für einzelne auslösende Ereignisse oder für die QRA insgesamt bei Verwendung konservativer HEPs "akzeptabel", ist der Aufwand für eine vollständige THERP-Analyse nicht gerechtfertigt; ergibt sich jedoch die Notwendigkeit einer weniger groben Vorgehensweise, um zu günstigeren Ergebnissen zu gelangen, werden die aufwendigeren Arbeiten für das Verfahren THERP durchgeführt.

## **6.4.2 Analyse der Arbeitsumgebung**

Im ersten Arbeitsschritt der HF-Analyse werden generelle Informationen und Daten des zu untersuchenden Betriebes bzw. Betriebsbereiches erfasst und analysiert. Basis der durchgeführten Arbeiten stellen die Sicherheitsanalyse des Betreibers 6 /2/ sowie die mündlichen Aussagen und schriftlichen Informationen dar, die anlässlich der Besprechungen am 19.01.2000, 11./12.04.2000 und 21.06.2000 vom Betreiber zur Verfügung gestellt wurden.

### **6.4.2.1 Betriebsbegehungen**

#### **Allgemeines Anlagenlayout**

Bei dem Untersuchungsgegenstand handelt es sich um einen chlorverarbeitenden Betrieb der chemischen Industrie (1. Genehmigung 1962). Der gesamte Betrieb ist mittelgroß, der hier zu untersuchende Betriebsbereich, das Chlorlager, nimmt davon nur einen sehr kleinen Teil ein.

Das Werksgelände ist eingezäunt und die Pforte ist ständig (24 h) besetzt. Der Betrieb ist von drei Seiten gut zugänglich und nachts beleuchtet; Flucht- und Rettungswege innerhalb des Lagers sind vorhanden. Zur Feststellung der vorherrschenden Windverhältnisse gibt es Windrichtungs- und -geschwindigkeitsanzeiger in der Mess-Warte sowie Windsäcke.

### **Chlorklager**

Analysiert wird das als Freiluftanlage ausgeführte Chlorklager mit drei Lagertanks (je 20 m<sup>3</sup>; druckverflüssigtes Chlor (0,68 MPa, 20 °C); ein Tank leer als Notaufnahmetank) mit den Rohrleitungen bis zu den Vorlagen (Übergang in die Produktion). Die zwei Lagertanks sind liegend auf je zwei Betonsockeln in einer separaten Betonwanne untergebracht. Ein dritter Reservechlortank gleichen Volumens wird immer leer bereitgehalten, um notfalls die Gesamtmenge eines Tanks aufnehmen zu können. Die Lagertanks sind oberhalb über Laufstege verbunden. Das Auffangvolumen der Bodenwanne ist größer als das Volumen aller Tanks. Die Bodenwanne ist mit einem separaten Pumpensumpf ausgerüstet.

Je eine Chlorpumpe fördert aus einem Lagertank in die Vorlagen. Die Pumpen können nur vor Ort in Betrieb genommen werden, ihre Abschaltung kann auch von einer Warte (s. u.) aus erfolgen.

Des Weiteren gibt es eine Notpumpe für alle Tanks gemeinsam sowie Absperrventile, Füllgrad- und Druckmessungen.

Die Absperrventile in den Rohrleitungen sind i. W. Handarmaturen, ohne Kennzeichnung; die Ventilstellung ist an der Spindel oder an der Lage des Betätigungshebels relativ zur Rohrleitung erkennbar.

### **(Mess-)Warten, Schichtbesetzung**

Die Produktion wird von zwei (Mess-)Warten aus gefahren und überwacht. Projektdefinitionsgemäß ist das Fahren der Produktion von zwei getrennten Warten aus mit eingeschränkten Anzeigen und Zugriff auf gemeinsame Betriebsteile nicht Gegenstand dieser Analyse. Deshalb ist nachfolgend mit "Warte" nur diejenige gemeint, von der aus

- das Abschalten der Chlorpumpen und
- das Schließen der pneumatischen Notabsperrventile direkt am Flüssigchlor-Auslassstutzen eines jeden Lagertanks

fernbedienbar erfolgen kann.

Die Warte ist vom allgemeinen Layout her älteren Datums. An einer Wand befindet sich eine Anzeigen- und Schalttafel, an der u. a. die Füllstände (über Kraftmessdosen) der Lagertanks durch einen Analogschreiber (relativer Füllgrad) angezeigt werden. Des Weiteren wird bei Erreichen eines eingestellten Grenzwertes "Druck hoch" über eine Druckmessung in den Lagertanks ein Alarm in der Warte ausgelöst.

Auf der Warte ist ein Ordner für Arbeitsanweisungen vorhanden.

Warte und Chlorklager sind mit einer Rufanlage miteinander verbunden. Dem Wartepersonal ist es möglich, über Mikrofon Lautsprecherdurchsagen abzusetzen. Die Rufanlage ist an die unterbrechungsfreie Spannungsversorgung angeschlossen. Die Lautsprecher sind so installiert, dass

sie von allen Punkten des Chlorlagers gehört werden können. Not-Aus-Schalter heben sich deutlich von den übrigen Bedienungselementen ab.

Die Warten sind im Drei-Schicht-Betrieb besetzt, mindestens eine Person ("Anlagenfahrer") pro Posten und ein Läufer.

### **Administrative Regelungen; Reparatur, Instandhaltung**

Das Chlorlager wird im Rahmen der regelmäßig durchgeführten Rundgänge alle zwei Stunden von einem Anlagenfahrer abgegangen. Dabei muss der Druck der Lagertanks abgelesen und in ein Protokoll eingetragen werden. Eventuell auftretende Leckagen können aufgrund der niedrigen Geruchsschwelle bemerkt werden. Zur Lokalisierung von Leckagen sind im Bereich des Chlorlagers kleine Spritzflaschen, gefüllt mit Ammoniakwasser bereitgestellt. Ammoniakwasser in Verbindung mit elementarem Chlor bildet weiße Nebel, zum Aufspüren von Chlorleckagen. Werden im Rahmen der Rundgänge irgendwelche Schäden feststellen, so werden diese an den Produktionsmeister bzw. den diensthabenden Schichtführer gemeldet. Dieser verfasst eine entsprechende Schadensmeldung im Reparaturbuch. Der Betriebsingenieur veranlasst aufgrund dieser Schadensmeldung einen entsprechenden Reparaturauftrag an die zuständigen Werkstätten, je nach Schadensursache. Der Betriebsingenieur ist verantwortlich für die ordnungsgemäße Durchführung und Terminverfolgung der Reparaturmaßnahme in enger Abstimmung mit dem Leiter der zentralen Instandhaltung des Werkes.

Der Chlorverladearm, über den die *Chlorübernahme* erfolgt, wird einmal jährlich einer Revision durch den Herstellerkundendienst unterzogen.

Die Lagertanks unterliegen der Druckbehälterverordnung. Daraus ergeben sich die vorgeschriebenen Prüffristen - 5-jährlich -, d. h. die innere Besichtigung und eine Druckprobe. Die Abnahme der Tanks wird von dem zuständigen Sachverständigen in Zusammenarbeit mit dem werksseitig vorhandenen Sachkundigen durchgeführt.

Art, Umfang und Durchführung der anfallenden Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten werden generell vom Werkstattingenieur in Verbindung mit dem Betriebsingenieur abgestimmt und veranlasst. Die Reparaturen werden nach den anerkannten Regeln der Technik von werkseigenen Facharbeitern oder Monteuren der entsprechenden Herstellerfirmen ausgeführt.

### **Schulung, Unterweisung**

Es wird eine Personalschulung durchgeführt, bei der neue Mitarbeiter über die bestehenden Unfallverhütungsvorschriften, über die Gefahrstoffverordnung, die vorhandenen Unfallschuttmittel und die anlagenspezifischen Produkte hingewiesen werden. Diese Schulung für neue Mitarbeiter wird bei Bedarf in kurzen Abständen wiederholt.

Für alle Mitarbeiter werden jährlich sechs Sicherheitsgespräche durchgeführt.

In Betriebsanweisungen nach § 20 der Gefahrstoffverordnung werden die im Betrieb beim Umgang mit Gefahrstoffen zu beachtenden Sicherheitsvorschriften festgelegt. Jeder Mitarbeiter wird anhand dieser Betriebsanweisungen vor Antritt seiner Tätigkeit erstmalig und danach wiederkehrend (einmal pro Jahr) unterwiesen über:

- Bezeichnung und Eigenschaften der Gefahrstoffe,
- die beim Umgang auftretenden Gefahren,

- Verhaltensregeln und Schutzmaßnahmen beim Umgang,
- Verhaltensregeln für die sachgerechte Entsorgung entstehender gefährlicher Abfälle,
- Verhaltensregeln für den Gefahrfall und
- Verhaltensregeln bei Unfällen und für Erste Hilfe.

Alle Gefahrstoffe, mit denen im Betrieb umgegangen wird, sind in dieser Betriebsanweisung darüber hinaus in Form von einzelnen Merkblättern erfasst.

Inhalt und Zeitpunkt der Unterweisungen bzw. Sicherheitsgespräche werden von dem Unterwiesenen durch Unterschrift bestätigt. Die regelmäßige Durchführung der Unterweisungen wird im Sicherheitsbereich dokumentiert.

### **Alarmierung**

Der Werksalarm kann nur von der Zentraleinheit beim Pförtner ausgelöst werden. Der Pförtner löst den Alarm aus, wenn:

- ihm durch eine verantwortliche Person der Auftrag dazu erteilt wird oder
  - eine Alarmierung aus einer der Warten auf dem Drucker der Zentraleinheit angezeigt wird.
- Der in den Warten installierte Alarmknopf "Alarm Pförtner" bietet dem Personal in den Warten die Möglichkeit, im Störfall durch Drücken des Alarmknopfes den Pförtner zur weiteren Alarmierung zu erreichen.

Wenn im Betrieb der Alarmton ertönt, begeben sich alle anwesenden Feuerwehrmitglieder sofort zum Feuerwehrmagazin. Im Feuerwehrmagazin wird auf einem Alarmleuchttabelleau angezeigt, von welcher der Warten die Alarmierung erfolgte. Dadurch entfallen telefonische Rückfragen.

Die Mitglieder der Feuerwehr halten sich während der Normalschichtzeit im Betrieb - aufgrund ihrer Tätigkeit meist in der Werkstatt - auf.

Alle Feuerwehrmitglieder sind zu Hause an ein zentrales Rufsystem angeschlossen, welches beim Pförtner - z. B. außerhalb der Tagesschicht - per Knopfdruck ausgelöst werden kann.

### **Übungen**

Der Betrieb verfügt zur Begrenzung von Störfallauswirkungen über eine Werksfeuerwehr, die mit Gerätschaften speziell zur Bekämpfung von störfallrelevanten Stoffen ausgerüstet ist. Die Mitglieder der Feuerwehr sind im Tragen von schwerem Atemschutz und Vollschutz ausgebildet. Maßnahmen von Mitgliedern der Feuerwehr an Betriebsteilen erfolgen nach Rücksprache mit verantwortlichem Betriebspersonal.

Ein Teil der Feuerwehr rekrutiert sich aus Chemiewerkern, die in den sicherheitstechnisch bedeutsamen Betriebsteilen im Schichtbetrieb arbeiten.

Die Feuerwehr führt regelmäßige Übungen in den sicherheitsrelevanten Betriebsteilen durch. Im Rahmen der Funktionstests der Notpumpe wird das Umpumpen von Chlor einmal jährlich geübt.

### Stoffeigenschaften Chlor

Bei dem Stoff Chlor handelt es sich um eine giftige Substanz. In Tab. 6-4 sind die Auswirkungen von Chlorgas-Konzentrationen auf den Menschen 6 /2/ kurz zusammengefasst.

**Tab. 6-4: Auswirkungen von Chlorgas-Konzentrationen auf den Menschen (6 /2/)**

Konzentration (ppm)	Wirkung
0,02 - 1	Geruchsschwelle für empfindliche Personen bei 0,02 ppm; 1 ppm Chlorgas wird von gesunden Menschen wahrgenommen. Bei längerer und wiederholter Exposition tritt eine Gewöhnung an den Geruch ein. Die Geruchsschwelle kann dann höher liegen.
1	Gesundheitsschädigungen sind beim Menschen nicht bekannt, können aber aufgrund von Tierversuchen bei Langzeitexposition nicht ausgeschlossen werden.
2	Diese Konzentrationen können lästig wirken. Für empfindliche Personen sind sie bereits schwer zu ertragen.
3 - 4	Diese Konzentrationen können Atemnot und Kopfschmerzen verursachen.
14 - 20	Diese Konzentrationen sind unerträglich und bereits bei halbstündigem Einatmen gefährlich.
50	Konzentrationen über 50 ppm wirken dosisabhängig schnell tödlich.

MAK-Wert (1981): 0,5 ppm Atemluft.

Gasförmiges Chlor reizt die Augen stark und führt zu Tränen und Rötung; es kann eine Atemblockade und Herz-Kreislauf-Versagen zur Folge haben. Flüssiges Chlor ätzt die Haut stark und erzeugt starke Rötung bis Blasenbildung.

#### 6.4.2.2 Betriebs- und Systemziele, -funktionen

Das übergeordnete Ziel für den gesamten Betrieb stellt der möglichst störungsfreie und kontinuierliche Betrieb, d. h. die Sicherstellung einer wirtschaftlichen und einwandfreien Produktion, dar. Dazu werden eine Reihe allgemeiner störfallverhindernder Vorkehrungen getroffen, die sich mit folgenden Fragestellungen befassen:

- Auslegungsbeanspruchungen,
- Brand- und Explosionsschutz,
- Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen,
- Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen,
- Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter,
- Prüfung, Überwachung und Instandhaltung der sicherheitsrelevanten Betriebsteile,
- sicherheitstechnische Vorkehrungen zur Vermeidung von Fehlbedienungen,
- Vorkehrungen gegen Fehlhandlungen und

- schriftliche Unterlagen.

Im Hinblick auf das hier untersuchte Chlorklager stellt somit die unterbrechungsfreie Bereitstellung von Chlor für die Produktion das übergeordnete Systemziel dar.

Bei einer auftretenden Störung bzw. einem Störfall, der einen Verlust des Einschlusses gefährlicher Stoffe (LOC) zur Folge hat, ist die Zielsetzung des Betriebs

- der Schutz des Personals,
- die Begrenzung der Stofffreisetzung auf das Betriebsgelände,
- die zeitliche und räumliche Begrenzung und Beendigung der Emission.

Dazu sind allgemeine störfallbegrenzende Maßnahmen und Vorkehrungen zu folgenden Themen vorgesehen:

- bautechnische Maßnahmen,
- sicherheitstechnische Einrichtungen und technische Schutzvorkehrungen,
- organisatorische Schutzvorkehrungen,
- betriebliche Alarm- und Gefahrenabwehrpläne,
- verantwortliche Person oder Stelle, sachkundige Beratung der Einsatzkräfte,
- Störfallunterweisung des Personals und
- Lagerverzeichnis.

In Bezug auf das Chlorklager sind alle vorgesehenen Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC, welche die Begrenzung und Beendigung der Emission zum Ziel haben, vom Personal bzw. von Mitgliedern der Feuerwehr durchzuführen.

Als Gegenmaßnahmen bei Auftreten einer Leckage im Chlorklager ist nach einer manuell ausgelösten Alarmierung vorgesehen, zunächst das austretende Chlor abzusaugen, dann die Leckstelle abzudichten bzw. abzusperren oder ggf. den Inhalt eines Lagertanks in den leeren Notaufnahme-tank umzupumpen.

### **6.4.2.3 Arbeitsanweisungen und Prozeduren**

Für das untersuchte Chlorklager liegen vom Betreiber vier Arbeitsanweisungen vor:

1. Chlorübernahme (10-AA-03.DOC): Entladen von Chlor-Kesselwagen
2. Vorbereitung eines Tanks zur Inspektion (10-AA-04.DOC): Maßnahmen zur Vorbereitung eines Chlortanks zur Inspektion, Instandsetzung oder Prüfung
3. Inbetriebnahme nach einer Inspektion (10-AA-05.DOC): Maßnahmen zur Inbetriebnahme eines Chlortanks nach einer Inspektion
4. Chlor-Notpumpe (10-AA-02.DOC): Maßnahmen beim Not-Umpumpen von flüssigem Chlor aus einem Lagertank in den Nottank.

Weitere betriebliche Unterlagen, z. B. für die konkrete Durchführung von Prüf-, Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten oder die Überwachung von Grundstellungen von Armaturen oder Betriebszuständen von Pumpen, liegen für die Untersuchung nicht vor.

Es liegen Hinweise auf

- Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung,
- Expositionsbegrenzung und
- Verhaltensregeln für den Gefahrenfall

vor, die i. W. allgemeiner Art sind und dem Schutz des Personals dienen.

Zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen existieren betriebliche Alarm- und Gefahrenabwehrpläne, die mit den für Katastrophenschutz und allgemeine Gefahrenabwehr zuständigen Behörden abgestimmt sind. Für Chlor ist ein besonderer Alarm- und Bekämpfungsplan vorhanden (vgl. 6 /2/). Bei Betriebsstörungen oder Störfällen werden über eine Alarmanlage alle im Betrieb befindlichen Personen alarmiert.

Die Übernahme von Chlor aus einem Eisenbahnkesselwagen (EKW), für die eine Arbeitsanweisung vorliegt, war Gegenstand einer Beobachtung im Rahmen einer Betriebsbegehung.

Diese Prozedur wurde vor der Beobachtung unter Anwendung der Technik SHEL strukturiert und klassifiziert, um ausgewählte HF-relevante Gesichtspunkte und mögliche Einflussfaktoren zu identifizieren.

Chlor wird ausschließlich in Eisenbahnkesselwagen angeliefert. Die Entladung eines EKW erfolgt an Werktagen zwischen 7.00 Uhr und 16.00 Uhr. Der EKW wird zuerst in der Chlor-Entladestation gegen Verschieben und Auffahren gesichert. Am EKW-Puffer wird eine Verschiebesicherung (Magnet-Sensor) angebracht, bei deren Auslösung die beiden Schnellschlussventile im Chlorverladearm und am EKW automatisch schließen und somit den Umfüllvorgang unterbrechen.

Für die *Chlorübernahme* ist ein Pressluftatmer mit Gasmaske in einem nahestehenden Abfüllhäuschen bereitgelegt.

Das An- und Abschließen des Chlorverladearms durch einen Bedienungsmann erfolgt unter Aufsicht des jeweiligen Schichtmeisters (oder Stellvertreters).

Vor Beginn der *Chlorübernahme* und nach Beendigung wird der Leitungsweg mit Ammoniakwasser auf Dichtheit überprüft.

Über das Druckgefälle zwischen EKW- und gekühltem Lagertank wird der EKW über das Steigrohr entladen. Bei nur geringen Druckunterschieden wird der EKW zwecks Erhöhung des Druckes mit warmem Wasser berieselt.

Die Füllstände der zu befüllenden Lagertanks werden auf der Warte angezeigt (relativer Füllgrad bezogen auf den max. zulässigen Füllgrad nach TRG). Über Sprechfunk wird dem Bedienungsmann vor Ort der aktuelle Füllgrad mitgeteilt (ca. alle 15 Minuten). Bei einem Füllgrad von maximal 98 % wird auf den zweiten zu befüllenden Lagertank umgestellt; erreicht dieser einen Füllgrad von 98 %, wird die *Chlorübernahme* beendet. In der Warte wird die *Chlorübernahme* protokolliert.

In der Umgebung der Chlor-Entladestation befinden sich vier Not-Aus-Schalter. Wird einer dieser Schalter gedrückt, wird - wie bei Ansprechen der Verschiebesicherung - der Umfüllvorgang unterbrochen (Schließen der Schnellschlussventile im Chlorverladearm und am EKW).

Die Strukturierung und Klassifizierung (SHEL) der *Chlorübernahme* auf Basis der vorliegenden Arbeitsanweisung ist in Tab. 6-5 am Ende des Kapitels 6.4 dieses Berichtes aufgeführt.

Auf Grundlage dieser Klassifizierung wurden vor der Beobachtung folgende HF-relevante Gesichtspunkte und mögliche Einflussfaktoren identifiziert, die Schwerpunkt der Beobachtung sein sollten:

- Kommunikation: Bedienungsmann, Aufsichtsperson, Wartenpersonal, Betriebsleitung,
- Führung: Entscheidungsbefugnis, Rückfrage, -sprache, -meldung, Anweisung,
- Prüf- und Kontrollschritte: Redundanz, Recovery-Möglichkeiten,
- örtliche Verhältnisse; Aufenthaltsort Bedienungsmann, Aufsichtsperson.

#### 6.4.2.4 Einflussfaktoren

Im Rahmen der Analyse der Arbeitsumgebung werden folgende Bedingungen und Einflussfaktoren, welche möglicherweise die Durchführung von Personalhandlungen beeinflussen, identifiziert:

- Die vorliegenden Unterlagen beinhalten wenig detaillierte Vorgaben im Hinblick auf die Entscheidungskriterien für und die konkrete Durchführung von Maßnahmen vor und nach Auftreten einer Störung.
- Aufgrund der Ausführung des Chlorklagers als Freiluftanlage sind die jeweiligen witterungs- und tageszeitabhängigen lokalen Bedingungen zu berücksichtigen.
- Es fehlen Kennzeichnungen an den Absperrventilen der chlorführenden Rohrleitungen; die Ventilstellungen und die Betriebszustände von Pumpen werden nicht überwacht und sind nur vor Ort identifizierbar (Ausnahme: Sicherung der Absperrventile in Offenstellung in Leitungen, die zu Manometern führen).
- Die Produktion wird von zwei getrennten Warten aus mit eingeschränkten Anzeigen und Zugriff auf gemeinsame Betriebsteile gefahren.
- Die Unterweisungen haben primär die Zielsetzung, das Personal für den sicheren Umgang mit Gefahrstoffen zu schulen und somit von den gesundheitsschädlichen Auswirkungen bei Gefahrstofffreisetzungen zu schützen.
- Die Alarmierung bei einer Störung bzw. einem Störfall erfolgt nicht automatisiert sondern manuell, initiiert von verschiedenen Stellen und über verschiedene Wege.
- Die Übungen für die Durchführung von Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC können - naturgemäß - nicht bei realen lokalen Verhältnissen stattfinden.

Bei dem Stoff Chlor handelt es sich - schon bei niedrigen Konzentrationen - um eine giftige, den Menschen physisch stark beeinträchtigende Substanz.

#### 6.4.2.5 Aufgabenanalyse

Bei der Aufgabenanalyse sind die konkreten Handlungen und Maßnahmen des Personals (aktuelle Manifestation der Durchführung ) zu analysieren.

Nachfolgend werden die gewonnenen qualitativen Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten dargestellt sowie die wesentlichen Erkenntnisse und die noch offenen Fragestellungen erläutert.

Bei der Aufgabenanalyse ist im Rahmen dieses Projektes ein Leckspektrum zu untersuchen, bei dem von einer Beeinträchtigung bzw. Gefährdung außerhalb des Betriebsgeländes auszugehen ist. Hierfür werden in Tab. 6-6 für verschiedene Leckgrößen und Ausströmungen in drei Entfernungen von einer Leckstelle im Chlorklager die sich nach einer Zeit  $\Delta t$  einstellenden Chlorkonzentrationen ausgewiesen 6 /17/.

Daraus folgt, dass bei dem hier zu untersuchenden Leckspektrum sich sehr schnell Chlorkonzentrationen einstellen, die eine Reaktion und die Durchführung von Maßnahmen nur im Vollschutzanzug - i. W. von Feuerwehrmitgliedern - möglich machen.

### **Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC**

Im Falle des Auftretens eines LOC (Strukturversagen oder Containment-Bypass) sind keine automatischen Sicherheitsfunktionen vorgesehen. Alle Gegenmaßnahmen bei einer Störung bzw. einem Störfall sind vom Personal durchzuführen. Die beiden Hauptkategorien - struktur- bzw. personalverursacht - unterscheiden sich dabei nicht grundsätzlich; die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich insbesondere auf das Auftreten eines strukturbedingten LOC.

Als Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC ist nach einer manuell ausgelösten Alarmierung vorgesehen, zunächst das aus dem Leck austretende Chlor abzusaugen, dann die Leckstelle abzudichten bzw. abzusperren oder ggf. den Inhalt eines Lagertanks in den leeren Notaufnahmetank umzupumpen.

**Tab. 6-5: Für verschiedene Leckgrößen und Ausströmungen (ga: gasförmige Phase, fl: flüssige Phase) in 10, 50 und 100 m Entfernung von der Leckstelle sich nach einer Zeit  $\Delta T$  einstellende Konzentrationen (6 /17/; nach VDI 3783/Blatt 1, 2)**

No(alt)	A		E		B		F		C		C1		C2		D	
No(neu)	a		b		c		d		e		f		g		h	
Leck	ga	fl	ga	fl	ga	fl	ga	fl	ga	fl	ga	fl	ga	fl	ga	fl
Phase	1,2 g/s		0,5 mm <sup>2</sup>		1,0 mm <sup>2</sup>		3,0 mm <sup>2</sup>		5,0 mm <sup>2</sup>		10,0 mm <sup>2</sup>		30,0 mm <sup>2</sup>		50,0 mm <sup>2</sup>	
m°gas	0,1 g/s	0,7 g/s	1,4 g/s	6,1 g/s	12,0 g/s	36,0 g/s	61,0 g/s	121,0 g/s	42,0 g/s	70,0 g/s	1109 ppm	1777 ppm	1109 ppm	2800 ppm	175 ppm	6369 ppm
m°flüss	1,2 g/s	0,7 g/s	1,4 g/s	6,1 g/s	12,0 g/s	36,0 g/s	61,0 g/s	121,0 g/s	42,0 g/s	70,0 g/s	1109 ppm	1777 ppm	1109 ppm	2800 ppm	175 ppm	6369 ppm
c (10 m)	3 ppm	14 ppm	27 ppm	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
t (10 m)	9 min	9 min	9 min	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
c (50 m)	0 ppm	1 ppm	2 ppm	55 ppm	142 ppm	827 ppm	2198 ppm	6888 ppm	2198 ppm	6888 ppm	1109 ppm	1777 ppm	1109 ppm	2800 ppm	175 ppm	6369 ppm
t (50 m)	6 min	6 min	6 min	3 min	2 min	3 min	3 min	1 min	3 min	1 min	2 min	1 min	2 min	2 min	2 min	2 min
c (100 m)	0 ppm	0 ppm	0 ppm	3 ppm	8 ppm	43 ppm	132 ppm	504 ppm	4 ppm	132 ppm	10 ppm	504 ppm	60 ppm	3129 ppm	175 ppm	6369 ppm
t (100 m)	6 min	6 min	6 min	6 min	6 min	7 min	6 min	5 min	6 min	5 min	5 min	4 min	7 min	2 min	5 min	2 min

Konzentrations- bzw. Zeitangabe '#NV' => Aufpunkt innerhalb der Schwergaswolke : c zwischen 10^6 ppm und 10^4 ppm

Für die Bewertung der Durchführbarkeit der Gegenmaßnahmen sind i. W. folgende Fragestellungen relevant, auf die nachfolgend im Einzelnen eingegangen wird:

- (bis) wann kann (noch) **Alarm ausgelöst** werden?
- wer **entscheidet** wie, was getan wird?
- ist **Absaugen** überhaupt möglich?
- kann (noch) **abgedichtet bzw. abgesperrt** werden (Erkennbarkeit/ Atmosphäre/Zugänglichkeit)?
- (ab) wann wird **umgepumpt** (Vorgaben/Strategie/Zugänglichkeit (wenn z. B. später, als Recovery-Maßnahme eingesetzt))?

Die Alarmierung erfolgt durch den Pfortner aufgrund

- einer Anweisung oder Beauftragung durch eine verantwortliche Person oder durch
- eine Alarmierung aus einer der Warten, die beim Pfortner angezeigt wird.

Im Falle eines LOC im Chlorlager hängt die Alarmierung, die nur auf Basis der Geruchswahrnehmung (zufällig in Bezug auf die Person des Personals) erfolgt, von der Witterung und der Tageszeit ab. D. h., das Spektrum und das Zeitfenster bewegt sich zwischen einer schwachen Wahrnehmung (z. B. nachts, Regen), bei der eine Alarmierung u. U. erst sehr spät erfolgt, bis zu dem ungünstigsten Fall, dass der Pfortner aufgrund der vorherrschenden Windrichtung keinen Alarm mehr auslösen kann.

Die festgelegte und praktizierte Alarmierung beinhaltet bei Auftreten eines LOC im Chlorlager keine Informationen darüber, um **welche** Stofffreisetzung es sich handelt und **wo** diese stattfindet.

Die über den Pfortner an die Feuerwehr weiterzuleitende Alarmierung läuft im Feuerwehrmagazin auf einem Alarmleuchttabelleau auf, an dem ggf. die alarmierende Warte oder auch mehrere Warten, die mit dem **Chlorlager** direkt nichts zu tun haben, angezeigt werden. Dies kann dazu führen, dass ohne weitere telefonische Rückfragen die Feuerwehr ausrückt, ohne genaue Informationen über den Einsatzort zu haben.

Bei Auslösen des Alarms halten sich die Mitglieder der Feuerwehr während der Normalschichtzeit im Betrieb - meist in der Werkstatt - auf und begeben sich unverzüglich zum Feuerwehrmagazin. Dieses liegt ca. 70 m von dem Chlorlager entfernt, die Werkstatt liegt näher, so dass - abhängig von der Windrichtung - von einer deutlichen physischen Beeinträchtigung der Feuerwehrmitglieder bis hin zur Unmöglichkeit des Betretens des Feuerwehrmagazins ausgegangen werden muss. Bei einer Alarmierung außerhalb der Normalschichtzeit und dem Einsatz von Fremdfirewehren kann es zu Zeitverzögerungen kommen.

Im Feuerwehrmagazin befindet sich ein Gerätewagen "Gefahrgut", der u. a. mit vier Vollschutzanzügen bestückt ist; im Magazin befinden sich weitere Vollschutzanzüge.

Zum Zeitpunkt des Ausrückens der Feuerwehr ist aus o. a. Punkten nicht eindeutig entscheidbar:

- Um welche Stofffreisetzung handelt es sich?
- Welche Maßnahmen dürfen deshalb nicht bzw. müssen ergriffen werden?
- Wo findet die Stofffreisetzung statt?
- Sind Vollschutzanzüge notwendig?

- Wo kann bzw. muss Vollschutz angelegt werden (Vorgabe: Sammeln beim Pfortner oder windabgewandte Seite)?

Da für die Identifikation eines LOC im Chlorklager keine automatischen Messgeräte, wie z. B. Chlorschnüffler, vorhanden sind, spielen die visuellen Verhältnisse (abhängig von der Tageszeit, den Licht- und Wetterverhältnissen) bei der Durchführbarkeit von Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines hier zu untersuchenden LOC eine wesentliche Rolle. Sie beeinflussen sowohl die Identifikation des Störfallortes als auch die der Leckstelle selbst. Die generelle Frage der Sichtbarkeit bei Chloremissionen konnte bisher nicht zufriedenstellend geklärt werden.

Für die Durchführung von konkreten Maßnahmen am Chlorklager zur Begrenzung und Beendigung der Emission gibt es die allgemeinen Vorgaben zum

- Absaugen des aus dem Leck austretenden Chlors,
- Abdichten bzw. Absperrn der Leckstelle und
- Umpumpen des Inhalts eines Lagertanks in den Notaufnahmetank.

Darüber hinaus sind keine Festlegungen zur grundsätzlichen Vorgehensweise (Strategie) vorhanden, die abhängig von bestimmten Kriterien zu Entscheidungen bzw. Anordnungen über konkrete Maßnahmen führen können. Die Feuerwehrmitglieder führen von sich aus störfallbegrenzende Maßnahmen aus - wie Absaugen, Stellen von zusätzlichen Wasserwänden -. Maßnahmen an Betriebsteilen erfolgen nur nach Rücksprache mit verantwortlichem Betriebspersonal, was aufgrund der lokalen Chlorkonzentration u. U. schwierig ist. Für das Schließen der pneumatischen Notabsperrentile direkt am Flüssigchlor-Auslassstutzen der Lagertanks, das fernbedient von der Warte aus erfolgen kann, gibt es keine Vorgaben. Bei einer - aufgrund der Witterungsverhältnisse - sehr späten Geruchswahrnehmung könnte dies nur zeitverzögert erfolgen.

Für die konkrete Durchführbarkeit einer Maßnahme ist ferner die Frage der Zugänglichkeit (z. B. für das Abdichten von Lecks) von Bedeutung.

### **Chlorübernahme von EKW**

Bei der Übernahme von Chlor aus einem Eisenbahnkesselwagen (EKW) (vgl. Kapitel 6.4.2.3) handelt es sich um eine Prozedur, bei der auch ein personalverursachter LOC auftreten kann. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse und Fragestellungen, die sich aus der Strukturierung und Klassifizierung der Arbeitsumgebung und der Mensch-Maschine/Umgebungs-Interaktion mit SHEL (vgl. Tab. 6-5) und der Beobachtung (vgl. Kapitel 6.4.2.3) ergeben, zusammengefasst. Auf Basis der Erkenntnisse aus den durchgeführten Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben wird die Anwendung der Technik SHEL (vgl. Kapitel 6.4.1) für derartige Analysen auch für zukünftige Untersuchungen empfohlen.

Die witterungsabhängigen Bedingungen sind besonders relevant (z. B. Ausrutschen auf EKW, Geruchswahrnehmung, Aufenthaltsort Bedienungsmann).

Der Pressluftatmer liegt zwar bereit, aber im Abfüllhäuschen und ist somit u. U. zu spät greifbar.

Es erfolgen teilweise Prüf- und Kontrollschritte nach Durchführung einzelner Maßnahmen (z. B. Kontrolle Ventilstellungen).

Die Aufsichtsperson überwacht das An- und Abschließen des Chlorverladearms durch den Bedienungsmann ohne Gasmasken.

Der Bedienungsmann soll sich in windabgewandter Richtung während des Entladungsvorgangs aufhalten; dadurch nimmt er eine Chloremission zeitverzögert wahr.

Wann die Not-Aus-Schalter zu betätigen sind, ist nicht geregelt. Unter Umständen können sie nicht mehr erreicht werden.

Die notwendige Kommunikation zwischen Bedienungsmann und Wartenpersonal beruht auf Sprechfunk; Anzeigen zum Füllgrad sind vor Ort nicht vorhanden.

Die Überwachung des Entladungsvorgangs erfolgt durch den Bedienungsmann vor Ort, der u. U. aufgrund physischer Beeinträchtigung nicht mehr reagieren kann (Übelkeit, Schwächeanfall) und das Wartenpersonal, welches den Füllgrad der Lagertanks zwar beobachten, aber nicht direkt eingreifen kann.

Regelungen bezüglich notwendiger Rückfragen, -meldungen und Anweisungen (Entscheidungsbefugnis) sind aus der vorliegenden Arbeitsanweisung nicht erkennbar.

### **6.4.3 Arbeitsergebnisse**

Mit den o. a. Arbeitsschritten der HF-Analyse wurde eine Reihe von umgebungs- und kontext-abhängigen Bedingungen und Einflussfaktoren für die Durchführung notwendiger Personalhandlungen identifiziert, aus denen sich – unter weiterer Berücksichtigung der festgestellten offenen Fragestellungen – nur auf pauschalen Annahmen und Grobeinschätzungen basierende pessimistische Ergebnisse erzielen ließen. Es wird deshalb als sinnvoll und zielführend erachtet, die o. a. qualitativen Ergebnisse und Erkenntnisse insgesamt sowie die offenen Fragestellungen für den Analysegegenstand in diesem Forschungsvorhaben darzulegen und einer Diskussion mit dem Betreiber zuzuführen. Die Erarbeitung von konkreten Empfehlungen und Vorschlägen für sicherheitstechnische und betriebliche Verbesserungsmaßnahmen aus den Arbeitsergebnissen war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Nach der Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen in dem Betrieb wäre eine nachfolgende erweiterte HF-Analyse und Integration dieser Ergebnisse in die systemtechnische Analyse zielführend, um letztendlich quantitative Risikobewertungen zu erhalten.

### **6.4.4 Retrospektive Analyse**

Nach Aussage des Betreibers gab es keine relevanten Störungen bzw. Störfälle in der bisherigen Betriebserfahrung mit dem Chlorklager, so dass in diesem Forschungsvorhaben keine retrospektive Analyse durchgeführt wird.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den durchgeführten Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben wird die Nutzung der Methodik HERMES (vgl. Kapitel 6.4.1 dieses Berichtes) für zukünftige Untersuchungen empfohlen, um durch eine Auswertung der Betriebserfahrung in einer retrospektiven Analyse von aufgetretenen Störungen bzw. Störfällen zusätzlich Ergebnisse und Erkenntnisse aus der konkreten, realen Arbeitsumgebung für die Durchführung der QRA nutzen zu können.

#### **6.4.5 Bewertung von fehlerhaften Personalhandlungen**

Da die Informationen, Ergebnisse und Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitsschritte der HF-Analyse (vgl. i. W. Kapitel 6.4.2 dieses Berichtes) in die Durchführung der detaillierten qualitativen und quantitativen Analyse und Bewertung von fehlerhaften Personalhandlungen einfließen, würde dieser Arbeitsschritt zweckmäßigerweise erst nach Klärung der o. a. Fragestellungen bzw. Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen in dem Betrieb mit einer nachfolgenden erweiterten HF-Analyse durchgeführt werden.

Für weiterführende und vertiefte Untersuchungen mit dem Ziel letztendlich quantitativer Risikobewertungen werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse in diesem Forschungsvorhaben für die Durchführung der Aufgabenanalyse eine hierarchische Methode - insbesondere zur Entwicklung von konkreten Prozeduren und betrieblichen Unterlagen - sowie eine tabellarische Dekompositionsmethode bei Vorliegen detaillierter schriftlicher Anweisungen empfohlen; des Weiteren können auch für die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten von Fehlerereignissen die Verfahren THERP und ASEP herangezogen werden (vgl. Kapitel 6.4.1 dieses Berichtes).

#### **6.4.6 Zusammenfassung**

Die Analyse von Maßnahmen des Personals während des Normalbetriebs und bei auftretenden Störungen bzw. Störfällen wird als HF-Analyse bezeichnet. Nach Einschätzung der Störfall-Kommission des Bundesumweltministeriums stellen Fehler bei der Bedienung störfallrelevanter Anlagen einen bedeutsamen Faktor bei der Bewertung der Anlagensicherheit dar. Die HF-Analyse ist für die hier durchzuführende QRA von besonderer Relevanz, da **alle** vorgesehenen Gegenmaßnahmen bei Auftreten eines LOC vom Personal durchzuführen sind, also keine automatischen Sicherheitsfunktionen bestehen. Die Analyse der Auswirkungen fehlerhafter Personalhandlungen vor Auftreten eines LOC ist ebenfalls Gegenstand der HF-Analyse.

Für die Durchführung der HF-Analyse werden verschiedene Methoden und Techniken erläutert und die grundlegende Struktur, innerhalb derer diese zum Einsatz kommen, dargestellt.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben wird die Nutzung verschiedener methodischer Ansätze - entsprechend der jeweiligen Fragestellung - für weiterführende und vertiefte Untersuchungen empfohlen.

Mit der HF-Analyse wurde eine Reihe von Bedingungen und Einflussfaktoren für die Durchführung notwendiger Personalhandlungen identifiziert, aus denen sich – unter weiterer Berücksichtigung der festgestellten offenen Fragestellungen – nur auf pauschalen Annahmen und Grobeinschätzungen basierende pessimistische Ergebnisse erzielen ließen. Es wird deshalb als zielführend erachtet, die qualitativen Ergebnisse und Erkenntnisse insgesamt sowie die offenen Fragestellungen für den Analysegegenstand in diesem Forschungsvorhaben darzulegen und einer Diskussion mit dem Betreiber zuzuführen. Die Erarbeitung von konkreten Empfehlungen und Vorschlägen für sicherheitstechnische und betriebliche Verbesserungsmaßnahmen war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Nach der Implementierung von Verbesserungsmaßnahmen in dem Betrieb wäre eine nachfolgende erweiterte HF-Analyse und Integrati-

on dieser Ergebnisse in die systemtechnische Analyse zielführend, um letztendlich quantitative Risikobewertungen zu erhalten.

**Tab. 6-6 Strukturierung und Klassifizierung (SHEL) der Chlorübernahme auf Basis der vorliegenden Arbeitsanweisung**

<b>Maßnahme/Aktion/Funktion</b>	<b>Klassifizierung</b>
<b>Festlegen Zeitfenster Entladung</b>	L-E
<b>Art der Entladung</b>	L-E
→ Vorbereitung/Zustand Lager? Zu füllender Tank? Check? Ventilstellung?	L-L
→ EKW kommt in Entladebereich/nach Weiche?	
→ Prüfung gemäß Checkliste?	L-S
	L-S
<b>Sichern gegen Verschieben</b>	
Hemmschuh-Wagen	L-H
	H-H
→ mit Anweisung? Praxis! Schilder? Blinkwarneinrichtung?	L-S
<b>Sichern gegen Auffahren</b>	L-H
	L-S
... auf ... Wanne/Gleiswaage	L-H
	H-H
... auf Nebengleis	L-H
Weiche abweisend stellen	L-H
	L-S
→ übrige Weichen?	
Schranken schließen	L-H
	L-S
Auflaufsicherung auf Gleis	L-H
	L-S
	H-H
Verschiebesicherung an Puffer	L-H

Maßnahme/Aktion/Funktion	Klassifizierung
	L-S
	H-H
→ mit Anweisung? Praxis!	L-S
→ mit Rückmeldung? Aufsichtsperson	L-L
Betriebsleitung	L-E
<b>Vorbereitung Entladung</b>	
Pressluftatmer bereitlegen	L-H
→ Gasmasken wo? wie?	L-S
Schutzkleidung tragen	L-H
→ wie?	L-S
Benachrichtigen Aufsichtsperson	L-L
Einhalten Sicherheitsvorschriften	L-S
→ Kontrolle der Sicherungsmaßnahmen?	L-S
→ alle? Abhaken?	L-S
<b>Anschließen Entladearm</b>	
nur mit Aufsichtsperson	L-S
→ Dom öffnen?	
Prüfung Ventile geschlossen	L-S
	L-H
Ventile zu	H-H
Anbringen Entladearm an Steigrohranschluss	L-H
	L-S
	H-H
Verwendung neuer Dichtungen	L-S
	L-H
Dichtung/Rohr	H-H
Leitungsweg freischalten	L-S
→ wie?	L-H
[Verbindung Chlortank - EKW-Ventil offen; dieses ist noch zu!]	
Öffnen der Ventile	H-H
Prüfung EKW-Anschluss auf Dichtigkeit mit Ammoniak	L-S
	L-H
→ Prüfung Druck im EKW?	
Entriegeln Blockiereinrichtung durch Abschrauben Arretierkappe	L-S
	L-H

<b>Maßnahme/Aktion/Funktion</b>	<b>Klassifizierung</b>
Blockierung/Arretierkappe	H-H
Abnehmen Verschlusskappe am Luftanschluss	L-H
	L-S
	H-H
[Verbindung Chlortank - EKW-Ventil offen; dieses ist noch zu!] Druckluftschlauch anschließen	L-H
	L-S
	H-H
[Verbindung Chlortank - EKW-Ventil offen; dieses ist noch zu!] Prüfung Überdruck	L-S
	L-H
→ Aufsichtsperson wo? Aufschalten Druckluft (dauernd!) während Entladung	L-H
	L-S
	H-H
→ wer? wo?	
→ Verbindung Chlortank/EKW Prüfung Dichtigkeit mit Ammoniak	L-S
	L-H
→ mit Anweisung? Rückmeldung? Kontrolle?	L-L
	L-E
<b>Übernahme von Chlor</b>	
→ Messwarte: Meldung an ... Start Entladung?	L-L
Chlor steigt von EKW → Tank	H-H
Berieselung EKW	L-S
	L-H
Temperatur steigt im EKW	H-H
Chlor steigt schneller → Tank (Druckaufbau)	H-H
→ zeitliche Abläufe? Beaufsichtigung Entladung	L-E
→ wo genau? Standort? [MA2]	L-S
→ Windrichtungsanzeiger	
→ Aufsichtsperson? ggf. bei Störung: Not-Aus	L-S
	L-H
EKW: getrennt	H-H
Temperatur steigt/Druck steigt	H-H

<b>Maßnahme/Aktion/Funktion</b>	<b>Klassifizierung</b>
Tank getrennt durch Not-Aus	H-H
→ Was noch zu tun, außer Not-Aus?	L-S
<b>Kontrolle Übernahme</b>	
Kontrolle Füllgrad in Messwarte	L-S
	L-H
Füllgrad/-gewichtsanzeige in Messwarte	H-H
Meldung an MA2	L-L
Sprechfunk	H-H
→ Rückfrage, falls keine Meldung?	
Füllgrad 98 %	H-H
Meldung an MA2	L-L
→ Sprechfunk/Lautsprecher?	
Entscheidung umzuschalten	L-L
	L-S
→ Aufsichtsperson?	
Schließen Ventil	L-S
	L-H
Lagertank entkoppelt	H-H
Öffnen Ventile	L-S
	L-H
2. Lagertank offen	H-H
Chlor steigt in 2. Tank	H-H
→ Kontrolle weiter durch Messwarte? bei 2. Tank	
<b>Beenden der Entladung</b>	
Entladung fertig	H-H
→ Kontrolle? Anzeige? Rückmeldung?	
Druckluft abstellen	L-S
	L-H
Ventil zu, EKW entkoppelt	H-H
Abkuppeln Druckluftschlauch	L-S
	L-H
	H-H
Verschlusskappe aufsetzen	L-S
	L-H
	H-H

<b>Maßnahme/Aktion/Funktion</b>	<b>Klassifizierung</b>
Blockiereinrichtung verriegeln durch Aufschrauben Arretierkappe	L-S
	L-H
Arretierung Blockiereinrichtung	H-H
→ wie?	
Andampfen Rohrleitung	L-S
	L-H
Temperatur steigt	H-H
Restchlor → Tank	H-H
Druckanstieg	H-H
→ wo, wie?	
Erkennen	L-S
	L-H
Lagerventil schließen	L-S
	L-H
Lagertank entkoppelt vom Entladearm	H-H
Chlorgasrest entspannen	L-S
	L-H
	H-H
→ wie?	
<b>Abschließen Entladearm</b>	
Abflanschen	L-H
	L-S
neue Dichtung	L-H
	L-S
	H-H
Blinddeckel	L-H
	L-S
Entladearm abgekoppelt	H-H
EKW-Ventil neue Dichtung	L-H
	L-S
Blinddeckel	L-H
	L-S
EKW-Ventil: zu	H-H
Prüfung Entladearmanschluss auf Dichtheit	L-H
	L-S
Dichtheit festgestellt	H-H

<b>Maßnahme/Aktion/Funktion</b>	<b>Klassifizierung</b>
Prüfung EKW-Ventile auf Dichtheit	L-H
	L-S
Dichtheit festgestellt	H-H
Domdeckel schließen	L-H
	L-S
Domdeckel zu	H-H
Domdeckel sichern	L-H
	L-S
→ Prüfung? Rückmeldung an? wer entscheidet?	
Wagenabsicherung aufheben	L-H
	L-S
	L-L
EKW ausrangieren lassen	L-E
	L-L
	H-H
<b>Aufsichtsperson</b>	
→ Entscheidungsbefugnis? Kontrolle? Rückmeldungen, dann ...	
Standort? z. B. Kommunikation mit Messwarte	L-L
	L-E
	L-S
<b>Dokumentation</b>	
im Chlorbuch auf Messwarte protokollieren: Übernahme	L-S
	L-H
Eintrag	H-H
→ was genau?	
<b>Notabschaltung</b>	
Entscheidung für Not-Aus	L-L
	L-S
	L-E
Schalter drücken	L-H
	L-S
Steuerluft schließt, entspannt, Schnellschlussventil schließen ... am EKW und in Übernahmeleitung	H-H
EKW getrennt	H-H
Temperatur steigt	H-H
→ Tank getrennt/Nottank?	H-H

Maßnahme/Aktion/Funktion	Klassifizierung
Verschiebesicherung entfernen	L-H L-S
→ Schließen durch Reißleine (Sicherheitsbericht)?	
→ was noch zu tun, außer NOT-AUS?	L-S

## 6.5 Zuverlässigkeitsdaten

### 6.5.1 Allgemeines zur Vorgehensweise

#### 6.5.1.1 Verteilungen

In der EIReDA-Datenbank (6 /18/) werden für die Zuverlässigkeitskenngrößen (Ausfallraten bzw. Ausfallwahrscheinlichkeiten) meist Gamma- bzw. Beta-Verteilungen angegeben. Der einfacheren Handhabbarkeit wegen wurden diese Verteilungen mittels Lognormalverteilungen approximiert. Werden in der EIReDA-Datenbank Verteilungen mit Error-Faktoren („EF“) angegeben, so werden diese als Lognormalverteilungen und die Error-Faktoren als zugehörige Streufaktoren  $K_{95}$  interpretiert.

In den übrigen verwendeten Quellen sind in der Regel keine Verteilungstypen angegeben. In diesen Fällen werden ebenfalls Lognormalverteilungen unterstellt, wobei der Streufaktor aus dem 95-%-Perzentil  $x_{95}$  und dem 5-%-Perzentil  $x_5$  berechnet wird:

$$K_{95} := \sqrt{\frac{x_{95}}{x_5}}$$

Die daraus resultierenden Werte werden auf ganze Zahlen aufgerundet. Ergibt sich dabei ein Wert  $< 3$ , wird  $K_{95} = 3$  gesetzt. Eine Ausnahme hiervon bildet die Verteilung, die sich aus der Null-Fehler-Betrachtung für den Ausfall der Chlorpumpen ergibt (s. u.).

#### 6.5.1.2 Komponenten, Ausfallarten und -ursachen

Die zu untersuchenden Komponenten, Ausfallarten und -ursachen wurden im Rahmen der Systemanalyse ermittelt.

#### Versagen von Rohr- bzw. Messleitungen

Folgende Leckgrößen wurden betrachtet:

0,1 mm<sup>2</sup>, 0,5 mm<sup>2</sup>, 1 mm<sup>2</sup>, 3 mm<sup>2</sup>, 5 mm<sup>2</sup>, 10 mm<sup>2</sup>, 20 mm<sup>2</sup>, 30 mm<sup>2</sup>, 50 mm<sup>2</sup>.

Eintrittshäufigkeiten für die einzelnen Leckgrößen konnten nicht im Detail ermittelt werden. Daher wurde folgendermaßen vorgegangen: Nach 6 /20/ ist - gemittelt über verschiedene Rohrleitungstypen und für relativ große Lecks (bis max. 20 mm Öffnung) - eine Häufigkeit von  $3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$  anzusetzen. Dieser Wert wurde für die Summe über die Eintrittshäufigkeiten der Leckgrößen 10 mm<sup>2</sup>, 20 mm<sup>2</sup>, 30 mm<sup>2</sup> und 50 mm<sup>2</sup> übernommen. Für jede einzelne dieser Leckgrößen ergibt sich damit eine Häufigkeit von  $7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Die Eintrittshäufigkeit für die kleinen

Lecks (0,1 mm<sup>2</sup>, 0,5 mm<sup>2</sup>, 1 mm<sup>2</sup>, 3 mm<sup>2</sup>, 5 mm<sup>2</sup>) wurde jeweils um eine Größenordnung höher zu  $7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$  abgeschätzt.

Insgesamt ergeben sich somit folgende Werte:

**Tab. 6-7: Eintrittshäufigkeiten verschiedener Leckgrößen**

Leckgröße	Eintrittshäufigkeit [ $\text{m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ]
0,1 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
0,5 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
1 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
3 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
5 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
10 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
20 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
30 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
50 mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$

Nach einer britischen Studie 6 /21/ sind in der chemischen Industrie folgende Ursachen für das Versagen bei Rohrleitungen verantwortlich:

- ◆ Überdruck 20,5 %
- ◆ Korrosion 15,6 %
- ◆ Inkorrekte Installation 4,5 %
- ◆ Bedienfehler 30,9 %
- ◆ Äußere Einwirkung 23,5 %
- ◆ Ermüdung 3,5 %
- ◆ Sonstiges 1,5 %

Abrasion und Erosion spielten demnach keine hervorgehobene Rolle.

Betrachtet man lediglich die „technischen“ Ursachen Überdruck, Korrosion und Ermüdung (die anderen genannten Ursachen müssen ggf. in den Fehlerbäumen abgebildet werden), erhält man folgende Eintrittshäufigkeiten:

**Tab. 6-8: Eintrittshäufigkeiten aufgrund verschiedener Ursachen**

Leckgröße	Ursache		
	Überdruck	Korrosion	Ermüdung
0,1 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
0,5 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
1 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
3 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
5 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
10 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
20 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
30 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
50 mm <sup>2</sup>	$1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$

Für die **Messleitungen** werden die Werte für das 3 mm<sup>2</sup>-Leck übernommen.

Bei den vorstehend genannten Werten handelt es sich um Erwartungswerte. Da in der entsprechenden Literatur hierzu keine Unsicherheitsangaben enthalten sind, werden für die Häufigkeiten des Versagens von Rohr- bzw. Messleitungen Lognormalverteilungen mit einem geschätzten Error-Faktor  $K_{95} = 10$  verwendet.

### 6.5.1.3 Anmerkung zu Lecks in Armaturen und passiven Komponenten (mit Ausnahme von Rohrleitungen)

Aus den recherchierten generischen Daten waren für diese Komponenten keine detaillierten Angaben zu den Häufigkeiten unterschiedlicher Leckgrößen zu ermitteln. Jedoch treten erfahrungsgemäß kleinere Lecks häufiger auf als große Lecks. Um dem Rechnung zu tragen, wird die ermittelte Ausfallrate hier in zwei Anteile aufgeteilt. Dabei wird angenommen, dass Leckgrößen  $\leq 5 \text{ mm}^2$  90% zur Rate beitragen, größere Lecks hingegen nur 10%.

Diese Vorgehensweise lässt sich aus der Analogie zu vergleichbaren Relationen bei Rohrleitungen (siehe z. B. 6 /22/) bzw. Abschätzungen aus der Expertenerfahrung (siehe z. B. 6 /23/) rechtfertigen.

#### Ausfallart „Heißlaufen der Chlorpumpe“

Für diese Ausfallart konnten keine generischen Daten ermittelt werden. Daher wurde auf die Betriebserfahrung der zu untersuchenden Anlage zurückgegriffen, obwohl diese mit insgesamt 40 Betriebsjahren nicht sehr umfangreich ist. Ein Heißlaufen der Pumpen bzw. ein dadurch bedingter Chlor-Eisenbrand ist bei einer gesamten Betriebszeit der dort vorhandenen zwei Chlorpumpen (mit jeweils 20 Jahren Betriebszeit) nicht aufgetreten.

Mittels einer Null-Fehler-Statistik (6 /24/) lässt sich somit eine Ausfallrate von

$$\frac{0,5}{2 \cdot 20 a} = \frac{1}{80 \cdot 8.760 h} = 1,5 \cdot 10^{-6} h^{-1} \quad (\text{Erwartungswert})$$

abschätzen.

Dieser Ausfallrate liegt folgende Gamma-Verteilung zugrunde:

$$f(\lambda) = \frac{T^{1/2}}{\Gamma(\frac{1}{2})} \lambda^{-1/2} e^{-\lambda T}$$

mit  $T = 40 a$  und  $\Gamma(\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}$ .

### 6.5.1.4 Bezeichnungen

Die in der 5. Spalte der Tab. 6-9 angegebene „Kenngröße“ ist der Erwartungswert der jeweiligen Ausfallrate bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Angabe erfolgt pro Stunde [1/h] bzw. pro Anforderung [1/Anforderung].

Als Verteilung wurde (mit Ausnahme der Versagensart „Heißlaufen“ bei der Chlorpumpe, s. o.) die Lognormalverteilung verwendet mit der bekannten Definition der Wahrscheinlichkeitsdichte für die Ausfallrate bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$\text{Lognormal}(x; \mu; \sigma) := \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2}, \quad x > 0, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$$

Der Streufaktor  $K_{95}$  ist definiert durch

$$K_{95} := \frac{x_{95}}{x_{50}} = \frac{x_{50}}{x_5}$$

Da zwischen Median  $x_{50}$ , Streufaktor  $K_{95}$  und Erwartungswert  $x_{erw}$  der Lognormalverteilung die Beziehungen

$$x_{50} = e^{\mu},$$

$$K = e^{1,6449 \sigma},$$

$$x_{erw} = e^{(\mu + \sigma^2/2)} = x_{50} e^{\sigma^2/2},$$

gelten, lässt sich aus dem 95%-Perzentil und dem 5%-Perzentil über

$$K_{95} := \sqrt{\frac{x_{95}}{x_5}}$$

der Streufaktor bestimmen und aus dem Median bzw. dem Erwartungswert die Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  der Lognormalverteilung.

Tab. 6-9: Komponenten Chlorlager - Zuverlässigkeitsdaten

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallursache	Kenngroße	Datenquelle
1	Kesselwagenventil, pneumatisch	Chlor	- wird undicht (während Entladevorgang), davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>	9,6 · 10 <sup>-7</sup> /h  8,6 · 10 <sup>-7</sup> /h 1,0 · 10 <sup>-7</sup> /h K <sub>95</sub> = 20 (geschätzt)	6 /19/ 4.4.4.3 s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"
2	Entladearm	Chlor	- schließt nicht (nach Öffnen)  wird undicht - Gelenkdichtsystem versagt davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>  - Korrosion von innen - Korrosion von außen davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>	4,09 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 8  3 · 10 <sup>-8</sup> /h  2,7 · 10 <sup>-8</sup> /h 0,3 · 10 <sup>-8</sup> /h K <sub>95</sub> = 10 (geschätzt)  -- 3 · 10 <sup>-7</sup> /h  2,7 · 10 <sup>-7</sup> /h 0,3 · 10 <sup>-7</sup> /h K <sub>95</sub> = 10 (geschätzt)	6 /25/ p. 3.14 s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallursache	Kenngroße	Datenquelle
3	Absperrventil, pneumatisch (Füllleitung)	Chlor	- wird undicht (nach außen) davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>  - schließt nicht (nach Öffnen)	4 · 10 <sup>-8</sup> /h  3,6 · 10 <sup>-8</sup> /h 4 · 10 <sup>-9</sup> /h K <sub>95</sub> = 10  1,96 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 4	6 /18/ t. 90/91 für Leckagen s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"
4	Lagertank	Chlor	wird undicht (in gefülltem Zustand) – Korrosion von innen davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>  - Korrosion von außen (nicht entdeckt wg. Isolierung) davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>	5,7 · 10 <sup>-11</sup> /h  5,1 · 10 <sup>-11</sup> /h 0,6 · 10 <sup>-11</sup> /h K <sub>95</sub> = 10 (geschätzt)  5,7 · 10 <sup>-11</sup> /h  5,1 · 10 <sup>-11</sup> /h 0,6 · 10 <sup>-11</sup> /h K <sub>95</sub> = 10 (geschätzt)	6 /25/ p. 3.3, Spalte G.2 s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"
5	Kühlsystem		Ausfall nicht sicherheitsrelevant	kein Datum ermittelt	---

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben "Risikoabschätzung an einem Chlorlager";  
 Abschlussbericht, Rev. 1.0 vom September 2004

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallursache	Kenngroße	Datenquelle
6	Betriebliche Pumpe	Chlor	- wird undicht Annahme: $\leq 5 \text{ mm}^2$ ,	$2,7 \cdot 10^{-8}/\text{h}$ $K_{95} = 15$ (geschätzt)	<u>Annahme:</u> Verhältnis kleine Lecks zu große Lecks = 90 % zu 10 %; Wert für große Lecks aus 6 /18/ t. 38 ff.
			- "Severe leak" (nicht definiert; hier: $> 5 \text{ mm}^2$ angenommen)	$3 \cdot 10^{-9}/\text{h}$ $K_{95} = 10$	6 /18/ t. 38 ff.
			- läuft heiß	$1,5 \cdot 10^{-6}/\text{h}$ Gamma-Verteilung	Betriebserfahrung s. o. "Ausfallart Heißlaufen"
7	Nottank	Chlor	wird undicht (in entleertem Zustand) - Korrosion von innen davon $\leq 5 \text{ mm}^2$ $> 5 \text{ mm}^2$  - Korrosion von außen (nicht entdeckt wg. Isolierung) davon $\leq 5 \text{ mm}^2$ $> 5 \text{ mm}^2$	$5,7 \cdot 10^{-10}/\text{h}$  $5,1 \cdot 10^{-10}/\text{h}$ $0,6 \cdot 10^{-10}/\text{h}$ $K_{95} = 10$ (geschätzt)  $5,7 \cdot 10^{-11}/\text{h}$  $5,1 \cdot 10^{-11}/\text{h}$ $0,6 \cdot 10^{-11}/\text{h}$ $K_{95} = 10$ (geschätzt)	6 /25/ p. 3.3, Spalte G.2  s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"  <b>Faktor 10 bei Korrosion von innen wg. Medieneinfluß</b>

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallursache	Kenngroße	Datenquelle
8	Notumfüllpumpe	Chlor	- startet nicht - Betriebsversagen - läuft heiß	$2,5 \cdot 10^{-2}$ /Anforderung. $95,96 \cdot 10^{-6}$ /h $K_{95} = 30$ $1,5 \cdot 10^{-6}$ /h Gamma-Verteilung	6 /19/ 1.3.1  Betriebsverfahren s. o. "Ausfallart Heißlaufen"
9	Kompressor	Chlor	Ausfall nicht sicherheitsrelevant	kein Datum ermittelt	---
10	Rohrleitung	Chlor	wird undicht - Korrosion von innen - Korrosion von außen - Erosion - Abrasion - Schweißnaht reißt - Ermüdungsbruch (Schwingungen)	<b>s. o. "Versagen von Rohr- bzw. Mess- leitungen"</b>	
11	Flansch	Chlor	Dichtung versagt davon $\leq 5 \text{ mm}^2$ $> 5 \text{ mm}^2$	$3 \cdot 10^{-9}$ /h $2,7 \cdot 10^{-9}$ /h $3 \cdot 10^{-10}$ /h $K_{95} = 30$	6 /26/ s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallsursache	Kenngroße	Datenquelle
12	Absperrarmatur, Hand (Entnahmeleitungen, Notpumppeleitungen)	Chlor	- öffnet nicht  - schließt nicht  - wird undicht (nach außen) hier: $\leq 5 \text{ mm}^2$ angenommen  - "Severe leak" (nicht definiert; hier: $> 5 \text{ mm}^2$ angenommen)	$4 \cdot 10^{-5}$ /Anforderung $K_{95} = 3$  $4 \cdot 10^{-5}$ /Anforderung $K_{95} = 3$  $3 \cdot 10^{-8}$ /h $K_{95} = 10$ (geschätzt)  $3 \cdot 10^{-9}$ /h $K_{95} = 10$	6 /18/ t. 96
13	Absperrventil, pneumatisch (Entnahmeleitung)	Chlor	- wird undicht (nach außen) davon $\leq 5 \text{ mm}^2$ $> 5 \text{ mm}^2$  - schließt nicht	$4 \cdot 10^{-8}$ /h  $3,6 \cdot 10^{-8}$ /h $4 \cdot 10^{-9}$ /h $K_{95} = 10$  $1,96 \cdot 10^{-6}$ /h $K_{95} = 4$	6 /18/ t. 90/91  s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"
14	Absperrarmatur, Hand (Messleitung/Prüfleitung)	Chlor	schließt nicht nach Öffnen	$4 \cdot 10^{-5}$ /Anforderung $K_{95} = 3$	6 /18/ t. 96
15	Magnetventil	Druckluft	öffnet nicht/schließt nicht	$1,1 \cdot 10^{-7}$ /h $K_{95} = 15$ (geschätzt)	6 /27/ t. 25

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallursache	Kenngroße	Datenquelle
16	Messleitung	Chlor	- wird undicht	s. o. „Versagen von Rohr- bzw. Messleitungen“	
17	Manometer	Chlor	- zeigt wesentlich zu niedrigen Druck  - wird undicht (Leckage nach außen) davon ≤ 5 mm <sup>2</sup> > 5 mm <sup>2</sup>	1,0 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 5  0,9 · 10 <sup>-9</sup> /h  0,8 · 10 <sup>-9</sup> /h 0,1 · 10 <sup>-9</sup> /h K <sub>95</sub> = 5	6 /19/ 4.3.3  s. o. "Anmerkung zu Leckgrößen"
18	Thermometer	Wasser	- zeigt wesentlich zu niedrige Temperatur - wird undicht (Leckage nach außen)	0,8 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 3	6 /18/ t. 216 (keine Unterscheidung in Ausfallarten möglich)
19	Kraftmessdose		zeigt wesentlich zu niedrige Last	3 · 10 <sup>-8</sup> /h K <sub>95</sub> = 10 (geschätzt)	6 /28/
20	LCD-Anzeige (Warte)		zeigt wesentlich zu niedrigen Füllstand	1,8 · 10 <sup>-5</sup> /h K <sub>95</sub> = 15	6 /29/ (Ausgabegerät bei SPS)
21	Schreiber (Warte)		zeigt wesentlich zu niedrigen Füllstand	4,5 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 15	6 /30/
22	Schalter, Taster (Freiland)		kein Kontakt	0,1 · 10 <sup>-6</sup> /h K <sub>95</sub> = 15	6 /31/
23	Relais, Schütz (Freiland)		zieht nicht an	1 · 10 <sup>-4</sup> /Anforderung K <sub>95</sub> = 4	6 /18/ t. 192

Nr.	Komponente	Medium	Ausfallart/Ausfallsursache	Kenngroße	Datenquelle
24	Verschiebesicherung (Magnetsensor)		reagiert nicht auf Verschiebung	$4 \cdot 10^{-3}$ /Anforderung $K_{95} = 10$	6 /26/
25	Druckalarm		keine Alarmierung bei hohem Druck	$1,0 \cdot 10^{-6}$ /h $K_{95} = 4$	6 /19/ 4.3.3
26	Füllstandsalarm		keine Alarmierung bei hohem Füllstand	$4,3 \cdot 10^{-6}$ /h $K_{95} = 2$	6 /19/ 4.3.2
27	Filter		Leckage nach außen	kein eigener Wert angesetzt <sup>6</sup>	---

<sup>6</sup> Der Filter wird nicht eigens bewertet, da die Filter in Rohrleitungen eingebaut sind und Leckagen der Rohrleitungen bzw. der zugehörigen Flansche separat berücksichtigt werden. Die Ausfallsursache "Durchbruch/Verstopfen mit anschließendem Heißlaufen der Pumpe" wird von den Werten für die Pumpen mit abgedeckt (s. Positionen 6 und 8)

## 6.6 Ereignisablaufquantifizierung

Nach der Erarbeitung der Ereignisablaufdiagramme werden die einzelnen auslösenden Ereignisse bzw. die in deren Folge möglichen unterschiedlichen Abläufe mit entsprechenden Verfahren ausgewertet. Als Ergebnis davon erhält man die erwarteten Häufigkeiten pro Jahr für die Freisetzung einer bestimmten Menge von Chlor (Freisetzungsmatrix; ggf. auch zeit- und ortsabhängige Konzentrationsangaben). Bei der Darstellung der Ergebnisse ist sowohl auf die qualitativen als auch auf die quantitativen Gesichtspunkte - insbesondere im Hinblick auf Unfallfolgen und -auswirkungen - wie

- ◆ Anlagenschadenzustände
  - ◆ Häufigkeiten
  - ◆ Freisetzungskategorien
- einzugehen.

### 6.6.1 Häufigkeiten von LOC

Das katastrophale Versagen von Lagertanks (Behälterbersten) und Rohrleitungen (Abriss) wird definitionsgemäß nicht unterstellt (6 /32/)

Die übrigen Lecks werden exemplarisch entsprechend ihrer Größe in zwei Klassen unterteilt, wobei die eine Klasse Lecks von 1 bis 5 mm<sup>2</sup> (im Folgenden „kleine Lecks“ genannt) umfasst, die andere Klasse Lecks von 5 bis 50 mm<sup>2</sup> (im Folgenden als „große Lecks“ bezeichnet). Die Häufigkeiten für Rohrleitungslecks unterschiedlicher Größe (pro Jahr und Meter Rohrleitung) sind in Kap. 6.5 angegeben.

Dort werden sieben Ursachen für das Versagen von Rohrleitungen unterschieden:

- ◆ Überdruck
- ◆ Korrosion
- ◆ Inkorrekte Installation
- ◆ Bedienfehler
- ◆ Äußere Einwirkung
- ◆ Ermüdung
- ◆ Sonstiges

Überdruck als Ursache für Rohrleitungsversagen im untersuchten Chlorlager wird ausgeschlossen, da die verwendeten Rohrleitungen im Vergleich mit den Lagertanks einen mehr als doppelt so hohen Auslegungsdruck (4 MPa) aufweisen.

Auf fehlerhafte Personalhandlungen, die zu Lecks führen können, wird in Kap. 6.4 eingegangen.

Lecks aufgrund äußerer Einwirkungen werden definitionsgemäß nicht betrachtet.

Somit verbleiben nur die Anteile aufgrund der Ursachen „Korrosion“, „Ermüdung“ und „Sonstiges“, d. h. in Summe 20,6 % der in Kapitel 6.5 angegebenen Gesamthäufigkeiten. Damit erhält

man für kleine Lecks (bis 20 mm<sup>2</sup>) eine Häufigkeit von  $0,206 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-7} m^{-1} a^{-1}}{8760 ha^{-1}} = 1,65 \cdot 10^{-11} m^{-1} h^{-1}$

und für große Lecks (20 mm<sup>2</sup> und größer) eine Häufigkeit von

$$0,206 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-8} m^{-1} a^{-1}}{8760 ha^{-1}} = 1,65 \cdot 10^{-12} m^{-1} h^{-1}$$

Der Betreiber hat die Gesamtlänge der Rohrleitungen im untersuchten Betriebsbereich auf 350 m geschätzt.

Für jede der in den Abb. 3-3 bis Abb. 3-6 eingezeichneten Lecklagen wurde die Länge des zugehörigen Rohrleitungsabschnitts so abgeschätzt, dass sich in Summe etwa die o. g. Gesamtlänge ergibt (siehe Tab. 6-10). Die damit berechneten Häufigkeiten für Rohrleitungslecks unterschiedlicher Größen sind in den Tab. 6-11 und Tab. 6-12 dargestellt.

Tab. 6-11 gilt dabei für die pessimistische Annahme, dass praktisch alle Armaturen des Chlorlagers während des Normalbetriebs geöffnet sind; damit wäre fast das gesamte Rohrleitungsnetz mit Chlor unter Lagertankdruck beaufschlagt. Der Tab. 6-12 liegt demgegenüber die realistische Konfiguration von Armaturenstellungen zugrunde, die laut Aussage des Betreibers im Normalbetrieb gegeben ist.

**Tab. 6-10: Geschätzte Längen der Rohrleitungsabschnitte in m**

Lecklage	Länge [m] NW25	Länge [m] NW32	Länge [m] NW40	Länge [m] NW50	Länge [m] NW80
1	0,5				
2	0,5				
3	0,5				
4	0,5				
5	0,5				
6	0,5				
7	5				
8	5				
9	5				
10	5				
11	5				
12	10				
13	10				
14	70				
15	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				
16	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				
17	40				
18	2				

Leck- lage	Länge [m] NW25	Länge [m] NW32	Länge [m] NW40	Länge [m] NW50	Länge [m] NW80
19	2				
20	5				
21	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				
22	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen				
23	2				
24	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
25	40				
26	40				
27	2				
28	10				
29	2				
30	2				
31	2				
32	0,5				
33	0,5				
34	0,5				
35	0,5				
36	0,5				
37	0,5				
38	10				
39	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
40	5				
41					0,5
42					0,5
43					0,5
44					0,5
45					0,5
46					0,5
47					7
48				1	
49				13,5	
50			0,5		
51			0,5		
52				0,5	
53	0,5				
54	0,5				
55	0,5				
56		0,5			

Leck- lage	Länge [m] NW25	Länge [m] NW32	Länge [m] NW40	Länge [m] NW50	Länge [m] NW80
57		0,5			
58		0,5			
59			2,5		
60			2,5		
61			1		
62			7		
63			1		
64			4,5		
65			0,5		
59a			2,5		
60a			2,5		
61a			1		
62a			7		
63a			1		
64a			4,5		
65a			0,5		
66	5				
67		4,25			
68	1,5				
69	1,5				
70	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
71	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber				
72	0,5				
73		4,25			
74	5				
<b>Σ</b>	<b>300</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>

Tab. 6-11: Leckhäufigkeiten pro Stunde für Rohrleitungsabschnitte (pessimistisch)

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
1	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
2	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
3	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
4	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
5	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
6	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
7	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
8	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
9	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
10	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
11	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
12	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
13	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
14	70	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10
15	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
16	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
17	40	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11
18	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
19	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
20	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
21	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
22	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
23	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
24	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
25	40	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11
26	40	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11
27	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
28	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
29	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
30	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
31	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
32	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
33	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
34	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
35	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
36	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
37	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
38	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
39	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
40	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
41	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
42	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
43	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
44	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
45	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
46	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
47	7	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11
48	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
49	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
50	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
51	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
52	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
53	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
54	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
55	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
56	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
57	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
58	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
59	2,5	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12
60	2,5	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12
61	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
62	7	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11
63	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
64	4,5	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12
65	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
59a	2,5	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12
60a	2,5	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12
61a	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
62a	7	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11
63a	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
64a	4,5	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12
65a	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
<b>Σ</b>	<b>19</b>	<b>3,1E-10</b>	<b>3,1E-10</b>	<b>3,1E-10</b>	<b>3,1E-11</b>	<b>3,1E-11</b>	<b>3,1E-11</b>	<b>3,1E-11</b>
66	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
67	4,25	7,0E-11	7,0E-11	7,0E-11	7,0E-12	7,0E-12	7,0E-12	7,0E-12
68	1,5	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12
69	1,5	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12
70	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
71	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
72	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
73	4,25	7,0E-11	7,0E-11	7,0E-11	7,0E-12	7,0E-12	7,0E-12	7,0E-12
74	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
Σ	336,5	5,5E-09	5,5E-09	5,5E-09	5,5E-10	5,5E-10	5,5E-10	5,5E-10

Mit der pessimistischen Annahme über die Armaturengrundstellungen erhält man also eine Häufigkeit von ca.  $4,8 \cdot 10^{-5}/a$  ( $5,5 \cdot 10^{-9}/h$ ) für kleine Rohrleitungslecks und eine Häufigkeit von ca.  $4,8 \cdot 10^{-6}/a$  ( $5,5 \cdot 10^{-10}/h$ ) für große Rohrleitungslecks.

**Tab. 6-12: Leckhäufigkeiten pro Stunde für Rohrleitungsabschnitte (realistisch)**

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
1	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
2	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
3	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
4	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
5	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
6	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
7	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
8	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
9	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
10	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
11	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
12	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
13	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
14	70	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-09	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10
15	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
16	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
17	40	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11
18	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
19	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
20	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
21	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
22	liegt außerhalb der definierten Systemgrenzen							
23	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
24	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
25	40	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-10	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11	6,6E-11
26	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
27	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
28	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11

Leck- lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> - Leck	3 mm <sup>2</sup> - Leck	5 mm <sup>2</sup> - Leck	10 mm <sup>2</sup> - Leck	20 mm <sup>2</sup> - Leck	30 mm <sup>2</sup> - Leck	50 mm <sup>2</sup> - Leck
29	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
30	2	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-11	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12	3,3E-12
31	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
32	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
33	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
34	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
35	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
36	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
37	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
38	10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-10	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11
39	entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber							
40	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
41	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
42	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
43	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
44	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
45	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
46	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
47	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
48	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
49	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
50	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
51	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
52	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
53	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
54	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
55	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
56	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
57	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
58	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
59	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
60	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
61	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
62	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
63	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
64	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
65	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
59a	2,5	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-11	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12	4,1E-12

Leck-lage	Länge [m]	1 mm <sup>2</sup> -Leck	3 mm <sup>2</sup> -Leck	5 mm <sup>2</sup> -Leck	10 mm <sup>2</sup> -Leck	20 mm <sup>2</sup> -Leck	30 mm <sup>2</sup> -Leck	50 mm <sup>2</sup> -Leck
60a	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
61a	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
62a	7	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-10	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11	1,2E-11
63a	1	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-11	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12	1,6E-12
64a	4,5	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-11	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12	7,4E-12
65a	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
<b>Σ</b>	<b>16,5</b>	<b>2,7E-10</b>	<b>2,7E-10</b>	<b>2,7E-10</b>	<b>2,7E-11</b>	<b>2,7E-11</b>	<b>2,7E-11</b>	<b>2,7E-11</b>
66	5	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-11	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12
67	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
68	1,5	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12
69	1,5	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-11	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12	2,5E-12
70 entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber								
71 entfallen aufgrund nachträglicher Änderung des Schaltplans durch den Betreiber								
72	0,5	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-12	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13	8,2E-13
73	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
74	0	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
<b>Σ</b>	<b>221,5</b>	<b>3,6E-09</b>	<b>3,6E-09</b>	<b>3,6E-09</b>	<b>3,6E-10</b>	<b>3,6E-10</b>	<b>3,6E-10</b>	<b>3,6E-10</b>

Mit der realistischen Annahme hinsichtlich der beim Anlagenbetrieb vorliegenden Armaturengrundstellungen (s. o.) ergibt sich für kleine Rohrleitungslecks eine Häufigkeit von ca.  $3,2 \cdot 10^{-5}/a$  ( $3,6 \cdot 10^{-9}/h$ ), für große Rohrleitungslecks eine Häufigkeit von ca.  $3,2 \cdot 10^{-6}/a$  ( $3,6 \cdot 10^{-10}/h$ ).

Neben den Rohrleitungslecks sind folgende weitere Ursachen für LOC zu berücksichtigen:

- ◆ Lagertank wird undicht
- ◆ Chlorpumpe wird undicht
- ◆ Chlorfilter wird undicht
- ◆ Chloreisenbrand infolge Heißlaufens der Chlorpumpe
- ◆ Flanschdichtung wird undicht
- ◆ Handarmatur wird undicht
- ◆ pneumatische Armatur in der Chlorentnahmeleitung wird undicht
- ◆ Manometer wird undicht

Bei der Chlorübernahme kommen zusätzlich hinzu:

- ◆ Kesselwagenventil wird undicht
- ◆ Chlorverladearm wird undicht
- ◆ pneumatische Armatur im Chlorverladearm wird undicht

Die zugehörigen Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten sind in Kap. 6.5 zu finden, wobei jeweils zwischen Lecks kleiner  $5 \text{ mm}^2$  und solchen größer  $5 \text{ mm}^2$  unterschieden wird.

Die zusätzliche Häufigkeit aufgrund der Chlorübernahmeporgänge beträgt unabhängig von der Annahme über die Grundstellungen der Armaturen für kleine Lecks ca.  $4,6 \cdot 10^{-4}/a$ , für große Lecks ca.  $5,0 \cdot 10^{-5}/a$ .

Alle genannten Ursachen führen bei pessimistischer Annahme über die Grundstellungen von Armaturen in Summe zu einer LOC-Häufigkeit von  $3 \cdot 10^{-2}/a$  für kleine Lecks bzw.  $1,6 \cdot 10^{-2}/a$  für große Lecks und bei realistischer Annahme über die Grundstellungen von Armaturen zu einer LOC-Häufigkeit von jeweils

**$1,5 \cdot 10^{-2}/a$  für kleine Lecks und für große Lecks.**

Auf den ersten Blick überrascht, dass die Häufigkeiten für kleine und große Lecks gleich hoch sind. Die Erklärung hierfür ist folgende: die gegenüber kleinen Lecks vergleichsweise geringere Häufigkeit für große Lecks in Rohrleitungen, Armaturen, Flanschen usw. wird kompensiert durch die zusätzliche Häufigkeit eines durch Chloreisenbrand verursachten großen Lecks. Aufgrund der fehlenden Temperaturüberwachung ist die Wahrscheinlichkeit für eine unbemerkte Überhitzung der in Betrieb befindlichen Chlorpumpe relativ hoch.

Dies zeigen auch die Tab. 6-13 und Tab. 6-14, in denen die Aufteilung der Summenhäufigkeiten auf die einzelnen Ursachen bzw. auslösenden Ereignisse dargestellt ist. Demnach werden kleine Lecks überwiegend durch undichte Handarmaturen verursacht, große Lecks hingegen durch heißlaufende Chlorpumpen.

Der Anteil der strukturbedingten Lecks, die im Rahmen von Chlorübernahmeprozessen auftreten, ist - verglichen mit der jeweiligen Gesamthäufigkeit - für kleine und große Lecks gering.

**Tab. 6-13: Leckhäufigkeiten pro Jahr für Komponenten und Rohrleitungen (pessimistisch)**

Komponente	Anzahl	Zeit [h]	Häufigkeit [1/a]		Anteil [%]		Anteil [%]
			kleine Lecks	große Lecks	kleine Lecks	große Lecks	
Lagertank Korrosion von innen	2	8760	9,0E-07	1,0E-07	0,0	0,0	0,0
Lagertank Korrosion von außen	2	8760	9,0E-07	1,0E-07	0,0	0,0	0,0
Chlorpumpe	3	8760	7,1E-04	7,9E-05	2,4	0,5	0,5
Chloreisenbrand (Pumpe läuft heiß)	1	8760	0,0	1,3E-02	0,0	81,5	81,5
Schnellschlussventil Entnahmeleitung	3	8760	9,5E-04	1,1E-04	3,3	0,7	0,7
Flansch	208	8760	4,9E-03	5,5E-04	16,9	3,4	3,4
Handarmatur	85	8760	2,2E-02	2,2E-03	76,9	13,9	13,9
Filter	4	8760	nicht bewertet	nicht bewertet	0,0	0,0	0,0
Manometer	11	8760	7,8E-05	8,7E-06	0,3	0,1	0,1
Messleitungen [m]	2,75	8760	4,0E-07	0,0	0,0	0,0	0,0
Rohrleitungen [m]	336,5	8760	4,8E-05	4,8E-06	0,2	0,0	0,0
<b>Summe Normalbetrieb (pessimistisch)</b>			<b>2,9E-02</b>	<b>1,6E-02</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
Kesselwagen-Ventil pneumatisch	1	300	2,6E-04	2,9E-05	56,0	56,9	56,9
Gelenksystem Verladearm	1	300	8,1E-06	9,0E-07	1,8	1,8	1,8
Verladearm Korrosion von außen	1	300	8,1E-05	9,0E-06	17,5	17,8	17,8
Schnellschlussventil Verladearm	2	300	2,2E-05	2,4E-06	4,7	4,7	4,7
Flansch	25	300	2,0E-05	2,3E-06	4,4	4,4	4,4
Handarmatur	8	300	7,2E-05	7,2E-06	15,6	14,2	14,2
Manometer	1	300	2,4E-07	2,7E-08	0,1	0,1	0,1
Messleitungen [m]	0,25	300	1,2E-09	---	0,0	0,0	0,0
Rohrleitungen [m]	19	300	9,4E-08	5,1E-05	0,0	0,0	0,0
<b>Summe Chlorübernahme (pessimistisch)</b>			<b>4,6E-04</b>	<b>5,1E-05</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Gesamtsumme (pessimistisch)</b>			<b>3,0E-02</b>	<b>1,6E-02</b>			

**Tab. 6-14: Leckhäufigkeiten pro Jahr für Komponenten und Rohrleitungen (realistisch)**

Komponente	Anzahl	Zeit [h]	kleine Lecks		große Lecks	
			Häufigkeit [1/a]	Anteil [%]	Häufigkeit [1/a]	Anteil [%]
Lagertank Korrosion von innen	2	8760	9,0E-07	0,0	1,0E-07	0,0
Lagertank Korrosion von außen	2	8760	9,0E-07	0,0	1,0E-07	0,0
Chlorpumpe	1	8760	2,4E-04	1,7	2,6E-05	0,2
Chloreisenbrand (Pumpe läuft heiß)	1	8760	0,0	0,0	1,3E-02	90,1
Schnellschlussventil Entnahmeleitung	1	8760	3,2E-04	2,2	3,5E-05	0,2
Flansch	84	8760	2,0E-03	14,0	2,2E-04	1,5
Handarmatur	44	8760	1,2E-02	81,6	1,2E-03	7,9
Filter	2	8760	nicht bewertet	0,0	nicht bewertet	0,0
Manometer	5	8760	3,5E-05	0,3	3,9E-06	0,0
Messleitungen [m]	1,25	8760	1,8E-07	0,0	0,0	0,0
Rohrleitungen [m]	221,5	8760	3,2E-05	0,2	3,2E-06	0,0
<b>Summe Normalbetrieb (realistisch)</b>			<b>1,4E-02</b>	<b>100,0</b>	<b>1,5E-02</b>	<b>100,0</b>
Kesselwagen-Ventil pneumatisch	1	300	2,6E-04	56,2	2,9E-05	57,1
Gelenksystem Verladearm	1	300	8,1E-06	1,8	9,0E-07	1,8
Verladearm Korrosion von außen	1	300	8,1E-05	17,6	9,0E-06	17,9
Schnellschlussventil Verladearm	2	300	2,2E-05	4,7	2,4E-06	4,8
Flansch	23	300	1,9E-05	4,0	2,1E-06	4,1
Handarmatur	8	300	7,2E-05	15,6	7,2E-06	14,3
Manometer	1	300	2,4E-07	0,1	2,7E-08	0,1
Messleitungen [m]	0,25	300	1,2E-09	0,0	---	0,0
Rohrleitungen [m]	16,5	300	8,1E-08	0,0	8,1E-09	0,0
<b>Summe Chlorübernahme (realistisch)</b>			<b>4,6E-04</b>	<b>100,0</b>	<b>5,0E-05</b>	<b>100,0</b>
<b>Gesamtsumme (realistisch)</b>			<b>1,5E-02</b>		<b>1,5E-02</b>	

Alle genannten Häufigkeiten resultieren ausschließlich aus technischem Versagen, nicht berücksichtigt sind darin fehlerhafte Personalhandlungen, die zu Chlorfreisetzungen führen können.

Bei den angegebenen Häufigkeiten handelt es sich um so genannte Punktwerte, die man erhält, wenn man als Berechnungsgrundlage die Erwartungswerte der jeweiligen Einflussgrößen verwendet.

Für den Fall mit der realistischen Annahme über die Armaturengrundstellungen wurde exemplarisch eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Die Verteilungsparameter für die einzelnen Ausfallarten bzw. Ausfallursachen finden sich in Tabelle 6-11. Für die ebenfalls mit Unsicherheiten behaftete Dauer der Chlorübernahmeprozesse wird eine Gleichverteilung zwischen einem Minimalwert (geschätzte Dauer abzüglich 20 %) und einem Maximalwert (geschätzte Dauer zuzüglich 20 %) angesetzt.

Damit ergeben sich folgende Werte:

	kleine Lecks	große Lecks
- Punktwert (s. o.)	$1,5 \cdot 10^{-2}/a$	$1,5 \cdot 10^{-2}/a$
- Erwartungswert	$1,5 \cdot 10^{-2}/a$	$1,4 \cdot 10^{-2}/a$
- 5%-Fraktile	$1,3 \cdot 10^{-3}/a$	$5,3 \cdot 10^{-4}/a$
- 50%-Fraktile	$6,6 \cdot 10^{-3}/a$	$7,1 \cdot 10^{-3}/a$
- 95%-Fraktile	$5,0 \cdot 10^{-2}/a$	$5,0 \cdot 10^{-2}/a$

### 6.6.2 Nichtverfügbarkeit von Sicherheitsfunktionen

Nach Einsetzen der Zuverlässigkeitskenngrößen (Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Ausfallraten von Komponenten, Wahrscheinlichkeiten für fehlerhafte Personalhandlungen) für die einzelnen Elemente der Fehlerbäume können mit einem geeigneten Rechenprogramm (z. B. „RiskSpectrum“; 6 /33/) die Nichtverfügbarkeiten der Sicherheitsfunktionen, die eine Chlorfreisetzung eines bestimmten Ausmaßes verhindern sollen, berechnet werden. Dabei ergäbe sich durch eine erweiterte HF-Analyse eine Ergänzung und Differenzierung der auszuwertenden Sicherheitsfunktionen und Ereignisablaufdiagramme.

### 6.6.3 Häufigkeit von Freisetzungen/Freisetzungsmatrix

Ohne die in den vorangehenden Kapiteln dargestellten Einschränkungen, die speziell das vorliegende Projekt betreffen, könnten die Häufigkeiten von Freisetzungen berechnet werden, indem die Häufigkeiten für die auslösenden Ereignisse (LOC) mit den Nichtverfügbarkeiten der Sicherheitsfunktionen multipliziert werden (für kleine Lecks siehe Tab. 6-15). Damit erhält man die so genannte Freisetzungsmatrix, d. h. die unterschiedlichen Häufigkeiten, mit denen bestimmte Ausströmraten (korrespondierend zu den Leckgrößen) und Ausströmdauern zu erwarten sind.

Aufgrund des exemplarischen Charakters der Anwendung eines integralen Ansatzes in diesem Forschungsvorhaben sowie der Ergebnisse der durchgeführten HF-Analyse, aus der sich ein gewisser Optimierungsbedarf mit einer anschließenden Implementierung in der Anlage sowie einer nachfolgenden erweiterten HF-Analyse und Integration dieser Ergebnisse in die systemtechnische Analyse ergibt, werden in diesem Projekt keine quantitativen Resultate, sondern die gewonnenen methodischen Erkenntnisse und qualitative Ergebnisse ausgewiesen.

Anmerkung zu Tab 6-14:

Die gewählte Abstufung der Zeitfenster für erfolgreiche Gegenmaßnahmen im Falle eines LOC und die zugehörigen Nichtverfügbarkeiten  $NV_{10}$ ,  $NV_{30}$ ,  $NV_{60}$  haben ausschließlich exemplarischen Charakter und keinerlei Bezug zur Realität. Insbesondere wird die Nichtverfügbarkeit von Gegenmaßnahmen nicht nur von der Größe des Zeitfensters, sondern von einer Reihe weiterer Randbedingungen (z. B. systemtechnischer Art wie Lecklage und Leckgröße) und Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 6.4) abhängen.

**Tab. 6-14: Häufigkeiten pro Jahr für Freisetzung von Chlor aus kleinen Lecks**

Auslösendes Ereignis (kleines Leck)	H [1/a]	NV <sub>10</sub>	NV <sub>30</sub>	NV <sub>60</sub>	H*N <sub>V</sub> <sub>10</sub>	H*N <sub>V</sub> <sub>30</sub>	H*N <sub>V</sub> <sub>60</sub>
<b>Normalbetrieb</b>							
Lagertank Korrosion von innen	9,0E-07	1,0	< 1,0	< 0,5	9,0E-07	< 9,0E-07	< 4,5E-07
Lagertank Korrosion von außen	9,0E-07	1,0	< 1,0	< 0,5	9,0E-07	< 9,0E-07	< 4,5E-07
Chlorpumpe	2,4E-04	1,0	< 1,0	< 0,5	2,4E-04	< 2,4E-04	< 1,2E-04
Schnellschlussventil Entnahmeleitung	3,2E-04	1,0	< 1,0	< 0,5	3,2E-04	< 3,2E-04	< 1,6E-04
Flansch	2,0E-03	1,0	< 1,0	< 0,5	2,0E-03	< 2,0E-03	< 1,0E-03
Handarmatur	1,2E-02	1,0	< 1,0	< 0,5	1,2E-02	< 1,2E-02	< 6,0E-03
Manometer	3,5E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	3,5E-05	< 3,5E-05	< 1,8E-05
Messeleitung	1,8E-07	1,0	< 1,0	< 0,5	1,8E-07	< 1,8E-07	< 9,0E-08
Rohrleitung 1 - 5 mm <sup>2</sup>	3,2E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	3,2E-05	< 3,2E-05	< 1,6E-05
<b>Chlorübernahme</b>							
Kesselwagen-Ventil pneumatisch	2,6E-04	1,0	< 1,0	< 0,5	2,6E-04	< 2,6E-04	< 1,3E-04
Gelenksystem Verladearm	8,1E-06	1,0	< 1,0	< 0,5	8,1E-06	< 8,1E-06	< 4,1E-06
Verladearm Korrosion von außen	8,1E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	8,1E-05	< 8,1E-05	< 4,1E-05
Schnellschlussventil Verladearm	2,2E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	2,2E-05	< 2,2E-05	< 1,1E-05
Flansch	1,9E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	1,9E-05	< 1,9E-05	< 9,5E-06
Handarmatur	7,2E-05	1,0	< 1,0	< 0,5	7,2E-05	< 7,2E-05	< 3,6E-05
Manometer	2,4E-07	1,0	< 1,0	< 0,5	2,4E-07	< 2,4E-07	< 1,2E-07
Messeleitung	1,2E-09	1,0	< 1,0	< 0,5	1,2E-09	< 1,2E-09	< 6,0E-10
Rohrleitung 1 - 5 mm <sup>2</sup>	8,1E-08	1,0	< 1,0	< 0,5	8,1E-08	< 8,1E-08	< 4,1E-08

H = Häufigkeit des auslösenden Ereignisses

NV<sub>10</sub> = Nichtverfügbarkeit von Gegenmaßnahmen innerhalb eines Zeitraums von 10 Minuten

NV<sub>30</sub> = Nichtverfügbarkeit von Gegenmaßnahmen innerhalb eines Zeitraums von 30 Minuten

NV<sub>60</sub> = Nichtverfügbarkeit von Gegenmaßnahmen innerhalb eines Zeitraums von 60 Minuten

## **6.7 Unsicherheits-, Importanz- und Sensitivitätsanalysen**

Alle Parameter, welche die Häufigkeiten von Freisetzungen beeinflussen, sind statistische Größen, die mit Unsicherheiten verschiedener Art (Kenntnisunsicherheit und/oder stochastische Unsicherheit) behaftet sind. In welchem Maß sich diese Unsicherheiten der Eingangsparameter in die Ergebnisse fortpflanzen, kann mittels Unsicherheitsanalyse quantifiziert werden (zur Unsicherheit der Häufigkeit von LOC vgl. Kapitel 6.6.1). Dies bedeutet, dass für die ermittelten Ergebnisse jeweils statistische Erwartungswerte und Vertrauensintervalle ausgewiesen werden können.

Ebenso kann der Einfluss einzelner Komponentenausfälle bzw. fehlerhafter Personalhandlungen oder bestimmter Gruppen solcher Ausfälle bzw. fehlerhafter Handlungen auf die ermittelten Häufigkeiten von Freisetzungen in Form von Importanz- und Sensitivitätsmaßen aufgezeigt werden. Hieraus lassen sich wertvolle Rückschlüsse auf die Effizienz von Verbesserungsmaßnahmen an der untersuchten Anlage ziehen und besonders wirksame Maßnahmen im Sinne einer Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit ableiten

## **6.8 Zusammenfassung und Bewertung**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens kamen verschiedene methodische Ansätze (PAAG/Hazop, Zürich Methode, QRA) zur Durchführung einer Risikoanalyse vor dem Hintergrund der Seveso-Richtlinie 96/82/EG bzw. der 12. BImSchV zur Anwendung.

Aufgrund projektspezifischer Randbedingungen und Einschränkungen ergibt sich, dass die methodischen Ansätze und Vorgehensweisen zur Durchführung einer Risikoanalyse nur beispielhaft angewendet werden können.

Ungeachtet des exemplarischen Charakters der Anwendung eines integralen, ganzheitlichen Ansatzes, wie er für die Sicherheitsbewertung und detaillierte quantitative Risikobewertung komplexer Systeme unter Einbeziehung der o. a. Richtlinien notwendig ist, wird die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens erreicht, d. h. die Leistungsfähigkeit und das Potenzial der QRA-Methodik können aufgezeigt werden. Denn schon in diesem Forschungsvorhaben werden gegenüber anderen Ansätzen erweiterte, methodische Erkenntnisse und qualitative Ergebnisse, wie z. B. die Sinnfälligkeit der Nachrüstung einer Übertemperatur-Schutzabschaltung für die Chlorpumpen zur Reduktion der Häufigkeit eines Chloreisenbrandes, zur Verbesserung der Sicherheit und zur Optimierung des Anlagenbetriebes gewonnen.

Aufgrund der projektspezifischen Einschränkungen und aus Aufwandsgründen - da es sich um ein eigenfinanziertes Forschungsvorhaben handelt - werden aus den gewonnenen qualitativen Erkenntnissen und Ergebnissen keine konkreten Empfehlungen und Vorschläge für eine sicherheitstechnische und betriebliche Optimierung der Anlage ausgearbeitet, was durchaus möglich wäre. Erst damit wäre eine vollständige Einordnung des Nutzens der Durchführung einer QRA erkennbar - auch im Hinblick auf anlagenspezifische Optimierungsmöglichkeiten und risikoreduzierende Maßnahmen im Rahmen einer erweiterten Kosten-Nutzen-Analyse.

Auf Basis der in diesem Vorhaben geleisteten Arbeiten und gewonnenen Erkenntnisse bietet sich eine Weiterführung und Vertiefung der Untersuchungen an mit dem Ziel, das volle Potenzial der QRA-Methodik auszuschöpfen und letztendlich quantitative Risikobewertungen zu erhalten als Grundlage weiterer Optimierungen für den Betrieb und die Sicherheit industrieller Anlagen.



## 7 Risikoabschätzung Schienentransport von Chlor

Die Fehlerbaumanalyse ist die bevorzugte Methode der Risikoanalyse beim Schienentransport von gefährlichen Gütern und dient der systematischen Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen, die zu einem unerwünschten Ereignis führen (7 /1/, 7 /2/). Bei der Durchführung einer Fehlerbaumanalyse wird zuerst ein unerwünschtes Ereignis (top event) definiert. Im darauffolgenden Schritt werden alle Ausfälle bezeichnet, die unmittelbar auf das top event wirken. Diese können entweder einzeln (Oder - Verknüpfung) oder in einer Kombination (Und - Verknüpfung) auf das top event einwirken. Jeder Ausfall hat wiederum Eingangsgrößen, die gleichfalls direkt oder in Kombination mit anderen Ausfällen wirksam werden. Diese Vorgehensweise wird solange durchgeführt, bis ein Ausfall keine Eingangsgrößen mehr aufweist. Zur Auswertung des Fehlerbaumes wird die Boolesche Algebra benutzt. Das Ziel dieser Analyse besteht also darin, alle Ausfallkombinationen und deren Eintrittshäufigkeiten, die zu einem top event führen, zu ermitteln. Da das unerwünschte Ereignis (Freisetzung von Chlor) vorgegeben ist, und alle Ursachen hierfür ermittelt werden müssen, ist diese Analyse deduktiv. Bei induktiven Analysen, z.B. der Ereignisablaufanalyse, wird dagegen von Anfangsereignissen, von Ursachen ausgegangen und das unerwünschte Ereignis daraus abgeleitet. In beiden Fällen ist jedoch eine gesicherte Datenbasis eine unabdingbare Voraussetzung, weitere Kenntnisse hinsichtlich des Bahnbetriebs sind hilfreich. Da diese Datenbasis für den vorliegenden Bericht nicht zu erhalten war, musste auf bereits vorliegende Ergebnisse anderer Autoren zurückgegriffen werden.

Hartwig (7 /3/) verwendete bei seinen Untersuchungen ebenfalls die Fehlerbaumanalyse, die sich auf Grund der deduktiven Vorgehensweise als die vorteilhafteste Methode erwies. Es sind danach grundsätzlich folgende Hauptfreisetzungsarten von Chlor während des Schienentransports möglich:

- Chlorkreisfreisetzung durch einen Bahnbetriebsunfall im Zug - und Rangierbetrieb. Die Freisetzung kann dabei aus der Tankwandung oder aus den Armaturen erfolgen.
- Chlorkreisfreisetzung ohne vorherige Unfallbeanspruchung. Hier erfolgt wieder eine Differenzierung nach Zug - und Rangierbetrieb, zusätzlich wird der nicht bewegte, abgestellte Kesselwagen betrachtet.

Der entsprechende Fehlerbaum ist in Abb. 7-1 dargestellt.

Diese Hauptstruktur weist 10 Fortsetzungen auf. Davon wurden die Chlorkreisfreisetzungen im Zug - und Rangierbetrieb Nr. 1 und 2 weiter ausgeführt, sie sind im Anhang enthalten.

### 7.1 Methodische Aspekte und Datenprobleme

Da Chlor neben seinen erwünschten (7/4/) auch unerwünschte Eigenschaften aufweist (z.B. Schwergaseigenschaften, toxische Wirkung) und in vielen Fällen nicht direkt am Erzeugungsort weiterverarbeitet wird, ist der Handhabung, speziell dem Transport, eine große sicherheitstechnische Bedeutung beizumessen. Rohrleitungs-, Schienen- und Straßentransport sind in der Bundesrepublik Deutschland die gebräuchlichsten Transportvarianten, wobei dem Straßentrans-

port auf Grund seiner gegenüber dem Schienentransport vergleichsweise geringen Mengen, nur eine geringe Bedeutung beizumessen ist.

Da der Rohrleitungstransport von Chlor im wesentlichen innerhalb der Werksflächen oder innerhalb abgesperrter und für die Öffentlichkeit unzugänglicher Schutzstreifen vorgenommen wird, sind die damit verbundenen Risiken auf die umliegenden Flächen begrenzt.

Eine grundsätzlich andere Situation liegt beim Schienentransport vor. Hier erfolgt der Transport über weite Strecken, die der Öffentlichkeit zum großen Teil zugänglich sind, entlang einer Schienentrasse mit z.T. sehr hoher Besiedlungsdichte und natürlich unter einem nicht auszuschließenden Transportrisiko, d.h. einer unerwünschten Freisetzung infolge eines Bahnbetriebsunfalls. Sämtliche weiteren Ausführungen werden darum dem Schienentransport gewidmet.

Für den Transport von Chlor stehen Druckgas - Kesselwagen mit Obenentleerung zur Verfügung. Zusätzlich können Stoffe der Klasse 2 transportiert werden, für die eine Obenentleerung vorgeschrieben ist (ein wechselweiser Transport verschiedener Gase ist jedoch nicht zugelassen). Auf dem Mannlochdeckel des Kesselwagens sind drei Ventile angeordnet. Diese haben jeweils einen innen - und außenliegenden Teil. Bei einer Beschädigung des äußeren Teils ist also immer noch der sichere Verschluss gewährleistet. Zwei Ventile gehören zur Flüssigphase, eines zur Gasphase. Die Ventile für die Flüssigphase sind mit sogen. Steigrohren verbunden, die in die Sumpfmulde führen. Das Gasphasenventil besitzt ein kurzes Rohrstück.

Zum Befüllen und Entleeren des Kesselwagens werden die Ventile pneumatisch betätigt. Die Steuerluft wirkt auf den Kolben des außenliegenden Eckventils, bewegt die Spindel nach unten und öffnet dabei sowohl das äußere als auch das innenliegende Ventil. Bei Entlüftung schließen alle Ventile selbsttätig durch Federkraft. Das gleiche geschieht aus Sicherheitsgründen, falls bei einer Störung die Steuerluft ausfallen sollte. Das äußere Ventil ist zusätzlich gegen ungewolltes Öffnen (z.B. bei Beanspruchung durch Schienenstöße an Weichen oder Kreuzungen) durch eine Blockiervorrichtung gesichert. In Ausnahmefällen können die Ventile auch mittels einer speziellen Vorrichtung mit der Hand betätigt werden. Bei einer Gefahr lassen sich die Ventile vom Boden aus über Reißleinen schließen (7 /5/). Diese Kesselwagen stehen sowohl in zweiachsiger als auch vierachsiger Ausführung in verschiedenen Größen (15 - 57 t Inhalt) zur Verfügung.

Die in der Bundesrepublik Deutschland eingesetzten Kesselwagen sind entweder im Besitz der Chlorhersteller oder können von Kesselwagen - Vermietern geordert werden. Die wohl bekanntesten sind hierbei die Vereinigte Tanklager und Transportmittel GmbH (VTG) und die Eisenbahn - Verkehrsmittel AG (Eva). In Tab. 7-1 sind die Transportmengen von Chlor in Kesselwagen für den Zeitraum von 1988 - 1990 aufgelistet.

**Tab. 7-1: Transportmengen, mittlere Versandweiten und Wagenzahlen (aus 7 /3/)**

<b>Zeitraum</b>	<b>Transportmenge [ t ]</b>	<b>mittlere Versandweite [ km ]</b>	<b>Wagenzahl</b>
1988	441.698	223	8.742
1989	400.305	228	7.956
1990	381.189	224	7.536

Die Ermittlung der Ursachen, die beim Schienentransport zu einer Gefahrgutfreisetzung führen, kann durch die Auswertung von Unfallstatistiken und Unfallanalysen erfolgen. Im Falle des Gefahrgutes "Chlor" ist dies jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da Unfälle mit Chlorkesselwagen im Gegensatz zu anderen Produkten (Mineralölprodukte) sehr selten sind.

Um nun überhaupt eine Aussage treffen zu können, ist es deshalb zweckmäßig, alle Bahnbetriebsunfälle des Güterverkehrs heranzuziehen, um somit, in Kenntnis der transportierten Chlormengen, zu einer Prognose über zu erwartende Chlorfreisetzungen im Schienenverkehr zu gelangen. Dies ist auch ohne weiteres möglich, da der Chlortransport eine Teilmenge des gesamten Gütertransports darstellt und auch unter denselben Randbedingungen abgewickelt wird.

Diese Vorgehensweise erfordert jedoch die detaillierte Kenntnis der Unfallsituation im Schienengüterverkehr. Die Unfalldaten über Bahnbetriebsunfälle, u.a. auch mit Gefahrgut, werden von der Deutschen Bahn - AG in einer Bahnbetriebsunfallstatistik erfasst. Diese wurde in den vergangenen Jahren hinsichtlich der Erfassungstiefe bzw. des Erfassungsumfanges mehrfach überarbeitet und für eine Computerauswertung nach einem einheitlichen Erfassungs- und Auswertungsschema modifiziert. Die Pflege dieser Unfalldatenbank wird von der Bahn AG, dem Eisenbahnbundesamt und auch einzelnen Institutionen, z.B. der Technischen Universität Dresden, Institut für Verkehrssystemtechnik, vorgenommen.

Das Hauptproblem dieser Datenbank bestand und besteht im mehrfach geänderten Erfassungsmodus, vor allen Dingen der älteren Jahrgänge. Ein Bahnbetriebsunfall mit Gefahrgut wird in aller Regel nur dann erfasst, wenn ein Gefahrgutaustritt bemerkt worden ist, d.h. ein Verlust der sicheren Umschließungsfunktion eingetreten ist. Dies bedeutet jedoch, dass z.B. die Penetration der Behälterwandung eines leeren Eisenbahnkesselwagens u.U. nicht bemerkt wird, weil dieser zum Zeitpunkt des Unfalls unbeladen war.

Die Klassifizierung der Bahnbetriebsunfälle erfolgt nach einem einheitlichen Erfassungsblatt. Dieses enthält Informationen zum Unfallzeitpunkt, über den Ort, den Unfallhergang, die beteiligten Ladungseinheiten und Triebfahrzeuge, Geschwindigkeiten, Ursachen und Schäden. Die Deutsche Bahn AG klassifiziert die aufgetretenen Unfälle nach 19 Hauptereignisarten, siehe Tab. 7-2.

**Tab. 7-2: Klassifizierung von Bahnbetriebsunfällen bei der DB AG**

<b>Ereignisart</b>	<b>Beschreibung 1</b>	<b>Beschreibung 2</b>	<b>Beschreibung 3</b>	<b>Erläuterung</b>
100	Entgleisung		ohne anschl. Zusammenstoß	Nur Abheben eines oder mehrerer Radsätze von der Schiene, Keine Angabe ob Umsturz erfolgt ist
101	Entgleisung		mit anschl. Zusammenstoß	
210	Zusammenstoß	Gegenfahrt	ohne anschl. Entgleisung	Kollision zweier Eisenbahnzüge auf einem Gleiskörper ("Entgegenkommer")
211	Zusammenstoß		mit anschl. Entgleisung	
220	Zusammenstoß	Flankenfahrt	ohne anschl. Entgleisung	Seitliches Auffahren eines Zuges oder einer einzelnen Lok im Bereich von
221	Zusammenstoß		mit anschl. Entgleisung	
230	Zusammenstoß	Auffahren	ohne anschl. Entgleisung	Auffahren in gleicher Richtung auf ein langsames, vorausfahrendes Eisenbahnfahrzeug
231	Zusammenstoß		mit anschl. Entgleisung	
240	Zusammenstoß	Auffahren	ohne anschl. Entgleisung	Auffahren auf ein stehendes Eisenbahnfahrzeug (z.B. abgekoppelter Waggon) oder an Haltesignal wartenden Zug
241	Zusammenstoß		mit anschl. Entgleisung	
310	Aufprall	Gleisabschluss	ohne anschl. Entgleisung	Prellbock
311	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
320	Aufprall	Gleissperre od.	ohne anschl. Entgleisung	

<b>Ereignisart</b>	<b>Beschreibung 1</b>	<b>Beschreibung 2</b>	<b>Beschreibung 3</b>	<b>Erläuterung</b>
321	Aufprall	Radvorleger	mit anschl. Entgleisung	
330	Aufprall	Hemmschuh	ohne anschl. Entgleisung	
331	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
340	Aufprall	Straßenfahrzeug	ohne anschl. Entgleisung	Verursacht durch Straßenfahrzeug (z.B. in Werksge-lände), nicht je-doch auf
341	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	Bahnübergang ((400)
350	Aufprall	Baumaschine o-der Baugerät	ohne anschl. Entgleisung	Aufprall auf Ma-schine oder Gerät zur Gleisinstand-haltung, Wartung Oberleitung usw.
351	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
360	Aufprall	Baum, auch Äste	ohne anschl. Entgleisung	
361	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
370	Aufprall	Tier	ohne anschl. Entgleisung	
371	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
380	Aufprall	Oberleitungs-anlage	ohne anschl. Entgleisung	
381	Aufprall	Oberleitungs-anlage	mit anschl. Entgleisung	
390	Aufprall	Sonstiges	ohne anschl. Entgleisung	Verlorene Ladung, Fahrzeugteile (Puffer), Erdrut-sche, Schnee, Eis
391	Aufprall		mit anschl. Entgleisung	
400	Zusammenprall		ohne anschl. Entgleisung	Kollision zwischen einem Eisenbahn-fahrzeug und ei-nem Straßenbe-nutzer (auch Personen !)
401	Zusammenprall		mit anschl. Entgleisung	an einem Bahn-übergang

<b>Ereignisart</b>	<b>Beschreibung 1</b>	<b>Beschreibung 2</b>	<b>Beschreibung 3</b>	<b>Erläuterung</b>
910	Sonst. Unfall	Brand		Brand in einem Eisenbahnfahrzeug (Lok) oder Ladungseinheit während der Fahrt,  jedoch nicht als Folgeereignis einer anderen Ereignisart
920	Sonst. Unfall	Explosion		Explosion in einem Eisenbahnfahrzeug (Lok) oder Ladungseinheit während der Fahrt,  jedoch nicht als Folgeereignis einer anderen Ereignisart
931	Sonst. Unfall	Beschädigung	durch Ladung	Beschädigung durch Parallelfahrer auf Nachbargleis, z.B. durch verrutschte Ladung
932	Sonst. Unfall	Beschädigung	durch Eisenbahnfahrzeugteile	wie vor, jedoch durch Eisenbahnteile (z.B. lockere Bremsgestänge, umgeknickte Traversen, Leitern usw.)
941	Sonst. Unfall	Beschädigung	durch Ladung	Beschädigung stehender Eisenbahnfahrzeuge auf Nachbargleis
942	Sonst. Unfall	Beschädigung	durch Eisenbahnfahrzeugteile	wie vor
990	Sonst. Unfall	übriger Unfall	Beschuss, Bewurf, Beschädigung	Mutwilliger Eingriff von außen

Die Kenntnis der Bahnbetriebsunfallstatistik des Güterverkehrs ist somit die wichtigste Voraussetzung, um zu einer Risikoabschätzung des Chlortransports mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse zu gelangen. Entsprechende Anfragen der BAM an die Deutsche Bahn AG zur Überlassung bzw. Einsicht dieser Unfallstatistik wurden jedoch abschlägig beantwortet (siehe auch Kap. 7.3). Auch einer Bitte, entsprechende Streckendaten zur Verfügung zu stellen, aus denen z.B. die Anzahl der Bahnhofsdurchfahrten, der Bahnart (Hauptbahn, Nebenbahn), der Streckenkategorie (Personen, Güter, Mischbetrieb, Hochgeschwindigkeitsstrecke usw.) ersichtlich wäre (7 /6/), wurde nicht entsprochen. Aus diesem Grund stützen sich die nachfolgenden Betrachtungen im wesentlichen auf Literaturangaben 7 /3/, 7 /7/ sowie auf Angaben aus zugänglichen Datenbanken (GUNDI - Gefahrgutunfall-Datenbank im Internet).

## 7.2 Gefahrenidentifikation

Unfälle mit Eisenbahnkesselwagen in Verbindung mit einem Austritt von Gefahrgut sind zwar seltene Ereignisse, können aber trotz aller Bauvorschriften, Vorsorgemaßnahmen, Sicherheits-einrichtungen, Handlungsanweisungen usw. nicht völlig ausgeschlossen werden. Dabei wirkt erschwerend, dass neben den "systemimmanenten" Gefahrenquellen (Wagenpark, Betrieb, Sicherung) auch solche existieren, die vom Bahnbetrieb weitestgehend unabhängig sind, auf diesen aber nachhaltig einwirken können.

Am deutlichsten zeigt sich dies an den Schnittstellen mit dem Straßenverkehr, an den Bahnübergängen und bei Gefährdungen im Streckenbetrieb, die aus der Zugänglichkeit bzw. Quermöglichkeit der Gleistrasse resultieren. Selbst Straßenbrücken sind als Gefahrenquelle anzusehen, wie ein Beispiel aus dem Jahre 1992 zeigt 7 /8/.

Eine weitere Gefahrenquelle stellt, gerade für Gefahrguttransporte, die Tunneldurchfahrt dar (7 /9/). Hier sind es vor allen Dingen die eingeschränkten Sichtverhältnisse während des Zugbetriebes (Gefahr des Auffahrens) bzw., im Falle eines Brandes, die Schwierigkeiten hinsichtlich der Identifikation des betroffenen Gefahrguts, welche die Höhe einer Gefährdung bestimmen. Gemessen an der Gesamtlänge der Schienentrassen in der Bundesrepublik Deutschland, sind die Tunneldurchfahrten mit einer Gesamtlänge von ca. 375 km jedoch vernachlässigbar, bzw. durch ein entsprechendes Management (Vorankündigung, kein Gegenverkehr) sicher zu gestalten.

Die Bahnbetriebsunfälle an den Bahnübergängen sind zu einem hohen Prozentsatz auf das Fehlverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer zurückzuführen. In den meisten Fällen sind diese Unfälle in ihrer Wirkung auf den Güterverkehr vergleichsweise gering. Durch das Gewicht des Triebfahrzeugs werden die Straßenfahrzeuge vom Gleiskörper geschoben. Es ist jedoch auch denkbar, dass ein Bahnbetriebsunfall infolge eines beladenen Straßentankfahrzeugs verursacht wird, wie ein Beispiel aus den USA zeigt (7 /10/). In einem solchen Fall ist mit Explosionen und Bränden zu rechnen, die auf Grund der Wärmestrahlung auch nachhaltig auf Kesselwagen einwirken können.

Auch aus diesem Grund ist die DB AG daran interessiert, die Anzahl der Bahnübergänge zu reduzieren (7/11/) bzw. durch solche zu ersetzen, die zum einen technisch gesichert sind und zum anderen das Befahren oder Blockieren des Gleiskörpers unmöglich machen, z.B. durch eine Vollschranke (natürlich unter der Voraussetzung dass diese auch schließt!).

Tab. 7-3 gibt einen Überblick über die Anzahl der Bahnübergänge und deren technische Sicherung.

**Tab. 7-3: Anzahl der Bahnübergänge und deren Sicherung**

Quelle: Statistisches Jahrbuch 1998, Fachserie 8, Reihe 2, Eisenbahnverkehr, Tabelle 3.1

	1997	Davon				
		mit technischer Sicherung			ohne techn. Sicherung	
		Schranken	Halbschranken		Drehkreuz Umläufe	ohne alles
			mit Blinklichter oder Lichtzeichen	Ohne		
Baden-Württemberg	2942	383	725	465	52	1317
Bayern	5672	535	676	556	15	3890
Berlin	138	9	34	28	4	63
Brandenburg	1687	305	454	18	5	905
Bremen	307	32	21	25	-	229
Hamburg	280	20	75	64	24	97
Hessen	1720	344	299	241	14	822
Mecklenburg – Vor- pommern	1285	264	319	14	9	679
Niedersachsen	5300	579	643	544	60	3474
Nordrhein - Westfalen	5001	851	837	613	102	2598
Rheinland - Pfalz	1729	363	228	181	2	955
Saarland	139	26	11	16	-	86
Sachsen	2377	366	552	13	36	1410
Sachsen - Anhalt	1771	386	379	10	20	976
Schleswig - Holstein	1278	213	195	198	32	640
Thüringen	1140	219	307	3	2	609
Insgesamt	32766	4895	5755	2989	377	18750
		14,9 %	17,6 %	9,1 %	1,2 %	57,2 %
		41,6 %			58,4 %	

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Anzahl der Bahnübergänge im Streckennetz der DB-AG ca. 26.980 beträgt (Quelle: Deutsche Bahn AG Daten und Fakten 1998/99). Aus der vorstehenden Tabelle ist zu ersehen, dass die Mehrzahl der Bahnübergänge, auch bei Anzeige einer Zugfahrt, (unerlaubt) passierbar sind. Lediglich 14,9 % schließen dies durch Vollschranken weitestgehend aus. In Abb. 7-2 (siehe Anlagenband) sind alle Gefahrenquellen, die beim Schienentransport wirksam werden können, zusammenfassend dargestellt.

Eine Freisetzung von Chlor bzw. eines Gefahrgutes generell setzt das Auftreten von Versagensmechanismen voraus. Diese können aus einer Belastung durch einen Bahnbetriebsunfall als auch durch ein Versagen ohne eine unfallartige Beanspruchung, z.B. Undichtigkeiten von Armaturen, Durchrostung des Behälters oder Sabotageeingriffe auftreten.

Eine Freisetzung von Chlor infolge eines Bahnbetriebsunfalls setzt voraus, dass die Beanspruchung so groß ist, dass die Umschließung bzw. Verschlüsse (Domdeckel, Armaturen) durch mechanische oder thermische Belastungen versagen. Diese Beanspruchung im Zugbetrieb ist von der Transport - bzw. Kollisionsgeschwindigkeit abhängig. Auch aus diesem Grund ist die Kenntnis der Bahnbetriebsunfallstatistik zwingend notwendig; nur aus dieser können die Versagensgrenzen von Kesselwagen abgeleitet werden.

Bei einem Bahnbetriebsunfall können grundsätzlich folgende Belastungsarten zu einem Versagen der Umschließung führen:

- ◆ Ein Frontalstoß, übertragen über die Puffer und das Fahrgestell. Dabei erfährt der Behälter selbst keine direkte Berührung, es wirken hier Beschleunigungskräfte auf das Ladegut bzw. auf die Auflager. Diese Belastung kann verursacht sein durch:
  - Einen Frontalzusammenstoß ("Zusammenstoß Gegenfahrt").
  - Einen Zusammenstoß infolge Auffahrens in gleicher Richtung.
  - Einen Aufprall auf ein Hindernis (Baumaschinen, Bäume usw.).
  - Einen Zusammenprall an einem Bahnübergang (Dies setzt jedoch einen entsprechenden "Unfallgegner" voraus).
  - Eine Entgleisung mit anschließendem Zusammenstoß ("Entgegenkommer").
  - Einen Zusammenstoß infolge Auffahrens auf einen stehenden Eisenbahnwagen (abgerissener Vorausfahrer).
- ◆ Ein Seitenstoß, hervorgerufen durch eine quer zur Längsrichtung wirkenden Belastung, verursacht durch:
  - Einen Zusammenstoß infolge einer Flankenfahrt.
  - Einen Zusammenprall an einem Bahnübergang.
- ◆ Seitliches Umstürzen des Kesselwagens, verursacht durch eine Entgleisung infolge
  - defekten Unterbaus oder defekten Laufwerks (z.B. Heißläufer),
  - eines Zusammenstoßes infolge Gegenfahrt, Flankenfahrt, Auffahrt, Aufprall und Zusammenprall.
- ◆ Eine Penetration oder Deformation des Behälters. Diese Stoßbelastung kann aus allen Bahnbetriebsunfällen herrühren. Sie ist im Gegensatz zu den vorgenannten Belastungsarten auf eine kleine Fläche beschränkt.
- ◆ Die Einwirkung eines Schadenfeuers im Zusammenhang mit dem Zugbetrieb, z. B. durch brennende Ladung.

### 7.2.1 Notfallmanagement

Die Sicherheitsphilosophie der Gefahrgutbeförderung ist auf die Beherrschung der mit dem Transport verbundenen Risiken ausgerichtet. Die behördlichen Aufgaben in Fragen der Gefahrgutüberwachung sind mit dem Eisenbahnneuordnungsgesetz Ende 1993 auf das Eisenbahnbundesamt (EBA) übertragen worden. Da sich eine vollständige Risikovermeidung nur durch

ein generelles Beförderungsverbot erreichen ließe, besteht die Aufgabe des EBA hauptsächlich darin, die Überwachung der Beförderung zu gewährleisten, d.h. auf die Einhaltung der Gefahrgutrechtsvorschriften zu achten. Da trotz aller Vorsorgemaßnahmen nicht auszuschließen ist, dass es bei Transportvorgängen zu Unfällen mit Gefahrgut kommen kann, wurde von der DB AG Anfang 1997 ein Notfallmanagement eingeführt. Dieses umfasst die gesamte Organisation zur Bewältigung von Unfällen, Störungen und auch Katastrophen. Bedingt durch viele bahnspezifische und topografische Besonderheiten (elektrifizierte Strecken, weitläufige Rangierbahnhöfe, Tunnel) spielt das Notfallmanagement eine besonders verantwortungsvolle Rolle hinsichtlich des koordinierten Einsatzes der Hilfskräfte und Feuerwehren. Nähere Informationen zum Aufbau und zur Struktur des Notfallmanagements können weiterführenden Veröffentlichungen 7 /12/, 7 /13/ entnommen werden.

Eine weitere wichtige Vorsorgemaßnahme ist das **Transport-Unfall-Informations- und Hilfeleistungssystem** der Chemischen Industrie, abgekürzt TUIS. Die Mitglieder haben sich darin verpflichtet, bei Schadensfällen mit Chemieprodukten, also auch gefährlichen Gütern, die öffentlichen Einsatzkräfte zu beraten und zu unterstützen. Die Installation eines derartigen Systems war auch damit begründet, dass die Beseitigung der Unfallfolgen mit gefährlichen Stoffen Expertenwissen verlangt, welches von den am Einsatzort tätigen Feuerwehren und Hilfsdiensten nicht in jedem Fall vorausgesetzt werden kann. Aus diesem Grund werden ständige Übungen, auch mit speziell vorgehaltenen Übungskesselwagen abgehalten (7 /14/)

### **7.3 Gefahrenbewertung**

In Abb. 7-3, (siehe Anlagenband) ist die Hauptstruktur des Fehlerbaumes zusammen mit den abgeleiteten Eintrittswahrscheinlichkeiten dargestellt. Demnach ereignet sich eine Chlorfreisetzung beim Schienentransport, gleich welcher Ursache, ca. alle 28 Jahre. Eine Freisetzung durch einen Bahnbetriebsunfall erfolgt ca. alle 60 Jahre, durch Material - oder Armaturenversagen ca. alle 55 Jahre.

Es ist auch zu sehen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten eine sehr große Spannweite aufweisen. Überraschend ist, dass die Chlorfreisetzungen aus der Tankwandung mit und ohne Unfallbeanspruchung in der gleichen Größenordnung liegen. Wird nach der Betriebsart unterschieden, so zeigt sich dass der größte Teil der Freisetzungen im Zug- und Rangierbetrieb durch Bahnbetriebsunfälle initiiert werden, wohingegen bei abgestellten Kesselwagen der Hauptanteil der Freisetzungen durch Material - bzw. Armaturenversagen verursacht wird.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass bis dato noch kein schwerer Unfall mit einem Chlorkesselwagen aufgetreten ist. Dies liegt zum einen daran, dass das Transportgut Chlor, gemessen an den in Kesselwagen insgesamt beförderten Produkten, nur einen vergleichsweise geringen Umfang hat, zum anderen an Sondervorschriften, z.B. der besonderen Bauform, mit oben liegenden Ventilen.

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Referenzanlage untersucht, die mit Chlorkesselwagen beliefert wird. Die Schienentrasse ist ca. 252 km lang. Nach internen Informationen hat sich auf dieser Trasse noch kein Bahnbetriebsunfall mit einem Kesselwagen bzw. Chlorkesselwagen ereignet.

### 7.3.1 Auswertung von Literaturangaben

Da, wie schon unter Kapitel 7.1 ausgeführt, die Deutsche Bahn - AG wie auch das Eisenbahn - Bundesamt nicht bereit waren, die Bahnbetriebsunfallstatistik zur Einsichtnahme bzw. Auswertung zur Verfügung zu stellen, konnten weitere Informationen nur aus öffentlich zugänglichen Quellen gewonnen werden.

So wurden u.a. in einer am Institut für Verkehrswesen der Universität Hannover entstandenen Arbeit die in Tab. 7-4 aufgeführten Unfallereignisse entnommen.

**Tab. 7-4: Aufteilung der Unfallereignisse DB (1989 - 1993) auf Bahnhöfe, Strecken und Bahnübergänge (aus 7 /9/)**

Unfallart			Bahnhof		Strecke	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
ENTGLEISUNGEN	5246		5074	96,7	172	3,3
ZUSAMMENSTÖSSE	5901		5848	99,1	53	0,9
Frontal	98	1,7	89	90,8	9	9,2
Flankenfahrt	738	12,5	738	100,0	0	0
Auffahrt auf fahrendes EBF	449	7,6	443	98,7	6	1,3
Auffahrt auf stehendes EBF	4616	78,2	4578	99,2	38	0,8
AUFPRALLE	7321		5263	71,9	2058	28,1
Prellbock	888	12,1	874	98,4	14	1,6
Gleissperre	1272	17,4	1230	96,7	42	3,3
Hemmschuh	1387	18,9	1361	98,1	26	1,9
Straßenfahrzeug	514	7,0	403	78,4	111	21,6
Baumaschine	187	2,6	119	63,6	68	36,4
Baum	409	5,6	54	13,2	355	86,8
Tier	484	6,6	53	11,0	431	89,0
Oberleitungsanlage	99	1,4	50	50,5	49	49,5
Sonstige Aufpralle	2081	28,4	1119	53,8	962	46,2
ZUSAMMENPRALLE						
Bahnübergang	1631		360	22,1	1271	77,9
Σ	20.099		16.545	82,3	3.554	17,7

Diese Aufstellung ist vor allen Dingen für eine Risikominimierung hinsichtlich der Auswahl einer bestimmten Strecke, auf der Gefahrguttransporte erfolgen sollen, interessant.

Es ist z.B. zu erkennen, dass die Mehrzahl der Unfälle in den Bahnhofsbereichen stattfindet. Dies ist auch nicht weiter erstaunlich, da dieser Bereich als eine "Quelle und Senke" des Schienenverkehrs betrachtet werden kann: Es finden gleichzeitig Rangierfahrten und Zugfahrten statt, oftmals in entgegengesetzten Richtungen. Bahnhofsdurchfahrten von Personen - als auch Güterzügen erfolgen oftmals mit beträchtlichen Geschwindigkeiten. Im Bahnhofsbereich existieren Durchgangsgleise, Wartegleise und auch Abstellgleise. Dies bedingt eine Vielzahl von Weichen und Kreuzungen.

Im Streckenbetrieb dominiert eindeutig das Unfallereignis "Aufprall" und "Zusammenprall" an einem Bahnübergang. Als Konsequenz für Gefahrguttransporte könnte daraus abgeleitet werden, dass Bahnhofsdurchfahrten einer speziellen Risikobetrachtung zu unterziehen sind und Bahnübergänge, falls sie nicht vermieden werden können, den höchsten Sicherungsstandard aufweisen sollten. Die Tab. 7-4 weist für einen 5 jährigen Betrachtungszeitraum exakt 20.099 Unfälle aus, dies entspricht einer Unfallrate von ca. 11 Unfällen pro Tag. Diese Unfallrate enthält jedoch auch Unfälle des Personenverkehrs. Darüber hinaus ist nicht abzuleiten, wie hoch die Unfallraten des Zug - und Rangierbetriebs angenommen werden müssen. Die Unfallrate des Güterverkehrs ist in Tab. 7-5 dargestellt.

**Tab. 7-5: Anzahl der Güterzugunfälle 1989 - 1993 (Quelle : Hörstel 7 /7/)**

Unfallart	Güterzüge				Gesamt		
	Anzahl	%	Platz		Anzahl	%	Platz
Entgleisungen	70	16,1	4		5246	26,1	3
Zusammenstöße	154	35,5	1		5901	29,3	2
Aufpralle	123	28,3	2		7321	36,5	1
Zusammenpralle	87	20,1	3		1631	8,1	4
Σ	434	100			20099	100	

Während des 5 jährigen Betrachtungszeitraumes wurden nach oben stehender Tabelle 434 Unfälle im Güterzugverkehr registriert. Es handelt sich dabei um eine Untermenge der in Tabelle 4 aufgeführten Unfälle, wobei jedoch nicht bekannt ist, wie viele Eisenbahnkesselwagen mit Gefahrgut daran beteiligt waren.

Vergleicht man diese Teilmenge mit der Gesamtmenge hinsichtlich der Unfallarten bzw. ihrer Häufigkeiten, so zeigt sich, dass sich diese von der Gesamtheit unterscheidet. Während z.B. die Unfallart "Aufprall" in der Gesamtheit mit 36,5 % an der Spitze liegt, ist diese bei Güterzugunfällen nur noch mit 28,3 % vertreten.

Daraus ist zu schließen, dass zwischen Personen - und Güterverkehr grundsätzlich zu unterscheiden ist, und zwar aus den folgenden Gründen :

- ◆ Güter - und Personenverkehr finden nicht zwangsweise entlang derselben Trassierung statt; viele Streckenabschnitte sind dem Personenverkehr vorbehalten und umgekehrt.
- ◆ Der Güterverkehr wird, soweit möglich, vorzugsweise in den Nachtstunden abgewickelt. Daraus ergibt sich eine andere Häufigkeit bezüglich der Unfallarten. Es ist z.B. denkbar,

dass die Unfallart "Zusammenstöße", in der Gesamtbetrachtung auf Platz 2 liegend, sich dadurch im Güterverkehr auf den ersten Platz verschiebt.

- ◆ Stark frequentierte Strecken (sogen. Hauptstrecken) weisen i.A. eine "höherwertige" Sicherungstechnik auf (Induktive Zugsicherung, Linienzugbeeinflussung, Heißläuferortungsanlagen usw.) bzw. werden, so weit dies möglich ist, nicht durch Bahnübergänge gequert, sondern durch Brücken oder Unterführungen "berührungslos" gestaltet.

Aus den vorgenannten Gründen, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, ist es auch nicht möglich, die in Tab. 7-4 angegebene Aufteilung der Unfallereignisse auf einzelnen Streckenabschnitte auf die Teilmenge "Güterzugunfälle" zu beziehen, bzw. aus der prozentualen Verteilung eine Ereignishäufigkeit für eine Fehlerbaumanalyse abzuleiten.

### **7.3.2 Auswertung der Gefahrgutunfall - Datenbank GUNDI**

Eine weitere Möglichkeit, statistische Angaben zu verunfallten Kesselwagen mit Gefahrgut zu erhalten, bietet die **Gefahrgutunfall - Datenbank im Internet**, abgekürzt GUNDI. Das Fachmagazin "Gefährliche Ladung" des Storck Verlages Hamburg berichtet seit über 40 Jahren über Unfälle mit Gefahrgütern bei Transport, Umschlag und Lagerung. Seit 1992 werden diese in einer Unfall-Datenbank registriert. Diese Daten stehen der Öffentlichkeit im Internet kostenlos zur Verfügung (<http://www.storck-verlag.de/gg/ggundi.htm>).

In GUNDI werden Unfälle mit Gefahrgütern erfasst, über die deutsche Tageszeitungen berichtet haben. Quellen sind rund 600 deutsche Lokal - und Regionalzeitungen. Diese werden ergänzt durch Recherchen der Gefahrgutredaktion bzw. durch Einsatzberichte der Feuerwehren, Polizei und örtlicher Behörden. Auch Unfälle aus dem Ausland, die auf Grund ihrer Schwere, ihres Zustandekommens bzw. des Notfallmanagements interessant sind, sind in dieser Datenbank enthalten (z. B. Zürich, 8.3.94). Da die Datengewinnung auf Meldungen in den Medien bzw. auf Informationen der Feuerwehren bzw. örtlicher Behörden beruht, muss unterstellt werden, dass auch diese Unfall - Datenbank das Unfallgeschehen nicht vollständig abbildet. Es ist zu vermuten, dass sogen. Bagatellunfälle, die mit keinem oder nur geringem Ladungsaustritt verbunden waren und somit keine Feuerwehreinsätze erforderten, nicht registriert worden sind. Derzeit sind 94 Unfälle mit Gefahrgütern, die in Eisenbahnkesselwagen transportiert worden sind, in dieser Datenbank enthalten (Stand 13.4.00, Ereignisse aus dem Ausland ausgenommen). Davon sind 3 Ereignisse auf Grund unvollständiger Daten nicht auswertbar. Der Zeitraum umfasst die Jahre 1992 - 1999. In Tab. 7-6 sind sämtliche Bahnbetriebsunfälle mit Eisenbahnkesselwagen und Gefahrgut aufgelistet. Wie ersichtlich ist nur ein Unfall mit Chlor registriert

**Tab. 7-6: Bahnbetriebsunfälle mit Eisenbahnkesselwagen und Gefahrgut (Quelle : GUNDI - Gefahrgut-Unfall-Datenbank im Internet)**

lfd. Nr.	Datum	Zug- betrieb	Rangier- betrieb	Bahnhof DB Netz	Rangier- bahnhof	Güter- bahnhof	Werks- gelände	Gefahr - gutaustritt / Substanz	Menge	Beteiligte Einheiten		Bundes- land	E. Art	Ursache
										Güterwg.	Kesselwg.			
1	20.1.92		x				x	j / Dieselkr.	10000 kg		3 von 14	HH	241	Zusammenstoß / Fehlverhalten
2	4.2.92		x				x	j / Salzsäure	53 kg		1	HE		Rissbildung in Tankausrüstung
3	9.6.92	x						j / Acrylnitril	10 l		1	HH		Domdeckel undicht
4	6.7.92		x				x	j / Salzsäure	200 l		1	TH		Durchrostung
5	13.9.92		x				x	j / Salzsäure	5000 l		1	NS		Leck / Rissbildung
6	5.10.92		x				x	j / Kerosin	3000 l		3	BY		Leck ?
7	16.10.92		x	?				j / Benzin	5500 l		1	?		Diebstahl Kraftstoff ?
8	28.12.92		x		x			n / Phenol	-		3 von 6	NS	221	Zusammenstoß
9	20.2.93		x				x	j / Salzsäure	20 l		1	BW		Leck
10	24.2.93		x	x				j / Butan	1 l		1	BY		Ventil undicht ?
11	5.3.93		x				(x)	n / Benzin	-		1	BW		Waggonfabrik, Eingriff von außen
12	16.3.93		x				x	j / Heizöl	2000 l		4	BW	221	Zusammenstoß Flankenfahrt
13	20.4.93		x				x	j / Natrium	10 kg		1	NRW		Austritt beim Umladen
14	3.6.93		x			x		j / Salzsäure	100 l		1	MV		Leck, undichte Schweißnaht
15	18.6.93		x			x		j / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 kg		1	SH		Leck, undichte Schweißnaht
16	23.7.93		x				x	n / Propylen	-	x	2	NRW	241	Auffahren mit Entgleisung
17	12.9.93		x				x	j / Benzin	5000 l		3	MV	311	Aufprall mit Entgleisung, Umsturz
18	3.10.93	x						j / Diesel	30000 l	x	1	SC	101	Entgleisung mit Zusammenstoß

Ifd. Nr.	Datum	Zugbetrieb	Rangierbetrieb	Bahnhof DB Netz	Rangierbahnhof	Güterbahnhof	Werks- gelände	Gefahr - gutaustritt / Substanz	Menge	Beteiligte Einheiten		Bundes- land	E.-Art	Ursache
										Güterwg.	Kesselwg.			
19	5.10.93		x		x			j / Methanol	20 l		7	TH	311 ?	Umsturz
20	10.10.93	x						n / Ammoniak	-	x	1	HE	241	Entgleisung mit Zusammenstoß
21	2.11.93		x		x			n / Essigsäure	-		3	BW	101	Entgleisung, Umsturz, Weiche
22	28.12.93		x		x			j / Diesel	2000 kg		1/1	NS	240 ?	Zusammenstoß, Leck
23	12.1.94		x	x				j / Heizöl	59000 kg		1	NS	210 ?	Flankenfahrt Rangierlok ?
24	1.3.94		x	x				j / Heizöl	101 t	x	2	BY	231	Zusammenstoß / Auffahren
25	9.3.94		x		x			j / Butyraldehyd	1 l		1	NS		Ventil defekt ?
26	18.4.94		x			x		j / Oleum	10 l		1	NS		Leck
27	27.5.94		x	x				j / Salzsäure	900 l		1	SC		Leck ?
28	2.6.94		x	x				j / Natronlauge	1 kg		1	NRW		Ventil undicht
29	3.6.94		x			x		j / Salpetersäure	2 l		1	HE		Überfüllung, Austritt aus Ventil
30	5.6.94	x						j / Diesel	5000 kg		1	SC		Ventil undicht ?
31	6.7.94		x	x				j / Salpetersäure	10 l		1	BW		Domdeckel undicht
32	21.7.94		x			x		j / Salzsäure	10 l		1	HE		Leck
33	15.12.94		x			x		j / Heizöl	30000 l		1	B		?
34	27.12.94	x		(x)				j / Benzin	50 l		1	BY	941 ?	Penetration Behälterwand
35	10.4.95		x		(x) ?			n / Propan	-		1	TH	100	Entgleisung
36	25.4.95		x		x			j / Acetaldehyd	5 l		1	NS		Dichtung defekt
37	21.5.95		x			x		j / Heizöl	30000 l		1	B		Diebstahl Heizöl ?
38	21.7.95		x		x			j / Propan	10 kg		1	SH		Ventil geöffnet, Fehlfunktion ?
39	18.8.95		x			x		j / Ethylacetat	10 l		1	NRW		Leck, undichte Schweißnaht
40	18.8.95		x	x				n / Acrylsäure	-		1 von 2	NRW	100	Entgleisung, Umsturz

Ifd. Nr.	Datum	Zug- betrieb	Rangier- betrieb	Bahnhof DB Netz	Rangier- bahnhof	Güter- bahnhof	Werks- gelände	Gefahr - gutaustritt / Substanz	Menge	Beteiligte Einheiten		Bundes- land	E. Art	Ursache
										Güterwg.	Kesselwg.			
41	23.8.95		x		x			j / Salzsäure	50 l		1	BW		Flansch undicht
42	17.10.95	x		(x)				j / Butadien	50 l		1	NRW		Dichtung defekt
43	8.12.95		x		x			j / Butylether	50 l		1	SCA		Bodenventil undicht
44	24.12.95		x		x			j / Diesel	30000 l		1	SC	100	Entgleisung, Umsturz, Weiche
45	8.1.96		x		x			j / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1000 kg		1			Dichtung defekt
46	29.2.96	x						j / Acrylsäure	20 l		Gzzug	HE		Leck
47	29.2.96		x		x			j / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10 l		1	RP		Leck
48	11.5.96		x		x			j / Acrylnitril	20 l		1	NS		Domdeckel undicht
49	1.6.96	x						j / Vinylchlorid	200 t		Gzzug	SCA	101	Entgleisung, Explosion
50	20.6.96		x		x			j / Isopropanol	25 t	x	1	NRW	221	Flankenfahrt, Umsturz
51	10.8.96		x		x			j / Allylalkohol	10 l		1	?		Domdeckel nicht verschlossen
52	29.8.96		x		x			j / Natronlauge	10 l		1 von 2	NS	241	Zusammenstoß, Umsturz
53	5.11.96	x		(x)				j / Diesel	40000 l	x	1	BW	101	Heißläufer, Entgleisung, Umsturz
54	30.1.97		x	x				j / Salzsäure	50 l		1	?		Leck
55	19.2.97	x		(x)				j / Benzin	85 t	x	Gzzug	HE	221	Flankenfahrt, Entgleisung
56	26.2.97		x		x			j / NaHSO <sub>3</sub>	5 l		1	NS		Ventil undicht
57	13.3.97		x		x			j / Methansäure	20 l		1	BW		Leck
58	12.4.97		x	x				j / (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	20 l		1	NS		Ventil undicht
59	12.6.97		x			x		j / Acetaldehyd	20 l		1	RP		Entladen, Flanschv. Undicht
60	21.6.97		x		x			j / Butan	50 l		1	SC		Leck
61	25.6.97	x		(x)				j / Natronlauge	25 t		1	NS	101	Entgleisung, Umsturz
62	11.8.97	?	?		ohne Zählung			j / Butylacetat	?	1		RP		Leck

Ifd. Nr.	Datum	Zug- betrieb	Rangier- betrieb	Bahnhof DB Netz	Rangier- bahnhof	Güter- bahnhof	Werks- gelände	Gefahr - gutaustritt / Substanz	Menge	Beteiligte Einheiten		Bundes- land	E.-Art	Ursache
										Güterwg.	Kesselwg.			
63	16.8.97		x		x			j / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10 l		1	?		Domdeckel undicht
64	17.11.97	?	?	x		ohne Zählung		j / O <sub>2</sub> flsg.			1	NRW		Ventil undicht
65	20.11.97	x		(x)				j / Benzin, Heizöl	600 t		Gzzug	BB	101	Entgleisung, Explosion
66	9.12.97	x						j / Heizöl	291 t	P-Zug	Gzzug	NS	211	Zusammenstoß, Explosion
67	30.12.97		x		x			j / Salzsäure	5 l		1	BW		Dichtung Domdeckel unkorrekt
68	23.1.98		x			x		j / Acetaldehyd	5 l		1	SL		Leckage beim Befüllen ?
69	30.1.98		x		x			n / Propan	-		2	HE	331	Entgleisung
70	10.4.98		x		x			j / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10 l		1	NW		Domdeckel undicht
71	7.5.98		x		x			n / Natronlauge	-		1	NW		Entgleisung, Umsturz, Weiche
72	17.9.98		x			x		j/Dichlorphenol	20 kg		1	HE		Entladen, Flansch undicht
73	18.9.98		x		x			j / 1,2-Kresol	?		1	BW		Ventil undicht
74	30.9.98		x			x		j / Chlor	?		1	TH		Umfüllen, Dichtung defekt
75	13.11.98		x	x				j / NaHSO <sub>3</sub>	5 l		1	SCA		Leck
76	20.1.99		x		x			j / Salzsäure	2 l		1	SL		Leck
77	25.1.99		x		x			j / Butan	?		1	HH		Leck
78	3.2.99		x	x				j / Essigsäure	5 l	x	1	BY	311	Aufprall, Entgleisung, Umsturz
79	8.2.99		x		x			n / Ammoniak	-		1	NI	100	Entgleisung, Weiche
80	11.3.99		x		x			j / Diethylanilin	3 l		1	BW		Ventil undicht
81	27.3.99		x	x				j / Salzsäure	?		1	BY		Leck
82	30.3.99		x		x			j / Palatinol	150 l		1	BW		Leck
83	2.4.99		x		x			j / Salzsäure	10 l		1	BW		Leck, korrodierte Schweißnaht
84	20.4.99	?	?		ohne Zählung	?		j / Salzsäure		1		BW		Überfüllung

Ifd. Nr.	Datum	Zug- betrieb	Rangier- betrieb	Bahnhof DB Netz	Rangier- bahnhof	Güter- bahnhof	Werks- gelände	Gefahr - gutaustritt / Substanz	Menge	Beteiligte Einheiten		Bundes- land	E.-Art	Ursache
										Güterwg.	Kesselwg.			
85	28.4.99	x						n/Butyraldehyd	-	x	1	HE	100	Entgleisung, Umsturz
86	8.6.99	x		(x)				n / Benzin	-		Gzzug	BW	101	Entgleisung, Umsturz, Weiche
87	8.6.99	x						j / Heizöl	5 l		2	HE		Domdeckel undicht
88	29.6.99		x			x		n / Propan	-	1	1	SH	100	Entgleisung, Umsturz
89	3.7.99	x						j / Acetaldehyd	20 l	x	1	NW		Domdeckel undicht
90	9.9.99		x			x		j/Salpetersäure	5 l		1	NI		Leck
91	16.9.99	x						j / Argon	?	x	1	HE		Ventil undicht, Überfüllung ?
92	13.10.99	x						j / Salzsäure	5 l		1	NI		Leck ?
93	18.11.99	x		(x)				j/Cyclohexanon	40 l		1	SC		Ventil undicht
94	27.12.99	x						n/Salpetersäure	-	x	2	SH	100	Entgleisung

### 7.3.2.1 Gefahrenbewertung Zugbetrieb

Werden die Bahnbetriebsunfälle nach Zug - und Rangierbetrieb unterschieden, so ergibt sich, dass von 91 Unfallereignissen 21 dem Zugbetrieb und 70 dem Rangierbetrieb zuzurechnen sind. Dies lässt zunächst den Schluss zu, dass der Zugbetrieb, der mit vergleichsweise geringen 21 % am Unfallgeschehen beteiligt ist, ein wesentlich geringeres Risiko in sich birgt, als dies beim Rangierbetrieb der Fall ist. In Tab. 7-7 sind diese Relationen dargestellt.

**Tab. 7-7: Anzahl der Bahnbetriebsunfälle und Anzahl der Gefahrgutaustritte im Zug- und Rangierbetrieb, Quelle: GUNDI**

Jahr	Anzahl	davon im		davon mit Gefahrgutaustritt im	
		Zugbetrieb	Rangierbetrieb	Zugbetrieb	Rangierbetrieb
1992	8	1	7	1	6
1993	14	2	12	1	9
1994	12	2	10	2	10
1995	10	1	9	1	7
1996	9	3	6	3	6
1997	12	4	8	4	8
1998	8	-	8	-	6
1999	18	8	10	5	8
Σ	91	21	70	17	60
(%)	100	23	77	81 (auf 21%)	86 (auf 70%)

Werden die Unfälle hinsichtlich der Gefahrgutaustritte unterschieden, so ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Im Zugbetrieb trat in 17 von 21 Fällen Gefahrgut aus, d.h. in 81 % der Fälle versagte die Umschließung. Im Rangierbetrieb wurde in 86 % der Fälle ein Gefahrgutaustritt, gleich welcher Ursache, festgestellt. Hinsichtlich des Freisetzungsriskos scheinen also keine gravierenden Unterschiede zu bestehen. Sieht man sich jedoch die Ursachen der Freisetzungen im Zugbetrieb genauer an ( siehe Tabelle 7-6 ), so ergibt sich, dass von den 17 Freisetzungen ( lfd.Nr. 3,18,30,34,42,46,49,53,55,61,65,66,87,89,91,92,93 ) nur 8 ( lfd.Nr. 18,34,49,53,55,61,65,66 ) Fälle durch eine Unfallbeanspruchung durch den Bahnbetrieb verursacht worden ist. Die restlichen 9 Freisetzungen wurden durch undichte Domdeckel (3 x), undichte Ventile (3 x), durch Lecks (2 x) bzw. durch eine fehlerhafte Dichtung verursacht. Generell lässt das vorliegende Datenmaterial den Schluss zu, dass die Masse der Freisetzungen nicht durch Bahnbetriebsunfälle verursacht sind. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Feststellung nur hinsichtlich der Häufigkeit zutreffend ist. Werden die freigesetzten Mengen betrachtet, so sind diese auf Grund der Unfallbeanspruchung (Kollisions- und Aufprallgeschwindigkeiten) im Zugbetrieb größer. In Tab. 7-8 sind die Gefahrgutfreisetzungen und ihre Ursachen dargestellt.

**Tab. 7-8: Gefahrgutfreisetzung infolge Bahnbetriebsunfall und andere Ursachen**

Jahr	Anzahl	Bahnbetriebsunfall (nach DB-Er.art)	andere Ursachen
1992	7	1	6
1993	10	5	5
1994	12	3	9
1995	8	1	7
1996	9	4	5
1997	12	4	8
1998	6	-	6
1999	13	1	12
Σ	77	19	58
(%)	100	25	75

Es ist zu sehen, dass 25 % aller Gefahrgutfreisetzungen durch Bahnbetriebsunfälle begründet sind, 75 % sind durch andere Ereignisse verursacht. Werden diese gesondert betrachtet so ergibt sich, dass von 58 Freisetzungen 26 durch Fehlhandlungen, 29 durch Schäden am Kesselwagen und 3 durch sonstige Vorkommnisse verursacht worden sind (Tab. 7-9).

**Tab. 7-9: Anzahl der Gefahrgutfreisetzungen durch Bedienfehler oder Unterlassung beim Be-/ Entladen (kein sicherer Verschluss durch Domdeckel, fehlerhafte Dichtungen, offene Ventile), Schäden am Kesselwagen und sonstige**

Jahr	Anzahl	Fehlhandlungen	Schäden am Kesselwagen	Sonstige
1992	6	1	4	1
1993	5	1	4	-
1994	9	2	6	1
1995	7	3	3	1
1996	5	3	2	-
1997	8	5	3	-
1998	6	5	1	-
1999	12	6	6	-
Σ	58	26	29	3
(%)	100	45	50	5

### 7.3.2.2 Gefahrenbewertung Rangierbetrieb

Werden die Unfälle im Rangierbetrieb mit einer Gefahrgutfreisetzung hinsichtlich des Ortes der Feststellung bzw. Verursachung einer genaueren Betrachtung unterzogen, so zeigt sich, dass der grösste Teil der Freisetzungen auf Rangierbahnhöfen und beim Empfänger bzw. Absender, d.h.auf Werksgeländen verursacht wird (Tab. 7-10).

**Tab. 7-10: Aufteilung der Unfälle im Rangierbetrieb mit Gefahrgutfreisetzung nach Unfallort (Quelle: GUNDI)**

Jahr	Anzahl	Bahnhof DB Netz	Rangierbahnhof	Güterbahnhof	Werks- gelände
1992	6	1	-	-	5
1993	9	1	2	2	4
1994	10	5	1	1	3
1995	7	-	3	4	-
1996	6	-	3	3	-
1997	8	2	4	1	1
1998	6	1	2	-	3
1999	8	2	4	2	-
Σ	60	12	19	13	16
%	100	20,0	31,6	21,7	26,7

Dabei ist jedoch zu beachten, dass viele Ereignisse dem Rangierbetrieb zugerechnet werden, die u.U. durch eine Beanspruchung im Zugbetrieb verursacht worden sind, aber erst auf Grund des Zugstillstandes in den Bahnhöfen und Rangier- bzw. Güterbahnhöfen entdeckt werden können. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass hier in erster Linie Schäden am Kesselwagen für eine Gefahrgutfreisetzung verantwortlich sind, bzw. die Umschließung insgesamt (Behälter, Domdeckel und Ventile) den Beanspruchungen des Zugbetriebs nicht gewachsen ist.

Werden die Gefahrgutfreisetzungen auf dem Gelände des Absenders und Empfängers nach ihren Ursachen untersucht, so ergibt sich das folgende Bild (Tab. 7-11).

**Tab. 7-11: Ursachen der Gefahrgutfreisetzungen in Werksgebieten**

Jahr	Anzahl	Ursache der Gefahrgutfreisetzung
1992	5	1 x Rangierunfall, 4 x Schäden am Kesselwagen
1993	4	2 x Rangierunfall, 1x Schaden am Kesselwagen, 1 x Austritt beim Umladen
1994	3	2 x Schäden am Kesselwagen, 1 x unbekannt
1995	-	
1996	-	
1997	1	Undichte Flanschverbindung
1998	3	1 x Leckage beim Befüllen, 1 x undichte Flanschverbindung, 1 x Dichtungsdefekt (Umfüllen von Chlor)
1999	-	-

Das Gros der Freisetzungen (7) ist auf Schäden am Kesselwagen zurückzuführen, insbesondere Durchrostungen bzw. undichte Schweißnähte. Danach sind Rangierfehler, verursacht durch das den Kesselwagen einstellende Personal, die nächst wichtige Ursache (3 x). Alle anderen Fälle sind entweder verursacht durch das Handling beim Befüllen bzw. Umladen (je 1 x), durch undichte Flanschverbindungen (2 x) bzw. durch einen Dichtungsdefekt (1 x). In einem Fall ist die Ursache unbekannt.

In einer Studie 7 /5/ wurden Bahnbetriebsunfälle im Güterzugverkehr aus den Jahren 1979 bis 1988 sowie Unfälle auf dem Rangierbahnhof Braunschweig untersucht. Es wurden Unfallraten von 0,5 relevanten Unfällen pro eine Million Güterzugkilometer bzw. 7,5 relevanten Unfällen pro eine Million rangierte Waggons ermittelt. Dabei wurde auf eine spezielle Betrachtung von Kesselwagen mit Gefahrgut verzichtet, jedoch die Betriebsabläufe und Unfallrisiken im Rangierbetrieb generell dargestellt, so dass diese Erkenntnisse auch für Chlorkesselwagen zutreffend sind.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten den Rangierbetrieb abzuwickeln. Zum einen unter Ausnutzung eines natürlichen Gefälles oder mittels spezieller Rangierloks. Im ersten Fall werden die ankommenden Züge in einer sogen. Einfahrgruppe bereitgestellt und nach der Trennung der einzelnen Einheiten über einen Ablaufberg gedrückt, von dem sie im allgemeinen einzeln in die verschiedenen Richtungsgleise ablaufen. Auch diese Bereiche besitzen ein natürliches Gefälle, so dass sich auch mehrere Waggons, unter Verwendung von Bremswagen, rangieren lassen. Das Abdrücken am Ablaufberg erfolgt mit einer Geschwindigkeit von maximal 5 km/h. Zur Geschwindigkeitsverminderung stehen sogen. Hemmschuhe zur Verfügung, diese dürfen jedoch nur bei Zulaufgeschwindigkeiten  $\leq 15$  km/h verwendet werden. Beim Rangierbetrieb mit Triebfahrzeugen gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h. Für besonders gekennzeichnete Gefahrgüter kann ein Ablaufverbot gelten oder es müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

Eine Auswertung der Bahnbetriebsunfälle (aus 7 /15/) offenbart einige typische Unfallursachen. Diese können wie folgt beschrieben werden :

- ◆ Unzureichende Abstimmung der Beteiligten untereinander. Dadurch z.B. falsche Weichenstellung, Benutzung nicht freigegebener Gleisabschnitte, kein Bremser am Gleis.
- ◆ Fehler am Hemmschuh oder beim Setzen des Hemmschuhes (Bremsweg überschätzt, falsche oder fehlende Schmierung, Verformung, Eis oder Fremdkörper auf den Gleisen).
- ◆ Vergessene Hemmschuhe führen zum Mitschleifen bis zur nächsten Weiche, dort Verklemmen und Entgleisung.
- ◆ Ungleichmäßiger Ablauf durch Fehlbedienung der Gleisbremsen oder durch Wageneinheiten, die wegen zu hoher Reibung schlecht laufen.
- ◆ Unzureichende Bremskapazität bei zusammengekoppelten Wagengruppen.
- ◆ Ungesichertes Abstellen oder Abkoppeln ohne Sicherung im Gefällebereich.
- ◆ Nichteinhaltung der vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit.
- ◆ Ungünstige Massenverteilung innerhalb einer Wagengruppe (z.B. Leerwaggon zwischen zwei beladenen Waggons) bei gleichzeitig hohen Druckkräften im Wagenverband, besonders bei Kurvenfahrt.

#### **7.4 Risikobewertung Schienentransport**

Da die Beschaffung statistischer Daten über Bahnbetriebsunfälle der DB - AG nicht möglich war, mussten andere Wege beschritten werden - z.B. die Auswertung älterer Arbeiten zu diesem Themenkomplex. Ein wesentlicher Punkt ist die Kenntnis der Anzahl der täglich verkehrenden Güterzüge, der Anteile von Gefahrguttransporten und deren Last - und Leerfahrten.

Dazu kann, quasi als Stichprobe, eine FIV - Daten - Auswertung für Güterzüge <sup>7</sup> (Zeitraum 31.10. - 18.11.91, aus 7 /7/) herangezogen werden, diese ergibt das folgende Bild : Im o.g. Zeitraum wurden 78.717 Züge registriert, dies entspricht einer Quote von 4143 Zügen / Tag bei einem Verkehrsaufkommen von 401,2 Mio t im Jahr 1991 (1998 : 305,7 Mio t (siehe Tab. 7-12).

Die 78.717 Güterzüge umfassten insgesamt 1.899.670 Wagen. Davon fuhren 1.338.949 unter Last, 560.721 Wagen waren leer. Das Verhältnis der beladenen zu den unbeladenen Wagen beträgt somit ca. 2,4 : 1. Die mittlere Wagenanzahl je Güterzug beträgt ca. 24 Wagen. Unter den 1.899.670 Wagen befanden sich 143.694 Wagen mit Gefahrgut. Unter der Annahme, dass das Verhältnis beladener/ unbeladener Wagen annähernd konstant ist, ergeben sich somit für das Jahr 1991 die folgenden Wagenbewegungen :

1.237.612	Sonstige Güterwagen - voll	- 65,15 %
518.364	Sonstige Güterwagen - leer	- 27,29 %
101.276	Gefahrgutwagen - voll	- 5,33 %
42.418	Gefahrgutwagen - leer	- 2,23 %
Σ 1.899.670		100,00 %

Die Gefahrguttonnage je Gefahrgutwagen betrug im o.g. Zeitraum 22,7 t (7 /7/). Wird angenommen, dass die mittlere Gefahrguttonnage konstant ist, kann die Anzahl der Gefahrgut - Wagenfahrten für das Jahr 1998 aus dem Verkehrsaufkommen (siehe Tabelle 12, Seite 34) abgeschätzt werden, und zwar: 47.100.000 t Gefahrgut : 22,7 t = 2.074.890 Gefahrgutwagen. Mit anderen Worten : Zum Transport von 47,1 Mio t Gefahrgut im Jahre 1998 waren mindestens 2.074.890 Lastfahrten erforderlich. Wird diese Anzahl = 5,33 % (Gefahrgutwagen-voll, siehe obige.Aufstellung gesetzt, ergibt sich somit für das Jahr 1998:

25.361.929 Bewegungen	sonstiger Güterwagen - voll (SGV)
10.623.593 Bewegungen	sonstige Güterwagen - leer (SGL)
2.074.890 Bewegungen	von Gefahrgutwagen - voll (GGV)
868.106 Bewegungen	von Gefahrgutwagen - leer (GGL)
Σ 38.928.518 Bewegungen	

Wird als spezielles Gefahrgut der Stoff Chlor mit in diese Betrachtung einbezogen, so ergibt sich:

25.361.929	Sonstige Güterwagen - voll (SGV)
10.623.593	Sonstige Güterwagen - leer (SGL)
2.066.890	Gefahrgutwagen - voll (GGV)
864.773	Gefahrgutwagen - leer (GGL)
8.000	Gefahrgutwagen - Chlor - voll (GGCLV) aus 7 /3/
3.333	Gefahrgutwagen - Chlor - leer (GGCLL)
Σ 38.928.518	

Somit kann die Eintrittshäufigkeit eines Transports mit dem Gefahrgut Chlor mit  $2 \cdot 10^{-4}/a$  angegeben werden.

<sup>7</sup> FIV : Fahrzeug - Informations- und Vormelde - System

Zu den Ausführungen dieses Kapitels ist folgendes zu bemerken: Der Chlortransport auf dem Schienenweg ist eine Teilmenge des gesamten Gütertransports. Der Gütertransport findet jedoch nicht gleichverteilt über das ca. 38.000 km lange Schienennetz der DB - AG statt. Die Verteilung dieser Güterströme ist nur sehr schwer abzuschätzen. Die Transportrouten des Stoffes Chlor auf dem Schienenweg können ebenfalls nur grob beurteilt werden. Aus diesem Grund konnte keine streckenorientierte Risikoabschätzung vorgenommen werden. Es ist ohne Beweis einzusehen, dass das Risiko einer Chlorfreisetzung für viele Flächen überhaupt nicht relevant ist. Darüber hinaus spielen die Schnittstellen mit dem Straßenverkehr eine wesentliche Rolle, d.h. auch die Dichte dieser Güterströme ist für den Transportweg "Schiene" von Bedeutung. Bei Vorliegen genauerer statistischer Daten können hierzu Präzisierungen vorgenommen werden.

**Tab. 7-12: Güterverkehr - Verkehrsaufkommen Eisenbahn gesamt und Gefahrgut (Quelle : Verkehr in Zahlen 1999, BMVBW, Berlin)**

Verkehrsaufkommen	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Insgesamt (Mio t)	302,2	303,7	303,7	401,2	361,2	316,3	324,0	320,2	309,3	316,7	305,7
davon Gefahrgut-Gütergruppen :											
Rohes Erdöl	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	0,9	0,9	0,8
Mineralerzeugnisse	21,5	21,5	22,3	33,8	31,0	28,4	26,3	25,2	26,6	25,6	24,8
Chemische Erzeugnisse	20,8	20,8	20,0	21,1	19,3	17,5	19,9	20,6	20,1	20,9	21,5
Σ (Mio t)	43,7	43,7	43,7	56,3	51,6	47,2	47,5	47,0	47,6	47,4	47,1
Anteil [ % ]	14,5	14,4	14,4	14,0	14,3	14,9	14,7	14,7	15,4	15,0	15,4

## 7.5 Untersuchung des Rangierbetriebs auf einem Werksgelände

Zur Abschätzung des Transportrisikos innerhalb einer Referenzanlage wurde ein chlorverarbeitender Betrieb in Deutschland ausgesucht. Der Chlorverbrauch beträgt etwa 700 t / Jahr, so dass pro Jahr ca. 25 - 30 Kesselwagen eingestellt werden müssen. Der am häufigsten eingesetzte Chlorkesselwagen ist ein zweiachsiger Kesselwagen mit einer maximal zulässigen Füllmasse von 24.650 kg. Diese zweiachsigen Kesselwagen haben ein Gesamtgewicht von 37,9 t, die Länge über Puffer beträgt 9,51 m.

Der Chlorkesselwagen wird über ein Anschlussgleis von der DB AG mit einer dieselbetriebenen Lok an der Grundstücksgrenze übergeben. Dazu muss zunächst eine sogen. Sicherungsweiche passiert werden, diese wird per Hand vom DB - Rangierpersonal betätigt. Nach der Übernahme erfolgt der Weitertransport mittels eines speziellen Schienen-Unimogs. Dieser ist mit einer Druckluftbremsanlage ausgerüstet die mit dem zu rangierenden Kesselwagen verbunden werden muss. Der Unimog und der Kesselwagen sind mit einer Zugstange verbunden. Der gesamte Transportvorgang mit beladenen Kesselwagen darf nur im "Zugbetrieb" erfolgen, d.h. der Schienen-Unimog befindet sich in Bewegungsrichtung immer vorne. Während des innerbetrieblichen Transports müssen noch drei Richtungsweichen passiert werden. Diese werden durch das Rangierpersonal des Werkes, welches für Transportvorgänge speziell geschult wurde, betätigt. Durch die manuelle Betätigung ist eine optische Kontrolle der Weichenstellung möglich. Die Traktionsgeschwindigkeit beträgt ca. 10 - 15 km/h. Während der Rangierfahrt zur Entlade- stelle müssen mehrere Werkstraßen gekreuzt werden, diese sind während der Prozedur mittels mobiler Einrichtungen gesperrt (Durchfahrtssperren). Durch die Frontposition des Zugfahrzeugs kann eine unmittelbare Überprüfung der Absperrung erfolgen. Vor der Einfahrt in die Entlade- zone muss eine weitere Richtungsweiche manuell betätigt werden. Diese wird sofort nach dem Einstellen des Kesselwagens wieder in eine abweisende Position gebracht, so dass nachlau- fende Kesselwagen nicht in die Umfüllstelle einfahren können. Diese Weiche weist insofern eine sicherheitstechnische Besonderheit auf, als zu ihrer Umstellung ein spezieller Betäti- gungshebel eingesetzt werden muss.

Nach dem genauen Positionieren des Kesselwagens werden beide Achsen mit einem doppel- ten Radvorleger gesichert und der Schienen - Unimog abgekoppelt. In der unmittelbaren Um- gebung des zur Entleerung vorgesehenen Kesselwagens, an einer Stirnseite und auf dem pa- rallel verlaufenden Nebengleis werden weitere Kesselwagen positioniert. Diese dienen als An- fahrtschutz. Seit dem Bestehen des Werkes kam es auf dem Gelände zu keinem Unfall bzw. Freisetzung von Chlor der mit dem Rangierbetrieb oder dem Handling eines Chlorkesselwa- gens in Verbindung gebracht werden könnte.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, auch größere Kesselwagen entgegenzunehmen (57 t). In diesem Fall besteht jedoch das Problem, dass dieser auf Grund der Anlagenkapazität nicht in einem Arbeitsgang entleert werden kann, d.h. er muss in einem geeigneten Betriebsteil "zwi- schengelagert" werden, und zwar so lange, bis die Lagerbehälter die Restmenge aufnehmen können. Dazu wären jedoch weitere Rangiertätigkeiten notwendig. Die Befüllstrategie sollte darum so gewählt werden, dass kein teilentleerter Chlorkesselwagen auf einem Teil des Werksgeländes vorübergehend abgestellt werden muss.

## **8 Sicherheitsmanagementsystem (SMS)**

Das beim vorliegenden Betriebsbereich eingeführte Management-Handbuch ist nach ISO 9000 ff (Qualität) und 14000 ff (Umwelt) zertifiziert und wird gegenwärtig entsprechend den Anforderungen der Störfallverordnung an das SMS weiterentwickelt.

Teilaspekte des SMS sind Gegenstand der HF-Analyse und wurden in Kap. 6.4 berücksichtigt.

### **8.1 Integriertes Managementsystem**

Zielvorgabe ist ein ganzheitliches Managementsystem (SHEQ) in das die international üblichen Standards an

- ◆ Safety
- ◆ Health
- ◆ Environment
- ◆ Quality

einschließlich der Verpflichtungen aus dem Responsible Care-Programm /8 (2)/ integriert sind.

Der derzeitige Stand der Verknüpfungen des vorhandenen Management-Handbuches mit den SMS-Elementen gemäß Störfallverordnung wurde entsprechend der Tab. 8-1 (siehe Anlagenband) verifiziert.



## **9 Methodenvergleich**

### **9.1 Zusammenfassung**

Dieses Kapitel vergleicht die HAZOP / PAAG Analyse, die Analyse nach der Zürich Methode und die Quantitative Risikoanalyse (QRA) im Hinblick auf die von der Seveso II Richtlinie [V /1/] geforderten Verfahrensweisen. Das Lösungspotential der drei Methoden für bestimmte Anforderungen der Seveso II Richtlinie wird einander gegenübergestellt.

Die drei in diesem Vorhaben erprobten Methoden sind grundsätzlich geeignet, bei geplanten und bestehenden Anlagen sicherheitstechnische Schwachstellen zu erkennen und das Risiko (qualitativ oder quantitativ) abzuschätzen. Um die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden zu verdeutlichen, werden in den folgenden Abschnitten die Elemente behandelt, die im Sinne spezieller Fragestellungen innerhalb der Seveso II Richtlinie von Bedeutung sind.

### **9.2 Einzelheiten zum Methodenvergleich**

#### **9.2.1 Identifikation der Gefahren / Risiken**

##### **9.2.1.1 Systematisch / ganzheitlich (Analyselogik, interne/externe Ereignisse)**

Die QRA hat hier ein hohes Potential, da sie mit Hilfe einer „Master Logic“, in systematischer, ganzheitlicher und nachvollziehbarer Weise durch eine logische Darstellung nach allen Ursachen (Gefahren) sucht, die über eine Ereigniskette zu einer Gefährdung (Risiko) innerhalb oder außerhalb der Anlage führen können. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine systematische Identifikation von Ursachen für Gefahren. Hierfür sind detaillierte anlagentechnische und verfahrenstechnische Kenntnisse von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen erforderlich. Das PAAG/HAZOP-Verfahren hat ein sehr hohes Potential bei der systematischen Erkennung von möglichen Störungen, da es in einem Team mit Experten unterschiedlicher Fachrichtungen durchgeführt wird. Da beim PAAG-Verfahren keine logische Darstellung der Ereigniskette (über die Tabellenzeilen hinweg) erfolgt, ist es im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit etwas im Nachteil. Die Zürich Methode sieht keine systematische Gefahrenidentifizierung vor, wie sie beim PAAG-Verfahren durch die Sollfunktion und Leitworte erfolgt.

Da im vorliegenden Projekt vereinbarungsgemäß der Untersuchungsumfang beschränkt war (z. B. keine Untersuchungen zu „Dominoeffekten“ im Betriebsgelände, zum Brand, zu äußeren Einwirkungen wie Explosion, Überflutung, Erdbeben, Flugzeugabsturz), wurde bei der Umsetzung der Fragestellung im Sinne der Seveso II Richtlinie das Potential der Methoden nicht voll ausgeschöpft.

##### **9.2.1.2 Nachvollziehbarkeit (Randbedingungen, Vernachlässigungen)**

Eine Analyse ist besonders gut nachvollziehbar, wenn Zusammenhänge von Ursache und Wirkung, die gegenseitige Abhängigkeit von Ereignissen, Folgeereignisse, gemeinsam verursachte Ausfälle, u. ä., auch visuell mit Hilfe von logischen Operatoren dargestellt und dokumentiert werden. Diese Voraussetzungen sind bei der QRA erfüllt, da sie mit Hilfe verschiedener Tech-

niken (z. B. Ereignisablaufdiagramm, Fehlerbaum, Master Logic) solche Zusammenhänge identifiziert und darstellt. Allerdings setzt dies vertiefte Kenntnis dieser Methoden voraus. Dagegen sind die Dokumentationen des PAAG-Verfahrens bzw. der ZHA für das technische Fachpersonal bei Betreibern und Behörden leichter nachzuvollziehen.

Bezüglich Randbedingungen und Vernachlässigungen ist man bei allen Methoden auf eine sorgfältige Dokumentation angewiesen.

### **9.2.1.3 Nutzung der Betriebserfahrung (implizit, explizit)**

Sicherheitsbewertungen und Risikoabschätzungen sollten möglichst umfassend die Betriebserfahrung mit der untersuchten Anlage nutzen. Beim PAAG Verfahren und der Zürich Methode geschieht dies „implizit“ durch die Beteiligung von Betriebspersonal im Analyseteam. Bei der QRA werden Zuverlässigkeitskenngrößen für Komponenten der Anlage aus beobachteten Ereignissen in der untersuchten und vergleichbaren Anlagen ermittelt und „explizit“ in der Analyse weiterverarbeitet. Somit besteht bei allen Methoden die Möglichkeit die Betriebserfahrung gut einzubringen.

Im vorliegenden Anwendungsfall wurde vereinbarungsgemäß für die QRA keine umfassende statistische Auswertung der anlagenspezifischen Betriebserfahrung durchgeführt, da der Methodenvergleich im Vordergrund stand. Da generische Daten aus der Literatur verwendet wurden, ist ein Absolutvergleich der Ergebnisse nur unter Vorbehalt möglich. Relativvergleiche innerhalb der Analyse sind von dieser Beschränkung nicht wesentlich betroffen.

### **9.2.1.4 Nutzung der Teamerfahrung (Fachrichtungen, Erfahrung)**

Bei der Komplexität der heutigen Anlagentechnik erfordert sowohl das Verstehen der Funktionszusammenhänge als auch die Untersuchung des Anlagenverhaltens bei Störungen und Störfällen die Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen (i. a. Maschinenbau / Verfahrenstechnik, Elektrotechnik/Elektronik, Regelungstechnik, Ergonomie). Im Idealfall kennen die beteiligten Fachleute dieser Disziplinen auch die Betriebserfahrung mit der untersuchten Anlage. Wenn dies nicht der Fall ist, muss das Analyseteam durch Personal der konkreten Anlage und durch Experten aus dem Bereich Notfallschutz / Katastrophenschutz ergänzt werden. Diese Voraussetzung gilt für alle hier betrachteten Analysemethoden. Im konkreten Anwendungsfall kann ein Vorteil beim PAAG Verfahren und der Zürich Methode liegen, da dort unter unmittelbarer Beteiligung von Anlagenpersonal analysiert wird.

## **9.2.2 Bewertung der Gefahren / Risiko**

### **9.2.2.1 Systemanalyse (Funktions- und Ausfallverhalten)**

Bei der Bewertung des Risikos im Sinne der Seveso II Richtlinie spielt die Systemanalyse eine bedeutende Rolle für den Nachvollzug aller Funktionen der Anlage und zur Identifikation möglicher Fehlfunktionen und Ausfallmechanismen. Hierbei sind PAAG Verfahren und QRA annähernd gleichwertig. Die Zürich Methode liegt etwas ungünstiger, da sie im Regelfall auf Anlagenebene durchgeführt wird und deshalb Systemeffekte in Teilsystemen und vor allem auf Komponentenebene verborgen bleiben können.

### **9.2.2.2 Zuverlässigkeitsanalyse (Wirksamkeit und Verfügbarkeit)**

Für die Bewertung des Risikos ist die Beurteilung der „Zuverlässigkeit“ von Systemen und Komponenten von entscheidender Bedeutung. Die Zuverlässigkeit aller Komponenten, Bauteile und des Bedienungs- und Instandhaltungspersonals bestimmt sowohl die zu erwartende Häufigkeit „unerwünschter Ereignisse“ als auch die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein „unerwünschtes Ereignis“ nicht beherrscht wird. Hier liegt das höchste Potential bei der QRA. Bei der praktischen Durchführung in dieser Studie liegen hier allerdings auch bei der QRA bestimmte Defizite, da vereinbarungsgemäß physikalische Berechnungen (z. B. zeitabhängiger Druck- und Massenstromverlauf, Ausströmraten und –Zeitauern) zu Ausfalleffekten oder zur Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen nicht durchgeführt wurden.

### **9.2.2.3 Bewertung des „Faktors Mensch“ (Human Factor, HF) (Verhinderung und Beherrschung von Störfällen)**

Das größere Potential zur Analyse und Bewertung von Handlungen des Personals liegt bei der QRA, da hier die „Human Factor“ Analyse „explizit“, strukturiert und nachvollziehbar durchgeführt wird. Dazu wird eine Analyse der Arbeitsumgebung durchgeführt, bei der u. a. Betriebsbegehungen durchgeführt werden, Arbeitsanweisungen und Prozeduren analysiert werden, umgebungs- und kontextabhängige Einflussfaktoren untersucht werden und eine Aufgabenanalyse durchgeführt wird. Zusätzliche Erkenntnisse können auf Basis einer Auswertung der Betriebserfahrung gewonnen werden. Die gesamten Ergebnisse fließen zusammen in die detaillierte qualitative und quantitative Analyse und Bewertung von fehlerhaften Personalhandlungen, die anschließend in die Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse der QRA integriert werden.

Bei den anderen Analysemethoden wird „implizit bedacht“, welche Ereignisse durch fehlerhafte Personalhandlungen ausgelöst werden können und wie Ereignisabläufe durch Eingriffe des Betriebspersonals beeinflusst werden können.

Bei der konkreten Durchführung dieser Studie konnten die Vorteile der HF-Analyse in der QRA nicht vollständig demonstriert werden, da aufgrund projektspezifischer Einschränkungen sowie der erzielten Ergebnisse, aus denen sich ein gewisser Optimierungsbedarf mit einer anschließenden Implementierung in der Anlage ergab, keine quantitativen Resultate, sondern die gewonnenen methodischen Erkenntnisse und qualitative Ergebnisse ausgewiesen worden sind.

Bei dem PAAG/HAZOP-Verfahren ist die Bedienbarkeit der Anlage (engl. "operability") ein wichtiges Element der Analyse. Deshalb werden auch die Bediener mit einbezogen, die aus ihrer spezifischen Erfahrung wichtige Gesichtspunkte einbringen können.

### **9.2.2.4 Instandhaltung (Prüfung, Wartung und Reparatur)**

Instandhaltung umfasst Prüfungen (Funktionsprüfungen, zerstörungsfreie Prüfungen), Wartung (zeitabhängig, zustandsabhängig) und Reparatur. Aufgabe der Instandhaltung ist es, die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Systemen und Komponenten zu erhalten bzw. nachzuweisen und - nach Fehlern und Ausfällen - wiederherzustellen. Allerdings kann die fehlerhafte Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen die Zuverlässigkeit auch negativ beeinflussen („Test and Maintenance Induced Failures“). In der QRA wird der Einfluss der Instandhaltung auf die Zuverlässigkeit quantitativ berücksichtigt. Die bisher verwendeten Modelle bewerten allerdings Systeme und Komponenten nach einer Instandhaltungsmaßnahme als „so gut wie neu“.

Dennoch hat die QRA ein sehr gutes Potential zur Berücksichtigung der Instandhaltung. Zu den in der untersuchten Anlage durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen lagen allerdings keine lückenlosen Aufzeichnungen vor, so dass der Einfluss der Instandhaltung auf die Zuverlässigkeit der Systeme möglicherweise unzutreffend bewertet wird.

Beim PAAG Verfahren und bei der Zürich Methode wird der Einfluss vom Untersuchungsteam implizit mit bewertet. Gegenüber der QRA bestehen geringe Nachteile bei der modellmäßigen bzw. ingenieurmäßigen Umsetzung in die Risikobewertung der Anlage.

### **9.2.2.5 Gegenmaßnahmen (Schutz- und Sicherheitssysteme)**

Maßnahmen gegen unerwünschte Ereignisse (Störungen, Störfälle) sind in der Regel in mehreren Ebenen vorgesehen. In einer ersten Ebene verhindert die (betriebliche) Leittechnik - unterstützt durch Begrenzungseinrichtungen -, dass wichtige Systemgrößen (z. B. Druck, Temperatur) einen festgelegten Bereich verlassen. In einer zweiten Ebene greifen Sicherheitssysteme ein, um die Folgen eines Ereignisses zu mildern oder die Ereigniskette ganz zu stoppen. In einer dritten Ebene wird versucht, mit Hilfe von Notfallmaßnahmen (s. Abschnitt 9.2.2.6) die Folgen eines – durch die Ebenen 1 und 2 nicht beherrschten - Ereignisses zu begrenzen, so dass die Auswirkungen auf die Anlage oder die Umgebung möglichst gering bleiben.

Im Untersuchungsfall zählen zur ersten Ebene z. B. die Gewichtskontrolle der Behälter zum Schutz gegen Überfüllung, die Kühlung der Chlorbehälter zur Vermeidung eines Druckanstiegs, und zur zweiten Ebene die Absperrungen von Rohrleitungen bei Leckagen oder das Umpumpen des Chlors in den Reservebehälter. Solche Maßnahmen wurden von allen drei Methoden entsprechend berücksichtigt. Allerdings kann bei der QRA ein gewisser Vorteil liegen, da sie die Wirksamkeit und die Verfügbarkeit von Gegenmaßnahmen quantitativ untersucht. Dieses Potential konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht voll genutzt werden, da vereinbarungsgemäß keine physikalischen Berechnungen des Auswirkungspfades (z. B. Zeitverlauf der Chlor-Ortsdosis) durchgeführt wurden, die zur vollen Beurteilung der Wirksamkeit der Maßnahmen erforderlich wären.

Bei PAAG/HAZOP können durch ergänzende halbquantitative Methoden zur Risikoeinschätzung (z. B. nach VDI/VDE 2180 bzw. DIN 19250) mit geringem Aufwand Anforderungen an die Wirksamkeit und Verfügbarkeit von Gegenmaßnahmen festgelegt werden.

### **9.2.2.6 Notfallmaßnahmen (Planung, Alarmierung, Einsatz)**

Die dritte Ebene der Gegenmaßnahmen bei einer sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereigniskette besteht aus Notfallmaßnahmen. Diese umfassen die anlagenspezifische Planung, die Alarmierungsbedingungen und -maßnahmen, die Einsatzplanung und -durchführung und die wiederkehrenden Notfallübungen.

Detaillierte Anforderungen an die Notfallplanung ergeben sich aus der Seveso - II - Richtlinie Anhang IV bzw. der 3. StörfallVwV, die noch konkretere Vorgaben enthält. Bei der Gefahrenabwehrplanung sind mögliche Ereignisabläufe zugrunde zu legen. Die Ereignisabläufe ("vorhersehbare Ereignisse") müssen sich aus einer systematischen Analyse (festgelegt über das Sicherheitsmanagement) ergeben. Wahrscheinlichkeitsangaben sind in diesem Zusammenhang nicht erforderlich.

Bei der Untersuchung dieser Sicherheitsebene in der vorliegenden Studie zeigte sich, dass in der untersuchten Anlage bezüglich der Notfallmaßnahmen Planungsdefizite bestehen. So wird

in den vorhandenen Unterlagen mehrfach darauf verwiesen, dass „der Einsatzleiter im konkreten Fall die geeigneten Maßnahmen setzt“. Dies gilt nach heutigen Erkenntnissen als „Planungsdefizit“, da Stress und Zeitmangel im Ernstfall Fehlhandlungen befürchten lassen. Selbst bei „Unkenntnis“ der möglicherweise eintretenden Ereignisse müssen anhand typischer generischer Szenarien Einsatz-Eckpunkte detailliert geplant, festgeschrieben und geübt werden. Nur dann können die angewandten Methoden die Notfallmaßnahmen entsprechend bewerten. Da im Regelfall in der QRA auch auf dieser Ebene eine strukturierte, nachvollziehbare, explizite „Task-Analyse“ durchgeführt wird, besteht für das Potential dieser Methode hier ein gewisser Vorsprung.

### **9.2.3 Quantifizierung der Gefahren / Risiken**

Zur Risikobewertung (engl. „Risk Assessment“, nach Seveso - II - Richtlinie) sind drei Komponenten zu analysieren, zu bewerten und darzustellen:

- Welche Schäden können verursacht werden?
- Wie häufig kommt es zu einem Schadensereignis?
- Welches Schadensausmaß tritt auf ?

Unterschiedliche Meinungen bestehen allerdings zu der Frage, in welcher Breite und Tiefe und mit welchen Methoden die Risikobewertung durchzuführen ist. Die Meinungen lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen:

1. Es reicht aus, mit ingenieurmäßiger Abschätzung aufgrund von Erfahrung aus der Vergangenheit, auf relativ hoher Ebene (Ende einer Ereigniskette) die drei Komponenten abzuschätzen und mit einem Graduierungssystem zu bewerten.
2. Es ist erforderlich, mit ingenieurmäßiger Abschätzung unter Hinzunahme statistischer Kenngrößen aus der Vergangenheit auf relativ niedriger Ebene (Beginn einer Ereigniskette; daher Stichwort Zerlegungsmethode) die drei Komponenten abzuschätzen und mit Hilfe eines Anlagenmodells auf das Ende der Ereigniskette „hochzurechnen“.

Das PAAG Verfahren und die Zürich Methode sind der ersten Verfahrensweise zuzuordnen, die QRA der zweiten. Die QRA hat ein größeres Potential, quantitative Ergebnisse für die drei Komponenten zu liefern, als die beiden anderen Methoden (vgl. die folgenden Abschnitte 9.2.3.1 - 7), sie erfordert allerdings in aller Regel erheblichen Mehraufwand.

#### **9.2.3.1 Art der Auswirkung (Sachschaden, Verletzung, Tod)**

Bei der praktischen Anwendung der drei Methoden für die vorliegende Studie wurden Beschränkungen vereinbart, da die Methodik zur Ermittlung der Chlorkonzentrationen an verschiedenen Aufpunkten der Umgebung einer Anlage an sich bekannt ist und damit auch die Art der Auswirkung ermittelbar ist.

#### **9.2.3.2 Schwere der Auswirkung (Höhe des Sachschadens, Anzahl der Betroffenen)**

Auch hier wurden Beschränkungen vereinbart, da die Methodik zur Ermittlung der Chlorausbreitung in der Umgebung einer Anlage an sich bekannt ist und damit auch die Schwere der Auswirkung über das Bevölkerungsmodell ermittelbar ist.

### **9.2.3.3 Eintrittshäufigkeit einer Auswirkung ( $H_{Ai-n, Si-m}$ )**

Bei der praktischen Anwendung der drei Methoden ergibt sich hier ein Unterschied, da die ingenieurmäßige Schätzung bzw. Graduierung der Eintrittshäufigkeiten von Ereignissen am Ende einer Ereigniskette (bei PAAG und Zürich-Methode) der Zerlegungsmethode mit anschließender Hochrechnung (bei der QRA) unterlegen ist. Die QRA verwendet quantitative, soweit wie möglich empirisch ermittelte Eintrittshäufigkeiten für Basisereignisse und ist damit in der Lage, Eintrittshäufigkeiten von Ereignissen am Ende der Ereigniskette zu bewerten.

### **9.2.3.4 Datenbasis (Zuverlässigkeitskenngrößen, Anweisungen, Manuals)**

Dieser Punkt ist für das PAAG Verfahren und die Zürich Methode nahezu irrelevant, da diese Informationen nicht explizit ermittelt und verwendet werden. Die QRA hat bei gutem Potential in der praktischen Durchführung hier Defizite, da keine anlagenspezifischen Zuverlässigkeitskenngrößen ermittelt wurden und bei der „paper ware“ (Manuals, Bedienanleitungen, Vorschriften) vereinzelt anlagenspezifische Lücken bestehen (z.B. Reparaturanweisungen nicht auf neuestem Stand).

### **9.2.3.5 Importanzen (relative Wichtigkeit einzelner Elemente)**

Dieser Punkt ist für das PAAG Verfahren und die Zürich Methode nahezu irrelevant, da diese Informationen nicht explizit ermittelt und verwendet werden. Die QRA hat bei sehr gutem Potential in der praktischen Durchführung Defizite, da vereinbarungsgemäß keine Importanzrechnungen durchgeführt wurde.

### **9.2.3.6 Vollständigkeit (Wissenstand, Vernachlässigungen)**

Im Rahmen jeder Methode müssen die wesentlichen Grundlagen (Wissenstand) und Vernachlässigungen explizit genannt werden. Insoweit ist das Potential der drei Methoden ausgewogen. Bei der Zürich Methode ist bei der praktischen Durchführung allerdings erkennbar, dass Vernachlässigungen kaum Eingang in die dazu vorgesehene Dokumentation gefunden hat.

### **9.2.3.7 Unsicherheiten (Parameter- und Modellunsicherheiten)**

Dieser Punkt ist für das PAAG Verfahren und die Zürich Methode nahezu irrelevant, da diese Informationen nicht explizit ermittelt und diskutiert werden. Die QRA hat hier bei gutem Potential in der praktischen Durchführung Defizite, da vereinbarungsgemäß keine Unsicherheitsanalyse durchgeführt wurde.

## **9.2.4 Darstellung der Gefahren / Risiken**

Zur Darstellung der Ergebnisse einer Risikobewertung sind die drei Komponenten, die das Risiko beschreiben (Schadensart, Schadenshäufigkeit, Schadensausmaß; vgl. Abschnitt 9.2.3), getrennt auszuweisen. Durch Multiplikation von Schwere der Auswirkung und jeweiliger Eintrittshäufigkeit geht Information verloren, da bei gleichem Multiplikationsergebnis die beiden Komponenten jeweils deutlich unterschiedlich sein können (z. B.  $100 \times 10^{-2}$  oder  $1.000 \times 10^{-3} = 1$ ). Alle wesentlichen Einzelschritte bei der Ermittlung der drei Komponenten sind nachvollziehbar zu dokumentieren.

Beim PAAG/HAZOP- Verfahren und der Zürich Methode ist eine nachvollziehbare Darstellung und Dokumentation bereits durch den Ablauf der Methode gewährleistet.

#### **9.2.4.1 Detaillierungsgrad (Art und Komponenten der Risiken)**

Da die QRA im Regelfall mit größerem Aufwand als das PAAG Verfahren und die Zürich Methode durchgeführt wird, besitzt sie entsprechend einen höheren Detaillierungsgrad. Allerdings waren bei der praktischen Durchführung in der vorliegenden Studie auch für die QRA Beschränkungen des Detaillierungsgrads vereinbart (z. B. im Bereich der Ermittlung des Auswirkungspfades).

#### **9.2.4.2 Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit**

Hierzu haben die drei Methoden nahezu das gleiche Potential. Bei der praktischen Durchführung ist die QRA etwas im Vorteil, da z. B. bei der Ermittlung der auslösenden Ereignisse, bei der Ermittlung der Ausfallmöglichkeiten eines Systems oder bei der Ermittlung eines Ereignisablaufs mit strukturierter Analysetechnik vorgegangen wird (z. B. Master Logic, Fehlerbaummethode, Ereignisablaufdiagramm).

Allerdings setzt dies eine vertiefte Kenntnis dieser Methoden voraus. Dagegen sind die Dokumentationen des PAAG-Verfahrens bzw. der ZHA für das technische Fachpersonal bei Betreibern und Behörden leichter nachzuvollziehen.

#### **9.2.4.3 Nachvollziehbarkeit (Randbedingungen, Vernachlässigungen)**

Hier gilt das gleiche wie beim Punkt „Vollständigkeit“ (Abschnitt 9.2.4.2).

### **9.2.5 Aufwand / Nutzen / Anwendung**

Es ist selbstverständlich, dass mit höherem Aufwand Antworten zu einer größeren Anzahl von Fragestellungen erarbeitet werden können.

Für die vertiefte Betrachtung spezieller Probleme scheint sich, international gesehen, die QRA als „de facto Standard“ herauszubilden.

Das PAAG/HAZOP-Verfahren wird für verfahrenstechnische Anlagen der Chemie und Petrochemie weltweit eingesetzt. Außerdem wird es zunehmend auch in anderen Technologien (z. B. Elektronik) eingesetzt. Hierzu liegt auch ein Entwurf eines IEC-Standards vor.

Grundsätzlich entsprechen alle drei untersuchten Methoden dem als Bewertungsmaßstab heranzuziehenden Stand der Sicherheitstechnik.

#### **9.2.5.1 Aufwand (Einarbeitung, Bearbeitung, Dokumentation)**

Die Einarbeitungszeit ist bei den drei Methoden vergleichsweise unbedeutend, da Risikobewertungen vorzugsweise von erfahrenen Mitarbeitern durchgeführt werden sollten. Der Zeitaufwand für die Bearbeitung und die Dokumentation kann bei der QRA erheblich größer sein als bei den beiden anderen Methoden.

### **9.2.5.2 Update / lebendes Dokument (Listen, Formblätter, PC Stützung)**

Es ist sinnvoll, Risikobewertungen als „lebendes“ Dokument („living risk model“) PC-gestützt aufzubauen, durchzuführen und zu pflegen. Damit kann die Bearbeitung effektiv unterstützt werden und zudem durch „Lernen“ aus später auftretenden Ereignissen ein aktualisiertes Bild der Wirklichkeit erzeugt werden.

### **9.2.5.3 Anwendbarkeit (Auslegung, Betriebsführung, Begutachtung)**

Risikobewertungen können für vier Anwendungsbereiche durchgeführt werden:

1. Zur sicherheitstechnischen Optimierung der Auslegung einer Anlage,
2. zur Unterstützung des Anlagenbetriebs unter dem Gesichtspunkt der Risikominimierung
3. im Genehmigungsverfahren,
4. für die (periodische) Sicherheitsüberprüfung im Rahmen der behördlichen Aufsicht.

Für die Risikobewertung einer Anlage können demnach unterschiedliche Organisationen tätig sein (Hersteller, Betreiber, Gutachter).

Eine internationale Harmonisierung der Methode zur Risikobewertung in Sinne von „best practice“ zur Absicherung hoher Sicherheitsstandards, zur Minderung von Wettbewerbsverzerrungen und zur Erleichterung des Nachvollzugs von Ergebnissen ist anzustreben. Die Seveso II Richtlinie hat dazu einen ersten und wichtigen Schritt aufgezeigt.

Grundsätzlich entsprechen alle drei untersuchten Methoden dem als Bewertungsmaßstab heranzuziehenden Stand der Sicherheitstechnik.

## 10 Zusammenfassung

An einem Chlorlager als konkretem Anwendungsbeispiel wurden Untersuchungen zum praxisnahen Einsatz folgender Methoden zur Risikoabschätzung

- ◆ HAZOP/PAAG - (Hazard and Operability study) /3/]
- ◆ ZHA - Zurich Hazard Analysis
- ◆ QRA – Quantitative Risk Assessment

im Hinblick auf die von der Seveso-II-Richtlinie geforderte Verfahrensweise gemacht.

Der Untersuchungsumfang erstreckt sich dabei auf das Chlorlager einschließlich der Eisenbahnkesselwagen- (EKW) Entladestation, den innerbetrieblichen Rangierbetrieb und den Transport vom Chlorerzeuger zum Chlorverbraucher.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die drei untersuchten Methoden grundsätzlich geeignet sind, bei geplanten und bestehenden Anlagen sicherheitstechnische Schwachstellen zu erkennen und das Risiko (qualitativ oder quantitativ) abzuschätzen.

Bundesanstalt für Materialforschung  
und –prüfung  
Unter den Eichen 87  
D-12205 Berlin

Gesellschaft für Anlagen- und  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Boltzmannstr. 2  
D-85748 Garching

TÜV Industrie Service GmbH  
TÜV SÜD Gruppe  
Westendstrasse 199  
D-80686 München



## 11 Literatur

### Hinweis:

Seit Abschluss des Projektes im Jahre 2002 sind zu dem hier behandelten Thema verschiedene Veröffentlichungen erschienen (z. B. SFK-Bericht SFK-GS-41 „Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung“ vom April 2004), die im vorliegenden Dokument nicht berücksichtigt werden konnten.

### **Literatur zu Kap. "Vorwort"**

- V /1/ Richtlinie 96/2/EG des Rates zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffe, Amtsblatt Nr. L 10/B (1996)
- V /2/ Verordnung zur Umsetzung EG-rechtlicher Vorschriften betreffend die Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffe vom 26.4.2000, Bundesgesetzblatt 2000, Teil I Nr.19

### **Literatur zu Kap. 1**

- 1 /1/ Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung) - 12. BImSchV - i.d.F: vom 20 September 1991 (BGBl. I S. 1891, 2044) geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 26. Oktober 1993 (BGBl. I S. 1782)
- 1 /2/ Council Directive 82/501/EEC on the Major Accident Hazards of certain Industrial Activities, Amtsblatt Nr. L 210 (1982)

### **Literatur zu Kap. 2**

- 2 /1/ F. Crawley, M. Preston, B. Tyler, HAZOP: Guide to the best practice - Guidelines to the best practice for the process and chemical industries, IChem<sup>E</sup>, Rugby; UK (2000)
- 2 /2/ HAZOP and Multistage Hazard Study Training package, IChem<sup>E</sup>, Rugby; UK (1999)
- 2 /3/ Risikobegrenzung in der Chemie - PAAG-Verfahren (HAZOP), ISSA Prevention Series N0. 2002, IVSS Heidelberg (1990)
- 2 /4/ Risk Engineering - Teamleader's handbook for the Zurich Hazard Analysis, Zurich Insurance Company, Zürich (1998)
- 2 /5/ C. Kirchsteiger et al., Risk Assessment and Management in the Context of the Seveso II Directive, Elsevier, Amsterdam (1998)

### **Literatur Kapitel 4**

- 4 /1/ Hartwig: Risikoanalyse als Hilfe für Sicherheitsentscheidungen, Schadstoffe und Umwelt, Bd 14, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1999)
- 4 /2/ Roth, U. Weller: Gefährliche Chemische Reaktionen, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg (2000)
- 4 /3/ ZEMA Jahresberichte 1982 bis 1998, Umweltbundesamt, Berlin
- 4 /4/ H. Gould: Fault tree Analysis of the catastrophic Failure of bulk chlorine Vessels, AEA/HSE-Report (1993), UK
- 4 /5/ Mayor Hazard Incident 'Data Base (MHDAS), AEA Technology, UK (1993)
- 4 /6/ Guidelines for qualitative risk assessment, CPR 18E, Committee for the prevention of disasters, The Hague (1999)

## Literatur Kapitel 6

- 6 /1/ 12. BImSchV, 26.04.2000
- 6 /2/ Sicherheitsanalyse nach § 7 der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) des Betreibers, 1999
- 6 /3/ Demokritos: National Research Center for Physical Sciences  
Probabilistic Safety Analysis of an Ammonia Storage Plant.  
1st European Benchmark Exercise.  
Papazoglou I. A., Nivolianitou Z., Aneziris O., Christou M., 1990
- 6 /4/ Major Accident Reporting System, JRC/ISIS, EU
- 6 /5/ Major Hazard Incident Data Base, AEA, HSE
- 6 /6/ Gould, J.: "Fault Tree Analysis of the Catastrophic Failure of Bulk Chlorine Vessels, AEA HSE, December 1993
- 6 /7/ DIN 25419 Ereignisablaufanalyse Verfahren, graphische Symbole und Auswertung November 1985
- 6 /8/ DIN 25424 Fehlerbaumanalyse Methoden und Bildzeichen September 1981
- 6 /9/ DIN 25448 Ausfalleffektanalyse (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) Mai 1990
- 6 /10/ Störfall-Kommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
SFK-GS-19 Bericht Arbeitskreis Bediensicherheit. Verabschiedet auf der 30. Sitzung der Störfall-Kommission am 16./17. Juni 1999
- 6 /11/ Cacciabue P. C.  
Modelling and Simulation of Human Behaviour in System Control. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998
- 6 /12/ Kirwan B., Ainsworth L. K.  
A guide to task analysis. Taylor & Francis Ltd. London, Washington, DC, 1992
- 6 /13/ Spitzer C.  
Data Collection and Evaluation as well as Methods for Incorporation into PSA's: Recommendations due to the Experiences Gathered during the Course of the Assessment of PSA's Performed by Utilities. Final Report with reference to IAEA Co-ordinated Research Programme on Collection and Classification of Human Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessments, May 1998
- 6 /14/ Cacciabue P. C.  
A Methodology of Human Factors Analysis for Systems Engineering: Theory and Applications. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC, 27 (3) pp 325-339 (1997)
- 6 /15/ Swain A. D., Guttman H. E.  
Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. NUREG/CR-1278, Sand 80-0200 RX, AN. Final Report, 1983
- 6 /16/ Swain A. D.  
Accident Sequence Evaluation Program, Human Reliability Analysis Procedure. NUREG/CR-4772, Sand 86-1996, RX, AN.  
February 1987
- 6 /17/ TÜV BB-NDD-MUC  
Nach VDI 3783 ermittelte Konzentrationen und Zeiten für Chloremissionen; E-mail vom 26.06.2000
- 6 /18/ European Industry Reliability Data Bank, 3rd Edition 1998, Hrsg.: Electricité de France (EDF), European Commission, ISBN 2-9509092-0-5

- 6 /19/ Offshore Reliability Data Handbook, 3rd Edition 1997, Prepared by: SINTEF Industrial Management, Distributed by: Det Norske Veritas, ISBN 82-14-00438-1
- 6 /20/ IPO Risk Calculation Methodology; Quantitative Risk Assessment for Transportation of Hazardous Materials (Road - Rail - Water - Pipeline) Published by Ministry of Transport, Public Works and Water Management Directorate-General for Freight Transport, Den Haag o. J. (ca. 1998)
- 6 /21/ Ref. 2-24 in SKI-Report 95:61, Reliability of Piping System Components, Vol. 4, July 1996
- 6 /22/ 'SKI-PIPE' - SKI's Piping Failure Database, Status: November 1, 2000, RSA-R-2000-01.11
- 6 /23/ IAEA-TECDOS-994, Guidelines for integrated risk assessment and management in large industrial areas, IAEA, January 1998
- 6 /24/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Daten zur Quantifizierung von Ereignisablaufdiagrammen und Fehlerbäumen, BfS-KT-18/97, März 97
- 6 /25/ Guidelines for quantitative risk assessment, "Purple Book", CPR 18 E, Sdu Uitgevers, Den Haag, Committee for the Prevention of Disasters, 1st edition 1999
- 6 /26/ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin; TÜV Hannover e. V.; Batelle-Institut e. V., Frankfurt; TÜV Norddeutschland e. V., Hamburg, Ermittlung sicherheitstechnischer Kriterien zur Flüssiggastechnologie und Herleitung geeigneter Sicherheitsstandards - Fachband 2: Vergleich der Risiken von ober- und unterirdischer Lagerung von Flüssiggas; VDI Technologiezentrum 1988, BAM Bericht 01501
- 6 /27/ Reliability Data of Components in Nordic Nuclear Power Plants, 3rd Edition, Vattenfall 1992
- 6 /28/ Birolini, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen, Berlin, Heidelberg, New York 1997
- 6 /29/ Meyna, A.: Zuverlässigkeitsbewertung zukunftsorientierter Technologien, Braunschweig, Wiesbaden 1994
- 6 /30/ Eigene Erkenntnisse sowie Sexton, I. B., Failure Rate Estimates of Some Nuclear and Conventional Power Plant Components, Atomics International, USA, AL-67-MEMO-15 REV, 1968 Reliability Stress and Failure Rate Data for Electronic Equipment, Department of Defence, Washington D.C., USA, MIL-HDBK-217A, December 1965
- 6 /31/ Reliability Stress and Failure Rate Data for Electronic Equipment, Department of Defence, Washington D.C., USA, MIL-HDBK-217A, December 1965
- 6 /32/ G. Burgbacher: Aktennotiz zum Fachgespräch am 21. Juni 2000, Filderstadt, 23. Juni 2000
- 6 /33/ Risk Spectrum, Professional Risk and Reliability Software, Relcon AB, Sundbyberg, Sweden

## Literatur Kapitel 7

- 7 /1/ DIN 25424, Teil 1, Fehlerbaumanalyse, Methode und Bildzeichen, September 1981
- 7 /2/ DIN 25424, Teil 2, Fehlerbaumanalyse, Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaums, April 1990
- 7 /3/ Hartwig, S.: Die Risikoanalyse als Hilfe für Sicherheitsentscheidungen gezeigt am Beispiel schwerer Gase und des Chlorstoffzyklus, Erich Schmitt Verlag, Berlin 1999

- 7 /4/ Schmittinger, P.: Ein unverzichtbarer Reaktionspartner, CITplus, 5/99
- 7 /5/ VTG - Lehnkering AG, Geschäftsbereich Schienenlogistik, Sparte Kesselwagen, Betriebsanleitung für Chlor - Kesselwagen, Stand September 1997
- 7 /6/ Geisler, H.-J.: DB - Streckendaten - STREDA, Ordnungsrahmen und Infrastrukturdaten zum Fahrweg der Deutschen Bahn, Eisenbahningenieur (49), /98, S. 18 - 21
- 7 /7/ Hörstel, J.: Simulationsverfahren für Risikoabschätzungen im Eisenbahn - Mischbetrieb, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und - betrieb, Universität Hannover, 1996
- 7 /8/ 4.8.1992, Neuwied bei Köln, LKW stürzte von der Brücke auf Intercity, Berliner Zeitung, 5.8.1992
- 7 /9/ Giller, A.; Dinges, M.: Brand im Leinebusch - Tunnel, Brandschutz - Deutsche Feuerwehr - Zeitung, 5/1999, S. 453 - 458
- 7 /10/ Fort Lauderdale, USA, Zug kollidierte mit beladenem Tankkaster, Berliner Zeitung, 19.3.1993
- 7 /11/ Persönliche Mitteilung Dr.-Ing. Habil. E. Weigel, Institut für Verkehrssystemtechnik, Technische Universität Dresden, 12/1999
- 7 /12/ Bieger, K.-J.: Notfallmanagement der DB AG, Brandschutz / Deutsche Feuerwehr - Zeitung 10 / 97, S. 758 - 763
- 7 /13/ Wachtel, R.: Einsätze der Feuerwehr auf den Bahnanlagen der Deutschen Bahn AG, Brandschutz / Deutsche Feuerwehr - Zeitung 10 / 97, S. 769 - 774
- 7 /14/ Lambrecht, V.: Umfüllen von flüssigem Chlor - Eine Einsatzübung im Rahmen von TUIS und ICE, Brandschutz / Deutsche Feuerwehr - Zeitung 3 / 93, S. 234 - 236
- 7 /15/ Fett, H.J.; Lange, F.: Häufigkeit von Bahnbetriebsunfällen im Güterzugverkehr der Deutschen Bundesbahn, GRS - 82, Juli 1991

## Literatur Kapitel 8

- 8 /1/ N. Mitchison, S. Porter: Guidelines on a Major Accident Prevention Policy and Safety Management System, as Required by Council Directive 96/82/EC (Seveso II)
- 8 /2/ Joint research centre European Commission, Ispra, Italy (1998)
- 8 /3/ Leitfaden für die Darlegung eines Konzeptes zur Verhütung von Störfällen und ein Sicherheitsmanagementsystem gem. Artikel 9 und Anhang III der Seveso II-Richtlinie.
- 8 /4/ SFK-GS Nr. 23, GRS Köln 1999
- 8 /5/ Leitfaden "Verantwortliches Handeln" - Deutscher Beitrag zum weltweiten "Responsible Care" Programm der chemischen Industrie
- 8 /6/ Verband der Chemischen Industrie (VCI, Frankfurt (1993))
- 8 /7/ J. v. Steen: Safety Performance Measurement
- 8 /8/ European Process Safety Centre (EPSC) / Rugby, UK (1996)
- 8 /9/ British Standard BS 8800 - Guide to Occupational Health and Safety Management Systems
- 8 /10/ BSI - British Standards Institution, London, UK (1996)
- 8 /11/ Risk Assessment Matrix - Shell Health, Safety and Environment Panel
- 8 /12/ Shell International B.V., The Hague, NL (1999)
- 8 /13/ Hydro Safety Report 1997
- 8 /14/ Norsk Hydro, Oslo, Norway

Bundesanstalt für  
Materialforschung und  
-prüfung (BAM)

Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS)

TÜV Industrie Service GmbH  
TÜV Energie- und System-  
technik GmbH  
TÜV SÜD Gruppe

**Abschlussbericht des F+E-Vorhabens**  
**Risikoabschätzung Chlorklagerung/  
Chlortransport unter Einbeziehung  
der Seveso II-Richtlinie und der  
Störfallverordnung (2000)**

erarbeitet durch

**BAM, GRS und TÜV Süd**

**Teil 2: Anlagenband**

<b>Anhang 1</b>	<b>nicht belegt</b>	
<b>Anhang 2</b>	<b>Ergebnislisten und Abb. zu Kap. 5 PAAG-Verfahren/HAZOP und ZHA</b>	<b>3</b>
<b>Anhang 3:</b>	<b>Abbildungen zu Kapitel 6 Quantitative Risikoanalyse (QRA)</b>	<b>30</b>
<b>Anhang 4 :</b>	<b>Abbildungen zu Kapitel 7 Risikoabschätzung Schienentransport von Chlor</b>	<b>58</b>
<b>Anhang 5</b>	<b>Gliederung zum Kapitel 8 Sicherheitsmanagementsystem (SMS)</b>	<b>77</b>

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorklager“;  
Abschlussbericht

Seite 3

## **Anhang 2    Ergebnislisten und Abb. zu Kap. 5 PAAG-Verfahren/HAZOP und ZHA**

**Liste der PAAG-Sektionen**

<b>Sektion</b>	<b>Anlagenteile</b>	<b>Sollfunktion</b>	<b>Blätter</b>
1	Entladearm bis HV R-002	Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung	5
2	Rohrleitungen 4001, 4022, 4023 von R-002 bis SF-011/012	Fördere Chlor von Befüllarm zum Lagertank (LT-1/2)	2
3	Lagertanks B-0401/0402	Lagere Chlor bei Temp. von -20 °C bis max 30 °C	3
4	Rohrleitung von R033/R027 bis Ventil vor B-4201 bzw. U-313 einschl. C12-Pumpen P-0401/0402	Fördere Chlor in die Chlorvorlagen	4
5	Leitung 0413/0408 von Tanks zum Nottank B-0403 einschl. Notpumpe P-0405	Fördere Chlor bei Bedarf aus Lagertanks zum Nottank	2
6	Nottank B0403	Lagere im Bedarf Chlor	1
7	Rückföhrleitung 0405/0406/0403 zu Lagerbehälter B0401/0402 incl. P-0403	Fördere Chlor aus Nottank in Lagerbehälter	2
8	Köhlisystem	Köhle Flüssig-Chlor in Behältern und Rohrleitungsabschnitten	2
9	C12-Kompressor V-0401 einschl. Rohrleitungen	Entferne Gasphase aus einem Behälter und fördere sie in anderen Behälter (= Restentleerung von Behältern)	2
10	Rohrleitungen 0407, 0426, 0428, 0424, 0425 von Vorlagen zu den Lagertanks	Rückföhrung von Chlor aus Vorlagen in Lagerbehälter	2

**PAAG-Sek.** 1  
**Anlagenteil** Entladearm bis HV R-002  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 40 °C  
 20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Förderung	Befüllarm nicht ange-schlossen	Chlorfreisetzung (flüssig) aus KWG	durch Personal vor Ort (2 Mann)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsanweisung</li> <li>• Personalschulung (eingewiesenes Personal)</li> <li>• Freischaltung des Weges wird über Druckmessung geprüft</li> <li>• Bedieneringriff (Not-Aus)</li> <li>• Unterbrechung der Ver-ladung über Totmannschal-tung</li> </ul>	E	II	-
A.02	nein/nicht	keine Förderung	Ventil R-002 geschlos-sen	Temperatur/Druckanstieg im KWG	durch Personal vor Ort (2 Mann) und in MW	Bedieneringriff (aus-reichende Zeit, da Druck-anstieg ca. 4 bar/h)	F	III	-
A.03	nein/nicht	keine Förderung	induktiver Verschiebe-sensor nicht installiert	Entladung kann nicht in Betrieb genommen werden. Betrieblich relevant, keine Auswirkung nach Außen.	durch Personal in MW und vor Ort (2 Mann)				
A.04	nein/nicht	keine Förderung	Druck im Behälter zu hohe bzw. Druck im KWG zu gering	keine Auswirkung nach außen	durch Personal in MW und vor Ort (2 Mann)				
A.05	nein/nicht	keine Förderung	keine Wasserberiese-lung	keine Auswirkung nach außen	durch Personal in MW und vor Ort (2 Mann)				

**PAAG-Sek.** 1  
**Anlagenteil** Entladearm bis HV R-002  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 40 °C  
 20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.06	nein/nicht	keine Förderung	Wassertemperatur zu gering	keine Auswirkung nach außen	durch Personal in MW und vor Ort (2 Mann)				
B.01	mehr	mehr Chlor	Wassertemperatur zu hoch	Druckaufbau im Förderarm	durch Personal in MW (Tankstand nimmt schnell zu)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auslegung von Gelenkarm und Armaturen für PN40 (Wassertemperatur max. 100 °C, Sättigungsdampfdruck bei 100 °C = 40 bar)</li> <li>Bedienereingriff (ausreichende Zeit, da Druckanstieg ca. 4 bar/h)</li> </ul>	F	IV	-
B.02	mehr	mehr Chlor	Druck im KWG zu hoch	Druckaufbau im angeschlossenen System	durch Personal in MW und vor Ort (2 Mann)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druckmessung KWG vor Beginn der Entleerung</li> <li>Zulässiger Betriebsdruck Anlage &gt; zul. Betriebsdruck KWG</li> <li>Betriebsinterne Belieferung mit Qualitätssicherung</li> </ul>	E	III	-
B.03	mehr	mehr Chlor	Druck im Lagertank zu niedrig	keine Auswirkung nach Außen (unzulässiger Unterdruck kann nicht erreicht werden)					

**PAAG-Sek.** 1  
**Anlagenteil** Entladearm bis HV R-002  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 40 °C  
 20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 6 bar

<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Störung</b>	<b>Mögliche Ursache</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Erkennung</b>	<b>Gegenmaßnahme</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
C.01	weniger	weniger Chlor	Leckage durch Dichtungsversagen	Stofffreisetzung (flüssig)	durch Personal (2 Mann) vor Ort und in MW	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bedienereingriff (Not-Aus)</li> <li>•regelmäßige jährliche Prüfung Gelenkarm</li> <li>•Bediener hat Schutzrüstung griffbereit vor Ort</li> <li>•Wechsel der Anschlußdichtung vor jeder Verladung</li> <li>•Einsatz hochwertiger Dichtungen</li> <li>•Leitungsauslegung</li> <li>•Stickstoffspülung des Gelenkarms (Spülstrom in Wäscher, kein Rückstrom in Wäscher, kein Druck im Wäscher geringer)</li> <li>•Wasserschleier durch Gaswehr</li> </ul>	E	II	-

**PAAG-Sek.** 1  
**Anlagenteil** Entladearm bis HV R-002  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 40 °C  
 20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
C.02	weniger	weniger Chlor	Leckage durch mechanische Beschädigung (Anfahren des KWG)	Stofffreisetzung (flüssig)	durch Personal (2 Mann) vor Ort und in MW	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verschiebesensor als sicherheitstechnisch bedeutsame MSR-Einrichtung, eingestuft in Risikobereich 2, da S2, A2 (G1, G2), W2</li> <li>Bedienereingriff (Not-Aus)</li> <li>Bediener hat Schutzrüstung griffbereit vor Ort</li> <li>Wasserschleier durch Gaswehr</li> </ul>	E	II	-
C.03	weniger	weniger Chlor	Druckdifferenz zu niedrig	keine Auswirkung nach Außen					
C.04	weniger	weniger Chlor	Wasserberieselung ausgefallen	keine Auswirkung nach Außen					
C.05	weniger	weniger Chlor	Druck im Lagertank zu hoch	keine Auswirkung nach Außen					
D.01	sowohl als auch	sowohl Chlor als auch erhöhter Wasseranteil	zuviel Wasser im Chlor	erhöhte Korrosion mit Folge Stofffreisetzung (flüssig oder gasförmig)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebsinterne Belieferung mit Qualitätssicherung</li> <li>regelmäßige Prüfungen (Verladearm jährlich)</li> </ul>	E	III	
E.01	teilweise	nicht relevant							

**PAAG-Sek.** 1  
**Anlagenteil** Entladearm bis HV R-002  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor vom KWG zur Befüllleitung

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 40 °C  
 20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 6 bar

<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Störung</b>	<b>Mögliche Ursache</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Erkennung</b>	<b>Gegenmaßnahme</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
F.01	Umkehrung	Rückwärtsströmen	Druck im System höher als im KWG	Druckanstieg im KWG (Temperatur Lagerbehälter max 50 °C => Druck 16 bar < Auslegungsdruck KWG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•örtl. Manometer</li> <li>•Veränderung des Füllstandes im Tank</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Kühlen des Tanks</li> <li>•Abstellen der Beheizung/Berieselung</li> </ul>	F	II	-
G.01	anders als	anderer Stoff	Chlor-KWG ist mit anderem Stoff befüllt worden	<ul style="list-style-type: none"> <li>•unzulässiger Druck</li> <li>•unzulässige Temperatur (exotherme Reaktion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Eingangskontrolle durch Meister</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Betriebsinterne Belieferung mit Qualitätssicherung</li> <li>•Die Anschlüsse der Entladung sind so ausgeführt, daß KWG mit anderen Stoffen, die im Werk verwendet werden, nicht angeschlossen werden können.</li> </ul>	F	II	-

**PAAG-Sek.** 2  
**Anlagenteil** Rohrleitungen 4001, 4022, 4023 von R-002 bis SF-011/012  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor von Entladearm zum Lagertank (LT-1/2)

**Auslegung** **Temperatur** **Überdruck**  
 40°C 40 bar

**Betrieb** 20 °C 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Förderung	Ventile im Weg geschlossen	keine Auswirkung außen					
A.02	nein/nicht	keine Förderung	Rohrleitungsabriss	Stofffreisetzung (flüssig)	durch Personal vor Ort (2 Mann)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherung des KWG durch Unterlegkeile</li> <li>• Weiche in abweisender Stellung</li> <li>• Sicherung vor Anfahren durch leeren KWG auf Nachbargleis</li> <li>• Unterbrechung des Entladevorgangs über Verschiebesensor</li> <li>• Rohrleitungsauslegung und -verlegung</li> <li>• regelmäßige Prüfung gemäß Regelwerk</li> <li>• Bedieneringriff (Not-Aus)</li> <li>• Unterbrechung des Entladevorgangs über Totmannschaltung</li> <li>• Wasserschleier</li> </ul>	F	II	-
B.01	mehr	mehr Chlor	siehe Sektion 1, B.02				E	III	-

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
 Abschlussbericht

**PAAG-Sek.** 2  
**Anlagenteil** Rohrleitungen 4001, 4022, 4023 von R-002 bis SF-011/012  
**R+I** KAL/0-0400/02 Rev. C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor von Entladearm zum Lagertank (LT-1/2)

**Auslegung** 40 °C  
**Temperatur** 40 °C  
**Überdruck** 40 bar

**Betrieb** 20 °C  
**Überdruck** 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
C.01	weniger	weniger Förderung	R-003 bzw. R-006 offen	Stofffreisetzung (flüssig)	durch Personal vor Ort (2 Mann)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Blindflansche</li> <li>Dichtigkeitsprüfung mit Stickstoff vor Erstbefüllung nach Revision</li> </ul>	E	II	-
C.02	weniger	weniger Förderung	Leckage	Stofffreisetzung (flüssig)	durch Personal vor Ort (2 Mann)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rohrleitungsauslegung</li> <li>Armaturen der Fa. Phönix nach Armaturenwerke EUROCHLOR</li> <li>hochwertige Dichtungen</li> <li>Flansche mit Nut und Feder</li> <li>Dichtheitsprüfung vor Erstbetriebnahme nach Revision</li> <li>Bedienereingriff</li> <li>Not-Aus-System</li> <li>Wasserschleier</li> </ul>	E	III	-
D.01	sowohl als auch	siehe Sektion 1, D.01					E	III	-
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	siehe Sektion 1, F.01					F	II	-
G.01	anders als	nicht relevant							

**PAAG-Sek. 3**

**Anlagenteil** Lagertanks B-0401/0402  
**R+I** KAL/0-0400/02 C

**Auslegung** **Temperatur** **Überdruck**  
**Betrieb** 50 °C 16 bar / -1 bar  
 -20 °C bis 7 bar  
 30 °C

**Stoff(e)** Chlor

**Sollfunktion** Lagere Chlor bei Temp. von -20 °C bis max. 30 °C

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Lagerung	Leckage des Behälters	Stofffreisetzung (flüssig oder gasförmig)	durch Per-sonal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Not-Umpumpung</li> <li>• Kühlung</li> <li>• Auffangraum</li> <li>• Wasserschleier</li> <li>• Bedieneringriff</li> <li>• regelmäßige Prüfungen</li> <li>• Auslegung der Tanks</li> </ul>	E	II	-
A.02	nein/nicht	keine Lagerung	Behälter wird leerge-fahren	keine Auswirkung in dieser Sektion					
A.03	nein/nicht	keine Lagerung	Behälter wurde nicht befüllt	keine Auswirkung in dieser Sektion					
B.01	mehr	mehr Füllstand	Überfüllung des Behäl-ters durch Bedienfehler	Druckaufbau und ggf. Stoff-freisetzung sofern der Tank eingeblockt wird	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PIAH-015/016 (8bar)</li> <li>• keine Stand-änderung im Tank (WR)</li> <li>• Erkennung durch Per-sonal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsanweisung</li> <li>• Bedienung durch Schicht-führer vor Ort</li> <li>• Bedieneringriff (Not-Aus) nach Alarmierung über PIAH-015/016 (Druck-alarne sind sicherheits-technisch bedeutsame MSR-Einrichtungen)</li> <li>• Tanks sind über Gaspha-seleitung verbunden. (Armaturen in Leitung ge-sichert)</li> </ul>	E	II	+

*Keine automatische Über-*

**PAAG-Sek. 3**

**Anlagenteil** Lagertanks B-0401/0402  
**R+I** KAL/0-0400/02 C

**Auslegung** **Temperatur** **Überdruck**  
**Betrieb** 50 °C 16 bar / -1 bar  
 -20 °C bis 7 bar  
 30 °C

**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Lagere Chlor bei Temp. von -20 °C bis max. 30 °C

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
B.02	mehr	mehr Druck bzw. mehr Temperatur	unzulässiger Wärmeeintrag durch Chlorbefüllung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unzulässig hoher Druck</li> <li>• Stofffreisetzung (flüssig)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PIAH-015 (8bar)</li> <li>• Erkennung durch Personal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsanweisung</li> <li>• Eingetragene Wärme nach betrieblicher Erfahrung so gering, daß keine unzulässig hohe Temperatur entstehen</li> <li>• Wasserscheier</li> </ul>	F	II	-
C.01	weniger	weniger Temperatur	zu hohe Kühlleistung	tiefste Anwendungstemperatur nach AD-W2 unter-schritten	-	minimale Kühlsoletemperatur ist -20 °C kann nicht unterschritten werden. Unter Berücksichtigung der Beanspruchungsfälle I bis III nach AD-Merkblatt W10 keine unzulässigen Zustände.	-	-	-

**PAAG-Sek.** 3

**Anlagenteil** Lagertanks B-0401/0402  
**R+I** KAL/0-0400/02 C

**Auslegung** **Temperatur** **Überdruck**  
**Betrieb** 50 °C 16 bar / -1 bar  
 -20 °C bis 7 bar  
 30 °C

**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Lagere Chlor bei Temp. von -20 °C bis max. 30 °C

<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Störung</b>	<b>Mögliche Ursache</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Erkennung</b>	<b>Gegenmaßnahme</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
C.02	weniger	weniger Temperatur	Entspannen auf Ungebungsdruck	tiefste Anwendungstemperatur nach AD-W2 unter-schritten	-	Es werden betriebsmäßig keine Entspannungen von Flüssigkeit auf Umgebungsdruck durchgeführt. Die Flüssigkeit in der Ver-ladeleitung wird vor Ent-spannen in den Behälter entleert. (Ende der Entlee-rung erkennbar an Druck-anstieg)	-	-	-
D.01	sowohl als auch	sowohl Chlor als auch erhöhter Wasseranteil	zuviel Wasser im Chlor	erhöhte Korrosion mit Folge Stofffreisetzung (flüssig)	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Betriebsinterne Beliefe-rung mit Qualitätssiche-rung</li> <li>•regelmäßige Prüfungen durch Sachverständige</li> <li>•Prüfung vor Inbetrieb-nahme</li> </ul>	E	III	-
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	nicht relevant							
G.01	anders als	nicht relevant							

**PAAG-Sek.** 4  
**Anlagenteil** Rohrleitung von R033/R027 bis Ventil vor B-4201 bzw. Rohrleitung Pumpen  
**R+I** Chlor  
**Stoff(e)** Fördere Chlor in die Chlorvorlagen  
**Sollfunktion** Fördere Chlor in die Chlorvorlagen

**Auslegung** Rohrleitung Pumpen  
**Betrieb** -20 °C / 30 °C  
**Temperatur** -20 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 7 - 10 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Chlorförderung	Handventile R033/R027 (Saugseite) geschlossen	Pumpen laufen heiß, Stofffreisetzung (gasförmig)	Erkennung durch Personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leckfreie Pumpen (Magnetkupplung)</li> <li>Pumpenlaufräder und Gehäuse in Edelstahl ausgeführt.</li> <li>Bedienereingriff</li> <li>Wärmeabfuhr über Solekühlung</li> </ul>	D	III	-
A.02	nein/nicht	keine Chlorförderung	Schnellschlußventile SV-0401/SV-0402 (Saugseite) geschlossen	wie A.01			D	IV	-
A.03	nein/nicht	keine Chlorförderung	Pumpe defekt (fördert nicht)	keine Auswirkung nach Außen					
A.04	nein/nicht	keine Chlorförderung	Handventile auf Druckseite Pumpe geschlossen	Druckerhöhung (entspr. Betriebsverfahren kommt es bei druckseitigem Einblocken zu keinen unzulässigen Temperaturen)	-	Rohrleitung für Summe aus Nullförderhöhe und max. Vordruck ausgelegt.	D	IV	-
A.05	nein/nicht	keine Chlorförderung	Pumpe fördert im Kreis	keine Auswirkung nach Außen, da Wärmeabfuhr durch Kühlsole erfolgt.					

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
 Abschlussbericht

**PAAG-Sek.** 4  
**Anlagenteil** Rohrleitung von R033/R027 bis Ventil vor B-4201 bzw. Rohrleitung U-313 einschl. C12-Pumpen P-0401/0402  
**R+I** Chlor  
**Stoff(e)** Fördere Chlor in die Chlorvorlagen  
**Sollfunktion**

**Temperatur** -20 °C  
 -20 °C  
 -20 °C / 30 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 7 - 10 bar

**Auslegung**  
**Betrieb**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.06	nein/nicht	keine Chlorförderung	Magnetpumpe defekt, Spalttopf undicht	Stofffreisetzung (flüssig)	Erkennung durch Personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pumpen sind "auf Dauer technisch dicht" nach DA zu § 45 Abs. 1 BGV B 6</li> <li>• Bedienereingriff</li> <li>• Wasserschleier</li> <li>• absperzbare Kanalisation (Löschwasserrückhaltung)</li> </ul>	F	II	-
B.01	mehr	in dieser Sektion nicht relevant							
C.01	weniger	weniger Chlorförderung	Pumpenfilter verstopft.	keine Auswirkung nach Außen, da Auslegung für max. Pumpendruck					

**PAAG-Sek.** 4 **Temperatur** **Überdruck**  
**Anlagenteil** Rohrleitung von R033/R027 bis Ventil vor B-4201 bzw. Rohrleitung 40 bar  
 U-313 einschl. C12-Pumpen P-0401/0402 Pumpen  
**Betrieb** -20 °C  
 -20 °C  
 -20 °C / 30 °C 7 - 10 bar

**R+I**

**Stoff(e)** Chlor

**Sollfunktion** Fördere Chlor in die Chlorvorlagen

<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Störung</b>	<b>Mögliche Ursache</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Erkennung</b>	<b>Gegenmaßnahme</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
C.02	weniger	weniger Chlorförderung	Leckage	Stofffreisetzung (flüssig oder gasförmig)	Erkennung durch Personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>•hochwertige Dichtungen</li> <li>•Flansche mit Nut und Feder</li> <li>•leckfreie Pumpen ("auf Dauer technisch dicht" nach DA zu § 45 Abs. 1 BGV B 6)</li> <li>•Armaturen der Fa. Phönix Armaturenwerke nach EUROCHLOR</li> <li>•Bedienereingriff</li> <li>•Not-Aus-System</li> <li>•Wasserschleier</li> <li>•absperrbare Kanalisation (Löschwasserrückhaltung)</li> <li>•Rohrleitungsauslegung</li> </ul>	E	II	-
D.01	sowohl auch	sowohl Chlor als auch Wasser	erhöhter Wasseranteil im Chlor	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bildung von Chlor-„Butter“</li> <li>•Verstopfung von Leitungen</li> <li>•Druckaufbau</li> </ul>	•PAL-20		C	IV	-
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	nicht relevant, da Rückströmen von Vorlagen in Tank normale Betriebsweise darstellt. Zum Stoffeintrag aus den Reaktoren über die Vorlagen in die Tanks siehe Sektion 10 / G.01							

**PAAG-Sek.** 4  
**Anlagenteil** Rohrleitung von R033/R027 bis Ventil vor B-4201 bzw. Rohrleitung U-313 einschl. C12-Pumpen P-0401/0402  
**R+I**  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor in die Chlorvorlagen

**Temperatur** -20 °C  
 -20 °C  
 -20 °C / 30 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 7 - 10 bar

**Auslegung**  
**Betrieb**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
G.01	anders als	thermische Expansion	Wärmeeintrag in eingesperrte Flüssigkeit	unzulässiger Druckaufbau in Leitungen, Stofffreisetzung	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bedienungsanweisung</li> <li>•geschultes Personal</li> <li>•Sicherung von Armaturen</li> </ul>	D	III	-
G.02	anders als	Chlor-Eisen-Brand	Reibung durch Kontakt	Brand, Stofffreisetzung (gasförmig)	Erkennung durch Personal	Chlorpumpen (Laufräder und Gehäuse) in Edelstahl ausgeführt	F	I	-

**PAAG-Sek.** 5  
**Anlagenteil** Leitung 0413/0408 von Tanks zum Nottank B-0403 P-0405  
 einschl. Not-Pumpe P-0405 Leitung  
**R+I** KAL/O-0400/01 Rev D. **Betrieb** **Auslegung** **Temperatur** **Überdruck**  
 ? 50 °C ? 40 bar  
 -20 °C bis 2 bis 7 bar  
 30 °C

**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor bei Bedarf aus Lagertanks zum Nottank

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Förderung in den Nottank	Handventile auf Saugseite geschlossen	Lagertank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden, evtl. Stoffreisetzung kann nicht gestoppt werden.	• durch Personal vor Ort, • keine Füllstandsänderung in Nottank	• Betriebsanweisung • Mitarbeiterschulung • Wasserschieleier • Verpumpung mit Chlorpumpen B0401/0402 (geringere Förderleistung)	E	II	-
A.02	nein/nicht	keine Förderung in den Nottank	Ausfall Notpumpe P-0405	siehe A.01			E	II	-
A.03	nein/nicht	keine Förderung in den Nottank	Handventile auf Druckseite geschlossen	siehe A.01			E	II	-
A.04	nein/nicht	keine Förderung in den Nottank	Verstopfung	siehe A.01			E	II	-
A.05	nein/nicht	keine Förderung in den Nottank	Leckage	siehe A.01			E	II	-
B.01	mehr	mehr Förderung	nicht relevant						
C.01	weniger	weniger Förderung	zu hoher Druckverlust	analog A.01			E	II	-

**PAAG-Sek.** 5  
**Anlagenteil** Leitung 0413/0408 von Tanks zum Nottank B-0403 P-0405  
einschl. Not-Pumpe P-0405 Leitung  
**R+I** KAL/O-0400/01 Rev D. **Auslegung** **Überdruck**  
**Temperatur** ? **?**  
50 °C 40 bar  
-20 °C bis 2 bis 7 bar  
30 °C **Betrieb**

**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor bei Bedarf aus Lagertanks zum Nottank

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
D.01	sowohl als auch	sowohl Chlor als auch Stickstoff	Stickstoff an R-074 angeschlossen	Druckanstieg in Leitung (Stickstoffdruck auf 7 bar begrenzt)	keine	Gegenmaßnahmen nicht erforderlich, da Druck < Auslegungsdruck (Die Notpumpe wird nach Einbau unter N2-Druck eingeblockt. Der benötigte N2 wird aus Flaschen bezogen. Nach Einbau wird der N2-Anschluß blindgeflanscht.)	E	IV	-
D.02	sowohl als auch	sowohl in Nottank als auch in nicht havarierten Lagertank	Weg zum Lagertank fälschlich offen	Überfüllen des Lagertanks	<ul style="list-style-type: none"> <li>•WIR0400/0401</li> <li>•PIAH 015/016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bedienereingriff</li> <li>•Betriebsanweisung</li> <li>•ausreichendes „Not“-Volumen vorhanden</li> </ul>	E	IV	-
D.03	sowohl als auch	sowohl in Nottank als auch in havarierten Lagertank	siehe A.01				E	II	-
E.01	teilweise	Förderung in Nottank ohne Notwendigkeit	Bedienungsfehler	keine Auswirkungen nach Ausfen					
F.01	Umkehrung	ausgeschlossen, da Nottank immer leer							
G.01	anders als	Förderung von Stickstoff statt Chlor	Siehe D.01				E	IV	-

**PAAG-Sek.** 6  
**Anlagenteil** Nottank B0403  
**R+I** KAL/O-400/01 Rev D  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Lagere im Bedarf Chlor

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** 50 °C  
 -20 bis 30 °C  
**Überdruck** 14 bar  
 2 bis 6 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Lagerung im Anforderungsfall	Behälter undicht	Stofffreisetzung (flüssig)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erkennung durch Personal</li> <li>Druckmessung</li> </ul>	Auslegung und Prüfung nach Regelwerk	E	II	-
B.01	mehr	mehr Lagerung = Überfüllen	Bedienungsfehler (Entleerung in vollen Nottank oder Entleerung von zwei Lagertanks in Nottank)	Überdruck im Nottank	<ul style="list-style-type: none"> <li>PIAH-017</li> <li>WIR-0402</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Summe aus Nullförderhöhe und Vordruck kleiner als Auslegungsdruck</li> <li>Überfüllte Tanks werden entspr. Anweisung sofort entleert.</li> <li>Entleerung erst durch Druckausgleich, dann mit Pumpe</li> </ul>	F	II	-
C.01	weniger	nicht relevant							
D.01	sowohl als auch	sowohl Chlor als auch Stickstoff	nicht denkbar, da keine ständige Verbindung zum Stickstoff-System						
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	nicht relevant							
G.01	anders als	nicht relevant							

**PAAG-Sek.** 7  
**Anlagenteil** Rückföhrleitung 0405/0406/0403 zu Lagerbehälter P-0403  
 B0401/0402 incl. P-0403 Leitung  
**R+I** 0400/01 Rev D, 0400/02 Rev C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor aus Nottank in Lagerbehälter

**Auslegung** ?  
**Betrieb** 50°C  
 -20 bis 30 °C

**Temperatur** 40 bar  
 2 bis 7 bar

**Überdruck**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Förderung	Handventile saugseitig geschlossen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nottank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden.</li> <li>Trockenlaufen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>durch Per-sonal (keine Füllstands-abnahme im Nottank)</li> <li>örtl. PI (kei-ne Druck-erhöhung)</li> </ul>	Bedieneringriff entsprechend Betriebsanweisung  Maßnahmen gegen Trockenlaufen siehe Sektion 4 / A.01	E	III	-
A.02	nein/nicht	keine Förderung	Handventile druckseitig geschlossen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nottank kann im Anforderungsfall nicht entleert werden</li> <li>Druckerhöhung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>durch Per-sonal (keine Füllstands-abnahme im Nottank)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bedieneringriff entsprechend Betriebsanweisung</li> <li>Rohrleitung für max. Pumpendruck ausgelegt</li> </ul>	E	III	-
A.03	nein/nicht	keine Förderung	Pumpe ausgefallen	Nottank kann nicht entleert werden	<ul style="list-style-type: none"> <li>durch Per-sonal (keine Füllstands-abnahme im Nottank)</li> </ul>	Bedieneringriff entsprechend Betriebsanweisung	E	IV	-
A.05	nein/nicht	keine Förderung	Magnetpumpe defekt, Spalttopf undicht	Stofffreisetzung (flüssig)	Erkennung durch Per-sonal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pumpen sind "auf Dauer technisch dicht" nach DA zu § 45 Abs. 1 BGV B 6</li> <li>Bedieneringriff</li> <li>Wasserschleier</li> <li>absperbare Kanalisation (Löschwasserrückhaltung)</li> </ul>	F	II	-

**PAAG-Sek.** 7  
**Anlagenteil** Rückföhrleitung 0405/0406/0403 zu Lagerbehälter P-0403  
 B0401/0402 incl. P-0403 Leitung  
**R+I** 0400/01 Rev D, 0400/02 Rev C  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Fördere Chlor aus Nottank in Lagerbehälter

**Temperatur** ?  
 50°C  
 -20 bis 30 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 2 bis 7 bar

**Auslegung**  
**Betrieb**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
B.01	mehr	nicht relevant							
C.01	weniger	weniger Förderung	Verstopfung	Nottank kann nicht entleert werden	keine Füllstandsabnahme im Nottank	•Bedienereingriff	E	IV	-
C.02	weniger	weniger Förderung	Leckage	Stofffreisetzung (flüssig)	Erkennung durch Personal	•Rohrleitungsauslegung •Flansche mit Nut und Feder •Bedienereingriff •Not-Aus-System •Wasserschleier •absperrbare Kanalisation	E	II	-
D.01	sowohl als auch	nicht relevant (kein Stickstoff)							
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	Förderung aus Lagerbehälter (mit Behälterpumpen bzw. DeltaP) in Nottank		nicht relevant, da zulässige Betriebsweise.					
G.01	anders als	thermische Expansion eingesperrter Flüssigkeit	Ex-	siehe Sektion 4 G.01			D	III	-

**PAAG-Sek.** 8  
**Anlagenteil** Kühlsystem  
**R+I** KAL/O-0400/01 -02  
**Stoff(e)** wässr. CaCl<sub>2</sub>/MgCl<sub>2</sub>-Lösung  
**Sollfunktion** Kühle Flüssig-Chlor in Behältern und Rohrleitungsabschnitten

**Auslegung Betrieb**  
**Temperatur** -25 °C  
 -20 °C  
**Überdruck** 4 bar  
 <4 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Kühlung	Ausfall Kühlmittelpumpen	Wärmeeintrag in das System (nur längerfristig kritisch)	Ausfall wird alarmiert	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redundante Kühlmittelpumpe</li> <li>Alarm bei Pumpenstillstand</li> <li>Bedienereingriff</li> </ul>	D	IV	-
A.02	nein/nicht	keine Kühlung	Kühlmittelzuleitung versperrt	Wärmeeintrag in das System (nur längerfristig kritisch)	Mengenüberwachung an Solevorlage (Plausibilitätskontrolle über Hubzahl Kolbenpumpe)	Bedienereingriff	D	IV	-
B.01	mehr	Störung durch mehr (Soletemperatur Vorlauf min. -27 °C, normal -22 °C)	Kühlung im inneren Leckage im Kühlsystem	nicht möglich, da	Auslegung für max. Kälteleistung				
C.01	weniger	weniger Kühlung	Leckage im Kühlsystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eintritt von Chlor ins Kühlsystem (Druck Chlor im Normalfall höher als Druck im Sole-System)</li> <li>Eintritt von Sole ins Chlor bei niedrigen Drücken im Chlorsystem, erhöhte Korrosionsrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geruch</li> <li>pH-Wertmessung der Sole (regelmäßig 1x pro Woche)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine innenliegenden Kühlschlangen an Lagerbehältern (Behälter von Außen mit Kühlschlangen umwickelt, zwischen Kühlschlangen und Behälterwandung Wärmeleitpaste)</li> <li>Kühlsole ist CaCl<sub>2</sub>-Lösung</li> <li>Bedienereingriff</li> </ul>	D	III	-

**PAAG-Sek.** 8  
**Anlagenteil** Kühlsystem  
**R+I** KAL/O-0400/01 -02  
**Stoff(e)** wässr. CaCl<sub>2</sub>/MgCl<sub>2</sub>-Lösung  
**Sollfunktion** Kühle Flüssig-Chlor in Behältern und Rohrleitungsabschnitten

**Auslegung**  
**Betrieb**

**Temperatur**  
 -25 °C  
 -20 °C

**Überdruck**  
 4 bar  
 <4 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
D.01	sowohl als auch	nicht relevant							
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	nicht möglich							
G.01	anders als	thermische Expansion von eingesperrter Sole	Ex-Bedienungsfehler	Stofffreisetzung von Sole	keine	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Betriebsanweisung</li> <li>•Auffangmöglichkeiten</li> </ul>	D	III	-

**PAAG-Sek.** 9 C12-Kompressor V-0401 einschl. Rohrleitungen  
**Anlagenteil** Leitungen V-0401  
**R+I** KAL/O-0400/01 -02  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Entferne Gasphase aus einem Behälter und fördere sie in anderen Behälter

**Temperatur** 50 °C  
 ?  
 30 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 ?  
 -0,7 bis 7 bar

**Auslegung**  
**Betrieb**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Förderung	Ventile auf Saugseite geschlossen	Unterdruck	keine	Auslegung der Leitung für PN40 deckt auch Vakuum ab.	D	IV	-
A.02	nein/nicht	keine Förderung	Ventile auf Druckseite geschlossen	Verdichter fördert gegen geschlossenen Austritt, Verdichterdruk mechanisch begrenzt	keine	Überströmsicherung	D	IV	-
A.03	nein/nicht	keine Förderung	Membranbruch Verdichter	Absaugung unterbrochen	Membranbruch-Sicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dreifache Membran mit Zwischenraumüberwachung</li> <li>Automatische Verdichtersabschaltung bei Membranbruch.</li> <li>Bedienereingriff</li> </ul>	E	II	-
A.04	nein/nicht	keine Förderung	Verdichter steht	keine Auswirkung Außen					
B.01	mehr	nicht relevant							
C.01	weniger	weniger Förderung	Leckagen	Stofffreisetzung (gasförmig)	Erkennung durch Personal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rohrleitungsauslegung</li> <li>hochwertige Dichtungen</li> <li>Flansche mit Nut und Feder</li> <li>Bedienereingriff</li> </ul>	E	III	-
C.02	weniger	weniger Förderung	Verstopfen Filter Verdichter	Förderleistung sinkt	keine	keine	E	IV	-

**PAAG-Sek.** 9  
**Anlagenteil** C12-Kompressor V-0401 einschl. Rohrleitungen  
**R+I** KAL/O-0400/01 -02  
**Stoff(e)** Chlor  
**Sollfunktion** Entferne Gasphase aus einem Behälter und fördere sie in anderen Behälter

**Auslegung** Leitungen V-0401  
**Betrieb**  
**Temperatur** 50 °C  
 ?  
 30 °C  
**Überdruck** 40 bar  
 ?  
 -0,7 bis 7 bar

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
D.01	sowohl als auch	sowohl Gasphase als auch Flüssigphase	Tropfeneintrag	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abschaltung über el. Stromwächter</li> <li>sonst siehe A.03</li> </ul>			E	II	-
E.01	teilweise	keine Förderung	keine Förderung in anderen Behälter, siehe A.01				D	IV	-
F.01	Umkehrung	Rückströmen	Verdichterausfall	keine Auswirkung nach Außen (Verdichterventile bleiben mit Federkraft geschlossen)					
G.01	anders als	nicht relevant							

**PAAG-Sek.** 10  
**Anlagenteil** Rohrleitungen 0407, 0426, 0428, 0424, 0425 von Vorla-  
 gen zu den Lagertanks  
**R+I** KAL/O-0400/02 KAL/O-0400/01  
 KAL/O-3210/01 KAL/O-4201/02  
**Stoff(e)** Chlor (gasförmig)  
**Sollfunktion** Rückführung von Chlor aus Vorlagen in Lagerbehälter

**Temperatur** 50 °C  
**Überdruck** 40 bar  
**Betrieb** 30 °C  
**Überdruck** 7 bar

**Auslegung** Leitungen  
**Betrieb**

Nr.	Leitwort	Störung	Mögliche Ursache	Auswirkung	Erkennung	Gegenmaßnahme	P	S	A
A.01	nein/nicht	keine Rückführung	Ventile geschlossen	Druckanstieg in den Vorla- gen	PIAH 4206/ PAH 319	Auslegung der Vorlagen und Rohrleitungen für max. Pumpenenddruck	F	II	-
A.02	nein/nicht	keine Rückführung	Zuführung aus Lager geringer als Abnahme	keine Auswirkung nach Außen					
B.01	mehr	nicht relevant							
C.01	weniger	weniger Rückfüh- rung	Verstopfungen	analog A.01			F	II	-
C.02	weniger	weniger Rückfüh- rung	Leckagen	Stofffreisetzung (flüssig)	Erkennung durch Per- sonal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohrleitungsauslegung nach</li> <li>• Armaturen der Fa. Phönix nach</li> <li>EUROCHLOR</li> <li>• hochwertige Dichtungen</li> <li>• Flansche mit Nut und Feder</li> <li>• Bedieneingriff</li> <li>• Wasserschleier</li> </ul>	D	II	-
D.01	sowohl als auch	nicht relevant							
E.01	teilweise	nicht relevant							
F.01	Umkehrung	nicht relevant							

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
 Abschlussbericht

**PAAG-Sek. Anlagenteil** 10 Rohrleitungen 0407, 0426, 0428, 0424, 0425 von Vorla-  
 gen zu den Lagertanks  
**R+I** KAL/O-0400/02 KAL/O-0400/01  
 KAL/O-3210/01 KAL/O-4201/02  
**Stoff(e)** Chlor (gasförmig)  
**Sollfunktion** Rückführung von Chlor aus Vorlagen in Lagerbehälter

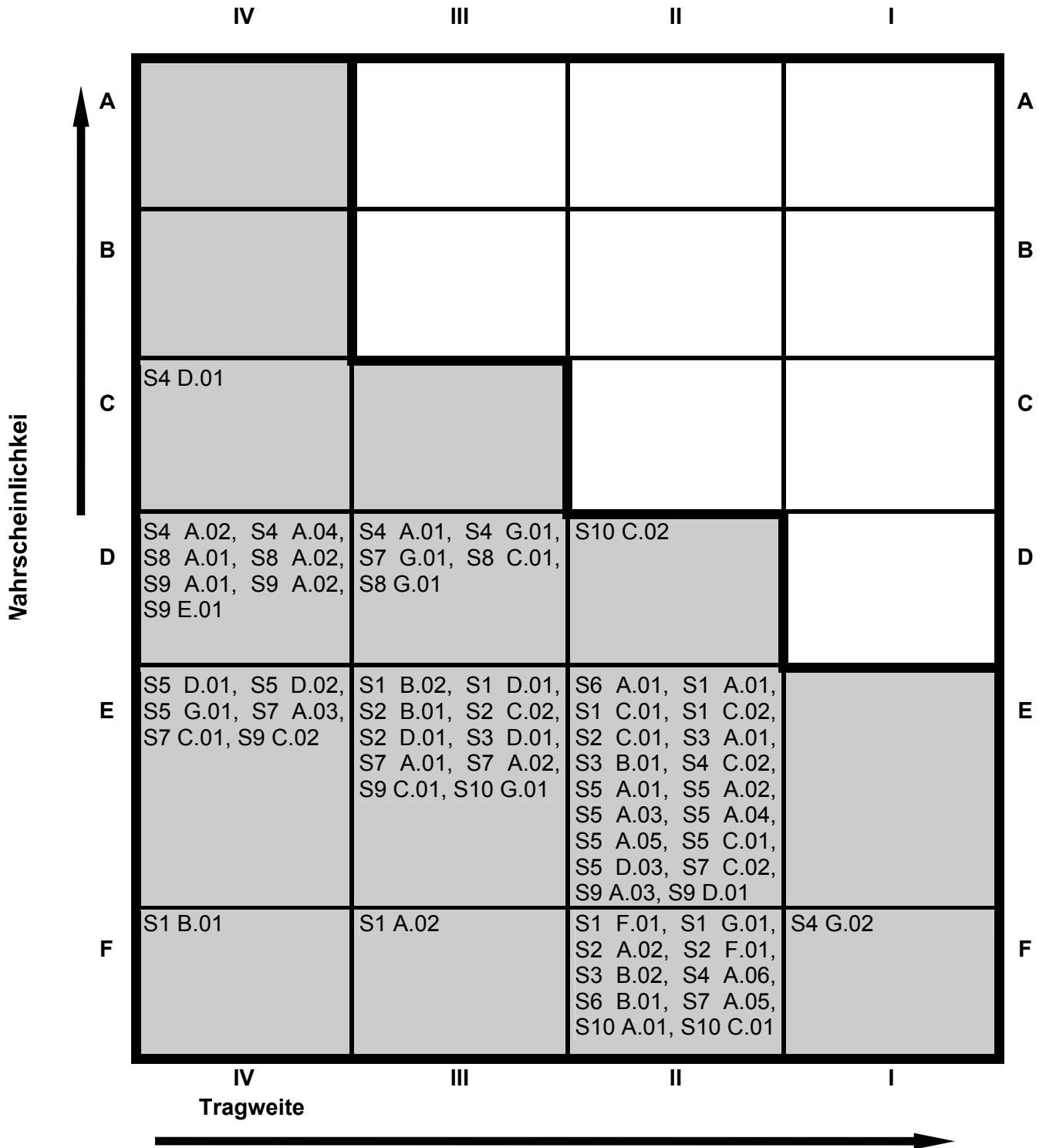
**Temperatur** 50 °C  
**Überdruck** 40 bar

**Auslegung** Leitungen

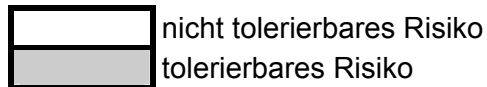
**Betrieb** 30 °C  
 7 bar

<b>Nr.</b>	<b>Leitwort</b>	<b>Störung</b>	<b>Mögliche Ursache</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Erkennung</b>	<b>Gegenmaßnahme</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
G.01	anders als	Produkt (SbCl <sub>5</sub> , R113, R114) aus den Reaktoren der nachgeschalteten Anlagen in Vorlage Tanklager	Störung in nachgeschalteten Anlagen	Verunreinigung	Überwachung der nachgeschalteten Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pumpen von Vorlage Tanklager zu den Vorlagen Produktion sind als Kolbenpumpen ausgeführt, daher geringe Durchflussmengen.</li> <li>• Durchgeführte Reaktionen in Produktion laufen nur bei höherem Druck und Temperatur ab</li> <li>• Über Dreibegeventil ist entweder der Weg von Vorlage Tanklager zu den Vorlagen Produktion oder von Vorlage Tanklager zu Lagertanks freigegeben.</li> <li>• Druck und Temperaturalarm auf Druckseite Kolbenpumpe</li> </ul>	E	III	-

Risikomatrix



Wahrscheinlichkeit: A: Häufig B: Oft C: Gelegentlich D: Selten E: Unwahrscheinlich F: Praktisch unmöglich  
 Tragweite: I: Katastrophal II: Kritisch III: Klein IV: Unbedeutend



### Erläuterungen zur Risiko-Matrix

Während der Durchführung der PAAG-Studie wurden die ermittelten Störungen (unter Berücksichtigung der getroffenen Gegenmaßnahmen) vom PAAG-Team anhand der Risiko-Matrix eingestuft. Dem PAAG-Team lag dazu die Risiko-Matrix in der oben aufgeführten Fassung vor. Da die Einstufung dazu diente, eine Rangfolge der ermittelten Störungen aufzustellen, waren die in der Matrix aufgeführten Wahrscheinlichkeiten und Tragweiten nicht kategorisiert worden. Die aufgeführten Kategorien für Wahrscheinlichkeit und Tragweite sind intuitiv erfassbar. Auf eine Kategorisierung war verzichtet worden, damit die Phantasie und den freien Gedankenfluss innerhalb des Teams nicht behindert wird, eine rasche und einfache Einstufung der Störung ermöglicht werden kann und abschweifende Diskussionen vermieden werden.

Die in der Risiko-Matrix aufgeführten Wahrscheinlichkeiten und Tragweiten lassen sich wie folgt interpretieren

#### Eintrittswahrscheinlichkeit P

- A : häufig
- B : oft
- C : gelegentlich
- D : selten
- E : unwahrscheinlich
- F : unmöglich

#### Erläuterung

- Ereignis kommt regelmäßig vor
- Ereignis ist bisher schon mehr als einmal vorgekommen
- Eintritt des Ereignisses ist nicht auszuschließen und auch schon einmal vorgekommen
- Eintritt des Ereignisses ist zwar nicht auszuschließen, jedoch unwahrscheinlich und bisher noch nicht vorgekommen.
- Eintritt des Ereignisses ist zwar nicht gänzlich auszuschließen, jedoch unwahrscheinlich und bisher noch nicht vorgekommen.
- Eintritt des Ereignisses ist vernünftigerweise auszuschließen

#### Schadensausmaß S

- I : katastrophal
- II : kritisch
- III : klein
- IV : unbedeutend

#### Erläuterung

- Behälterversagen oder große (>10 Liter in 1 min) Leckagen
- Abriss oder größere Leckagen von Flüssigphase führenden Rohrleitungen oder Anlagenteilen; Ausfall von Not-Systemen
- mittlere gasförmige und kleinere flüssige Leckagen
- Bedienereingriff vor Erreichen von unzulässigen Zuständen möglich; Betrieblich relevante Störungen

**Anhang 3: Abbildungen zu Kapitel 6 Quantitative Risikoanalyse (QRA)**

**Abb. 6-1: Ereignisablaufdiagramm**

**Abb. 6-2: Fehlerbaum LL04**

**Abb. 6-3: Fehlerbaum LL06**

**Abb. 6-4: Fehlerbaum LL07\_1**

**Abb. 6-5 Fehlerbaum LL07\_2**

**Abb. 6-6: Fehlerbaum LL09**

**Abb. 6-7: Fehlerbaum LL 10\_1**

**Abb. 6-8: Fehlerbaum LL10\_2**

**Abb. 6-9: Fehlerbaum LL10M\_1**

**Abb. 6-10: Fehlerbaum LL10M\_2**

**Abb. 6-11: Fehlerbaum LL20**

**Abb. 6-12: Fehlerbaum LL31**

**Abb. 6-13: Fehlerbaum (Teil 12)**

**Abb. 6-14: Fehlerbaum (Teil 13)**

**Abb. 6-15: Fehlerbaum (Teil 14)**

**Abb. 6-16: Fehlerbaum (Teil 15)**

**Abb. 6-17: Fehlerbaum (Teil 16)**

**Abb. 6-18: Fehlerbaum (Teil 17)**

**Abb. 6-18: Fehlerbaum (Teil 17)**

**Abb. 6-19: Fehlerbaum (Teil 18)**

**Abb. 6-20: Fehlerbaum (Teil 19)**

**Abb. 6-21: Fehlerbaum (Teil 20)**

**Abb. 6-22: Fehlerbaum (Teil 21)**

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorklager“;  
Abschlussbericht

Seite 31

**Abb. 6-23: Fehlerbaum (Teil 22)**

**Abb. 6-24: Fehlerbaum (Teil 23)**

**Abb. 6-25: Grundstruktur einer hierarchischen Aufgabenanalyse (6 /10/)**

**Abb. 6-26: Vorlage für die Durchführung der Dekompositionsmethode (tabellarisch) (6 /11/)**

Abb. 6-1: Ereignisablaufdiagramm (Event tree)

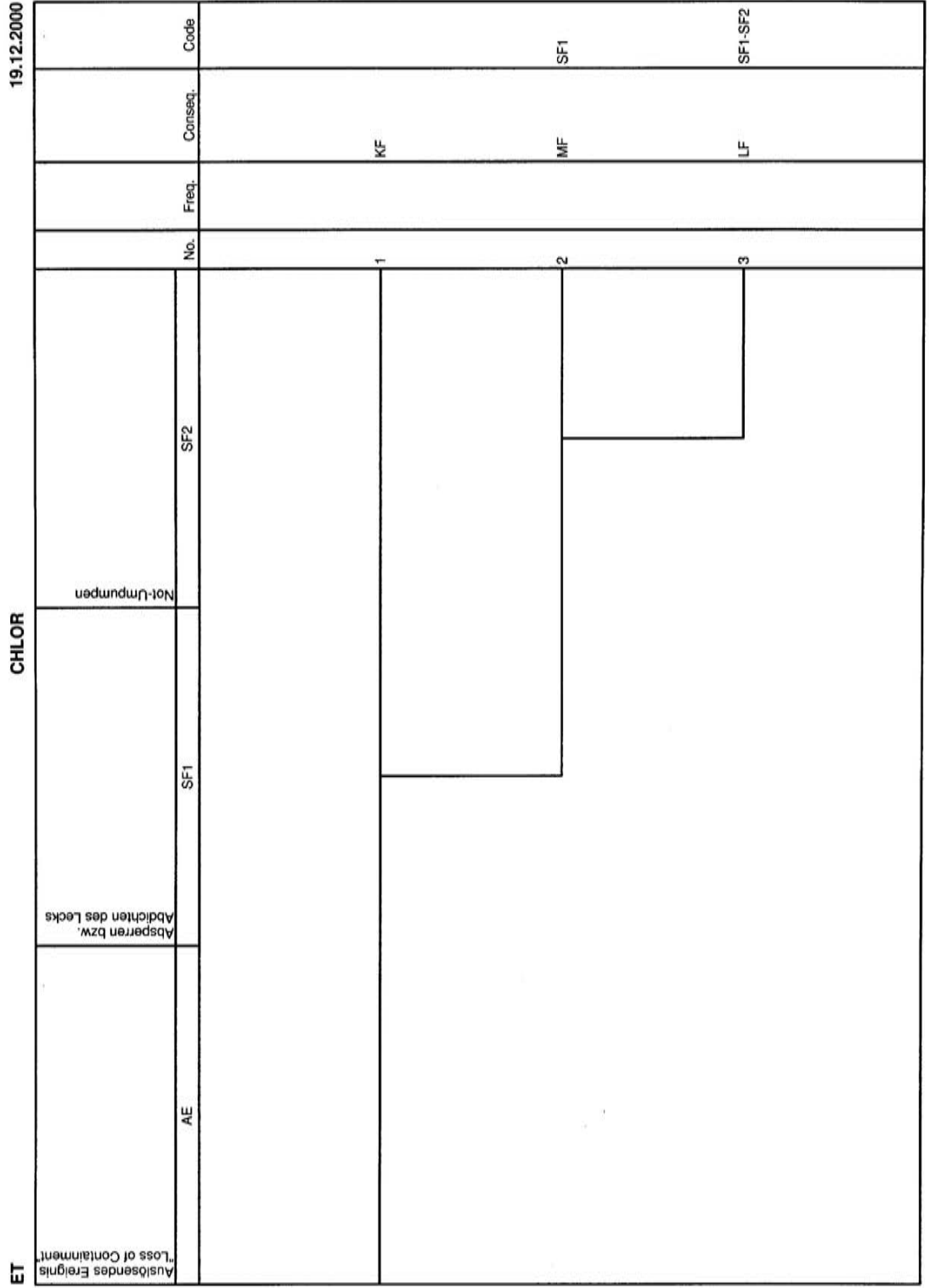
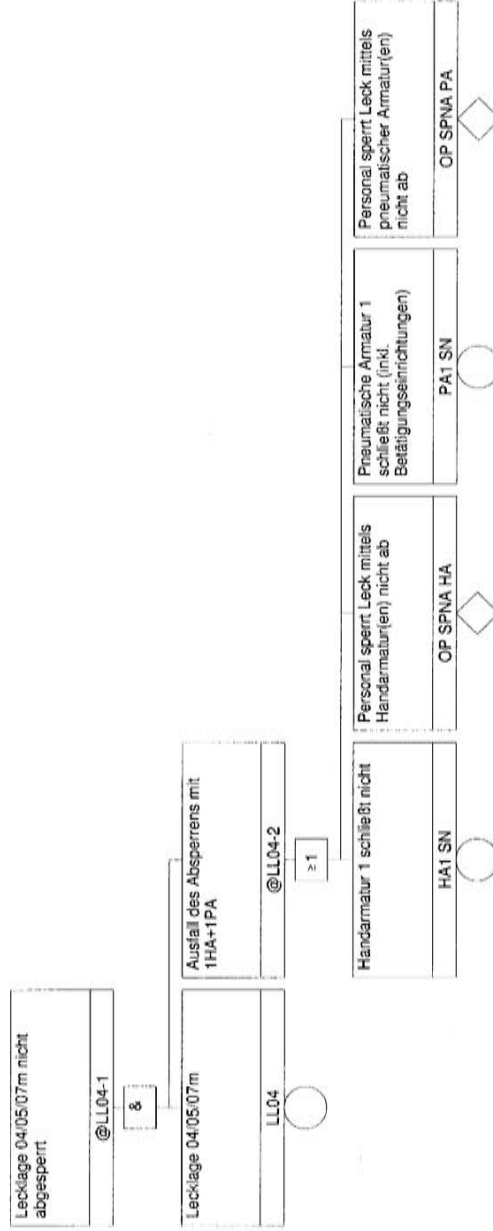


Abb. 6-2: Fehlerbaum LL04

LL04

CHLOR

19.12.2000



**Abb. 6-3: Fehlerbaum LL06**

LL06

CHLOR

19.12.2000

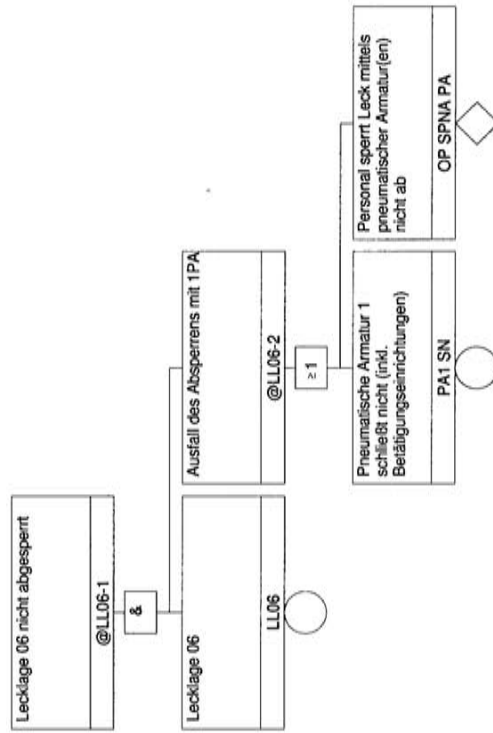
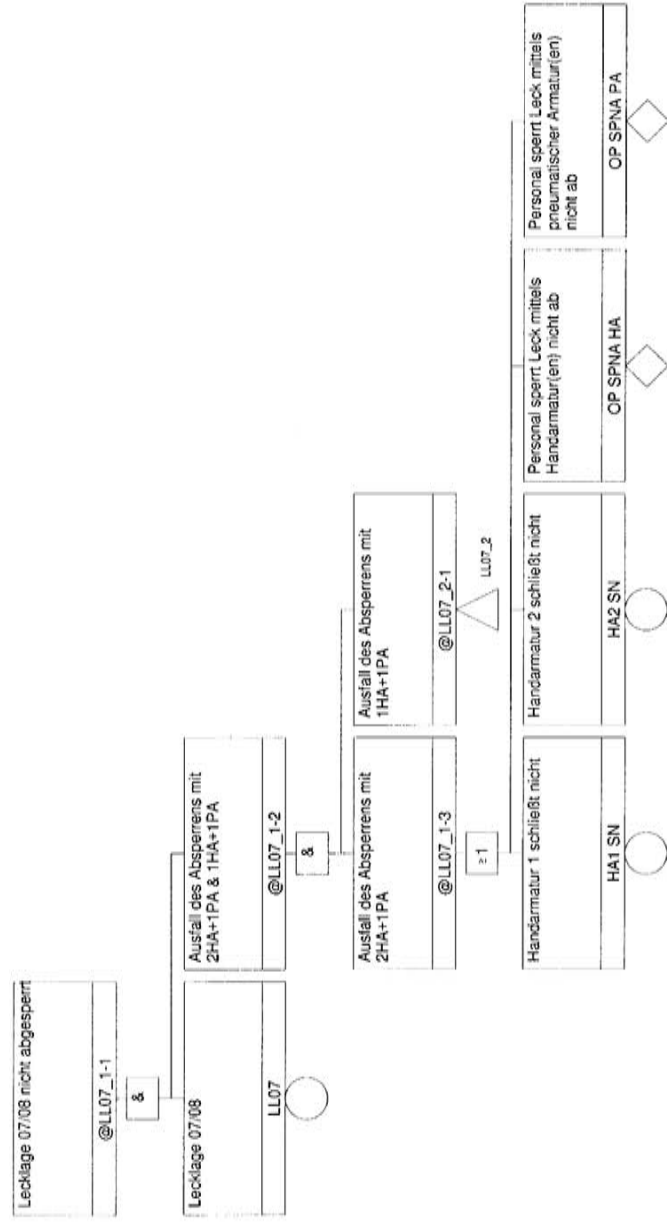


Abb. 6-4: Fehlerbaum LL07\_1

LL07\_1

CHLOR

19.12.2000



**Abb. 6-5 Fehlerbaum LL07\_2**

LL07\_2

CHLOR

19.12.2000

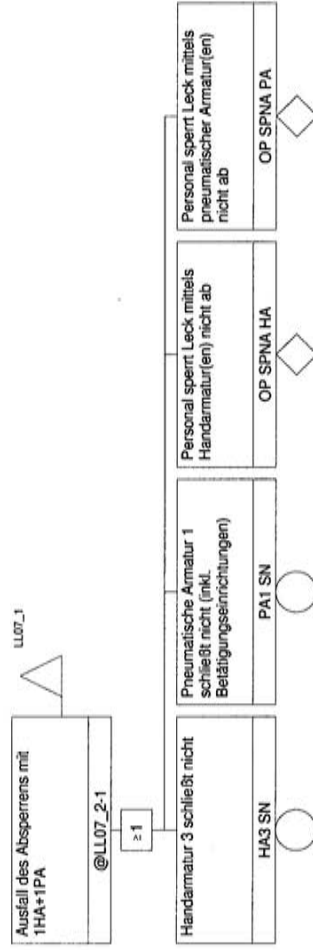


Abb. 6-6: Fehlerbaum LL09

LL09

CHLOR

19.12.2000

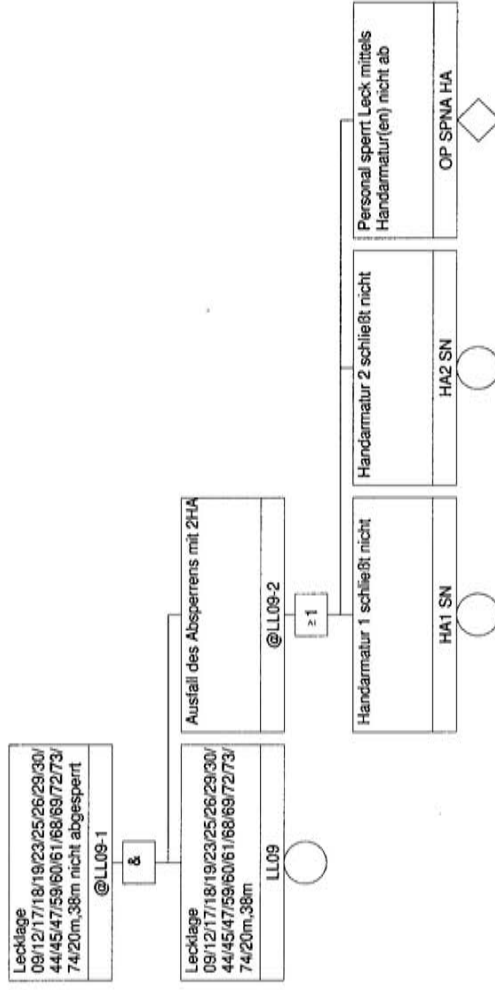


Abb. 6-7: Fehlerbaum LL 10\_1

LL10\_1

CHLOR

19.12.2000

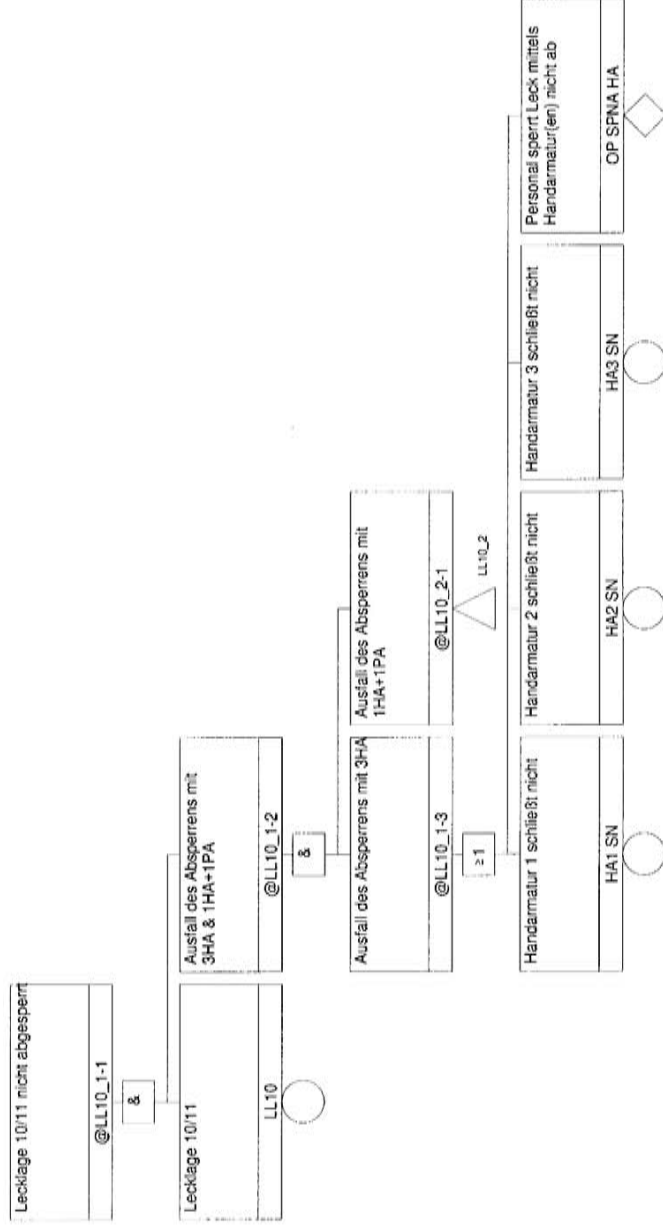
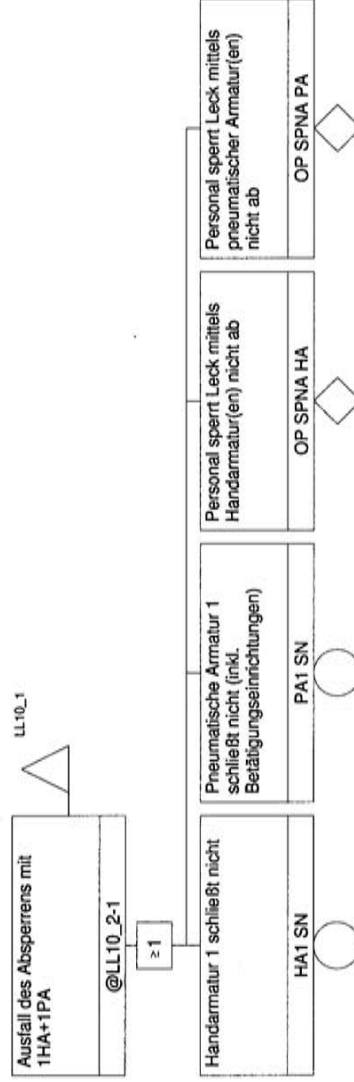


Abb. 6-8: Fehlerbaum LL10\_2

LL10\_2

CHLOR

19.12.2000

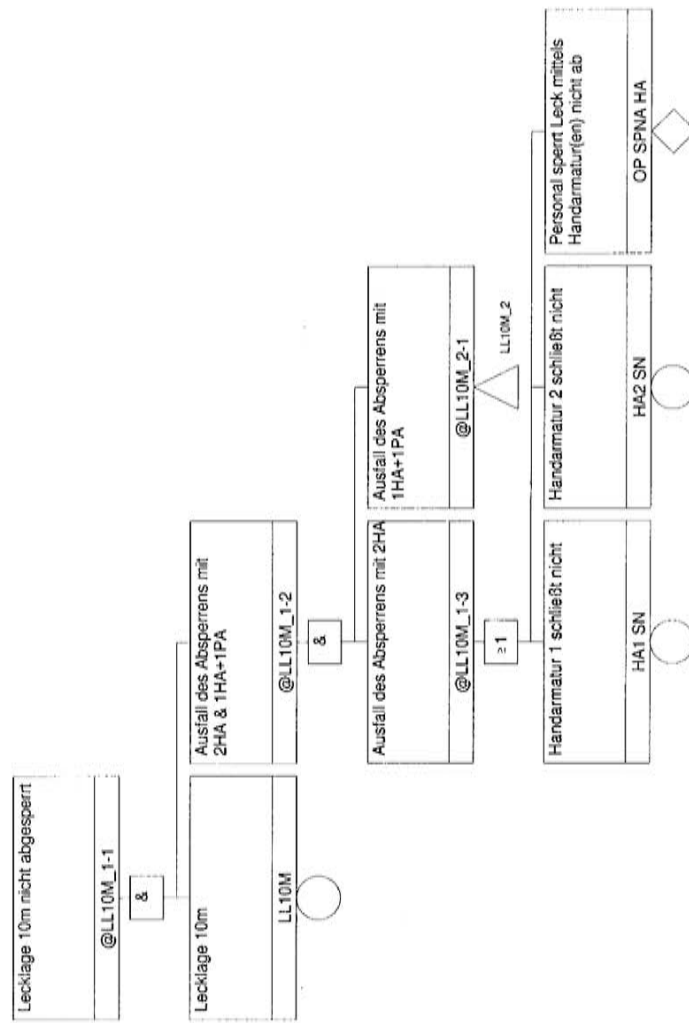


**Abb. 6-9: Fehlerbaum LL10M\_1**

LL10M\_1

CHLOR

19.12.2000



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
Abschlussbericht

Abb. 6-10: Fehlerbaum LL10M\_2

LL10M\_2

CHLOR

19.12.2000

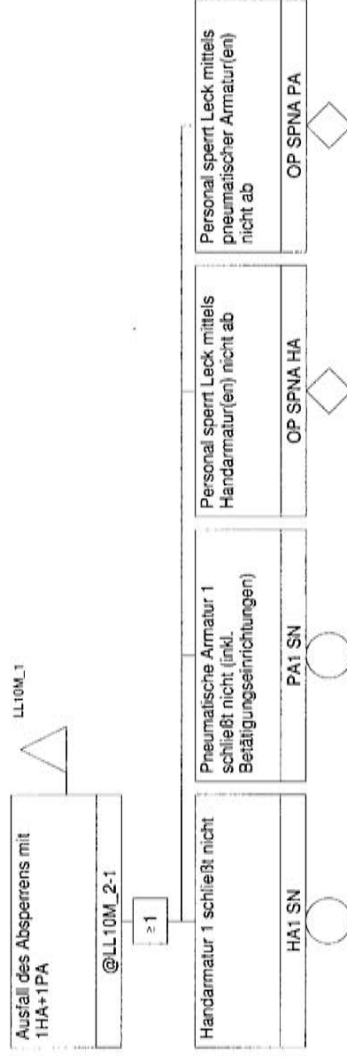


Abb. 6-11: Fehlerbaum LL20

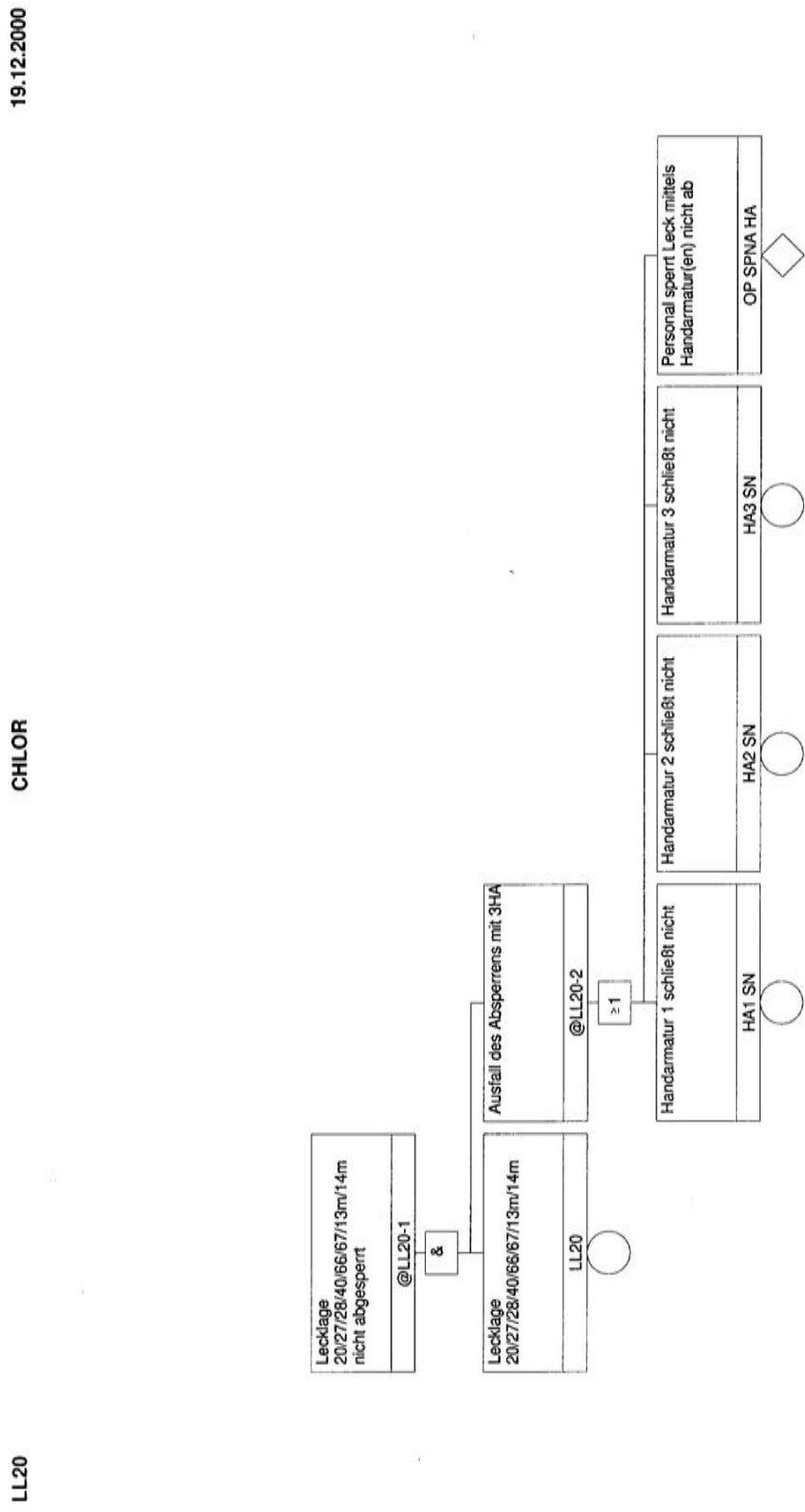
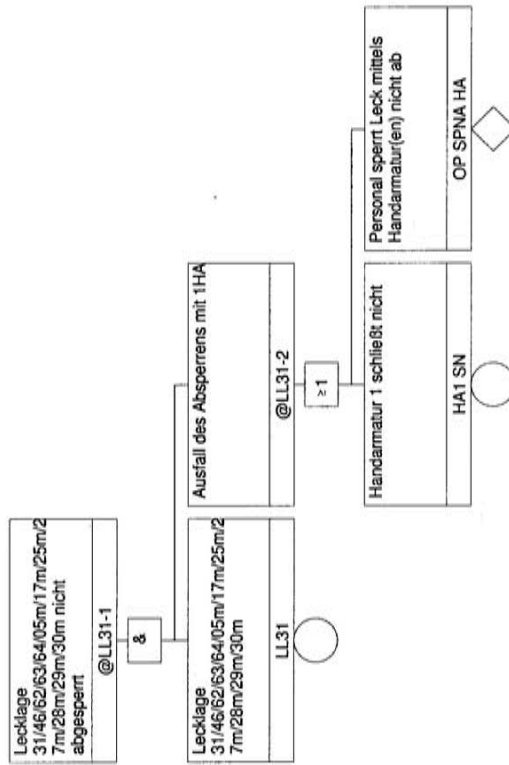


Abb. 6-12: Fehlerbaum LL31

LL31

CHLOR

19.12.2000



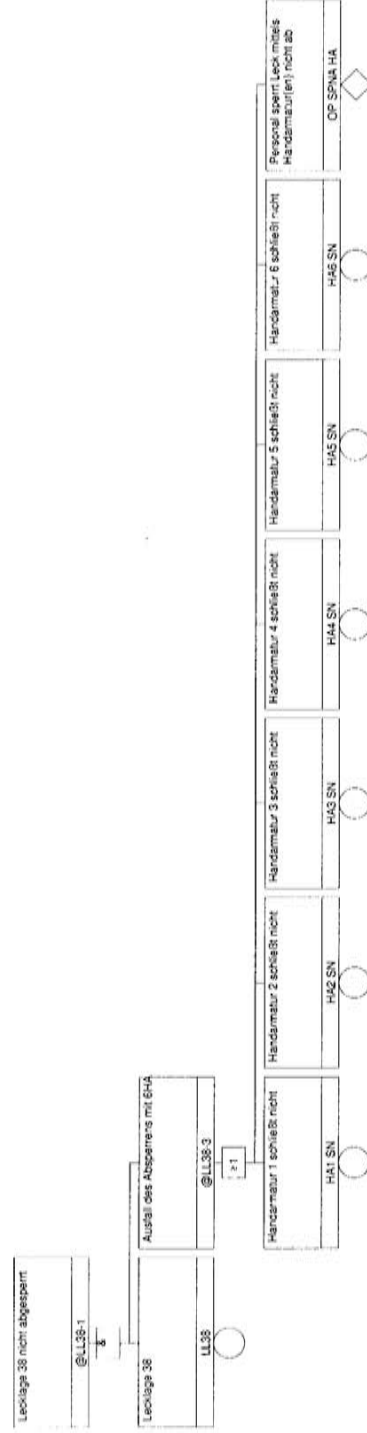
Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
Gegenstand: F+E-Vorhaben Abschlussbericht

Abb. 6-13: Fehlerbaum (Teil 12)

LL38

CHLOR

19.12.2000



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
Abschlussbericht

Abb. 6-14: Fehlerbaum (Teil 13)

LL59A

CHLOR

19.12.2000

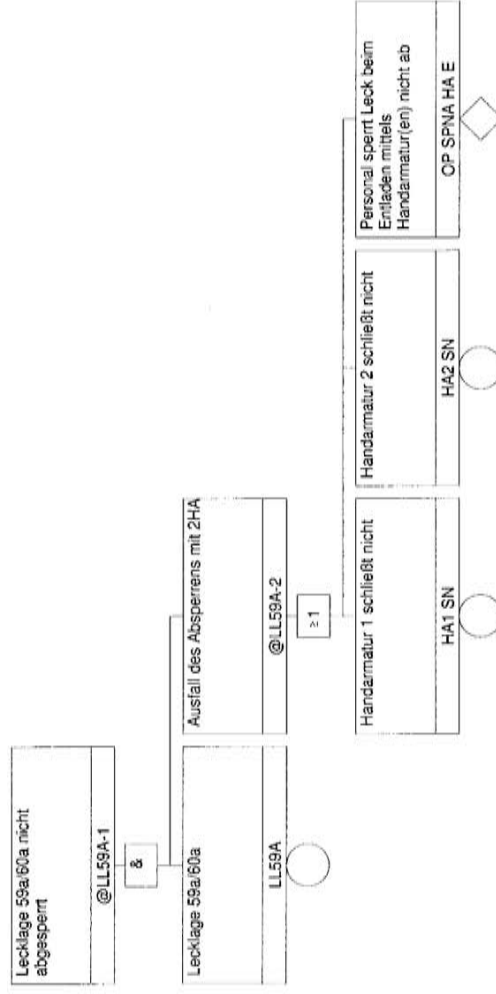
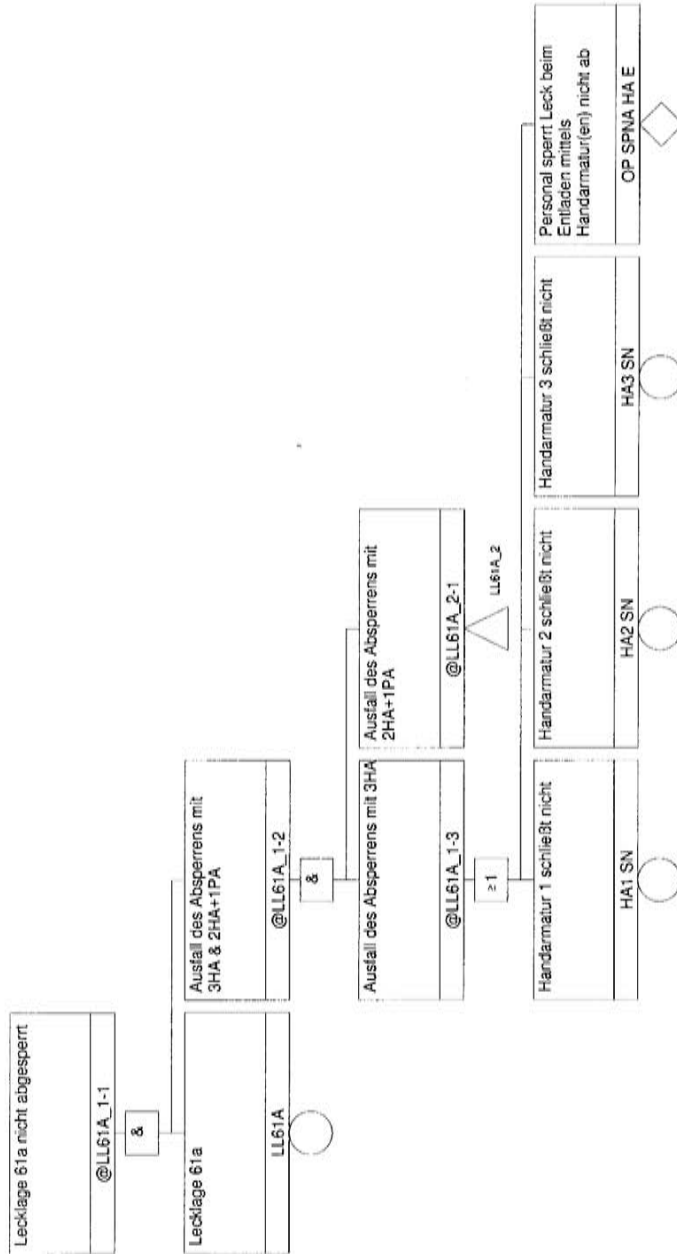


Abb. 6-15: Fehlerbaum (Teil 14)

LL61A\_1

CHLOR

19.12.2000



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
 Abschlussbericht

Abb. 6-16: Fehlerbaum (Teil 15)

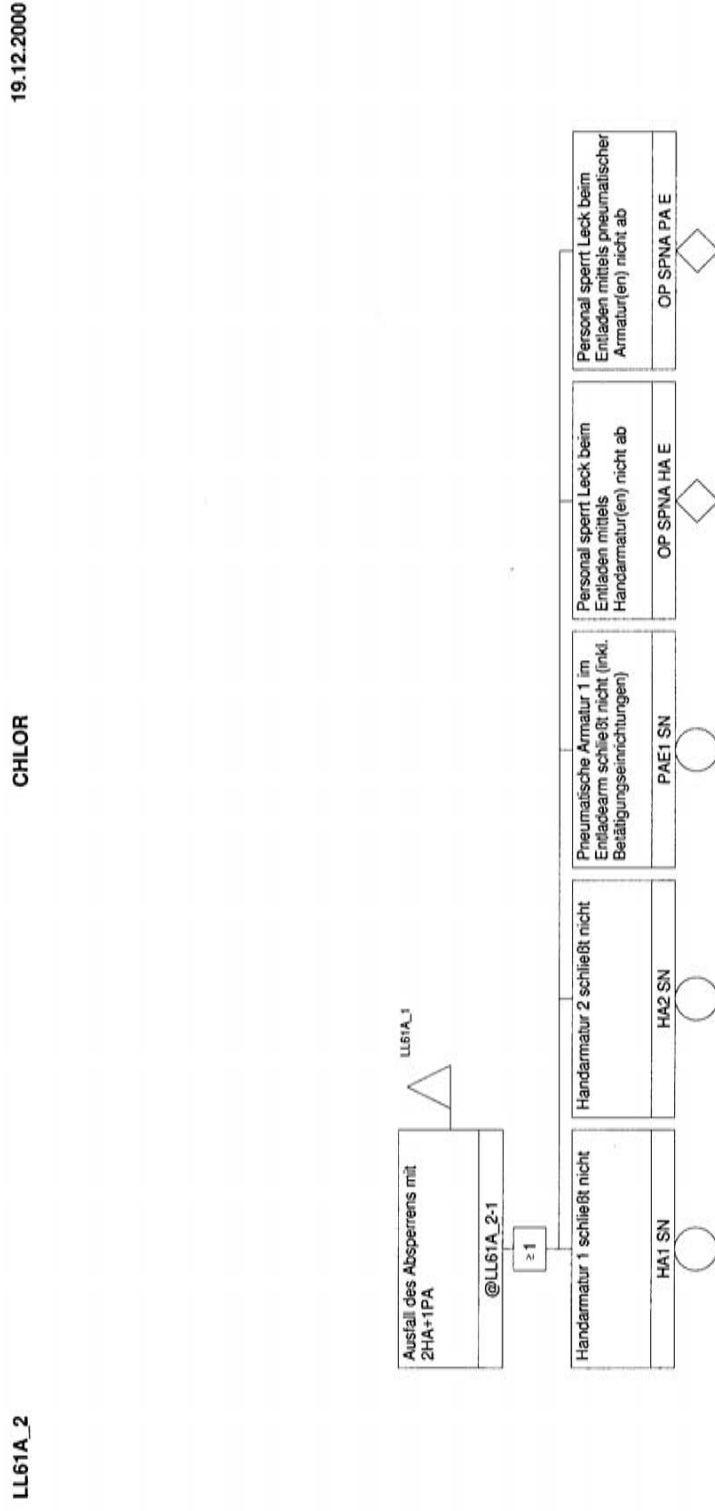
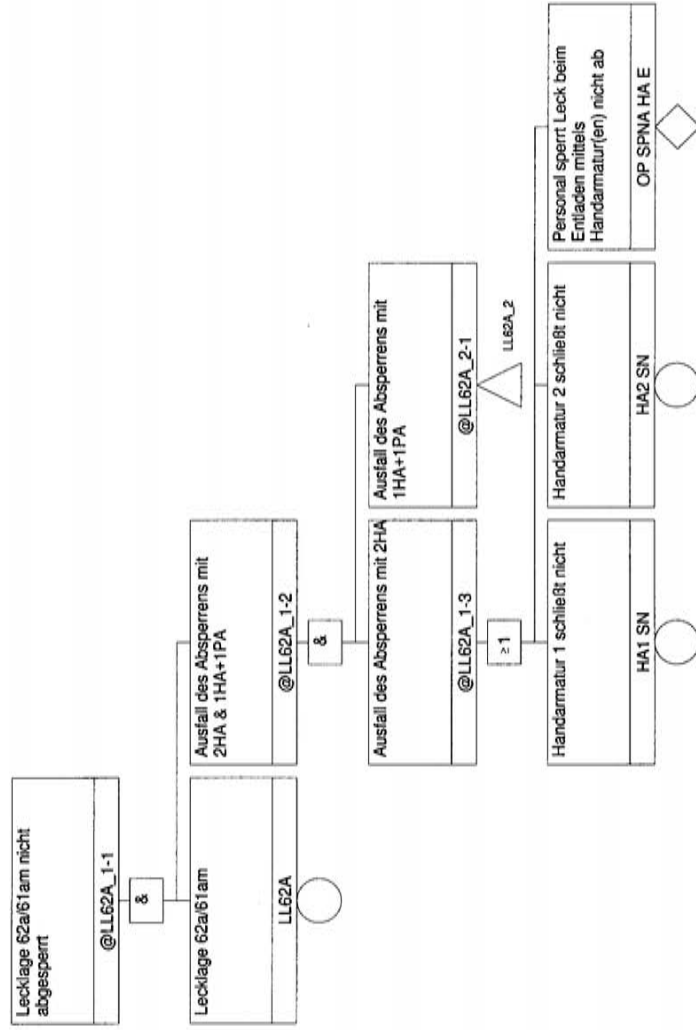


Abb. 6-17: Fehlerbaum (Teil 16)

LL62A\_1

CHLOR

19.12.2000



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
 Abschlussbericht

Abb. 6-18: Fehlerbaum (Teil 17)

LL62A\_2

CHLOR

19.12.2000

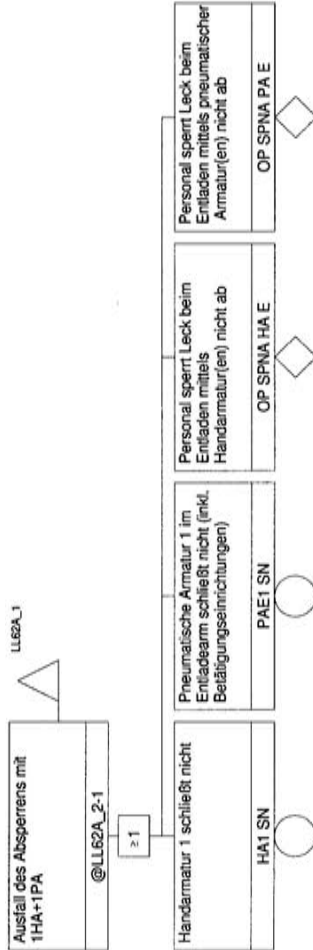


Abb. 6-19: Fehlerbaum (Teil 18)

LL63A CHLOR 19.12.2000

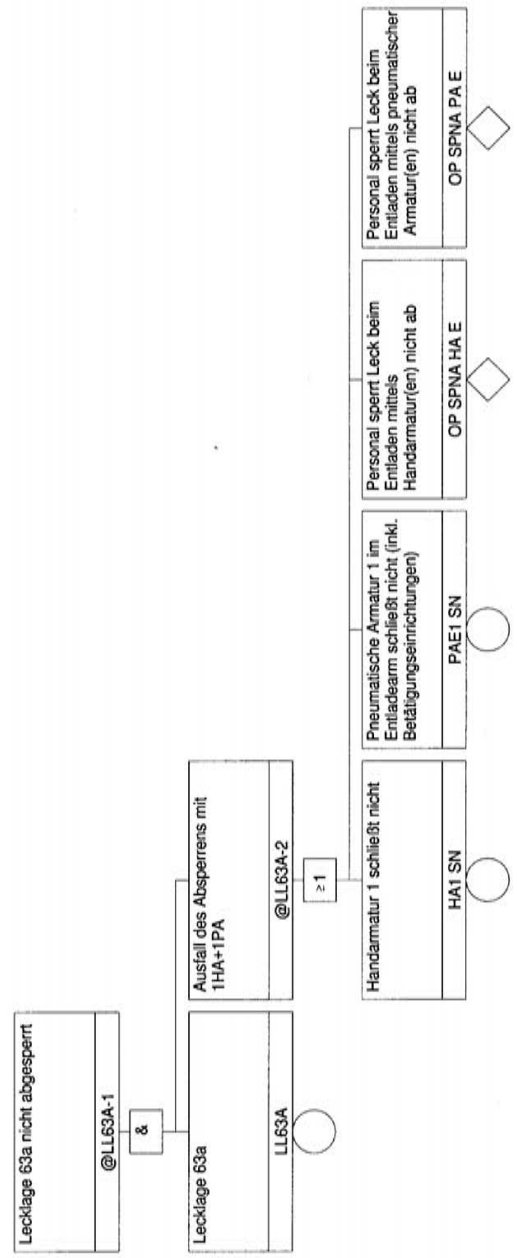




Abb. 6-21: Fehlerbaum (Teil 20)

LL65A

CHLOR

19.12.2000

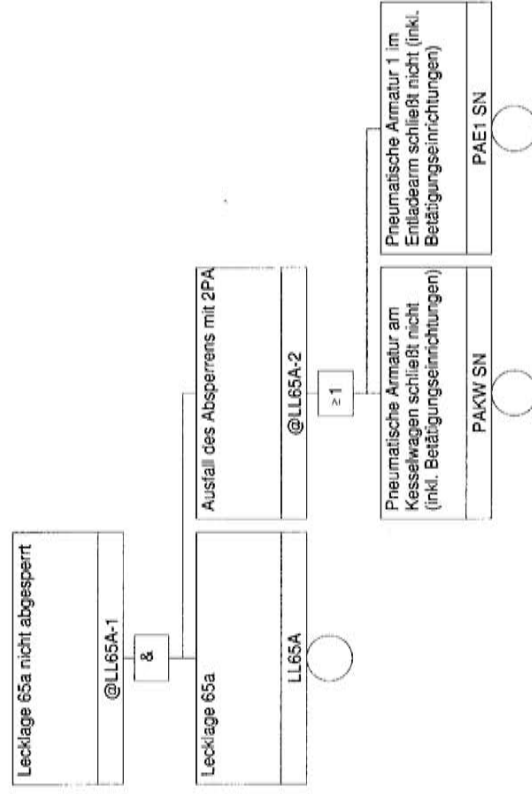
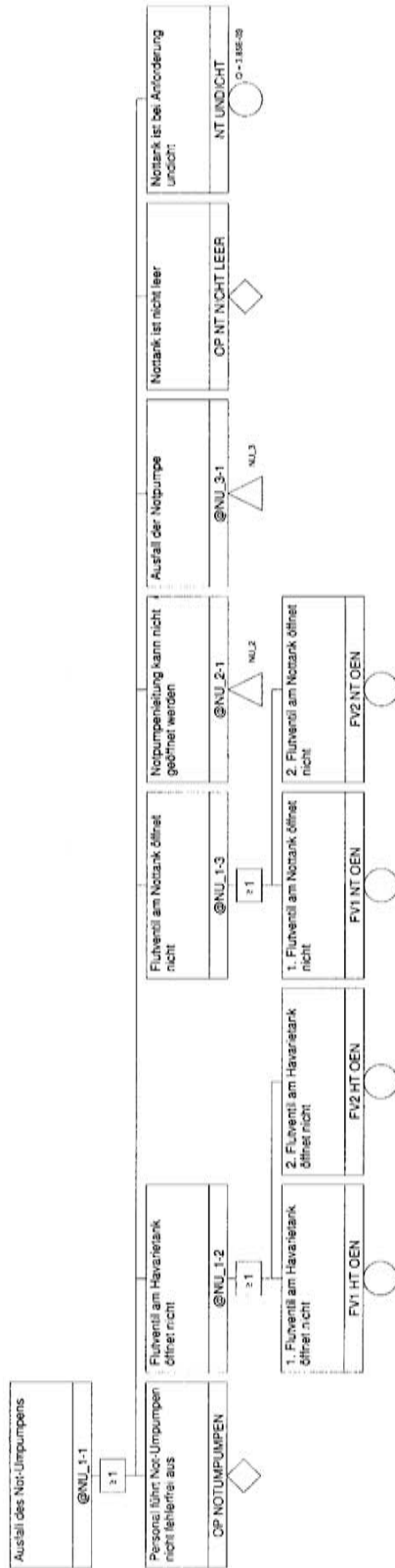


Abb. 6-22: Fehlerbaum (Teil 21)

19.12.2000

CHLOR

NU\_1

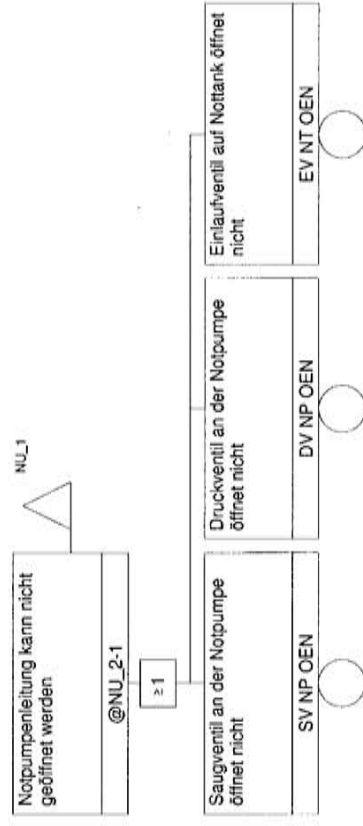


**Abb. 6-23: Fehlerbaum (Teil 22)**

NU\_2

CHLOR

19.12.2000



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
Abschlussbericht

Abb. 6-24: Fehlerbaum (Teil 23)

NU\_3

CHLOR

19.12.2000

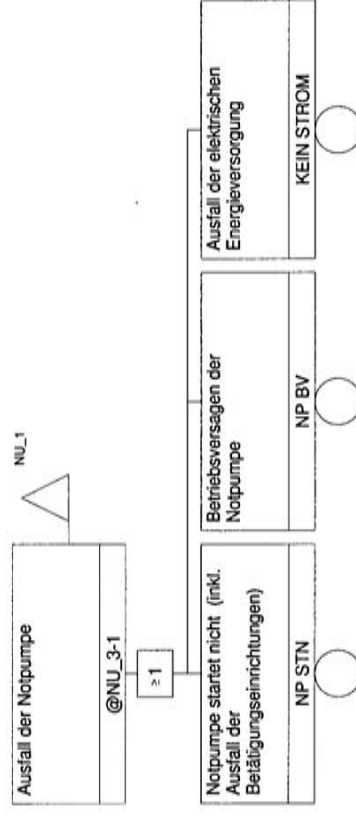
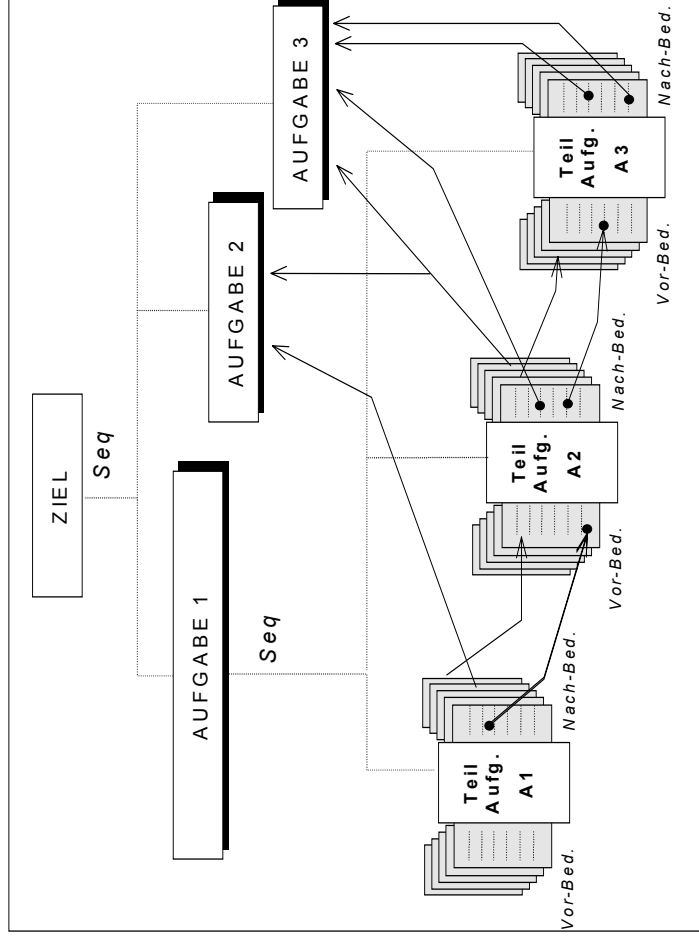


Abb. 6-25: Grundstruktur einer hierarchischen Aufgabenanalyse (6 /10/)





**Anhang 4 : Abbildungen zu Kapitel 7 Risikoabschätzung Schienentransport von Chlor**

**Abb. 7-1: Fehlerbaumdarstellung der Hauptfreisetzungsarten aus Chlorkesselwagen**

**Abb. 7-2: Gefahrenquellen beim Schienentransport**

**Abb. 7-3: Hauptfreisetzungsmöglichkeiten aus Chlorkesselwagen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bei einer Transportleistung, wie sie der des Jahres 1990 entspricht (Quelle: Hartwig / 3 /)**

**Abb. 7-4: Chlorfreisetzung im Zugbetrieb**

**Abb. 7-5: Freisetzung bei Beanspruchung durch Frontalstoß**

**Abb. 7-6: Freisetzung durch Aufprall auf ein Hindernis**

**Abb. 7-7: Freisetzung durch Zusammenprall an einem Bahnübergang**

**Abb. 7-8: Freisetzung durch Entgleisung mit Zusammenstoß**

**Abb. 7-9: Freisetzung durch Auffahrt auf eine stehende Einheit**

**Abb. 7-10: Freisetzung bei Beanspruchung durch Seitenstoß**

**Abb. 7-11: Freisetzung bei Beanspruchung durch Umstürzen**

**Abb. 7-12: Freisetzung durch Deformation oder Penetration**

**Abb. 7-13: Freisetzung bei Beanspruchung durch Schadensfeuer**

**Abb. 7-14: Chlorfreisetzung durch Unfall beim Rangierbetrieb**

Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD  
Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung an einem Chlorlager“;  
Abschlussbericht

Seite 59

**Abb. 7-15: Freisetzung bei Beanspruchung durch Frontalstoß**

**Abb. 7-16: Freisetzung durch Aufprall auf ein Hindernis/ Freisetzung durch Zusammenstoß**

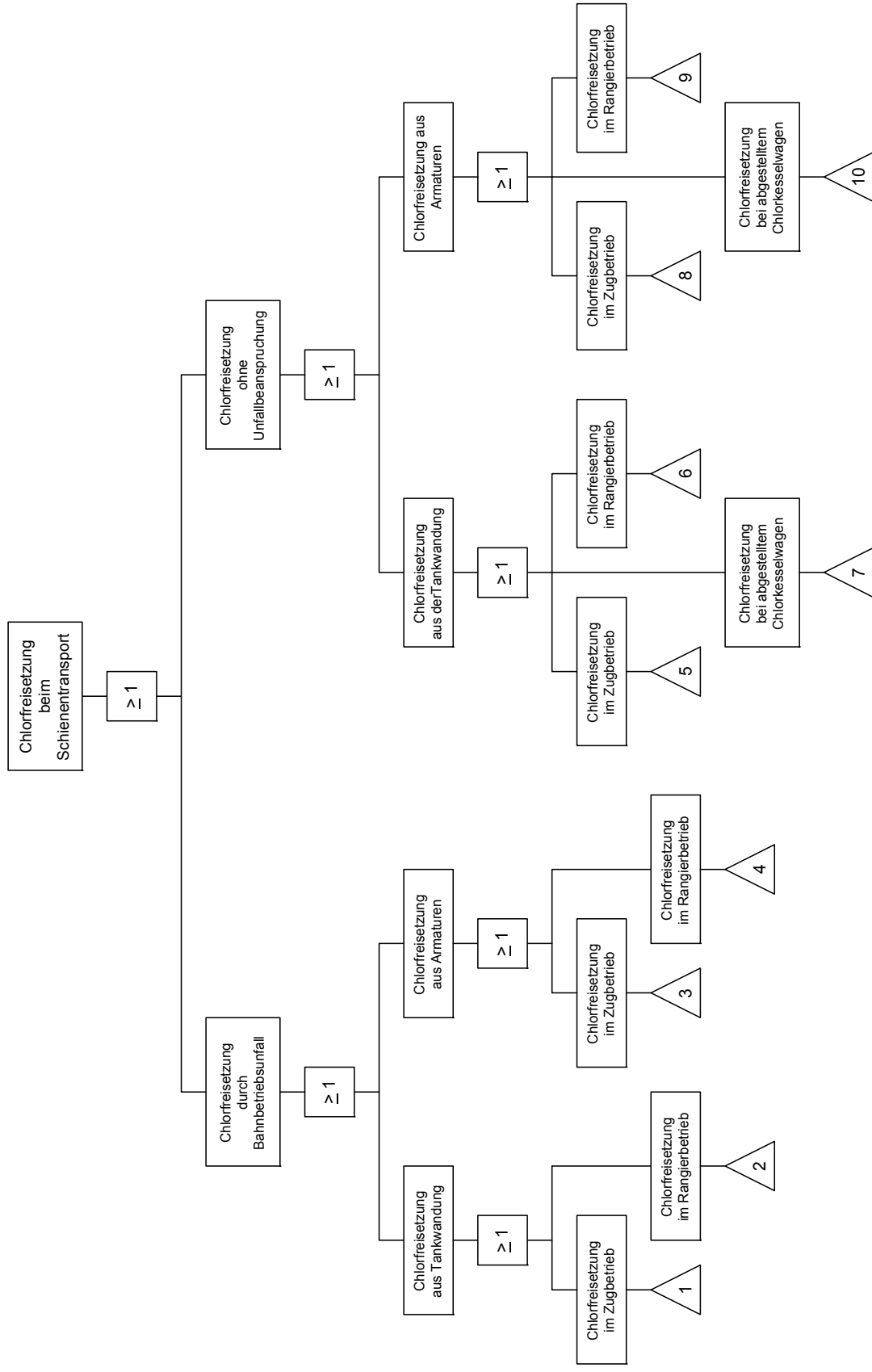
**Abb. 7-17: Auffahren auf eine stehende Einheit**

**Abb. 7-18: Freisetzung bei Beanspruchung durch Seitenstoß**

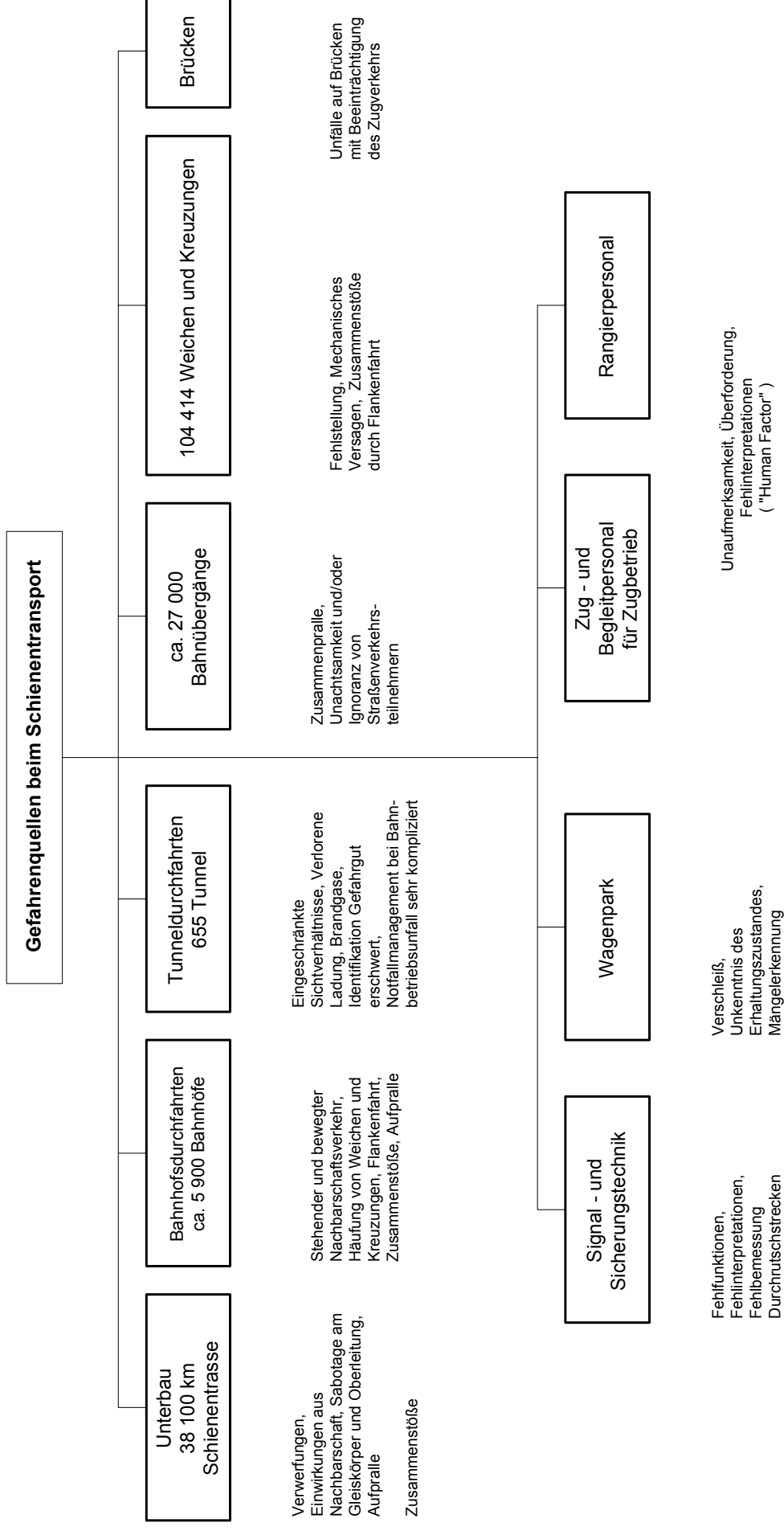
**Abb. 7-19: Freisetzung bei Beanspruchung durch Umstürzen**

**Abb. 7-20: Freisetzung bei Beanspruchung durch Schadensfeuer**

Abb. 7-1: Fehlerbaumdarstellung der Hauptfreisetzungsarten aus Chlorkesselwagen

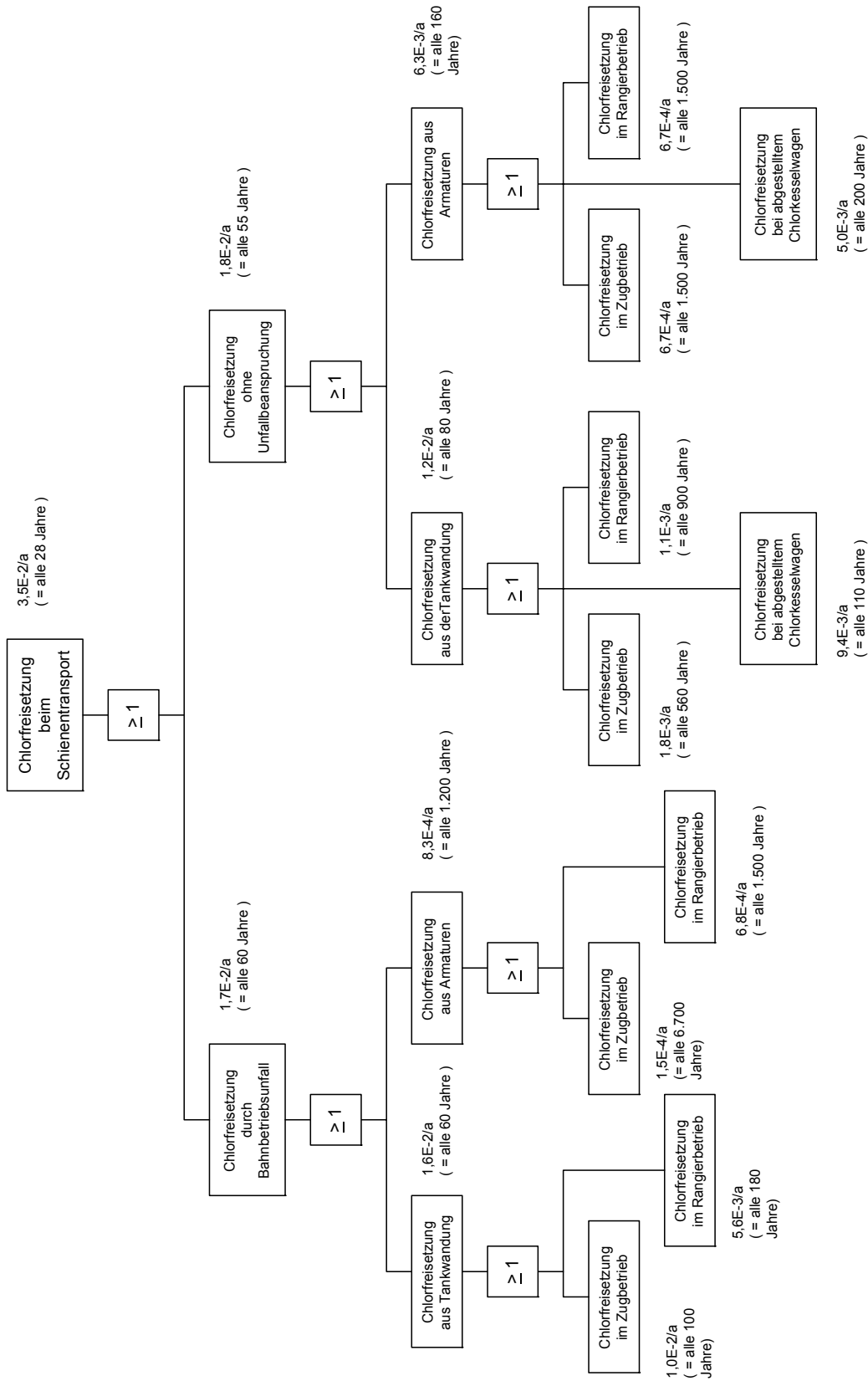


**Abb. 7-2: Gefahrenquellen beim Schienentransport**



Bearbeitung: BAM, GRS, TÜV SÜD an einem Chlorlager;  
 Gegenstand: F+E-Vorhaben „Risikoabschätzung Abschlussbericht“

**Abb. 7-3: Hauptfreisetzungsmöglichkeiten aus Chlorkesselwagen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bei einer Transportleistung, wie sie der des Jahres 1990 entspricht (Quelle: Hartwig / 3 /)**



**Abb. 7-4: Chlorfreisetzung im Zugbetrieb**

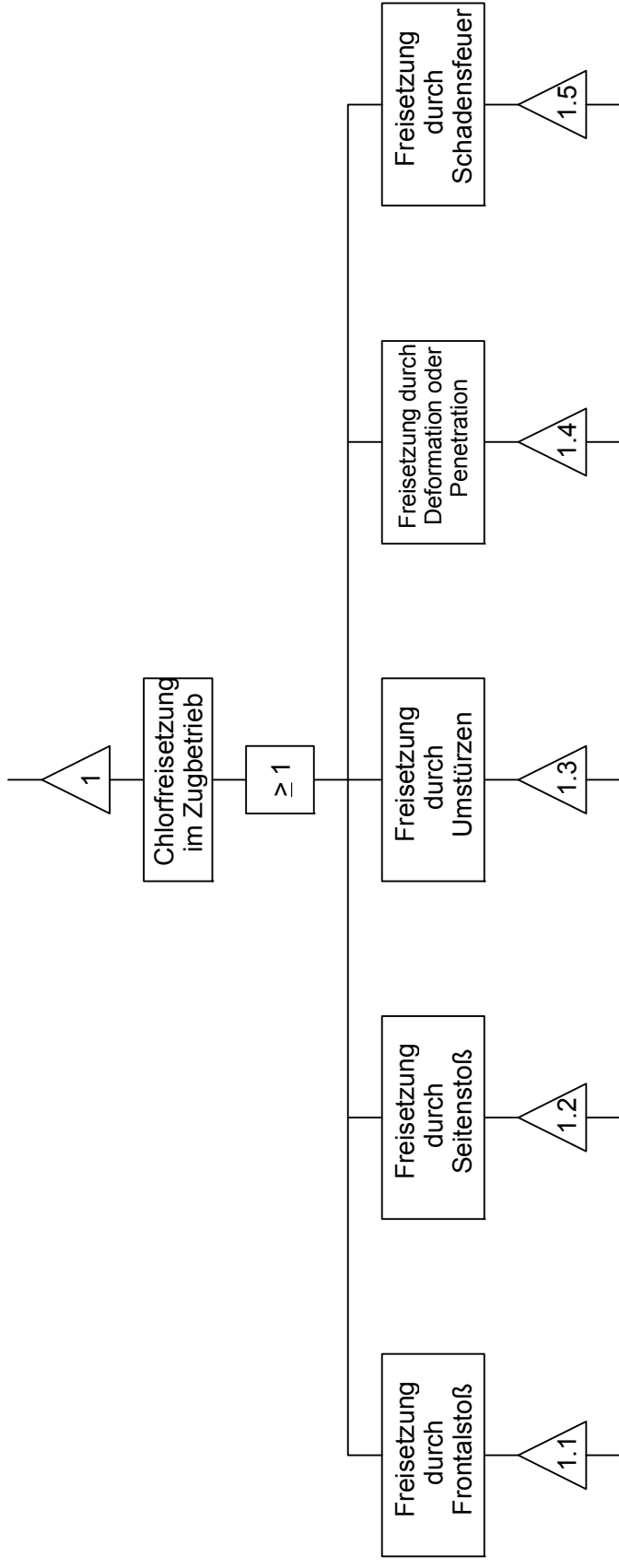
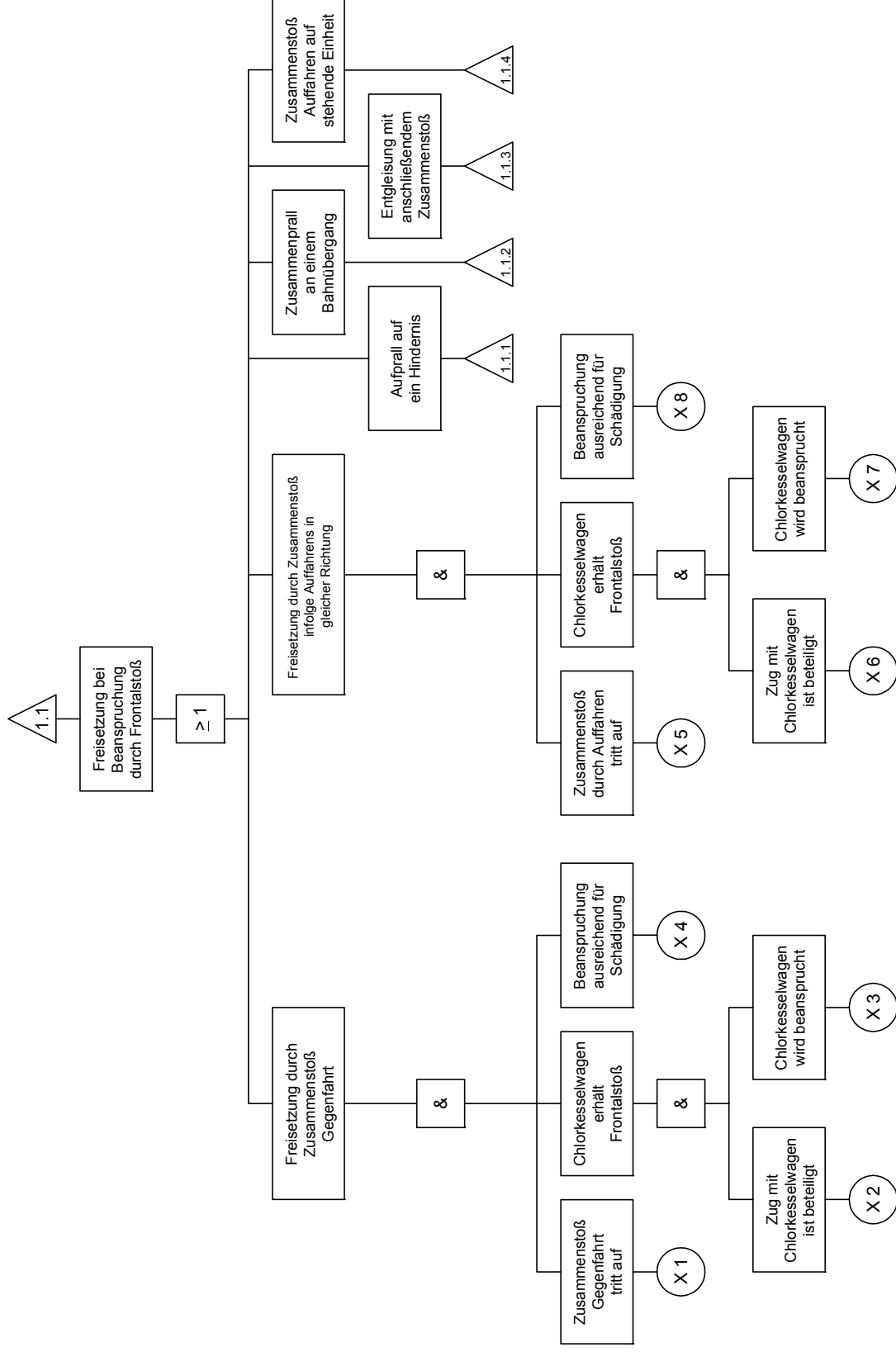
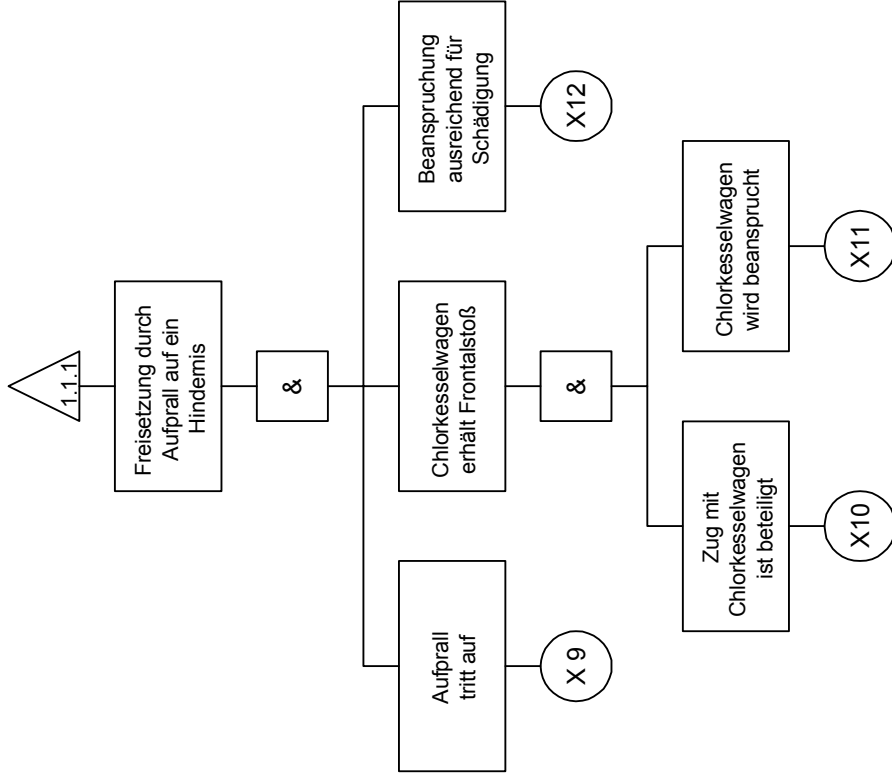


Abb. 7-5: Freisetzung bei Beanspruchung durch Frontalstoß



**Abb. 7-6: Freisetzung durch Aufprall auf ein Hindernis**



**Abb. 7-7: Freisetzung durch Zusammenprall an einem Bahnübergang**

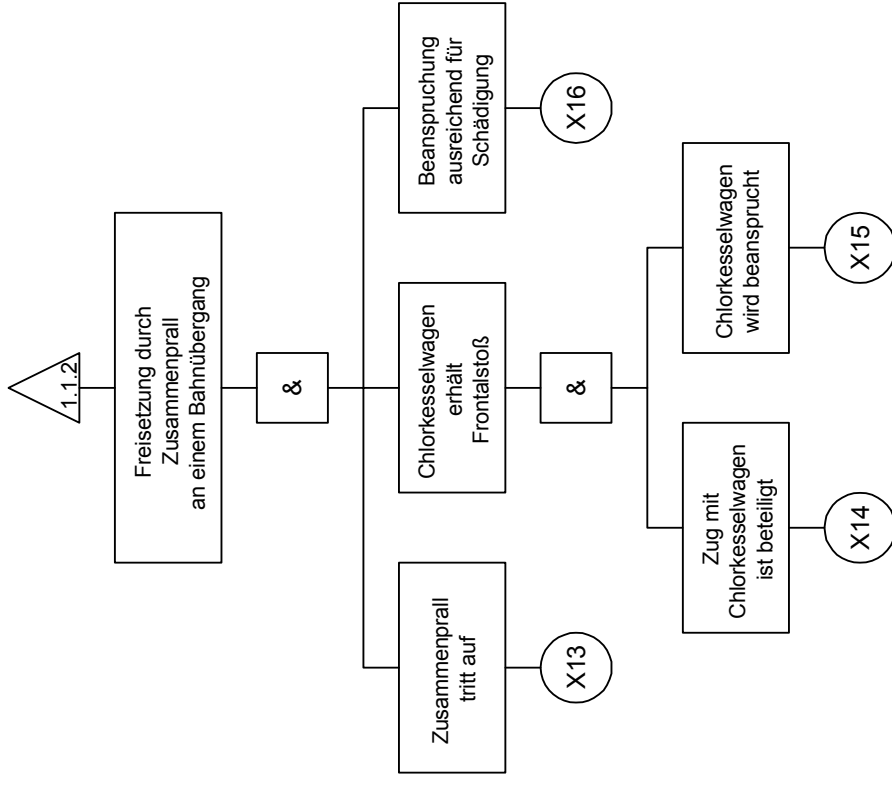


Abb. 7-8: Freisetzung durch Entgleisung mit Zusammenstoß

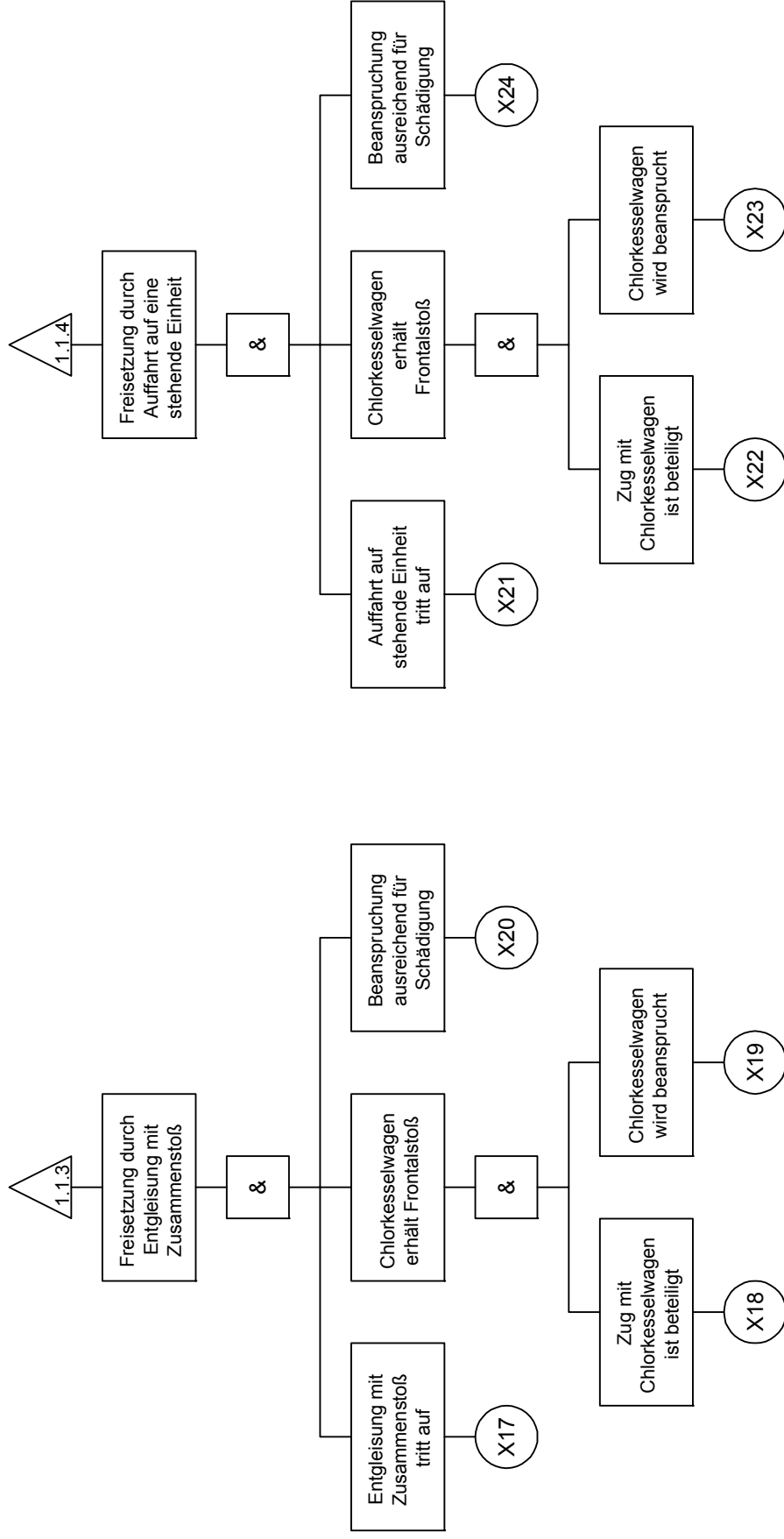
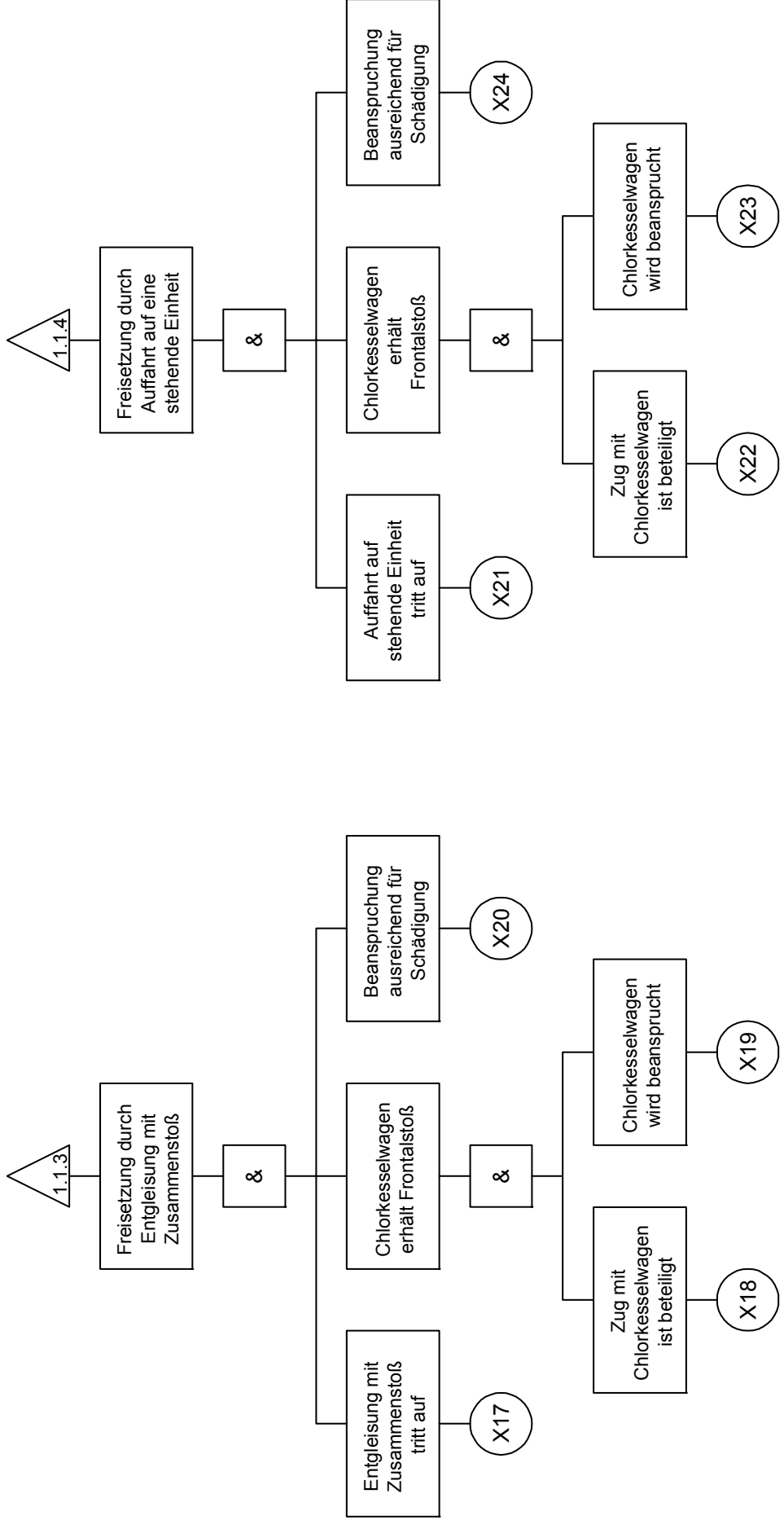


Abb. 7-9: Freisetzung durch Auffahrt auf eine stehende Einheit



**Abb. 7-10: Freisetzung bei Beanspruchung durch Seitenstoß**

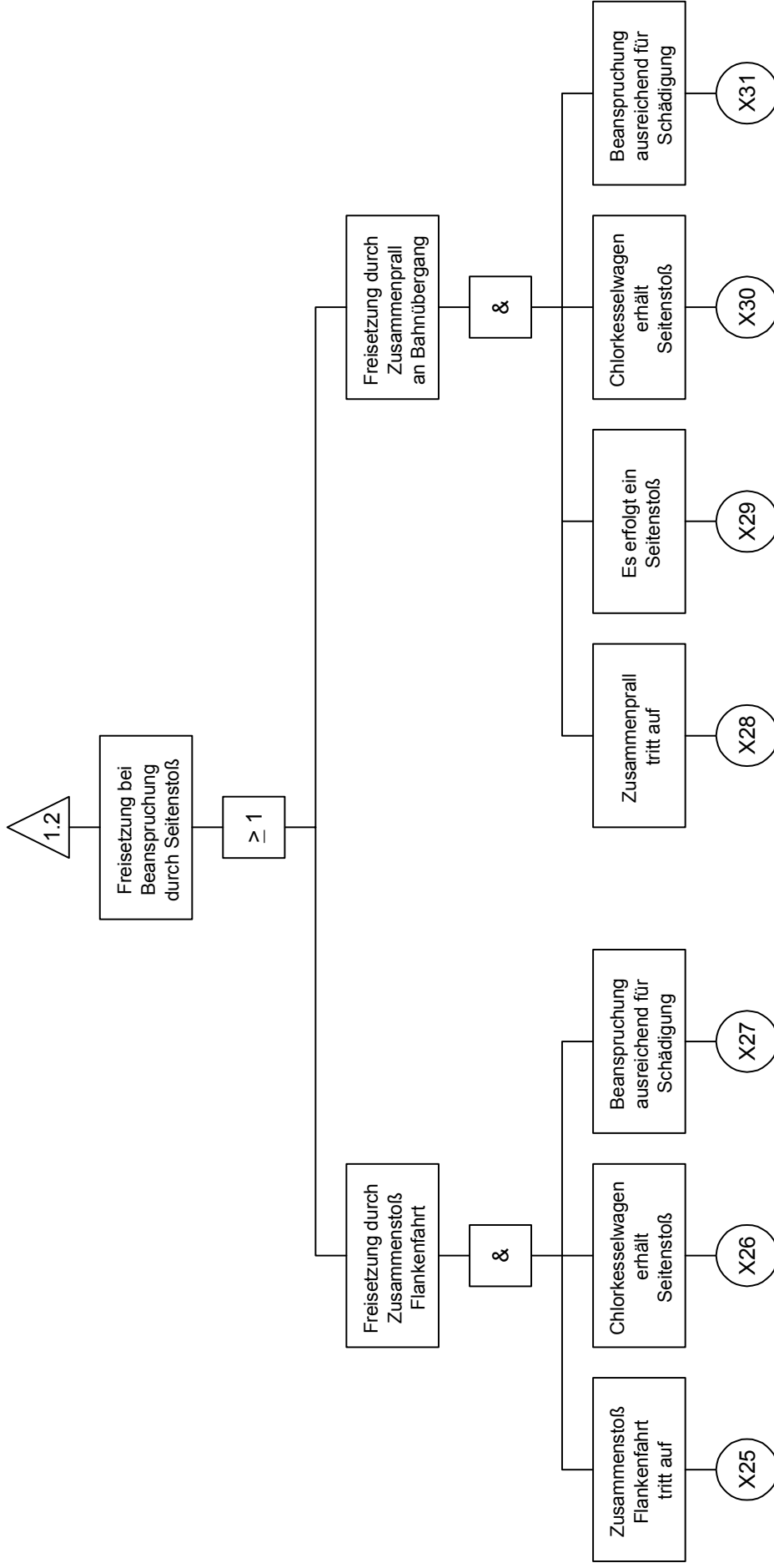
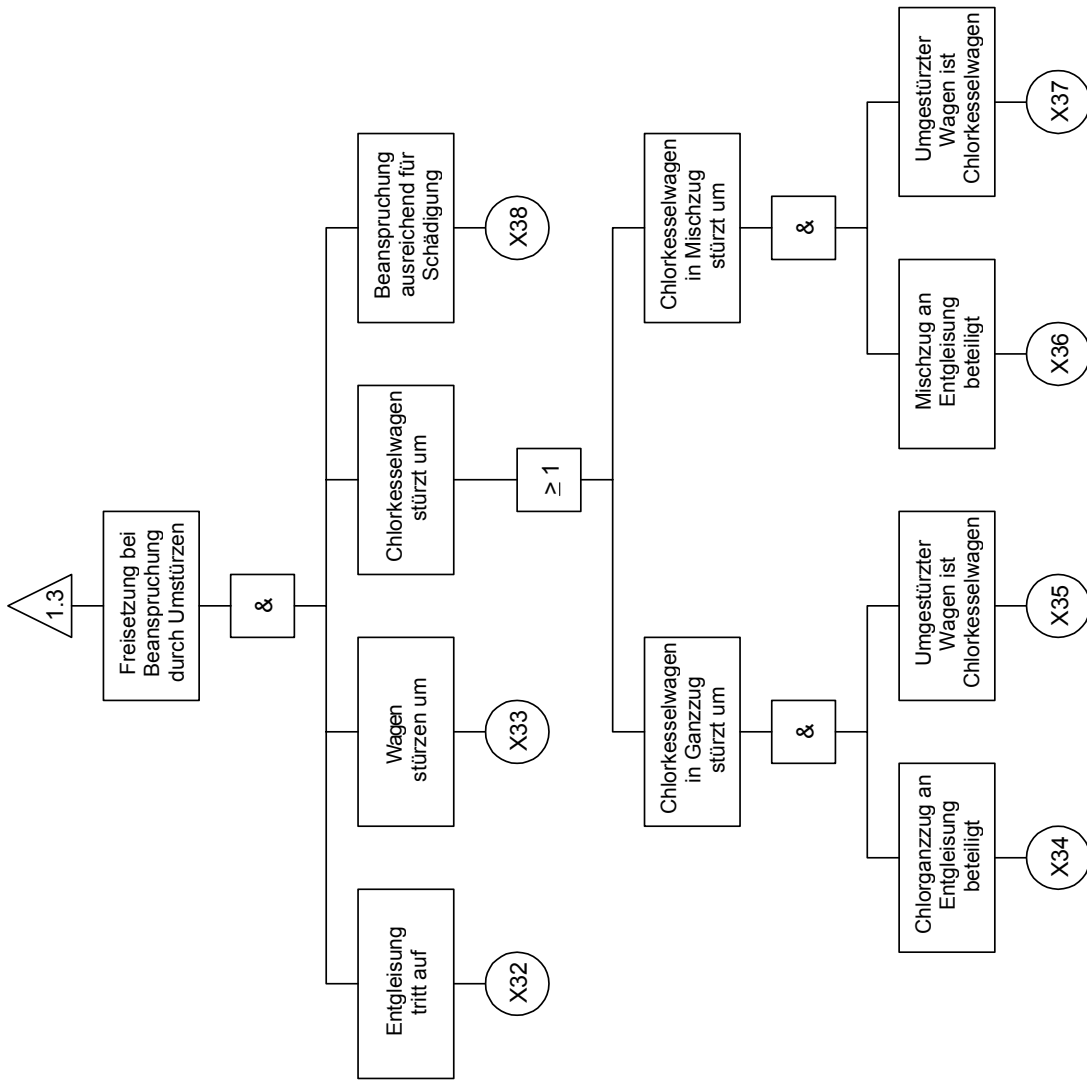
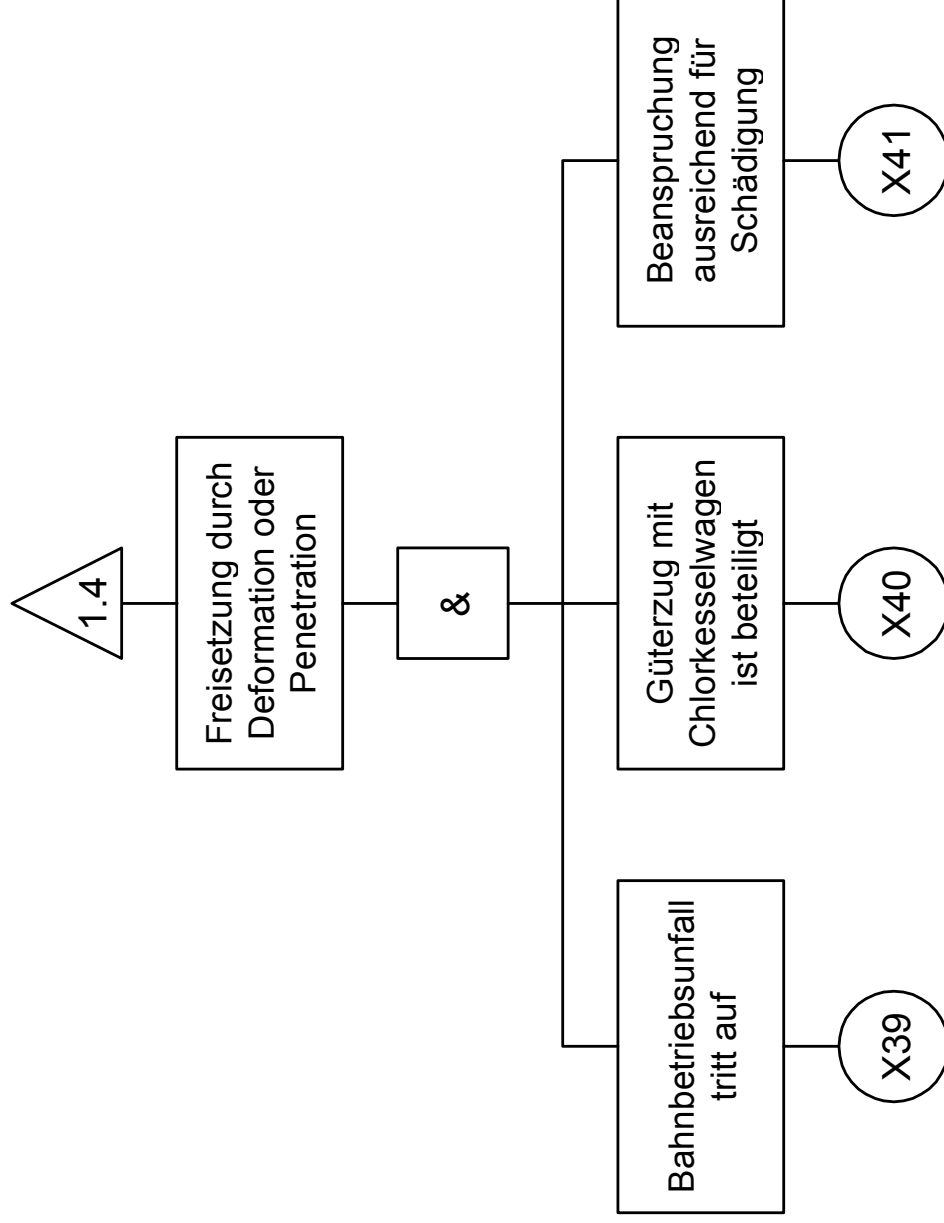


Abb. 7-11: Freisetzung bei Beanspruchung durch Umstürzen



**Abb. 7-12: Freisetzung durch Deformation oder Penetration**





**Abb. 7-14: Chlorfreisetzung durch Unfall beim Rangierbetrieb**

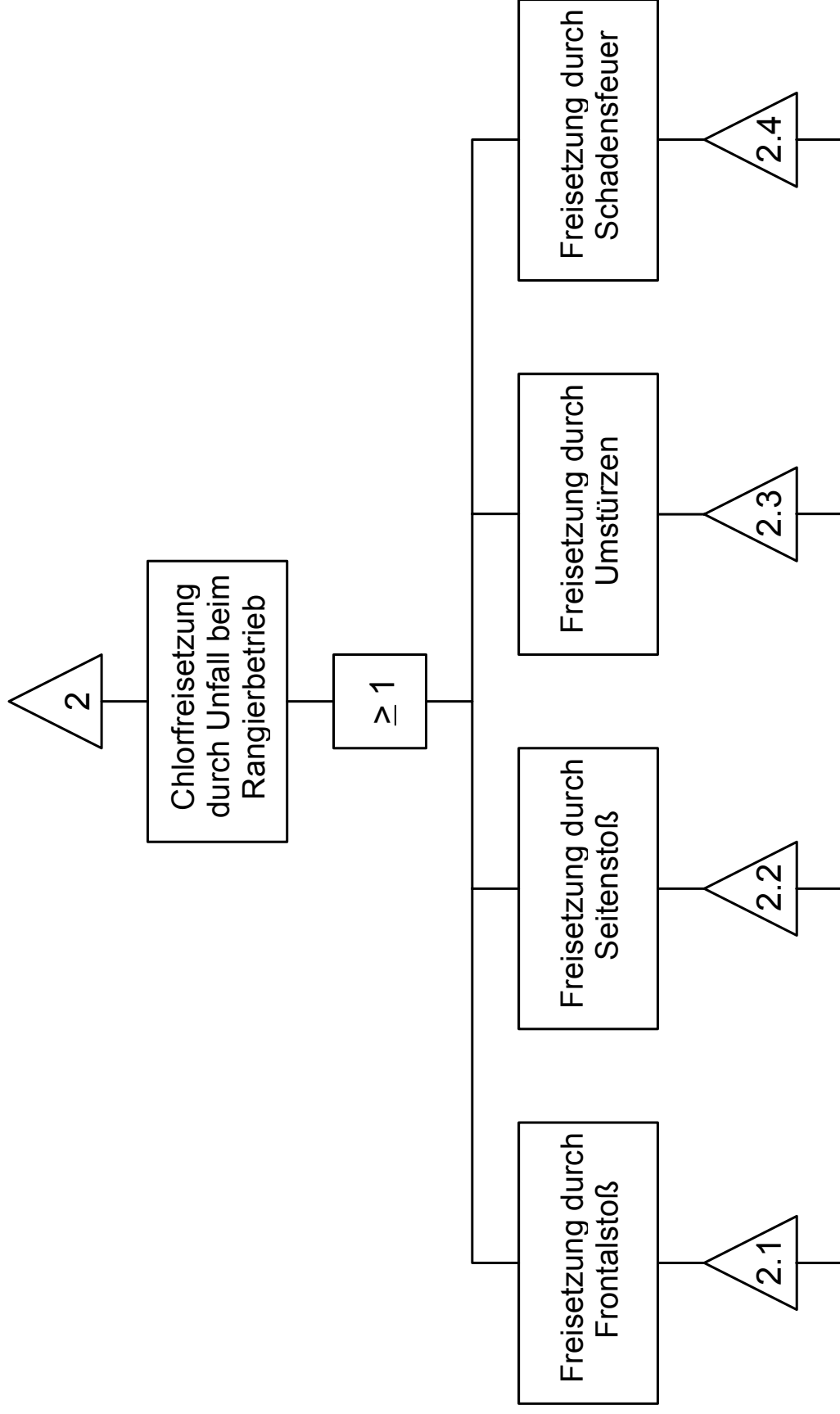
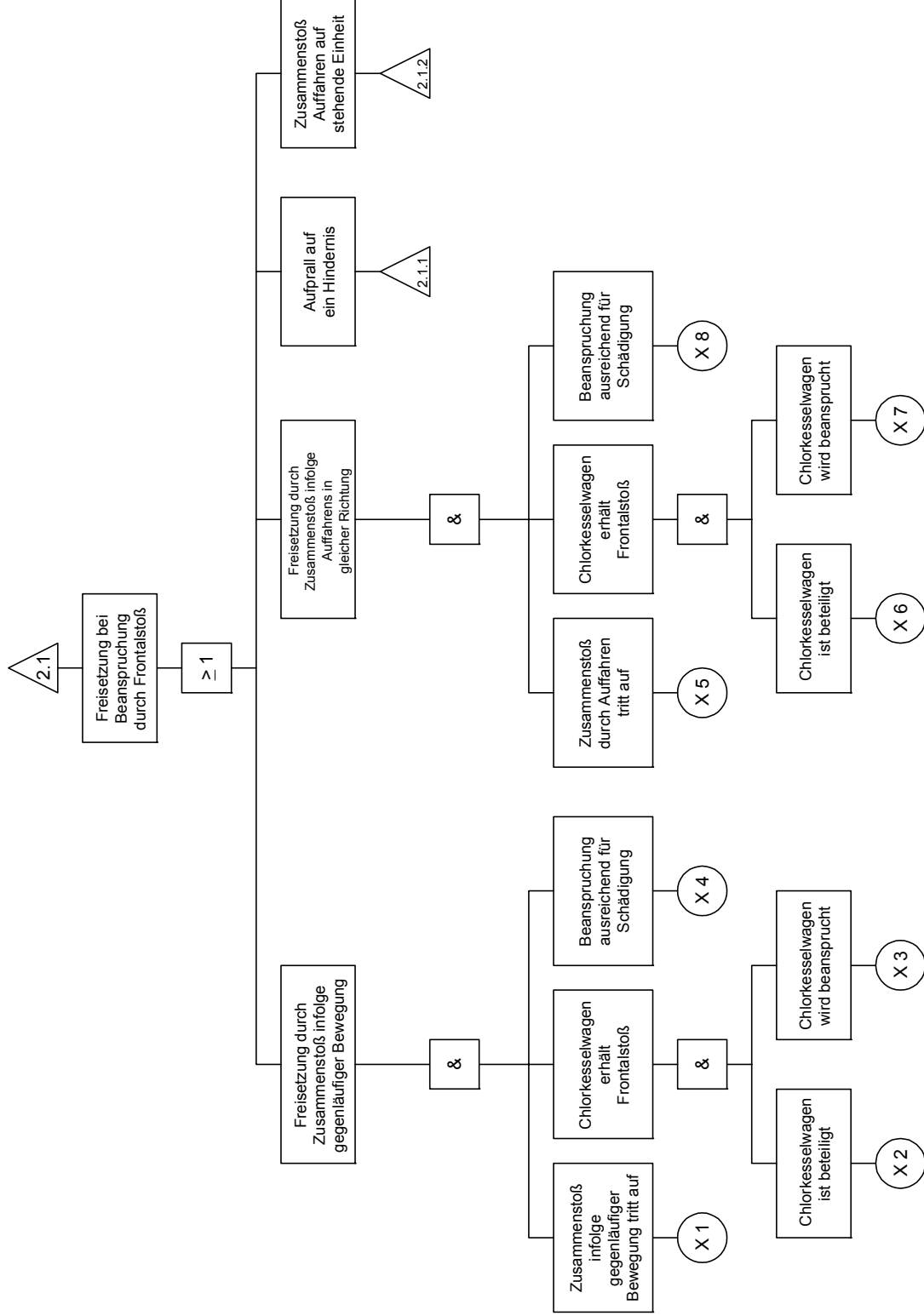


Abb. 7-15: Freisetzung bei Beanspruchung durch Frontalstoß



**Abb. 7-16: Freisetzung durch Aufprall auf ein Hindernis/ Abb. 7-17: Auffahren auf eine stehende Einheit**  
**Freisetzung durch Zusammenstoß**

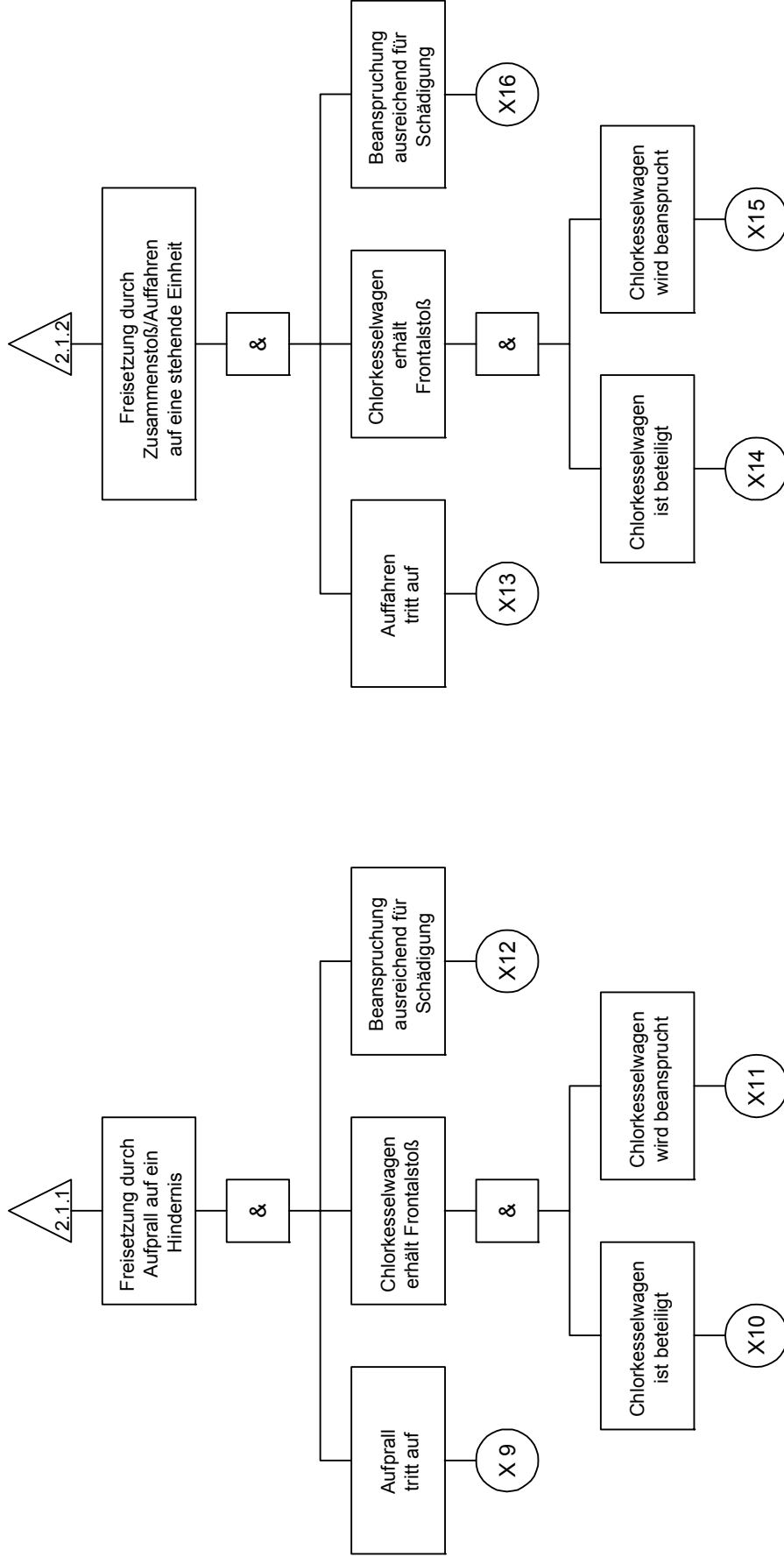


Abb. 7-18: Freisetzung bei Beanspruchung durch Seitenstoß

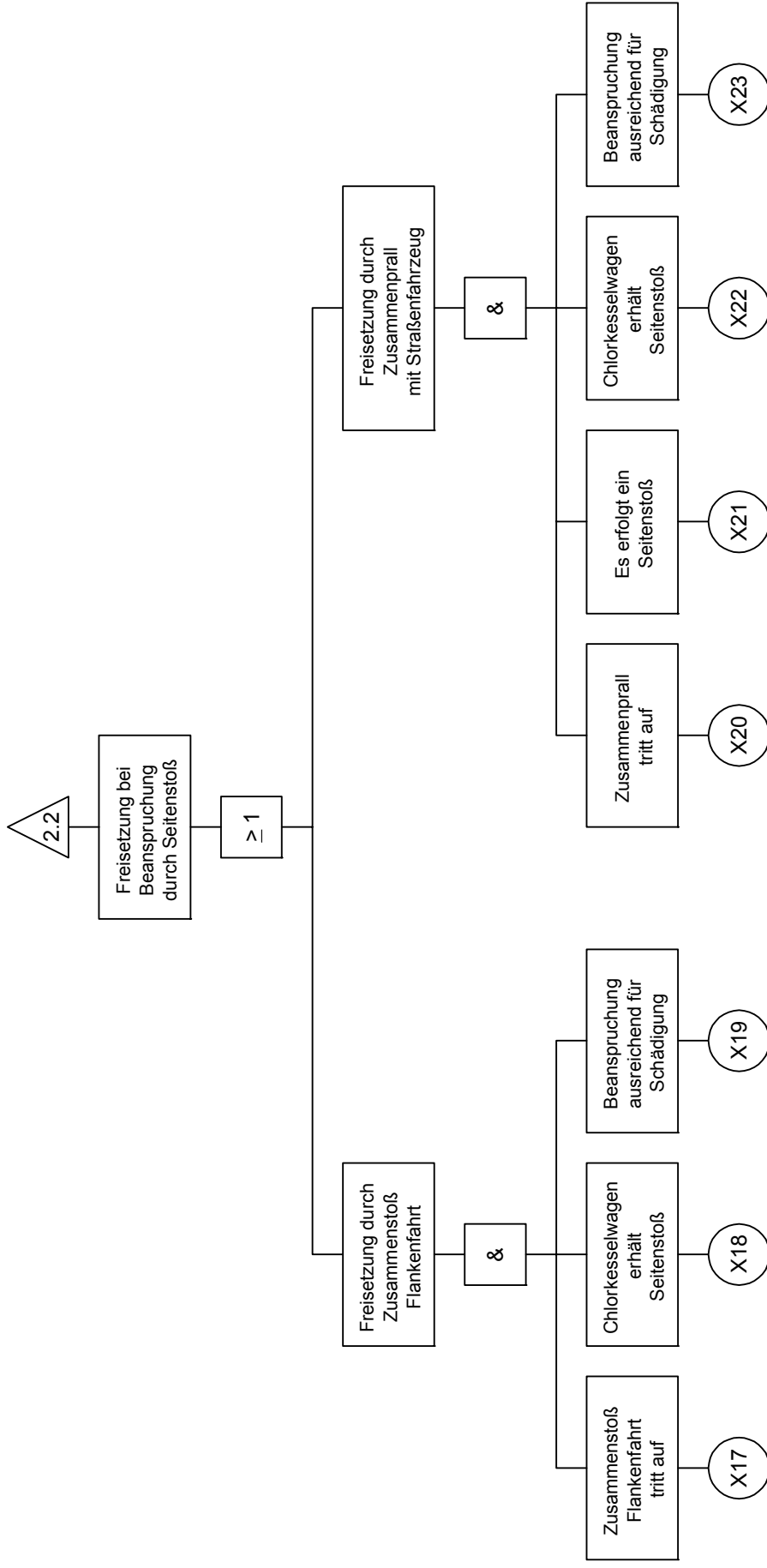


Abb. 7-19: Freisetzung bei Beanspruchung durch Umstürzen

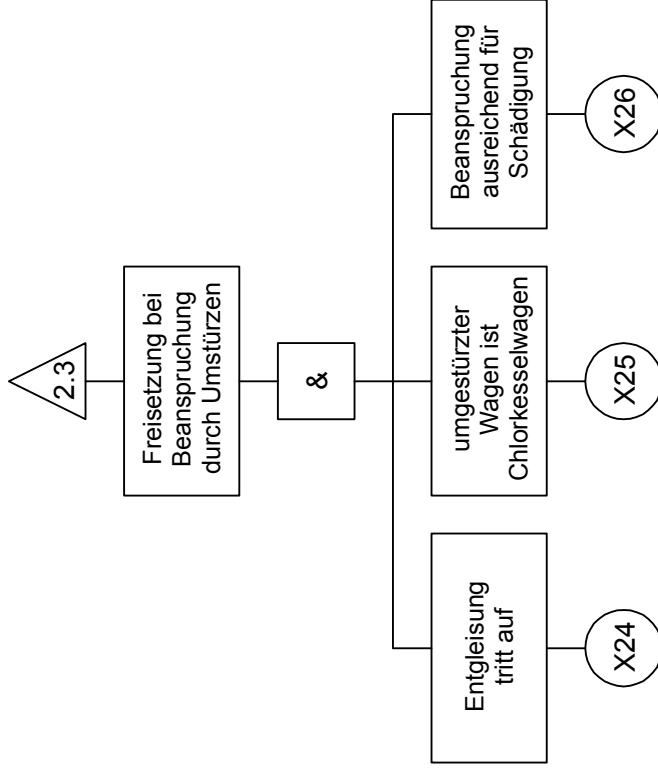
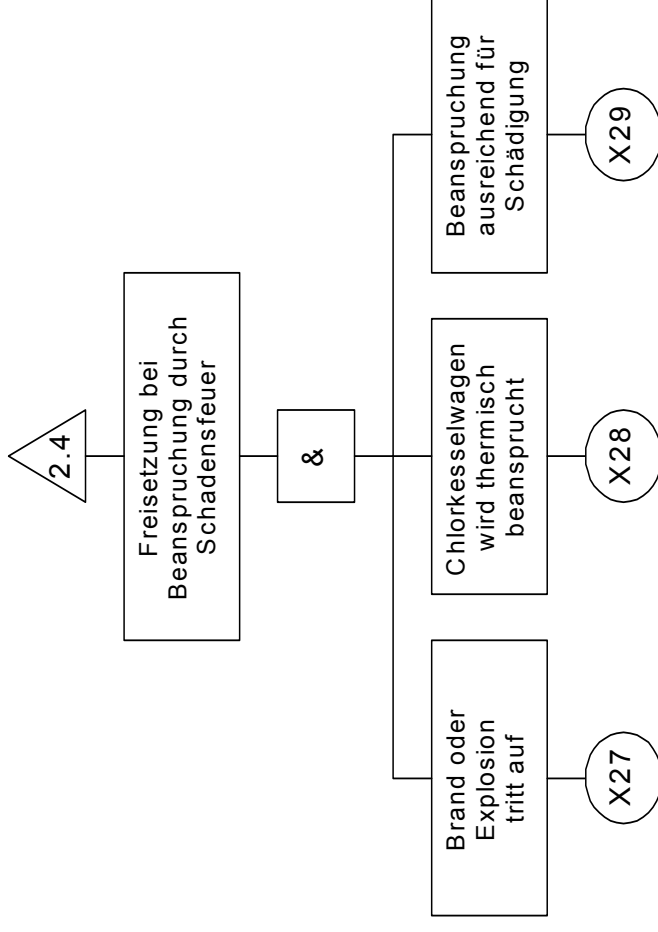


Abb. 7-20: Freisetzung bei Beanspruchung durch Schadensfeuer



## **Anhang 5 Gliederung zum Kapitel 8 Sicherheitsmanagementsystem (SMS)**

### **Tab. 0-1 Verknüpfung der SMS-Elemente der Störfallverordnung mit den SHEQ-Elementen (Chlorklager)**

- 1 Grundlegendes
  - ◆ *Einführung*
  - ◆ *Verantwortung der Unternehmensleitung (Pkt. 1.1 bis 1.3)*
- 2 Organisation und Personal
  - ◆ *Verantwortung der Unternehmensleitung (Pkt. 1.4, 1.5)*
  - ◆ *Integriertes Management System (SHEQ) (Pkt. 2)*
  - ◆ *Prüfung der Anforderungen (Pkt. 3)*
  - ◆ *Lenkung der Dokumente und Daten (Pkt. 5)*
  - ◆ *Schulung (Pkt. 18)*
  - ◆ *Ständige Verbesserung (Pkt. 22)*
  - ◆ *Kommunikation (Pkt. 24)*
  - ◆ *Liste der M-Verfahrensweisungen (Anhang 1)*
- 3 Ermittlung und Bewertung der Risiken von Störfällen
  - ◆ *Sicherheitsanforderungen bei der Entwicklung, Planung, Errichtung und Montage (Pkt. 4)*
  - ◆ *Beschaffung (Pkt. 6)*
  - ◆ *Lenkung der von Kunden beigestellten Produkte (Pkt. 7)*
  - ◆ *Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit von Produkten (Pkt. 8)*
  - ◆ *Produktionsteil Freigabeverfahren (Pkt. 21)*
- 4 Betriebskontrolle
  - ◆ *Prozesslenkung (Pkt. 9)*
  - ◆ *Prüfungen (Pkt. 10)*
  - ◆ *Prüfmittelüberwachung (Pkt. 11)*
  - ◆ *Prüfzustand (Pkt. 12)*
  - ◆ *Lenkung fehlerhafter Produkte (Pkt. 13)*
  - ◆ *Handhabung, Lagerung, Verpackung, Konservierung und Versand (Pkt. 15)*
  - ◆ *Lenkung von Aufzeichnungen (Pkt.. 16)*
  - ◆ *Service (Pkt. 19)*
- 5 Sichere Durchführung von Änderungen
  - ◆ *Korrekturmaßnahmen (Pkt. 14)*
  - ◆ *Produktionsteil-Freigabeverfahren (Pkt. 21)*
  - ◆ *Ständige Verbesserung (Pkt. 22)*
- 6 Planung für Notfälle
  - ◆ *Krisenmanagement (Pkt. 25)*
- 7 Überwachung der Wirksamkeit des Sicherheitsmanagementsystems
  - ◆ *Bewertung des SMS (Pkt. 16)*
  - ◆ *Prüfzustand (Pkt. 12)*
  - ◆ *Schulung (Pkt. 18)*
  - ◆ *Statistische Methoden (Pkt. 20)*
  - ◆ *Fähigkeiten der Fertigung (Pkt. 23)*

- ◆ *Kommunikation (Pkt. 24)*

8 Kontrolle und Analyse

- ◆ *Interne Audits (Pkt. 17)*
- ◆ *Ständige Verbesserung (Pkt. 22)*
- ◆ *Korrekturmaßnahmen (Pkt. 14)*