

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Fallstudie Risikoanalyse von LPG-Anlagen



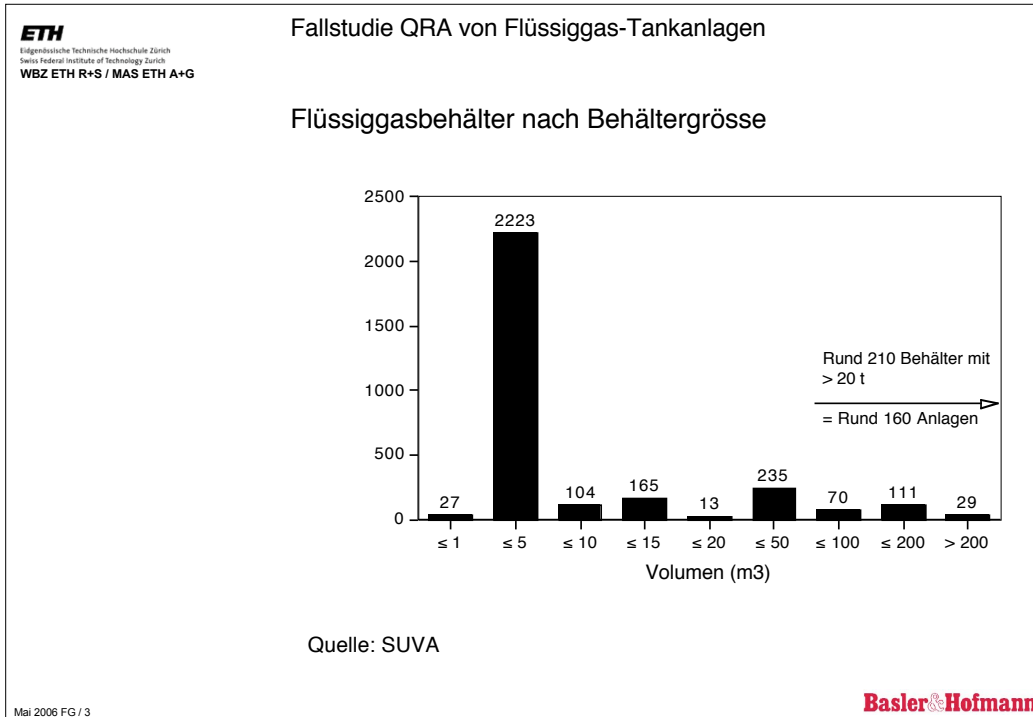
**Referent:**  
**Dr. Felix K. Gmünder**  
**Basler & Hofmann AG, Zürich**

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Gliederung / Inhalt

1. Fallstudie, inkl. Videodokumentation einer Flüssiggasunfall / -katastrophe
2. Video eines Flüssiggasarbeitsplatzes
3. Teamarbeit: Gefahrenermittlung, Massnahmenkatalog
4. Fragen und Schlussdiskussion
5. Zusammenfassung

Dokumentation Internet: [www.gmuender.org/rs](http://www.gmuender.org/rs)



- ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G
- Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen
- Relevanz der Thematik
- Verbreitung in der Schweiz:  
Ca. 1% aller Erdölprodukte (in t)  
Ca. 200 Behälter in rund 100 Anlagen
  - Grosses Gefahrenpotential
  - Unsicherheiten bei der Risiko-Bewertung und -Beurteilung
  - Sensibilisierung durch Katastrophen
- Mai 2006 FG / 4
- Basler & Hofmann**

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Vorgehen

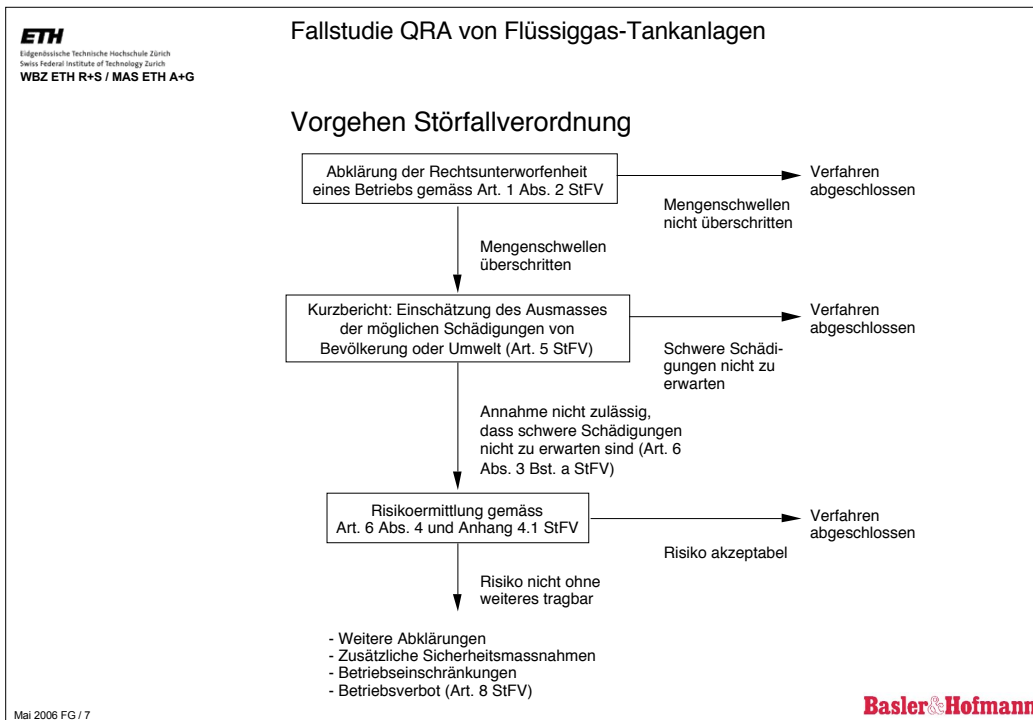
- Federführung BUWAL
- Flüssiggasindustrie Schweiz
- Kantone
- Experten SUVA und TISG
- Verfasser: B&H

**Rahmenbericht 1992****Methodikbeispiel 1993-95**  
(Fallbeispiel)

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Zielsetzung Rahmenbericht

- 1 Allgemein:**  
Notwendige Modelle und Berechnungsgrundlagen für Kurzbericht und Risikoermittlung
- 2 Für Inhaber:**  
Verhältnismässig geringer Aufwand für Kurzbericht und Risikoermittlung
- 3 Für Behörde:**
  - Instrument zur Überprüfung der Angaben des Inhabers
  - Systematisierung, gesamtschweizerisch vergleichbar



- ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G
- ### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen
- #### Inhalt Rahmenbericht
- Physikalische und chemische Eigenschaften von LPG
  - Wesentliche Störfallszenarien
  - Gesetzliche Vorschriften, Regelungen etc.
  - Schematische Darstellung eines Behälters
  - Richtlinien für den Kurzbericht
  - Leitgedanken für die Risikoermittlung
  - Systemelemente für die Risikoermittlung
  - Grundlegender Fehlerbaum
  - Grundlegender Ereignisbaum
  - Eingangswerte FB und EB
  - Ausbreitungsmodelle
  - Wirkungsmodelle
  - Auswirkungskriterien
- Mai 2006 FG / 8
- Basler & Hofmann**

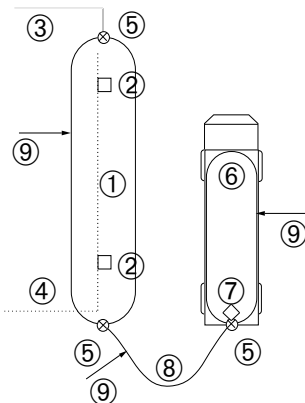
Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Methodikbeispiel für die Erstellung einer Risikoermittlung

- Konkrete Anwendung an einem Fallbeispiel
- Risikoermittlung für eine fiktive Anlage nach Anhang 4.1 StFV
- Erläuterungen für den Ersteller

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Systembeschreibung



- 1 Behälter (20 - 150 t)
- 2 Sicherheitsventile
- 3 Produkteitung im Nahbereich
- 4 Berieselungsanlage
- 5 Rohrbruchsicherungen
- 6 Camion
- 7 Bodenventil
- 8 Füllschlauch
- 9 Auslöser für wesentliche Szenarien

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Schema für oberirdischen Behälter

I Behälterkühlung)  
II Sicherung vor unbefugtem Zugriff  
III Zugänglichkeit

① Sicherheitsventil  
② Abblaserohr  
③ Sollbruchstelle im Abblaserohr nach dem Sicherheitsventil  
④ Peilventil, -rohr (max. Füllung)  
⑤ Füllstandsanzeige  
⑥ Druckmesseinrichtung  
⑦ Behälteranschlüsse mit Rohrbruchsicherung  
⑧ Entleerungseinrichtung (Ablassstutzen)

Mai 2006 FG / 11

**Basler & Hofmann**

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Sicherheitsmassnahmen

- Sicherheitsventile
- Füllstandsanzeige
- Peilrohr
- Druckmessgerät
- Rohrbruchsicherung
- Entleerungseinrichtung
- Schutzhaube oder Umzäunung
- Behälterkühlung
- Löscheinrichtungen
- Schutzabstände
- Periodische Prüfungen und Revisionsintervalle
  - Äussere Prüfung: Jedes Jahr
  - Innere Prüfung und wiederholte Druckprüfung: Alle 12 Jahre
  - Revisionsintervalle Sicherheitsventile: Alle 4 Jahre

Mai 2006 FG / 12

**Basler & Hofmann**

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Physikalische und chemische Eigenschaften

## Bezeichnung

- Flüssiggas: Propan, Butan oder deren Gemische

## Physikalische Eigenschaften

- Bei 1 bar gasförmig, druckverflüssigt (bei 20°C 8.5 bar)
- Schwergasverhalten (MG: Propan = 44; Butan = 58; Luft (Durchschnitt) = 29)
- Bei Druckentspannung adiabatische Verdampfung -> Abkühlung durch die benötigte Verdampfungswärme

Für Propan theoretisch bei 20°C: 32% Gasphase  
68% Flüssigphase  
-> - 42°C

Hohe thermische Ausdehnung: Füllgrad 85%  
freistehend,  
90% erdverlegt

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Eigenschaften und Brandverhalten

## Chemische Reaktivität

- Träge in Bezug auf Spontanreaktionen

## Human- und Ökotoxizität

- Hohe Konzentrationen schwach narkotisch
- Bei Leckagen: Verletzungsgefahr durch Kältewirkung (Verbrennungen) wegen starker Abkühlung
- Ökotoxische Wirkungen können ausgeschlossen werden

## Energieinhalt

- 45 MJ kg<sup>-1</sup> (im Bereich von Benzin)
- Verbrennungsprodukte: CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O
- Im Vergleich zu Heizöl deutlich geringere Schadstoffwerte

## Explosionsgrenzen

- Propan: 2.1 und 9.5%
- Butan: 1.8 und 8.4%

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Brandverhalten / Top Events

**Brandverhalten**

Gaswolkenbrand (Flash Fire)

Gaswolkenexplosion

Verdämmte Explosion

Feuerball (Sonderfall: BLEVE)

Freistrahbrand

Explosionen in Rohrleitungen

Trümmerwurf

**Top Events**

Kontinuierliche Freisetzung

Grosse spontane Freisetzung

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Beispiel wesentliches Störfallszenarium

Grosse spontane Freisetzung

**Hitzeeinwirkung**

BLEVE: "Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion"

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Bildbeispiel BLEVE

**5. Juli 1973, Kingman (Arizona)**

BLEVE eines Bahn-Kesselwagens  
verursacht nach Explosion und Brand  
in einem Verteillager

**13 Tote****96 Verletzte**

(Grosse Mehrzahl Feuerwehr)

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Grundszenarium Kurzbericht

- Schlimmstmögliche Schädigung in der Regel durch BLEVE
- In Ausnahmefällen durch Gaswolkenexplosion
- Formel zur Berechnung des einfachen Feuerballradius:

$$\text{Radius [m]} = 27.5 \cdot M^{0.333}$$

M = Masse des freigesetzten Flüssiggases in [t]

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Problem der Modellierung der Brandwirkung (BLEVE)

- **Strahlenmodelle (Hitzewirkung)?**
- **Verhalten der exponierten Personen?**
- **Baumaterialien von Gebäuden?**

Modellvergleich (Annahme: Personendichte 1000 km<sup>-1</sup>)

BLEVE in Tonnen	Anzahl Tote			
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
20	87	63	29	22
100	360	284	120	64

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Annahmen für Personen in Gebäuden und Fahrzeugen

- Gebäude im Feuerballradius: 50-90% Tote
- Personen in Autos: 50% Verletzte innerhalb des 3-fachen Feuerballradius
- Personen in Zügen: Entgleisen des Zuges im Nahbereich, 10 Tote und 50 Verletzte

Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Berechnung des Schadenausmasses (BLEVE)

Das Schadenausmass berechnet sich wie folgt:

$$F(n_1) = 0.003 \cdot P_D \cdot M^{0.666}$$

$F(n_1)$  = Anzahl Tote

$P_D$  = Bevölkerungsdichte [ $\text{km}^{-2}$ ]

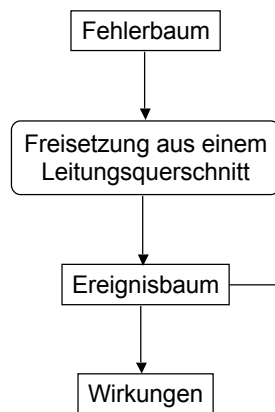
Die Bevölkerungsdichte wird berechnet aus der Anzahl Personen innerhalb des dreifachen Feuerballradius dividiert durch die Fläche.

$M$  = Masse des freigesetzten Flüssiggases in [t]

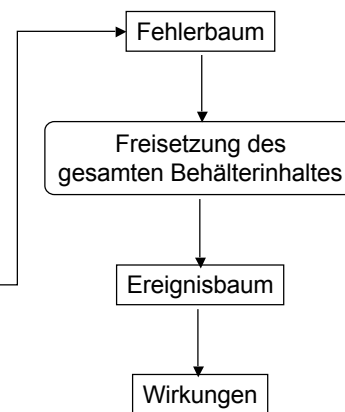
Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Hauptscenarien

**Kontinuierliche Freisetzung**



**Grosse spontane Freisetzung**



**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

#### Wirkung und Auswirkungen des BLEVE

Maximaler Füllstand: 63 Tonnen

Freigesetzte Menge	Feuerballradius	3-facher Feuerballradius
15 Tonnen	68 Meter	203 Meter
55 Tonnen	104 Meter	313 Meter

Mai 2006 FG / 23

**Basler & Hofmann**

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

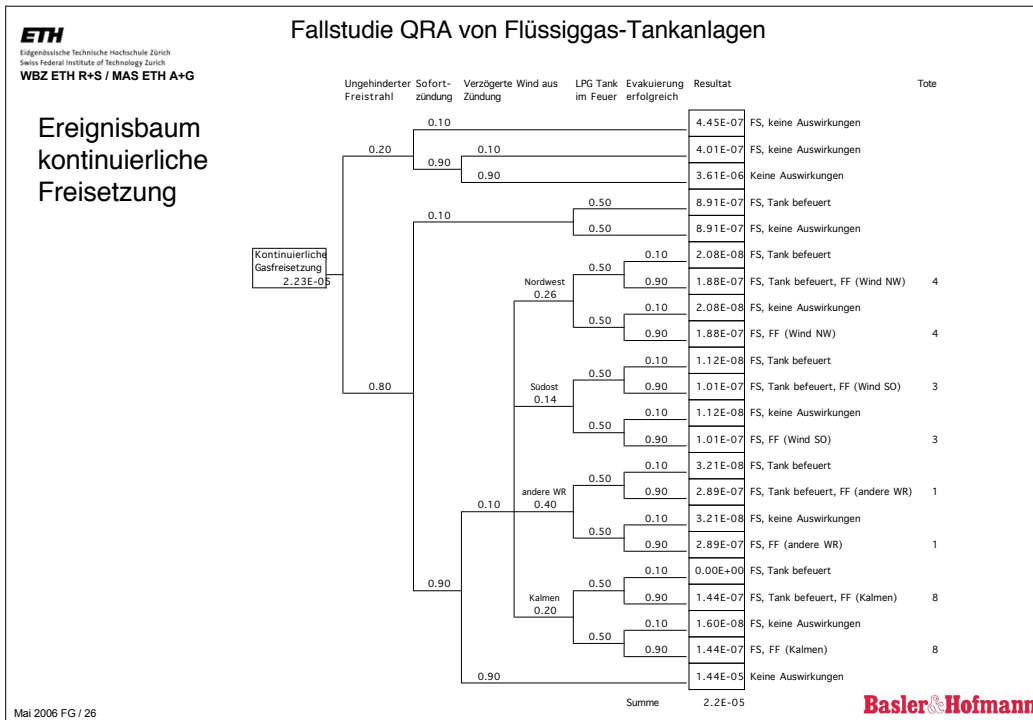
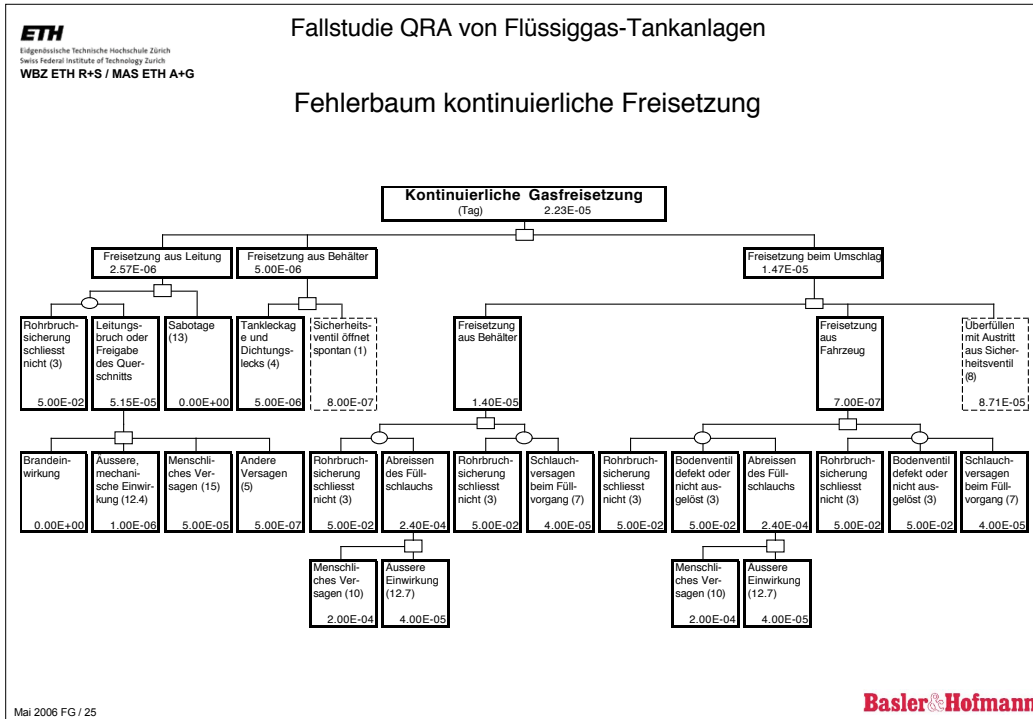
#### Übersichtsplan zur Umgebung

**Legende**

- T Propantank (
- 1 Firma 1
- 2 Firma 2
- 3 7 Einfamilienhäuser
- 4 5-stöckiges Mehrfamilienhaus mit 10 Wohnungen
- 5 5-stöckiges Mehrfamilienhaus mit 10 Wohnungen

Mai 2006 FG / 24

**Basler & Hofmann**



**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

#### Exposition: Im Freien und in Gebäuden

Anzahl Personen im Freien

Ort	Tag	Nacht
Industrie und Wohnzone im Bereich der Objekte 1 bis 5	10	2
Nähere Umgebung des Bahnhofs, Bahnhofplatz	10	1
Dorf	300/km <sup>2</sup>	60/km <sup>2</sup>
Bahnsteig, zur vollen Stunde, während 5 Min.	30	- -

Personen in Gebäuden

Objekt- nummer	Beschreibung	Tag	Nacht
1	Firma 1	10	0
2	Firma 2	10	0
3	7 Einfamilienhäuser mit je 3 Personen am Tag und 5 Personen nachts	21	35
4	Mehrfamilienhaus 4	25	50
5	Mehrfamilienhaus 5	25	50
Dorf: Bevölkerungsdichte =		2'500/km <sup>2</sup>	2'500/km <sup>2</sup>

Mai 2006 FG / 27

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Ausschnitt aus der Szenariensliste

Situation	Ereignis	A (Total)	W (pro Ja)
Tag	FS, Tank befeuert, FF (Wind NW)	4	1.88E-0
kontinuierliche	FS, FF (Wind NW)	4	1.88E-0
Freisetzung	FS, Tank befeuert, FF (Wind SO)	3	1.01E-0
	FS, FF (Wind SO)	3	1.01E-0
	FS, Tank befeuert, FF (andere WR)	1	2.89E-0
	FS, FF (andere WR)	1	2.89E-0
	FS, Tank befeuert, FF (Kalmen)	8	1.44E-0
	FS, FF (Kalmen)	8	1.44E-0
Nacht	FS, Tank befeuert, FF (Wind NW)	6	4.70E-0
kontinuierliche	FS, FF (Wind NW)	6	4.70E-0
Freisetzung	FS, Tank befeuert, FF (Wind SO)	0	2.53E-0
	FS, FF (Wind SO)	0	2.53E-0
	FS, Tank befeuert, FF (andere WR)	0	7.24E-0
	FS, FF (andere WR)	0	7.24E-0
	FS, Tank befeuert, FF (Kalmen)	7	3.62E-0
	FS, FF (Kalmen)	7	3.62E-0
Tag	BLEVE voller Tank	69	2.03E-0
grosse spontane	FF voller Tank, Nordwestwind	112	2.93E-1
Freisetzung	FF voller Tank, Südwestwind	1	2.93E-1
	FF voller Tank, Südostwind	4	1.58E-1
	FF voller Tank, Nordostwind	105	1.58E-1
	FF voller Tank, Kalmen	225	2.25E-1
	BLEVE halbvoller Tank	10	4.00E-0
	FF halbvoller Tank, Nordwestwind	40	5.78E-1
	FF halbvoller Tank, Südwestwind	1	5.78E-1
	FF halbvoller Tank, Südostwind	4	3.11E-1
	FF halbvoller Tank, Nordostwind	33	3.11E-1
	FF halbvoller Tank, Kalmen	83	4.45E-1
Nacht	BLEVE voller Tank	83	2.25E-1
grosse spontane	FF voller Tank, Nordwestwind	84	3.25E-1
Freisetzung	FF voller Tank, Südwestwind	0	3.25E-1
	FF voller Tank, Südostwind	0	1.75E-1
	FF voller Tank, Nordostwind	70	1.75E-1
	FF voller Tank, Kalmen	155	2.50E-1
	BLEVE halbvoller Tank	3	2.58E-0
	FF halbvoller Tank, Nordwestwind	35	3.73E-1
	FF halbvoller Tank, Südwestwind	0	3.73E-1
	FF halbvoller Tank, Südostwind	0	2.01E-1
	FF halbvoller Tank, Nordostwind	21	2.01E-1
	FF halbvoller Tank, Kalmen	57	2.87E-1

Mai 2006 FG / 28

**ETH**  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zürich  
WBZ ETH R+S / MAS ETH A+G

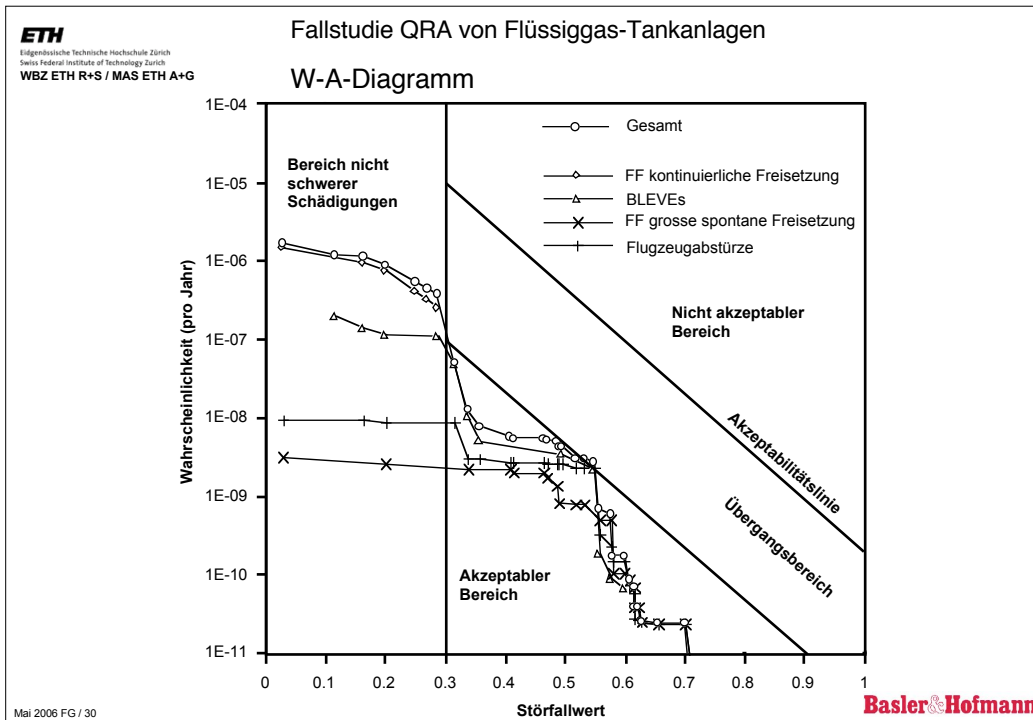
### Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Risikobestimmende Szenarien  
(Ausmass und kumulierte Wahrscheinlichkeiten für W-A-Diagramm)

Tote	W	W (kum.)	Störfallwe
260	7.50E-13	7.50E-13	0.7186
240	1.13E-12	1.88E-12	0.7087
225	2.25E-11	2.44E-11	0.7004
155	2.50E-13	2.46E-11	0.6543
123	5.25E-13	2.52E-11	0.6253
118	1.48E-11	4.00E-11	0.6203
113	7.88E-13	4.08E-11	0.6150
112	3.17E-11	7.25E-11	0.6138
105	1.58E-11	8.82E-11	0.6058
98	8.97E-11	1.78E-10	0.5972
84	3.25E-13	1.78E-10	0.5781
83	4.67E-10	6.46E-10	0.5766
70	1.01E-10	7.47E-10	0.5554
65	2.03E-09	2.77E-09	0.5462
57	2.87E-10	3.06E-09	0.5298
51	1.04E-11	3.07E-09	0.5160
43	1.33E-09	4.40E-09	0.4948
41	1.56E-11	4.42E-09	0.4888
40	6.26E-10	5.05E-09	0.4858
35	3.73E-10	5.42E-09	0.4691
33	3.11E-10	5.73E-09	0.4618
22	1.09E-11	5.74E-09	0.4114
21	2.01E-10	5.94E-09	0.4056
14	2.00E-09	7.94E-09	0.3552
12	5.25E-09	1.32E-08	0.3360
10	4.00E-08	5.32E-08	0.3133
8	3.52E-07	4.05E-07	0.2853
7	7.24E-08	4.77E-07	0.2688
6	9.41E-08	5.71E-07	0.2498
4	3.81E-07	9.52E-07	0.1993
3	2.28E-07	1.18E-06	0.1633
2	6.28E-08	1.24E-06	0.1131
1	5.78E-07	1.82E-06	0.0268

Mai 2006 FG / 29

**Basler & Hofmann**



## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

Aufgabenstellung für die Teamarbeit

Arbeitsplatzanalyse: Flüssiggasumschlag  
Bahnkesselwagen (Beurteilung des Umgangs  
mit Butan anhand eines Videos)

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Zusammenfassung

- Flüssiggasbehälter im Massstab über 20 Tonnen stellen ein grosses Gefahrenpotential dar
- Die quantifizierte Risikoanalyse ermöglicht die Risikobewertung und - beurteilung
- Sicherheitsmassnahmen können gezielt getroffen werden
- Die Kosten für den Anlageninhaber sind tragbar
- Die Fallstudie unterstützt den Vollzug der StFV
- Die Erarbeitung der Fallstudie hat einen Beitrag zur Förderung der Risikokultur in der Schweiz geleistet

## Fallstudie QRA von Flüssiggas-Tankanlagen

## Literatur

- Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen: "Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge", Basler&Hofmann, 1. Ausgabe vom 11.12.92 (Bezug: B&H, Preis Fr. 150.-)
- BUWAL: Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage, Vollzug Umwelt, Mai 1996, Bern (Bezug: Dokumentationsdienst BUWAL, kostenlos)
- BUWAL: Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung, StFV, Richtlinien, Vollzug Umwelt, September 1996, Bern (Bezug: Dokumentationsdienst BUWAL, kostenlos)