

Weiterentwicklung Screening und RE-Methodik

**Ereignisse mit gefährlichen Gütern
beim Transport mit der Eisenbahn:
CFD-Simulationen**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Vorgehen.....	2
2.1	Standard- / Modellsituation Chlorfreisetzung.....	2
2.2	Auswahl CFD Tool	3
2.2.1	Allgemeines	3
2.2.2	"general purpose" CFD Tools.....	3
2.2.3	KFX	4
2.2.4	FDS	4
2.2.5	Open FOAM	4
2.2.6	FLACS.....	5
2.2.7	Schlussfolgerung zur Auswahl der CFD Tools	5
2.3	Allgemeine Vorgaben und Bemerkungen zu den Berechnungen.....	6
2.3.1	Modellierung Freisetzung, Phasenwechsel und Expansion	6
2.3.2	Meteosituation.....	7
2.3.3	Worst-Case Distanzen	7
3	Berechnete Szenarien	8
4	Ergebnisse Simulationen.....	10
4.1	Vergleichsgrößen für potentielle Personenschäden und Methodik zur Berechnung der Vergleichsgrößen.....	10
4.1.1	Reichweiten und betroffene Flächen.....	10
4.1.2	Mittlere Letalitäten und Äquivalenzflächen	11
4.1.3	Abschätzung Ausmass basierend auf Annahmen von repräsentativen Personendichten ...	12
4.2	Übersichtstabellen	14
4.3	Vergleich EFFECTS und FLACS: Isolinien Letalität 1.5 m über Boden.....	17
4.3.1	Szenario 0 "Baseline"	17
4.3.2	Szenario 1 "Einfamilienhäuser"	18
4.3.3	Szenario 2 "Wohnblocks"	19
4.3.4	Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"	20
4.3.5	Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"	21
4.3.6	Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"	22
4.3.7	Vergleich FLACS	23
4.3.8	Vergleich EFFECTS.....	24

5	Auswertung der Ergebnisse	25
5.1	Grosse flache Ebene ("Baseline")	25
5.2	Überbaute Szenarien.....	26
5.3	Hangneigung.....	28
5.4	Modellierung Austritt (Freisetzung, Verdampfung etc.)	28
5.5	Ergebnisse oberhalb der ersten Meter über Boden	29
5.6	Zeitlicher Konzentrationsverlauf	30
6	Schlussfolgerungen.....	31
6.1	Übersicht	31
6.2	Basis für Empfehlungen zur Modellierung von Chlorgasausbreitung	32
6.2.1	Relevante Modelleigenschaften	32
6.2.2	Struktur für situationsabhängige Empfehlungen zur Anwendung von EFFECTS und FLACS	33
6.2.3	Limits der Anwendung	34
6.2.4	Unterteilung der Empfehlungen in Bereiche	36
6.2.5	Erläuterungen zum Aufwand für eine Modellrechnung mit FLACS und EFFECTS	37
6.3	Empfehlungen zur Anwendung von FLACS und EFFECTS für verschiedene Situationen	39
6.3.1	Ebenes, offenes Gelände ("Baseline") und Letalität in Bodennähe.....	39
6.3.2	Ebenes, überbautes Gebiet und Letalität in Bodennähe.....	42
6.3.3	Geneigtes Gelände ("Wohnblocks 10° Neigung") und Gelände mit unebener Topographie und Letalität in Bodennähe.....	44
6.3.4	Konzentrationen und Letalitäten oberhalb der ersten Meter über Boden.....	46
6.3.5	Übersicht	48
6.3.6	Letalitätsraster	49
6.3.7	Empfehlungen für weitergehende Anwendungen, Objektschutz etc.	49
6.3.8	Allgemeine Empfehlungen zu CFD-Berechnungen.....	50

Anhang

A	Szenariendefinition	52
A 1	Szenario 0 "Baseline"	52
A 1.1	Geometrie (nur FLACS)	52
A 1.2	Parameter	54
A 2	Szenario 1 "Einfamilienhäuser"	57
A 2.1	Geometrie (nur FLACS)	57
A 2.2	Parameter	59
A 3	Szenario 2 "Wohnblocks"	60
A 3.1	Geometrie (nur FLACS)	60
A 3.2	Parameter	63
A 4	Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"	64
A 4.1	Geometrie (nur FLACS)	64
A 4.2	Parameter	64
A 5	Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"	65
A 5.1	Geometrie (nur FLACS)	65
A 5.2	Parameter	69
A 6	Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"	70
A 6.1	Geometrie (nur FLACS)	70
A 6.2	Parameter	70
B	Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse	77
B 1	Allgemeine Erläuterungen und Bemerkungen	77
B 1.1	Expositionszeit	77
B 1.2	Isolinien in der Horizontalen für eine bestimmte maximale Chlorkonzentration	77
B 1.3	Vertikale Schnitte und Plots entlang der Wolkenachse bzw. parallel zu den Koordinatenachsen	80
B 1.4	Berechnungen maximale Reichweite, Fläche pro Letalitätsbereich, mittlere Letalität und letalitätsgewichtete Äquivalenzflächen	80
B 1.4.1	EFFECTS	80
B 1.4.2	FLACS	80

B 2	Szenario 0 "Baseline"	82
B 2.1	FLACS.....	82
B 2.1.1	Übersicht	82
B 2.1.1.1	Chlorkonzentration	82
B 2.1.1.2	Letalität	83
B 2.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	83
B 2.1.2	Chlorkonzentration.....	84
B 2.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	84
B 2.1.2.2	Chlorkonzentration vertikal.....	86
B 2.1.3	Letalität	87
B 2.1.4	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	88
B 2.2	EFFECTS.....	88
B 2.2.1	Übersicht	88
B 2.2.1.1	Chlorkonzentration	88
B 2.2.1.2	Letalität	89
B 2.2.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	91
B 2.2.2	Chlorkonzentration.....	92
B 2.2.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	92
B 2.2.2.2	Chlorkonzentration vertikal.....	95
B 2.2.3	Toxische Dosis.....	96
B 2.2.4	Letalität	96
B 2.2.5	Bemerkungen zu den EFFECTS-Ergebnissen.....	99
B 2.3	Vergleiche und Analysen	100
B 2.3.1	Chlorkonzentration.....	100
B 2.3.2	Letalität	100
B 2.3.3	Zeitlicher Verlauf.....	101
B 2.3.4	Ergebnis.....	102
B 3	Szenario 1 "Einfamilienhäuser"	103
B 3.1	FLACS.....	103
B 3.1.1	Übersicht	103
B 3.1.1.1	Chlorkonzentration	103
B 3.1.1.2	Letalität	104
B 3.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	104
B 3.1.2	Chlorkonzentration.....	105
B 3.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	105
B 3.1.2.2	Chlorkonzentration vertikal.....	108
B 3.1.3	Letalität	109
B 3.1.4	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	109

B 3.2	EFFECTS.....	110
B 3.3	Vergleiche und Analysen	110
B 3.3.1	Chlorkonzentration.....	110
B 3.3.1.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	110
B 3.3.1.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	111
B 3.3.1.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	111
B 3.3.2	Letalität	111
B 3.3.2.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	111
B 3.3.2.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	112
B 3.3.2.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	112
B 3.3.3	Zeitlicher Verlauf.....	113
B 3.3.3.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	113
B 3.3.3.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	113
B 3.3.3.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	113
B 3.3.4	Ergebnis.....	113
B 4	Szenario 2 "Wohnblocks".....	115
B 4.1	FLACS.....	115
B 4.1.1	Übersicht	115
B 4.1.1.1	Chlorkonzentration	115
B 4.1.1.2	Letalität	117
B 4.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	118
B 4.1.2	Chlorkonzentration.....	119
B 4.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	119
B 4.1.2.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	122
B 4.1.2.3	Chlorkonzentration vertikal.....	124
B 4.1.3	Letalität	125
B 4.1.3.1	Letalität 1.5 m über Boden.....	125
B 4.1.3.2	Letalität 30.5 m über Boden	126
B 4.1.4	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	126

B 4.2	EFFECTS.....	127
B 4.2.1	Übersicht Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m.....	127
B 4.2.1.1	Chlorkonzentration	127
B 4.2.1.2	Letalität	128
B 4.2.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	130
B 4.2.2	Übersicht Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m.....	130
B 4.2.2.1	Chlorkonzentration	130
B 4.2.2.2	Letalität	131
B 4.2.2.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	133
B 4.2.3	Chlorkonzentration Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m	134
B 4.2.3.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)	134
B 4.2.3.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)	137
B 4.2.3.3	Chlorkonzentration vertikal (Oberflächenrauigkeit 1 m).....	140
B 4.2.4	Chlorkonzentration Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m	141
B 4.2.4.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)	141
B 4.2.4.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)	144
B 4.2.4.3	Chlorkonzentration vertikal (Oberflächenrauigkeit 3 m).....	147
B 4.2.5	Toxische Dosis Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m	148
B 4.2.5.1	Toxische Dosis 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)	148
B 4.2.5.2	Toxische Dosis 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)	148
B 4.2.6	Toxische Dosis Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m	149
B 4.2.6.1	Toxische Dosis 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)	149
B 4.2.6.2	Toxische Dosis 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)	149
B 4.2.7	Letalität Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m.....	150
B 4.2.7.1	Letalität 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m).....	150
B 4.2.7.2	Letalität 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m).....	152
B 4.2.8	Letalität Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m.....	153
B 4.2.8.1	Letalität 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m).....	153
B 4.2.8.2	Letalität 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m).....	155
B 4.2.9	Bemerkungen zu den EFFECTS Ergebnissen.....	155
B 4.3	Vergleiche und Analysen	156
B 4.3.1	Chlorkonzentration.....	156
B 4.3.1.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	156
B 4.3.1.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	156
B 4.3.1.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	157
B 4.3.2	Letalität	157
B 4.3.2.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	157
B 4.3.2.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	158
B 4.3.2.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	158
B 4.3.3	Zeitlicher Verlauf.....	159
B 4.3.3.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	159
B 4.3.3.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	159
B 4.3.3.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	159
B 4.3.4	Ergebnis.....	160

B 5	Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"	161
B 5.1	FLACS.....	161
B 5.1.1	Übersicht	161
B 5.1.1.1	Chlorkonzentration	161
B 5.1.1.2	Letalität	163
B 5.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	164
B 5.1.2	Chlorkonzentration.....	165
B 5.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	165
B 5.1.2.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	168
B 5.1.2.3	Chlorkonzentration vertikal.....	170
B 5.1.3	Letalität	171
B 5.1.3.1	Letalität 1.5 m über Boden.....	171
B 5.1.3.2	Letalität 30.5 m über Boden	172
B 5.1.4	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	172
B 5.2	EFFECTS.....	172
B 5.3	Vergleiche und Analysen	173
B 5.3.1	Chlorkonzentration.....	173
B 5.3.1.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	173
B 5.3.1.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	173
B 5.3.1.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	173
B 5.3.2	Letalität	174
B 5.3.2.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	174
B 5.3.2.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	174
B 5.3.2.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	174
B 5.3.3	Zeitlicher Verlauf.....	175
B 5.3.3.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	175
B 5.3.3.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	175
B 5.3.3.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	176
B 5.3.4	Ergebnis.....	176

B 6	Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"	177
B 6.1	FLACS.....	177
B 6.1.1	Übersicht	177
B 6.1.1.1	Chlorkonzentration	177
B 6.1.1.2	Letalität	178
B 6.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	179
B 6.1.2	Chlorkonzentration.....	180
B 6.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	180
B 6.1.2.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	183
B 6.1.2.3	Chlorkonzentration vertikal.....	185
B 6.1.3	Letalität	186
B 6.1.3.1	Letalität 1.5 m über Boden.....	186
B 6.1.3.2	Letalität 30.5 m über Boden	187
B 6.1.4	Windfeld	188
B 6.1.4.1	Windfeld 1.5 m über Boden.....	188
B 6.1.4.2	Windfeld 30.5 m über Boden	190
B 6.1.5	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	191
B 6.2	EFFECTS.....	191
B 6.3	Vergleiche und Analysen	191
B 6.3.1	Chlorkonzentration.....	191
B 6.3.1.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	191
B 6.3.1.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	192
B 6.3.1.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	192
B 6.3.2	Letalität	193
B 6.3.2.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	193
B 6.3.2.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	194
B 6.3.2.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	194
B 6.3.3	Zeitlicher Verlauf.....	195
B 6.3.3.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	195
B 6.3.3.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	195
B 6.3.3.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	195
B 6.3.4	Ergebnis.....	195

B 7	Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"	197
B 7.1	FLACS.....	197
B 7.1.1	Übersicht	197
B 7.1.1.1	Chlorkonzentration	197
B 7.1.1.2	Letalität	199
B 7.1.1.3	Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl	200
B 7.1.2	Chlorkonzentration.....	201
B 7.1.2.1	Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	201
B 7.1.2.2	Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	204
B 7.1.2.3	Chlorkonzentration vertikal.....	206
B 7.1.3	Letalität	207
B 7.1.3.1	Letalität 1.5 m über Boden.....	207
B 7.1.3.2	Letalität 30.5 m über Boden	208
B 7.1.4	Windfeld	209
B 7.1.4.1	Windfeld 1.5 m über Boden.....	209
B 7.1.4.2	Windfeld 30.5 m über Boden.....	211
B 7.1.5	Lache.....	212
B 7.1.6	Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen	213
B 7.2	EFFECTS.....	213
B 7.3	Vergleiche und Analysen	213
B 7.3.1	Austrittsmodellierung	213
B 7.3.2	Chlorkonzentration.....	214
B 7.3.2.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	214
B 7.3.2.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	215
B 7.3.2.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	215
B 7.3.3	Letalität	215
B 7.3.3.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	215
B 7.3.3.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	216
B 7.3.3.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	216
B 7.3.4	Zeitlicher Verlauf.....	216
B 7.3.4.1	Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien	216
B 7.3.4.2	Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien ..	217
B 7.3.4.3	Vergleich FLACS-EFFECTS	217
B 7.3.5	Ergebnis.....	217
C	Vergleichsrechnungen Meteosituation mit EFFECTS	218
D	Konzentrations-Letalitätsberechnungen (EFFECTS)	219
D 1	1 % Letalität	219
D 2	50 % Letalität	219
D 3	99 % Letalität	220

E	EFFECTS Dispersionsberechnungen Reports und Vergleiche	221
E 1	Report Szenario 0 "Baseline" 1800 s und 2250 s Expositionszeit	221
E 2	Report Szenario 1 "Einfamilienhäuser" bzw. 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit und 1800 s und 8000 s Expositionszeit.....	226
E 3	Report Szenario 2 "Wohnblocks" mit 3 m Oberflächenrauigkeit und 1800 s und 8000 s Expositionszeit	231
E 4	Vergleiche Chlorkonzentration	236
E 5	Vergleiche Toxische Dosis	243
E 6	Vergleiche Letalität	244
F	Herleitung Bevölkerungsdichten zur Berechnung der Todesopferzahlen.....	245
F 1	Szenario 0 "Baseline"	245
F 2	Szenario 1 "Einfamilienhäuser"	245
F 3	Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"	245
F 4	Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"	246
G	Import Swisstopo Daten	247
G 1	Technical Note Import of Topological Data Gexcon AS.....	247
G 2	Übersicht Swisstopo Daten	248
H	Grundlagen und Literatur.....	249

Zusammenfassung

Das BAV hat für die Aktualisierung und Weiterentwicklung der methodischen Basis für die Beurteilung der Risiken aus dem Gefahrguttransport mit der Bahn mehrere Studien zur Modellierung der Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von Gefahrgütern in Auftrag gegeben. Diese Studien weisen darauf hin, dass es bei den gasförmigen Stoffen Situationen und Fragestellungen gibt, für deren Modellierung herkömmliche Integralmodelle, die in gängigen Softwarepaketen wie Gexcon (vormals TNO) EFFECTS oder DNV Phast implementiert sind, ungeeignet sind. Insbesondere können die herkömmlichen Integralmodelle für Gasausbreitungsberechnungen komplexe Geometrien wie z.B. Überbauungen nicht berücksichtigen. Als Alternative dazu bieten sich CFD-Tools an, die eine räumlich und zeitlich differenzierte Berechnung der Gasausbreitung erlauben.

Mit der vorliegenden Studie wird eine Entscheidungsgrundlage für einen gezielten Einsatz von CFD Tools zur Modellierung der Chlorgasausbreitung infolge eines Austritts aus einem Bahnkesselwagen zur Verfügung gestellt. Dazu werden in einem ersten Schritt Bebauungen, welche sich als repräsentative Modellsituationen eignen, identifiziert. In einem zweiten Schritt wird anhand von Vergleichsrechnungen einer Chlorgasausbreitung für diese Modellsituationen untersucht, wie sich die Ergebnisse des CFD-Tools FLACS von den Ergebnissen des Integralmodells EFFECTS unterscheiden. Als Drittes wird eine Empfehlung ausgearbeitet, in welchen Situationen (z.B. Bebauung) der Aufwand von CFD-Berechnungen gerechtfertigt ist.

Insgesamt wurden für sechs Szenarien Vergleichsrechnungen durchgeführt. Neben Bebauungsvarianten wurden auch je eine Variantenrechnung zum Einfluss der Hangneigung und zum Einfluss unterschiedlicher Modellierung des Freisetzungs- und Verdampfungsvorganges auf das Ergebnis durchgeführt.

Die Vergleichsrechnungen ergaben insbesondere in überbauten Situationen sehr grosse Differenzen zwischen FLACS und EFFECTS bei der Grösse der letalitätsbetroffenen Flächen. Die letalitätsbetroffenen Flächen und die Ausbreitungsdistancen von Chlorgas in letalen Konzentrationen sind bei EFFECTS deutlich grösser als bei FLACS. Dies hat zur Folge, dass sich bei Berechnung mit EFFECTS Personen bis in deutlich grössere Distanzen zur Bahnlinie im Bereich mit letalen Konzentrationen befinden als bei Berechnung mit FLACS (Faktor 3 und mehr). Zudem können sich auch bei der Lage der letalitätsbetroffenen Flächen deutliche Unterschiede zwischen FLACS und EFFECTS ergeben.

Bei einer vereinfachten Ausmassabschätzung auf Basis der Ergebnisse einer Vergleichsrechnung von FLACS und EFFECTS ergab sich beispielsweise bei einer Chlorfreisetzung in einem Gebiet mit homogener, dichter Wohnblockbebauung bei Berechnung mit EFFECTS ein Ausmass von über 6'000 Todesopfern, während sich bei Berechnung mit FLACS ein Ausmass von etwa 900 Todesopfern ergab. Bei einer Chlorfreisetzung in einem Gebiet mit homogener Einfamilienhausüberbauung ergab sich bei Berechnung mit EFFECTS ein Ausmass von über 1'000 Todesopfern, bei einer Berechnung mit FLACS hingegen resultierte ein deutlich tieferes Ausmass von ca. 280 Todesopfern.

Die verschiedenen FLACS-Rechenläufe haben ferner gezeigt, dass sich beispielsweise kleinere Unterschiede bei der Geometrie (z.B. Anordnung von Strömungshindernissen wie Gebäuden) im Nahbereich der Freisetzung stark auf das Ausbreitungsverhalten des Chlorgases und die Letalitäten auswirken können. Die Lage und Grösse der letalitätsbetroffenen Flächen sind deshalb stark vom konkreten Einzelfall abhängig und somit schwierig zu verallgemeinern.

Für die Wahl eines geeigneten Tools für die Simulation der Ausbreitung von gefährlichen Gasen ist besonders in Anbetracht der grossen Unterschiede in den Resultaten die Validität der jeweiligen Tools ein sehr wichtiges Kriterium, d.h. der Grad der Übereinstimmung von Modellergebnissen des jeweiligen Tools mit der Realität. Zusammen mit den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen dienen uns bekannte Angaben zur Validität der beiden verwendeten Tools als Grundlagen für erste Empfehlungen für den Einsatz von EFFECTS und FLACS. Mit umfassenderen Angaben zur Validität der beiden verwendeten Tools könnten die Empfehlungen wahrscheinlich noch präzisiert werden.

Der Einsatz von EFFECTS kommt in erster Linie in offenem (d.h. weitgehend frei von Strömungshindernissen wie Gebäuden, Bäumen etc.), ebenem Gelände in Frage. In überbauten Situationen, die eine höhere Bevölkerungsdichte aufweisen, und in unebenen oder geneigten Situationen hingegen wird der Einsatz von FLACS empfohlen. Dabei ist in Anlehnung an die Empfehlung des U.S. Department of Transportation für Dispersionsrechnungen für LNG die Anwendung eines Sicherheitsfaktors in Betracht zu ziehen.

Summary

The Swiss Federal Office of Transport (FOT) is currently in the process of updating and refining the methodological basis for the risk assessment of transports of dangerous goods by rail in Switzerland. In this context, the FOT has commissioned several studies on modeling the accidental release of dangerous substances, the dispersion respectively spreading of such substances and their effect on humans and the environment. These studies come to the conclusion that in the case of gaseous substances, common integral models like those implemented in standard software packages such as Gexcon (former TNO) EFFECTS or DNV Phast may not be suitable for dispersion modeling in certain situations. In particular, common integral models for gas dispersion cannot take account of complex geometries like built up areas. CFD-codes may represent an alternative to integral models, allowing both space- and time-resolved simulation of gas dispersion.

The present study contains a guidance for targeted use of CFD-codes for the simulation of chlorine gas dispersion following an accidental release of chlorine from a rail tank. For this purpose building developments serving as representative model situations were identified as a first step. As a second step comparative chlorine dispersion simulations using the CFD-code FLACS and the integral model EFFECTS were carried out for such model situations in order to assess the differences in the results obtained with both tools. Finally, a guidance on situations (for example type of development, topography) where the use of the CFD-code FLACS would be appropriate in spite of the significantly higher expenditure comparing to the integral model EFFECTS was worked out.

Comparative simulations for six different scenarios were made in all, mostly for different building development situations. Apart from the different building development situations, one comparative simulation was carried out in order to get an idea of the influence of sloping terrain. Another comparative simulation was made with the aim to see to what extent the use of different models for the release and for the evaporation phase of the chlorine leaking from a rail tank would affect the outcome of the simulation.

The comparative simulations revealed important differences in the results between FLACS and EFFECTS regarding the size of the area affected by lethal chlorine concentrations, especially in built up situations. The area affected by lethal chlorine concentrations and also the hazardous distances calculated with EFFECTS are considerably larger than those obtained with FLACS. Consequently, if dispersion simulation results with EFFECTS are used, persons would be exposed to lethal chlorine concentrations to much further distances away from the railway track than according to simulation results using FLACS (factor 3 and above). Furthermore, the location of the area exposed to lethal chlorine concentrations may significantly differ according to whether the dispersion simulation is carried out with EFFECTS or with FLACS.

A simplified example calculation of the number of casualties caused by an accidental chlorine release in a neighbourhood densely and homogeneously built up with apartment buildings resulted, when based on EFFECTS simulation results, in a number of more than 6'000 casualties. Using FLACS simulations results, the same example calculation resulted in a much lower number of about 900 casualties. A similar example calculation of a chlorine release in a neighbourhood built up homogeneously with single-family houses resulted in more than 1'000 casualties according to EFFECTS dispersion simulation results and in a significantly lower number of about 280 casualties according to FLACS results.

Furthermore, the different FLACS simulation runs revealed that even small differences in the geometry (for example arrangement of flow obstructions like buildings) of the near field of the release may strongly alter the dispersion of the chlorine gas and consequently lead to different positions and sizes of the areas affected by lethal chlorine concentrations. The size and position of the areas affected by lethal chlorine concentrations may thus differ for each individual case, which makes it difficult to generalize such results.

In view of the significant differences when comparing the results obtained with FLACS to those obtained with EFFECTS the validity of each tool becomes very important in the process of selecting the right tool for simulating the dispersion of dangerous gases. The term "validity" describes to what extent simulation results of a certain tool are in agreement with the reality. Together with the results of the comparative dispersion simulations with FLACS and EFFECTS, available information to us on the validity of both tools are used as a basis for guidance on the use of EFFECTS and FLACS. More comprehensive information on the validity of both tools would probably allow further refinement of the present guidance.

EFFECTS may primarily be used in open (i.e. mostly free of flow obstructions like buildings or trees etc.), flat terrain. In built up situations, which are associated with high population densities, and in uneven or sloped terrain we recommend to use FLACS. Similarly to the guidance of the U.S. Department of Transportation for gas dispersion calculation in the context of siting LNG facilities, we recommend to consider the use of a safety factor.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die methodische Basis für die Beurteilung der Risiken aus dem Gefahrguttransport mit der Bahn aus dem Jahr 1998 soll aktualisiert und weiterentwickelt werden.

Das BAV hat zu diesem Zweck unter anderem die drei Studien "Modellierung der Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten (LS Benzin)" (Emch+Berger 2017), "Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von brennbaren schweren Gasen" (suisseplan 2018) und "Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen schweren Gasen" (EBP 2018) in Auftrag gegeben. Diese drei Studien weisen darauf hin, dass es bei der Modellierung der Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von gasförmigen Stoffen Situationen und Fragestellungen gibt, für die herkömmliche Integralmodelle, die in gängigen Softwarepaketen wie Gexcon (vormals TNO) EFFECTS oder DNV Phast implementiert sind, ungeeignet sind.

Insbesondere können die herkömmlichen Integralmodelle für Gasausbreitungsberechnungen komplexe Geometrien, wie sie beispielsweise ein überbautes Gebiet darstellt, nicht berücksichtigen. Das Integralmodell EFFECTS beispielsweise verfügt nur über die Möglichkeit, über den Parameter der Oberflächenrauigkeit den Bebauungsgrad oder sonstige Strömungshindernisse auf der Erdoberfläche in einer allgemeinen und homogenen Form und auch nur in Teilaspekten in die Berechnung einfließen zu lassen. Der Parameter der Oberflächenrauigkeit beeinflusst im Integralmodell EFFECTS nur die Turbulenz und das vertikale Windprofil. Alle weiteren Einflüsse der Gebäude und anderer Strömungshindernisse auf die Luftströmung bleiben unberücksichtigt. Diese Änderungen der Luftströmung können für das Ausbreitungsverhalten einer Gaswolke jedoch oft ausschlaggebend sein. Um komplexe Geometrien realistisch in einer Simulation abzubilden, ist deshalb der Einsatz eines CFD Codes notwendig.

Deshalb soll mit der vorliegenden Forschungsstudie eine Entscheidungsgrundlage für einen gezielten Einsatz von CFD Tools zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Ressourcen beschränkt sich die Studie dabei auf den Leitstoff Chlor.

Konkret sollen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- 1) Gibt es auf dem störfallrelevanten Schienennetz Bebauungen, welche sich als Modellsituationen verwenden lassen, wenn ja welche?
- 2) Wie unterscheiden sich die Ergebnisse (Konzentrationsverlauf örtlich und zeitlich) der CFD Simulationen von den Ergebnissen mit herkömmlichen EDV-Tools, insbesondere EFFECTS, für das Szenario einer Chlorgas Freisetzung?
- 3) Welches ist der Aufwand (Zeit/Kosten) und Nutzen von CFD Simulationen für die neue Methodik für die Beurteilung der Risiken aus dem Gefahrguttransport mit der Bahn im Vergleich zu einer Betrachtung mit klassischen EDV Applikationen (Integralmodelle)? Wo wäre dieser Aufwand gerechtfertigt, zum Beispiel bei besonderen Bebauungen etc.?

2 Vorgehen

2.1 Standard- / Modellsituation Chlorfreisetzung

Grundsätzlich scheint der Nutzen von Chlor-Ausbreitungssimulationen für Gebiete mit vielen Hindernissen im Ausbreitungspfad des Chlorgases, in erster Linie also dicht bebaute, urbane Gebiete am höchsten zu sein. Dies sind diejenigen Situationen, welche Integralmodelle am wenigsten gut wiedergeben können und wo die Betroffenheit der Bevölkerung aufgrund der hohen Personendichte am grössten ist. So ist der doch beträchtliche Aufwand für eine CFD-Berechnung besonders gerechtfertigt und der Informationsgewinn am grössten. Mit Vorteil wird ein relativ flaches Gebiet gewählt, da bei stärkeren Hangneigungen die Genauigkeit der CFD-Tools abnimmt (siehe Kapitel 2.2.1).

An der Besprechung vom 6.6.2018 mit der Auftraggeberin wurde entschieden, dass in einem ersten Schritt Simulationen für eine "Baseline" und insgesamt drei synthetische, einfache Modellsituationen durchgeführt werden sollen. Die Simulation der vierten synthetischen, einfachen Modellsituation wurde an der Telefonkonferenz vom 15.1.2020 beschlossen. Bei diesen synthetischen, einfachen Modellsituationen werden beispielsweise die Gebäudeabmessungen, Hangneigung etc. variiert, um einen Eindruck vom Einfluss dieser Parameter auf das Ergebnis zu erhalten und um zu prüfen, wie weit die Ergebnisse der CFD-Berechnungen und Berechnungen mit Gexcon (vormals TNO) EFFECTS in verschiedenen Situationen voneinander abweichen.

Eine zusätzliche CFD-Berechnung wurde gemäss Entscheid an der Telefonkonferenz vom 15.1.2020 durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Modellierung der Phase vom Austritt, Flash, Lachenbildung und Verdampfung bis zur Expansion des Gasstrahls zu prüfen (siehe dazu Kapitel 2.3.1). Somit wurden in der vorliegenden Studie insgesamt sechs CFD-Simulationen durchgeführt (siehe Übersicht in Tab. 1).

Für CFD-Gasausbreitungssimulationen in einem realen Gebiet muss die Geometrie des Gebiets, in welchem die Chlorausbreitungsrechnung durchgeführt wird, möglichst detailliert nachgebildet werden. Zur Geometrie gehören sämtliche Festkörper, welche die Strömung des Fluids und die Gasausbreitung beeinflussen, also die Topographie, Gebäude, Vegetation etc. Wird die Geometrie für eine CFD-Simulation in Handarbeit aufgebaut, kann dies mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden sein. Um den Aufwand für Gasausbreitungssimulationen in einem realen Gebiet effizient zu halten, werden deshalb möglichst gut verwendbare bestehende Datensätze als Grundlagen recherchiert.

Swisstopo verfügt über verschiedene Datensätze zur Topographie, zu Gebäudekonturen und weiteren Geometrieelementen der Erdoberfläche. Viele dieser Datensätze sind schweizweit verfügbar, oder eine landesweite Abdeckung ist vorgesehen und in Arbeit.

Deshalb wurde in der vorliegenden Studie der Import der Swisstopo 3D Daten in das CFD Tool geprüft, obwohl noch keine Chlor-Ausbreitungssimulation für ein real existierendes Gebiet durchgeführt wurde. Dabei soll festgestellt werden, ob der Import in einer genügenden Qualität für eine CFD Simulation möglich ist und mit welchem Aufwand insgesamt zu rechnen ist (siehe Anhang G).

2.2 Auswahl CFD Tool

2.2.1 Allgemeines

Uns sind verschiedene CFD Tools bekannt, mit denen allenfalls eine Gasausbreitungsberechnung mit Chlor durchgeführt werden kann. CFD-Berechnungen werden in der Regel vor allem durchgeführt, um in komplexeren Geometrien detailliertere und realistischere Informationen zu erhalten, als dies mit einfacheren Tools möglich ist. Da die Realitätsnähe der Ergebnisse die Hauptmotivation ist, den Aufwand für den Einsatz eines CFD Tools auf sich zu nehmen, ist aus unserer Sicht die Validität der Tools, insbesondere im Vergleich mit Messwerten aus Gasfreisetzungsversuchen, das zentrale Auswahlkriterium.

Die Anfangsphase des Austrittes, d.h. das Ausströmen des druckverflüssigten Chlors durch das Leck, der Phasenwechsel und das damit verbundene Aufbrechen des Flüssigkeitsstrahls lässt sich mit CFD Codes nur schwer abbilden. Vielfach verfügen CFD Codes nicht über die Möglichkeit, einen Phasenübergang innerhalb des CFD Codes zu simulieren. Die Anfangsphase der Freisetzung muss deshalb in der Regel mit einer speziellen Lösung ausserhalb des CFD Codes berechnet werden. Das Ergebnis der Modellierung dieser Anfangsphase wird in den CFD Code übertragen, in welchem dann die weitere Ausbreitung unter Berücksichtigung der Umgebung berechnet wird. Eine andere Möglichkeit ist, dass entsprechende Teil- oder Submodelle, wie z.B. Lachenmodelle, mit dem CFD Code verknüpft werden und innerhalb des CFD Tools laufen.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse nimmt bei vielen CFD-Tools bei stärker geneigtem Terrain ab, soweit dies überhaupt systematisch untersucht wurde. Ein Grund dafür ist, dass viele Tools ein kartesisches Raster verwenden. Bei diesen Tools treten bei geneigtem Gelände Treppeneffekte auf, die sich negativ auf die Genauigkeit der Resultate auswirken können.

Zu den CFD Tools FLACS und FDS liegen Evaluationen gemäss Modellevaluationsprotokoll des US Department of Transportation DOT für LNG-Gasausbreitungsberechnungen vor. Für die Zulassung eines Tools für LNG-Gasausbreitungsberechnungen durch das US DOT muss ein ausführliches, systematisches Modellevaluationsprotokoll durchgeführt werden. Diese Evaluation beinhaltet auch Vergleichsrechnungen zu Messwerten einer grösseren Zahl von Freisetzungsversuchen mit unterschiedlichen Gasen (z.B. LNG, CO₂, Freon) bei unterschiedlichen Hangneigungen. Die Ergebnisse dieser Modellevaluation dürften deshalb auch für andere Gase als LNG eine gewisse Aussagekraft haben.

Nachfolgend sind einige Angaben zu unserer Einschätzung der Eignung einiger uns bekannter CFD Tools für die vorliegende Fragestellung aufgeführt:

2.2.2 "general purpose" CFD Tools

Beispiele: ANSYS CFX, ANSYS FLUENT oder CHAM PHOENICS

Diese Tools sind auf einem fortgeschrittenen technischen Stand: Sie verwenden statt eines kartesischen ein unstrukturiertes Raster und könnten deshalb allenfalls besser mit geneigtem Gelände umgehen. Sie sind parallelisiert, was sich positiv auf die bei CFD Berechnungen oft sehr lange Rechendauer auswirkt.

Allerdings sind uns keine systematischen Untersuchungen zur Validität dieser Tools bei Gasausbreitungsberechnungen bekannt (dies wird beispielsweise für FLUENT auch vom britischen Health&Safety Laboratory 2016 festgestellt), so dass die Zuverlässigkeit der Ergebnisse und die Limiten der Tools unbekannt sind.

2.2.3 KFX

KFX wird durch die norwegische Firma ComputIT, heute ein Teil von DNV GL, herausgegeben. KFX arbeitet mit einem kartesischen Raster und wird häufig für Gasausbreitungs- und Flammensimulationen eingesetzt. Uns sind jedoch weniger systematische Untersuchungen zur Validität im Bereich der Gasausbreitung als bei FLACS bekannt.

2.2.4 FDS

FDS ist ein kostenloses Tool mit kartesischem Raster, herausgegeben vom amerikanischen National Institute of Standards and Technology NIST.

Bei der Evaluation gemäss Protokoll des US DOT hat es sich gezeigt, dass FDS bei Gasausbreitungsberechnungen mit „obstructed flow“ die Gaskonzentration deutlich unterschätzt. Unter „obstructed flow“ wird die Strömung im Bereich von Hindernissen, z.B. auch Gebäuden, verstanden. Die Autoren der US DOT Evaluation schlagen deshalb vor, in Situationen mit „obstructed flow“ auf die Ergebnisse einen Sicherheitsfaktor 3 anzuwenden. Bei den vom BAV vorgesehenen CFD-Berechnungen in überbautem Gebiet ist der „obstructed flow“ äusserst wichtig. Aufgrund der spezifischen Schwäche in diesem Bereich erscheint uns deshalb FDS für die vorliegende Fragestellung weniger geeignet.

Bei der Evaluation gemäss Protokoll des US DOT wird für FDS bei geneigtem Gelände generell ein Sicherheitsfaktor von 3 empfohlen, wobei die grösste getestete Hangneigung 11.6 % betrug.

Gemäss Angabe in der im Auftrag des BAV erarbeiteten Studie "Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen schweren Gasen" (EBP 2018) sind mit FDS Chlorkonzentrationen infolge einer Chlorfreisetzung für grössere Distanzen nicht innert nützlicher Frist modellierbar.

2.2.5 Open FOAM

Open FOAM ist ein kommandozeilenbasiertes OpenSource Tool. Mit einem kommandozeilenbasierten OpenSource Tool scheint uns eine effiziente Projektabwicklung schwierig.

2.2.6 FLACS

FLACS wird durch die norwegische Firma Gexcon AS herausgegeben und gilt als Quasi-Standard im Bereich der Gasausbreitungs- und Explosionsberechnung. FLACS verwendet ein kartesisches Raster.

FLACS wird vielfach in der Gas- und Ölindustrie, in der chemischen Industrie und weiteren Anwendungsgebieten eingesetzt. Es bestehen viele Vergleichsrechnungen mit Experimenten. Das britische Health and Safety Executive hat ein Review für FLACS durchgeführt. Ebenfalls wurde FLACS durch die Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration PHMSA des US Department of Transportation (US DOT) für LNG zugelassen. Dabei sollen gemäss PHMSA die Berechnungsergebnisse von FLACS generell mit einem Sicherheitsfaktor 2 gehandhabt werden. Bei stärker als 10 % geneigtem Gelände müsste jedoch ein Sicherheitsfaktor >2 angewendet werden, weshalb FLACS für Hangneigungen $> 10\%$ von der PHMSA nicht empfohlen wird.

Für die Modellierung der Anfangsphase des Freisetzungsvorgangs verfügt FLACS über zusätzliche Tools, mit welchen die Anfangsphase modelliert werden kann. Die Ergebnisse können dann in den CFD Simulator von FLACS eingelesen werden. Ebenfalls verfügt FLACS über ein integriertes Lachenmodell.

FLACS wurde unter anderem bereits für Berechnungen einer Chlorfreisetzung aus einem Bahnkesselwagen im urbanen Gebiet in Chicago sowie für Vergleichsrechnungen mit dem beobachteten Ausbreitungsverhalten bei einem Unfall mit einem Chlor-Bahnkesselwagen in Festus, Missouri eingesetzt.

Der FLACS Code ist parallelisiert und 64-Bit tauglich, so dass die Berechnungen einer grossräumigen Gasausbreitung noch mit vertretbarer Rechenzeit möglich sein sollten.

2.2.7 Schlussfolgerung zur Auswahl der CFD Tools

Die CFD-Simulationen werden mit FLACS durchgeführt. FLACS scheint uns in Anbetracht der verfügbaren Angaben zur Validität und der Ausrüstung des FLACS-Pakets zur Modellierung der Anfangsphase des Austritts das am besten geeignete CFD Tool für die Modellierung der Chlorszenarien zu sein.

Um das Know-How der Herstellerfirma bestmöglich zu nutzen, werden die Simulationen von Gexcon AS durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma ist insbesondere auch für den Import der Swisstopo-Daten sinnvoll, da die Herstellerfirma die technischen Möglichkeiten für den Import der Swisstopo Daten am Besten ausschöpfen kann.

2.3 Allgemeine Vorgaben und Bemerkungen zu den Berechnungen

2.3.1 Modellierung Freisetzung, Phasenwechsel und Expansion

Die Modellierung einer instantanen Freisetzung (wie ursprünglich im Auftrag vorgesehen) ist recht anspruchsvoll. Die Modelle sind im Vergleich zu kontinuierlichen Freisetzungen weniger gut validiert, und das Ergebnis kann stark durch die Art der Modellierung der anfänglichen Freisetzungsphase beeinflusst werden.

An der Besprechung mit dem BAV vom 6.6.2018 wurde deshalb entschieden, die Berechnungen für eine grosse kontinuierliche Freisetzung durchzuführen. Dabei wurde eine Leckgrösse von 75 mm verwendet. Die Auswertung von Bahnunfällen mit Chlor im Rahmen der im Auftrag des BAV erarbeiteten Studie "Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen schweren Gasen" (EBP 2018) hat ergeben, dass unfallbedingte Leckdurchmesser eine beträchtliche Grösse von bis zu mehreren Dutzend cm erreichen können. Bei den in der vorliegenden Studie betrachteten Szenarien handelt es sich somit nicht um Worst-Case Situationen.

Gemäss Studie "Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen schweren Gasen" (EBP 2018) deuten Literaturangaben und Unfallereignisse darauf hin, dass bei einer Chlorfreisetzung keine oder zumindest keine bedeutende Lache gebildet wird. Ebenfalls zeigen erste EFFECTS Berechnungen des BAV, dass bei Berechnung mit EFFECTS bei einer grossen kontinuierlichen Freisetzung keine Lachenbildung auftritt. Deshalb sollen die Berechnungen ohne Lachenbildung durchgeführt werden. (Die obigen Angaben zur Lachenbildung stehen allerdings in Widerspruch zu den Ergebnissen einer FLACS-Austrittsmodellierung, siehe Kapitel 5.4 und Anhang B 7.3.1)

Die Berechnung von der Freisetzung bis zur Gasausbreitung ist ein mehrstufiger Prozess. Auf allen diesen Stufen gibt es Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS, d.h. nicht nur, weil FLACS die Geometrie detailliert berücksichtigt und EFFECTS nicht. Auch die Berechnung des Austritts, Phasenübergangs, Rainout, Expansion des Gasstrahls etc. unterscheiden sich.

Um möglichst nur die Unterschiede, die durch die unterschiedliche Berücksichtigung der Geometrie entstehen, zu erfassen, wurde an der telefonischen Besprechung mit dem BAV vom 14.11.2018 beschlossen, die Parameter für den expandierten Gasstrahl von EFFECTS für die Berechnungen in beiden Tools zu übernehmen. D.h. die Berechnung des Austritts und des Phasenübergangs sowie die Expansion des Gasstrahls werden auch für die FLACS Berechnungen mit EFFECTS durchgeführt. Mit den Parametern des expandierten Gasstrahls aus EFFECTS wird dann in FLACS eine Quelle definiert (die verwendeten Parameter sind in Anhang A 1.2 beschrieben).

Für die betreffenden FLACS-Berechnungen (Szenario Nr. 0 bis 4) werden deshalb keine Parameter zum Behälterinhalt, Füllstand, Ausflusskoeffizient etc. benötigt. Ebenfalls werden keine Parameter für die Oberflächenbeschaffenheit im Bereich der Lache benötigt, da keine Lachenbildung berechnet wird.

Zusätzlich wird eine CFD-Berechnung mit FLACS ohne Übernahme der Parameter für den expandierten Gasstrahl aus EFFECTS durchgeführt (Szenario Nr. 5). Dies bedeutet, dass der gesamte Prozess mit den Tools und Techniken von FLACS berechnet wird, so wie ein Chlorfreisetzungsszenario mit FLACS üblicherweise modelliert würde. D.h. auch der Austritt, Flash, Lachenbildung und Verdampfung sowie die Expansion des Gasstrahls werden mit den Tools und Techniken von FLACS berechnet. Die Lachenbildung wird nicht unterdrückt, sondern wie mit FLACS üblich modelliert.

Für diesen Rechenlauf werden deshalb auch Parameter wie z.B. der Ausflusskoeffizient oder Parameter zur Sonneneinstrahlung und Oberflächenbeschaffenheit im Bereich der Lache benötigt.

Für alle Rechnungen werden wo möglich die Parameter aus dem Vorschlag des BAV für die neue Methodik Transportrisiken Gefahrgut Eisenbahn TRGG Bahn (erhalten am 12.6.2018) verwendet.

2.3.2 Meteosituation

Die CFD-Simulationen werden jeweils nur für eine Meteosituation (Pasquill-Klasse F, 1.5 m/s Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe) durchgeführt. Es ist unbekannt, ob es sich dabei um einen Worst-Case handelt. Welche Meteosituation einem Worst-Case entspricht, lässt sich ohne Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Meteosituationen nicht festlegen.

Mit EFFECTS wurden Vergleichsrechnungen mit den Parametern von Szenario 2 "Wohnblocks" für verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Stabilitätsklasse bei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten und Expositionszeiten durchgeführt. Dabei hat es sich gezeigt, dass die für die Berechnungen verwendete Meteosituation mit Windgeschwindigkeit 1.5 m/s und Stabilitätsklasse F bei Berechnung mit EFFECTS einem eher schlechten Fall, aber nicht dem Worst Case entspricht (siehe Anhang C).

Die Worst-Case Meteosituation kann sich von Tool zu Tool unterscheiden. Beispielsweise ergibt die Meteosituation, die gemäss EFFECTS zu den grössten Ausbreitungsdistanzen führt, nicht zwingend auch bei FLACS die grössten Ausbreitungsdistanzen. Um die Vergleichbarkeit von EFFECTS und FLACS zu gewährleisten, wird in beiden Tools mit derselben Meteosituation gemäss neuer Methodik TRGG Bahn gerechnet.

2.3.3 Worst-Case Distanzen

Um Worst-Case Distanzen anzunähern, wären umfangreichere Sensitivitäts- und Parameterbetrachtungen nötig (z.B. Art der Freisetzung, Leckgrösse, Auswirkung der Lachenbildung, verschiedene Meteosituationen etc.). In der vorliegenden Studie konnte nur eine kleine Zahl von CFD Simulationen durchgeführt werden, so dass weitgehend auf Sensitivitäts- und Parameterbetrachtungen verzichtet werden musste. Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf dem direkten Vergleich von FLACS und EFFECTS, nicht auf der Bestimmung von Worst-Case Distanzen.

3 Berechnete Szenarien

(detaillierte Szenariendefinition siehe Anhang A)

Beim **Szenario 0 "Baseline"** wird eine Chlorgasausbreitung im freien Gelände berechnet. Dieses Szenario soll den Vergleich zwischen den Tools FLACS und EFFECTS ohne Einfluss von Geometrieeffekten ermöglichen. Ebenfalls dient das Szenario 0 "Baseline" als Vergleichsbasis um den Einfluss der Geometrie in den anderen Szenarien aufzuzeigen.

Bei den **Szenarien 1 "Einfamilienhäuser" und 2 "Wohnblocks"** wird die Situation einer Einfamilienhausüberbauung bzw. einer Wohnblocküberbauung simuliert. Bei FLACS wird die Überbauungssituation mit einer vereinfachten Geometrie abgebildet. Bei EFFECTS wird die Überbauungssituation über den Parameter der Oberflächenrauigkeit so gut wie möglich berücksichtigt. Szenario 2 "Wohnblocks" ist in FLACS als dichte Anordnung von Wohnblocks mit 30 m Höhe abgebildet. Zudem prallt der Chlorgasstrahl in Szenario 2 "Wohnblocks" kurz nach der Freisetzung auf eine Fassade.

Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" ist identisch mit Szenario 2 "Wohnblocks", ausser dass die Erdoberfläche um 10° in Windrichtung geneigt ist. Mit diesem Szenario sollen Informationen zum Einfluss der Hangneigung auf die Chlorgasausbreitung gewonnen werden.

Bei **Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"** wurde die Bebauungsdichte gegenüber Szenario 2 "Wohnblocks" reduziert und der in Szenario 2 "Wohnblocks" stattfindende Aufprall des Chlorgasstrahls kurz nach der Freisetzung auf eine Fassade vermieden. Damit sollen Informationen dazu gewonnen werden, wie robust die Ergebnisse von Szenario 2 "Wohnblocks" sind und ob es sich bei Szenario 2 "Wohnblocks" um einen extremen Spezialfall handelt. Die Abmessungen der Gebäude wurden von Szenario 2 "Wohnblocks" beibehalten.

Bei den Szenarien 0 bis 4 wurden für die FLACS-Berechnungen die Parameter für den expandierten Gasstrahl von EFFECTS übernommen. D.h. die Phasen vom Leckaustritt bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit zu einem Jet ausschliesslich in der Gasphase wurden auch für die FLACS-Berechnungen mit EFFECTS modelliert. Dazu wird in FLACS mit den Parametern des expandierten Gasstrahls aus EFFECTS eine Quelle definiert (die verwendeten Parameter sind in Anhang A 1.2 beschrieben).

Bei **Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"** wurde hingegen alles mit FLACS modelliert, also auch die Phasen von der Freisetzung bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit. Bei der Modellierung mit FLACS kam es im Gegensatz zu EFFECTS auch zu einer Lachenbildung. Die Entstehung und Verdampfung der Lache wurde bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" in FLACS ebenfalls berücksichtigt. Der Rechenlauf mit FLACS Freisetzungsmodellierung wurde durchgeführt, da sich FLACS und EFFECTS bei der Modellierung der Phasen vom Leckaustritt bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit bzw. der Verdampfung aus der Lache stark unterscheiden. Die Geometrie wurde beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" vom Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" übernommen.

Tab. 1 Übersichtstabelle berechnete Szenarien

Szenario Bezeichnung	Geometrie		Hangneigung		Modellierung von Quell- term, Phasenwechsel, Rainout, Expansion Gas- strahl		
	FLACS	EFFECTS (Berücksichtigung der Geometrie nur mit Parameter Oberflächenrauigkeit möglich)	FLACS	EFFECTS	FLACS	EFFECTS	
EFFECTS Freisetzungsmodellierung							
0	Baseline	Regelmässig angeordnete Quader 1*1*0.5 m bzw. 10*10*0.5 m (l*b*h) um eine mit der EFFECTS Rechnung vergleichbare Oberflächenrauigkeit zu erreichen	Oberflächenrauigkeit 0.03 m	0°	0°	Übernommen von EFFECTS	EFFECTS
1	Einfamilienhäuser	Regelmässig angeordnete Quader 10*10*8 m (l*b*h)	Oberflächenrauigkeit 1 m	0°	0°	Übernommen von EFFECTS	EFFECTS
2	Wohnblocks	Regelmässig dicht angeordnete Quader 40*15*30 m (l*b*h)	Zwei Varianten: Oberflächenrauigkeit 1 m und 3 m	0°	0°	Übernommen von EFFECTS	EFFECTS
3	Wohnblocks 10° Neigung	Regelmässig dicht angeordnete Quader 40*15*30 m (l*b*h)	Zwei Varianten: Oberflächenrauigkeit 1 m und 3 m	Gesamtes Simulationsvolu- men 10° in Wind- richtung abfallend	0° (in EFFECTS keine Berücksichtigung der Hangneigung möglich)	Übernommen von EFFECTS	EFFECTS
4	Wohnblocks mit Lücken	Regelmässig angeordnete Quader 40*15*30 m (l*b*h), Dichte gegenüber Szenario 2 um 37.5 % reduziert Zusätzlich linearer Korridor und rechteckige Freifläche	Zwei Varianten: Oberflächenrauigkeit 1 m und 3 m	0°	0°	Übernommen von EFFECTS	EFFECTS
FLACS – EFFECTS Freisetzungsmodellierung							
5	Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmo- dellierung	Regelmässig angeordnete Quader 40*15*30 m (l*b*h), Dichte gegenüber Szenario 2 um 37.5 % reduziert Zusätzlich linearer Korridor und rechteckige Freifläche	Zwei Varianten: Oberflächenrauigkeit 1 m und 3 m	0°	0°	FLACS	EFFECTS

Alle Simulationen wurden mit Windgeschwindigkeit 1.5 m/s in 10 m Höhe und Pasquill-Klasse F durchgeführt.

4 Ergebnisse Simulationen

4.1 Vergleichsgrößen für potentielle Personenschäden und Methodik zur Berechnung der Vergleichsgrößen

Das für die Risikoanalyse in der Regel entscheidende Ergebnis der Simulationen ist die Letalität. Die Letalitäten wurden in beiden Tools mit derselben Probitfunktion berechnet (zu den Parametern siehe Anhang A 1.2). Bei der Expositionszeit zur Berechnung der toxischen Dosis war hingegen keine identische Berechnungsweise der beiden Tools möglich. Mit einer vertieften Analyse des zeitlichen Konzentrationsverlaufs konnte trotzdem die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden (siehe dazu Anhang B 1.1).

Die Letalitätsergebnisse der verschiedenen Rechenläufe für die verschiedenen Szenarien können anhand von verschiedenen Größen verglichen werden (Vergleich von EFFECTS und FLACS sowie Vergleich der EFFECTS Rechenläufe untereinander und der FLACS Rechenläufe untereinander). Der Berechnungsaufwand für diese verschiedenen Größen ist sehr unterschiedlich. Auch von Tool zu Tool sind die Unterschiede beim Aufwand für die Berechnung der Vergleichsgrößen beträchtlich. Nachfolgend sind die im vorliegenden Bericht verwendeten Vergleichsgrößen beschrieben.

Zur Berechnungsmethodik der verschiedenen Vergleichsgrößen siehe auch Anhang B 1.4.

4.1.1 Reichweiten und betroffene Flächen

In Tab. 2 sind diejenigen Größen zur räumlichen Beschreibung der Letalität zusammengestellt, welche für alle simulierten Szenarien für beide Tools, FLACS und EFFECTS, berechnet werden konnten:

Für alle simulierten Szenarien sind die maximale Reichweiten 1.5 m über Boden für drei verschiedene Letalitätsprozentsätze von 1 %, 50 % und 99 % angegeben. Solche Reichweiten werden unter anderem oft zur Festlegung von Letalitätsradien verwendet. Im vorliegenden Fall handelt es sich aber nicht sicher um Worst-Case Distanzen. Die drei verschiedenen Letalitätsprozentsätze ermöglichen es, Unterschiede zwischen den Rechenläufen im tiefen, mittleren und hohen Letalitätsbereich aufzuzeigen.

Ebenfalls sind für alle simulierten Szenarien die Flächen in 1.5 m über Boden, in welchen die drei verschiedenen Letalitätsprozentsätze von 1 %, 50 % und 99 % überschritten werden, angegeben. Damit ist ein Vergleich der betroffenen Flächengröße möglich.

Die Reichweiten und betroffenen Flächen wurden je nach Tool und je nach den für das betreffende Szenario verfügbaren Datengrundlagen auf verschiedenen Wegen ermittelt. Die Reichweiten können bei EFFECTS aus den Reports entnommen werden. Die betroffenen Flächen wurden bei EFFECTS aus exportierten Vektordaten mit GIS berechnet. Bei FLACS wurden die Reichweiten aus dem Bericht von Gexcon AS vom 16.10.2020 übernommen. Die betroffenen Flächen wurden bei FLACS für diejenigen Szenarien (Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser", 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung"), für die Rasterdaten zur

Verfügung standen, anhand der Rasterdaten berechnet. Bei den anderen beiden Szenarien wurden sie anhand der Letalitätskonturen berechnet.

4.1.2 Mittlere Letalitäten und Äquivalenzflächen

In Tab. 3 sind zusätzliche Grössen zusammengestellt, die teilweise nur für ausgewählte Szenarien berechnet wurden. Es sind die exakte Grösse der Flächen angegeben, die in einem bestimmten Letalitätsbereich liegen und die mittlere Letalität innerhalb der betreffenden Fläche. Diese Angaben ermöglichen detaillierte quantitative Vergleiche der verschiedenen Simulationen.

Die Berechnung der mittleren Letalität innerhalb eines Letalitätsbereiches erfolgte auf Basis eines horizontalen Rasters mit den exakten Letalitätswerten in 1.5 m Höhe über Boden. Dabei bestehen bei den FLACS Rasterdaten leichte Abweichungen von den 1.5 m Höhe, da keine Interpolation in z-Richtung vorgenommen wurde, sondern jeweils die Werte der nächstgelegenen Rasterebene in z-Richtung verwendet wurden. Dies führt dazu, dass beispielsweise bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" statt die Werte in 1.5 m Höhe die Werte in 1.25 m Höhe verwendet werden. Die Rasterweite beträgt bei den EFFECTS-Berechnungen 35 bis 50 m. Dies ist die in EFFECTS maximal mögliche Auflösung. Bei den FLACS-Berechnungen beträgt die Rasterweite 5 m. Bei den FLACS-Berechnungen wurde aufgrund der kleineren betroffenen Flächen und der komplexen Flächenformen eine kleinere Rasterweite verwendet.

Bei FLACS ist die Extraktion der Rasterdaten mit einem höheren Aufwand verbunden. Deshalb wurden für die FLACS-Rechenläufe die Rasterdaten nur für die Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser", 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" extrahiert, so dass auch die mittlere Letalitäten nur für den FLACS-Rechenlauf der Szenarien 0, 1, 4 und 5 berechnet wurden. Hingegen wurden für alle EFFECTS-Rechenläufe Rasterdaten erzeugt, so dass für alle EFFECTS-Rechenläufe die mittleren Letalitäten berechnet werden konnten.

Zusätzlich wurden in Tab. 3 zur besseren quantitativen Vergleichbarkeit der FLACS- und EFFECTS-Ergebnisse für die modellierten Szenarien letalitätsgewichtete Äquivalenzflächen mit 100 % Letalität berechnet. Zur Berechnung dieser Äquivalenzflächen werden für jedes Szenario die Flächen mit einer Letalität >1 % nach deren Letalität gewichtet aufaddiert. Eine Fläche mit einer Grösse von 100 m^2 und einer Letalität von 1 % trägt dann beispielsweise gleich viel zur Äquivalenzfläche bei wie eine Fläche von 1 m^2 Grösse und 100 % Letalität.

Diese Äquivalenzfläche ist ein Mass für die gesamten potentiellen Personenschäden bei einer homogenen Bevölkerungsdichte (Personen im Freien). Sie macht die potentiellen Personenschäden der verschiedenen Rechenläufe vergleichbar (Vergleich EFFECTS-FLACS sowie EFFECTS-Rechenläufe untereinander und FLACS-Rechenläufe untereinander). Die Äquivalenzfläche kann mit einer homogenen Personendichte multipliziert werden, um eine Anzahl Todesopfer für konkrete Vergleiche zu berechnen.

Die Berechnung der letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen wurde ebenfalls auf Basis der Rasterdaten durchgeführt. Die letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen wurden für alle

EFFECTS-Rechenläufe berechnet. Aufgrund des höheren Aufwands für die Extraktion der benötigten Rasterdaten wurden die letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen bei FLACS hingegen nur für die Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser", 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" berechnet (siehe Tab. 3).

4.1.3 Abschätzung Ausmass basierend auf Annahmen von repräsentativen Personendichten

In Tab. 4 sind zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellrechnungen die Ergebnisse von Beispielberechnungen zum Schadensausmass mit konkreten Personenzahlen aufgeführt. Die Todesopferzahlen wurden anhand der mit FLACS und EFFECTS berechneten Letalitäten und unter Annahme einer homogenen Personendichte sowie grob vereinfachenden Annahmen zur Schutzwirkung von Gebäuden berechnet. Dabei wurden für die einzelnen Szenarien möglichst der jeweiligen Bebauungsdichte entsprechende Personendichten hergeleitet.

Es wurde von einer reinen Wohnbevölkerung und einer Freisetzung in der Nacht ausgegangen. Es wurden die Präsenzfactoren aus der Methodik für die Belegungsannahmen im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen verwendet: 90 % der Wohnbevölkerung werden werktags in der Nacht anwesend angenommen, wovon 1 % sich im Freien aufhalten.

Auch für das Szenario Baseline wurde von einer Wohnbevölkerung ausgegangen, d.h. dass sich in der grossen, flachen Ebene ca. 1 Einfamilienhaus pro 1.5 km² befindet. Diese sehr dünne Einfamilienhausbebauung wurde in den FLACS und EFFECTS-Berechnungen für Szenario 0 "Baseline" nicht abgebildet. Für die Gasausbreitung bleibt eine derart dünne Einfamilienhausbebauung unerheblich, solange sich keines der Gebäude im Nahbereich der Freisetzung befindet und den Impuls des Gasstrahls beeinflusst.

In Anlehnung an die Beispielrechnungen des BAV vom 16.9.2019 wird angenommen, dass die Letalität für Personen in Gebäuden pauschal 20 % der Letalität für Personen im Freien beträgt. Die Plausibilität dieses Wertes wurde jedoch nicht überprüft. Im Rahmen der vorliegenden Simulationen wurden keine Berechnungen der Letalität für Personen in Gebäuden durchgeführt. Der Prozentsatz von 20 % wird nur als Rechenbeispiel verwendet. Möglicherweise führt diese Berechnung der Letalität für Personen in Gebäuden anhand eines festen Prozentsatzes insbesondere bei den Szenarien mit dichter Wohnblockbebauung zu systematischen vergleichsweiser Über- bzw. Unterschätzungen der Letalität bei den FLACS bzw. EFFECTS-Ergebnissen. Die Konzentrationsverteilung ist bei den überbauten Szenarien 1 bis 5 und ganz besonders bei den Szenarien 2 und 3 bei FLACS und EFFECTS sehr verschieden. Bei den FLACS-Berechnungen bleibt das Chlor stärker an einem bestimmten Bereich konzentriert als bei EFFECTS. Es ist davon auszugehen, dass sich in Bereichen mit hohen Konzentrationen im Freien ein anderes Verhältnis zwischen der Letalität für Personen im Freien und der Letalität für Personen in Gebäuden ergibt als in Bereichen mit tieferen Konzentrationen im Freien.

Die Herleitung der für die Berechnung der Todesopferzahlen verwendeten Bevölkerungsdichten wird in Anhang F beschrieben.

Die Berechnung der konkreten Personenzahlen basiert auf den letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen. Die letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen wurden für alle EFFECTS-Rechenläufe berechnet. Aufgrund des hohen Aufwands wurden sie bei FLACS hingegen nur für die Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser", 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" berechnet (siehe Tab. 3).

Deshalb können bei FLACS auch nur für die Szenarien 0, 1, 4 und 5 konkrete Personenzahlen angegeben werden.

4.2 Übersichtstabellen

Eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse mit Quellenangaben ist im Anhang B des Berichts enthalten.

Tab. 2 Übersichtstabelle maximale Reichweite und Flächen Letalität für Personen im Freien horizontal 1.5 m über Boden bei den berechneten Szenarien

Szenario		Tool	Maximale Reichweite 1.5 m über Boden ⁸⁾			Fläche mit Letalität $\geq x$ %; 1.5 m über Boden ^{7) 9)}			Szenario	
Nr	Bezeichnung		1 % Letalität	50 % Letalität	99 % Letalität	1 % Letalität	50 % Letalität	99 % Letalität	Nr	Bezeichnung
0	Baseline	FLACS ⁵⁾	7'958 m	2'846 m	760 m	4'535'175 m ²	1'087'325 m ²	117'100 m ²	0	Baseline
		EFFECTS ¹⁾	8'563 m	2'917 m	853 m	12'006'636 m ²	2'686'126 m ²	313'593 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	93 %	98 %	89 %	38 %	40 %	37 %		
1	Einfamilienhäuser	FLACS ⁵⁾	2'134 m	697 m	440 m	999'425 m ²	337'325 m ²	157'250 m ²	1	Einfamilienhäuser
		EFFECTS ²⁾	6'055 m	1'698 m	407 m	6'204'153 m ²	1'194'335 m ²	125'620 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	35 %	41 %	108 %	16 %	28 %	125 % ¹⁰⁾		
2	Wohnblocks	FLACS ⁶⁾	805 m	710 m	522 m	612'009 m ²	310'892 m ²	234'341 m ²	2	Wohnblocks
		EFFECTS ³⁾	5'677 m	1'549 m	402 m	4'866'910 m ²	912'490 m ²	120'462 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	14 %	46 %	130 %	13 %	34 %	195 % ¹⁰⁾		
3	Wohnblocks 10° Neigung	FLACS ⁶⁾	1'303 m	1'144 m	720 m	805'884 m ²	413'948 m ²	184'602 m ²	3	Wohnblocks 10° Neigung
		EFFECTS ^{3) 4)}	5'677 m	1'549 m	402 m	4'866'910 m ²	912'490 m ²	120'462 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	23 %	74 %	179 %	17 %	45 %	153 % ¹⁰⁾		
4	Wohnblocks mit Lücken	FLACS ⁵⁾	1'792 m	820 m	555 m	800'650 m ²	253'350 m ²	92'700 m ²	4	Wohnblocks mit Lücken
		EFFECTS ³⁾	5'677 m	1'549 m	402 m	4'866'910 m ²	912'490 m ²	120'462 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	32 %	53 %	138 %	16 %	28 %	77 %		
5	Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung	FLACS ⁵⁾	1'366 m	510 m	360 m	490'925 m ²	157'125 m ²	84'075 m ²	5	Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung
		EFFECTS ³⁾	5'677 m	1'549 m	402 m	4'866'910 m ²	912'490 m ²	120'462 m ²		
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS	24 %	33 %	90 %	10 %	17 %	70 %		

¹⁾ Oberflächenrauigkeit 0.03 m, Expositionszeit 2'250 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)

²⁾ Oberflächenrauigkeit 1 m, Expositionszeit 8'000 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)

³⁾ Die EFFECTS-Berechnungen für das Szenario 2, 3, 4 und 5 sind identisch. Für diese Szenarien wurden mehrere Varianten, darunter auch zwei verschiedene Oberflächenrauigkeiten 1 m und 3 m gerechnet. In der Tabelle ist folgende Variante aufgeführt: Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8'000 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)

⁴⁾ EFFECTS kann keine Hangneigungen berücksichtigen. Es wurden deshalb für EFFECTS dieselben Werte wie bei Szenario 2, 4 und 5 eingesetzt.

⁵⁾ Die Fläche mit Letalität für Personen im Freien $\geq x$ %; 1.5 m über Boden wurde für die FLACS Ergebnisse mit Rasterdaten mit 5 m Auflösung berechnet.

⁶⁾ Die Fläche mit Letalität für Personen im Freien $\geq x$ %; 1.5 m über Boden wurde für die FLACS Ergebnisse mit Letalitätskonturen berechnet.

⁷⁾ EFFECTS Werte berechnet mit Letalitätskonturen für Personen im Freien

⁸⁾ FLACS Werte aus Bericht Gexcon AS (2020-10-16): Dispersion analysis of chlorine release, Ref. No: Gexcon-20-F100586-RA-1 Rev. 04, Trondheim, EFFECTS Werte aus EFFECTS Report

⁹⁾ Z.B. Fläche mit Letalität ≥ 1 %: Fläche mit Letalität zwischen 1 % und 100 % / Fläche mit Letalität ≥ 50 %: Fläche mit Letalität zwischen 50 % und 100 % etc. (alles Letalität für Personen im Freien)

¹⁰⁾ Zu den unterschiedlichen Verhältnissen FLACS zu EFFECTS bei 99 % Letalität und bei 1 % und 50 % Letalität siehe Erläuterungen in Kapitel 5.2

Tab. 3 Übersichtstabelle Schadensausmass Letalität 1.5 m über Boden bei den berechneten Szenarien

Szenario		Tool	Fläche und mittlere Letalität innerhalb der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden								Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität ^{4) 8)}				Szenario
			Letalitätsbereich 1 % bis 50 %		Letalitätsbereich 50 % bis 99 %		Letalitätsbereich >99 %		Letalitätsbereich >1 % (Total)		1 % bis 50 %	50 % bis 99 %	>99 %	Total (>1 %)	
Nr	Bezeichnung		Fläche ⁹⁾	Mittlere Letalität ⁸⁾	Fläche ⁹⁾	Mittlere Letalität ⁸⁾	Fläche ⁹⁾	Mittlere Letalität ⁸⁾	Fläche ⁹⁾	Mittlere Letalität ⁸⁾					
0	Baseline	FLACS ⁶⁾	3'447'850 m ²	9 %	970'225 m ²	79 %	117'100 m ²	100 %	4'535'175 m ²	26 %	303'639 m ²	771'205 m ²	116'659 m ²	1'191'502 m ²	Baseline
		EFFECTS ¹⁾	9'320'510 m ²	12 %	2'372'533 m ²	77 %	313'593 m ²	100 %	12'006'636 m ²	27 %	1'125'087 m ²	1'816'246 m ²	313'935 m ²	3'255'268 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	37 %	75 %	41 %	103 %	37 %	100 %	38 %	96 %	27 %	42 %	37 %	37 %	
1	Einfamilienhäuser	FLACS ⁶⁾	662'100 m ²	11 %	180'075 m ²	79 %	157'250 m ²	100 %	999'425 m ²	37 %	75'901 m ²	141'538 m ²	157'026 m ²	374'465 m ²	Einfamilienhäuser
		EFFECTS ²⁾	5'009'818 m ²	12 %	1'068'715 m ²	77 %	125'620 m ²	100 %	6'204'153 m ²	24 %	579'047 m ²	787'760 m ²	137'276 m ²	1'504'083 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	13 %	92 %	17 %	103 %	125 % ¹¹⁾	100 %	16 %	154 %	13 %	18 %	114 % ¹¹⁾	25 %	
2	Wohnblocks	FLACS ⁷⁾	301'117 m ²	n.d. ¹²⁾	76'551 m ²	n.d. ¹²⁾	234'341 m ²	n.d. ¹²⁾	612'009 m ²	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	Wohnblocks
		EFFECTS ³⁾	3'954'420 m ²	11 %	792'028 m ²	76 %	120'462 m ²	100 %	4'866'910 m ²	24 %	438'343 m ²	596'214 m ²	124'607 m ²	1'159'163 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	8 %	-	10 %	-	195 % ¹¹⁾	-	13 %	-	-	-	-	-	
3	Wohnblocks 10° Neigung	FLACS ⁷⁾	391'936 m ²	n.d. ¹²⁾	229'345 m ²	n.d. ¹²⁾	184'602 m ²	n.d. ¹²⁾	805'884 m ²	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	n.d. ¹²⁾	Wohnblocks 10° Neigung
		EFFECTS ^{3) 5)}	3'954'420 m ²	11 %	792'028 m ²	76 %	120'462 m ²	100 %	4'866'910 m ²	24 %	438'343 m ²	596'214 m ²	124'607 m ²	1'159'163 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	10 %	-	29 %	-	153 % ¹¹⁾	-	17 %	-	-	-	-	-	
4	Wohnblocks mit Lücken	FLACS ⁶⁾	547'300 m ²	11 %	160'650 m ²	80 %	92'700 m ²	100 %	800'650 m ²	35 %	62'612 m ²	127'957 m ²	92'480 m ²	283'049 m ²	Wohnblocks mit Lücken
		EFFECTS ³⁾	3'954'420 m ²	11 %	792'028 m ²	76 %	120'462 m ²	100 %	4'866'910 m ²	24 %	438'343 m ²	596'214 m ²	124'607 m ²	1'159'163 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	14 %	100 %	20 %	105 %	77 %	100 %	16 %	146 %	14 %	21 %	74 %	24 %	
5	Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung	FLACS ⁶⁾	333'800 m ²	10 %	73'050 m ²	82 %	84'075 m ²	100 %	490'925 m ²	36 %	33'588 m ²	59'832 m ²	83'960 m ²	177'380 m ²	Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung
		EFFECTS ³⁾	3'954'420 m ²	11 %	792'028 m ²	76 %	120'462 m ²	100 %	4'866'910 m ²	24 %	438'343 m ²	596'214 m ²	124'607 m ²	1'159'163 m ²	
		Verhältnis FLACS zu EFFECTS ¹⁰⁾	8 %	91 %	9 %	108 %	70 %	100 %	10 %	150 %	8 %	10 %	67 %	15 %	

Die Flächen innerhalb der Letalitätsbereiche für Personen im Freien 1.5 m über Boden wurden für EFFECTS anhand der Isolinien berechnet. Die mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100% Letalität für Personen im Freien hingegen wurden für EFFECTS mit größeren Rasterdaten (Rasterweite 35 bis 50 m) berechnet. Dies führt zu kleineren Differenzen und ist auch der Grund dafür, dass bei den Szenarien 0 bis 5 bei EFFECTS die Fläche im Letalitätsbereich für Personen im Freien >99 % kleiner ist als die entsprechende letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100% Letalität für Personen im Freien

- ¹⁾ Oberflächenrauigkeit 0.03 m, Expositionszeit 2'250 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)
- ²⁾ Oberflächenrauigkeit 1 m, Expositionszeit 8'000 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)
- ³⁾ Die EFFECTS-Berechnungen für das Szenario 2, 3, 4 und 5 sind identisch. Für diese Szenarien wurden mehrere Varianten, darunter auch zwei verschiedene Oberflächenrauigkeiten 1 m und 3 m gerechnet. In der Tabelle ist folgende Variante aufgeführt: Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8'000 s (zur Expositionszeit siehe Anhang B 1.1)
- ⁴⁾ Zur Berechnung der Äquivalenzflächen siehe Kap. 4.1
- ⁵⁾ EFFECTS kann keine Hangneigungen berücksichtigen. Es wurden deshalb für EFFECTS dieselben Werte wie bei Szenario 2, 4 und 5 eingesetzt.
- ⁶⁾ FLACS Werte berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m
- ⁷⁾ Berechnet mit Letalitätskonturen für Personen im Freien
- ⁸⁾ EFFECTS Werte berechnet mit Rasterdaten Auflösung 35 bis 50 m
- ⁹⁾ EFFECTS Werte berechnet mit Letalitätskonturen
- ¹⁰⁾ Flächenverhältnis FLACS zu EFFECTS bzw. Verhältnis der mittleren Letalitäten für Personen im Freien FLACS zu EFFECTS
- ¹¹⁾ Zu den unterschiedlichen Verhältnissen FLACS zu EFFECTS bei Letalitäten unter und über 99 % Letalität siehe Erläuterungen in Kapitel 5.2
- ¹²⁾ Für die Szenarien 2 und 3 wurden für FLACS keine mittlere Letalitäten und keine letalitätsgewichtete Äquivalenzflächen für Personen im Freien berechnet.

Tab. 4 Übersichtstabelle Beispielberechnungen Anzahl Todesopfer bei den berechneten Szenarien

Szenario Nr Bezeichnung	Personendichte	Tool	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität ⁴⁾ (Letalität im Freien)	Anzahl Todesopfer	
				(Personen in Gebäuden und im Freien, siehe Kap. 4.1.3)	Verhältnis FLACS zu EFFECTS
0 Baseline	0.02 Personen/ha	FLACS ⁶⁾	1'191'502 m ²	0.4	37 %
		EFFECTS ^{1) 7)}	3'255'268 m ²	1.2	
1 Einfamilienhäuser	40 Personen/ha	FLACS ⁶⁾	374'465 m ²	280	25 %
		EFFECTS ^{2) 7)}	1'504'083 m ²	1'126	
2 Wohnblocks	450 Personen/ha	FLACS ⁸⁾	n.d. ⁸⁾	n.d. ⁸⁾	-
		EFFECTS ^{3) 7)}	1'159'163 m ²	9'765	
3 Wohnblocks 10° Neigung	450 Personen/ha	FLACS ⁸⁾	n.d. ⁸⁾	n.d. ⁸⁾	-
		EFFECTS ^{3) 5) 7)}	1'159'163 m ²	9'765	
4 Wohnblocks mit Lücken	280 Personen/ha	FLACS ⁶⁾	283'049 m ²	1'484	24 %
		EFFECTS ^{3) 7)}	1'159'163 m ²	6'076	
5 Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmo- dellierung	280 Personen/ha	FLACS ⁶⁾	177'380 m ²	930	15%
		EFFECTS ^{3) 7)}	1'159'163 m ²	6'076	

1) Oberflächenrauigkeit 0.03 m, Expositionszeit 2'250 s

2) Oberflächenrauigkeit 1 m, Expositionszeit 8'000 s

3) Die EFFECTS-Berechnungen für das Szenario 2, 3, 4 und 5 sind identisch. Für diese Szenarien wurden mehrere Varianten, darunter auch zwei verschiedene Oberflächenrauigkeiten 1 m und 3 m gerechnet. In der Tabelle ist folgende Variante aufgeführt: Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8'000 s

4) Umfasst alle Flächen mit >1 % Letalität. Zur Berechnung der Äquivalenzflächen siehe Kap. 4.1

5) EFFECTS kann keine Hangneigungen berücksichtigen. Es wurden deshalb für EFFECTS dieselben Werte wie bei Szenario 2, 4 und 5 eingesetzt.

6) Berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m

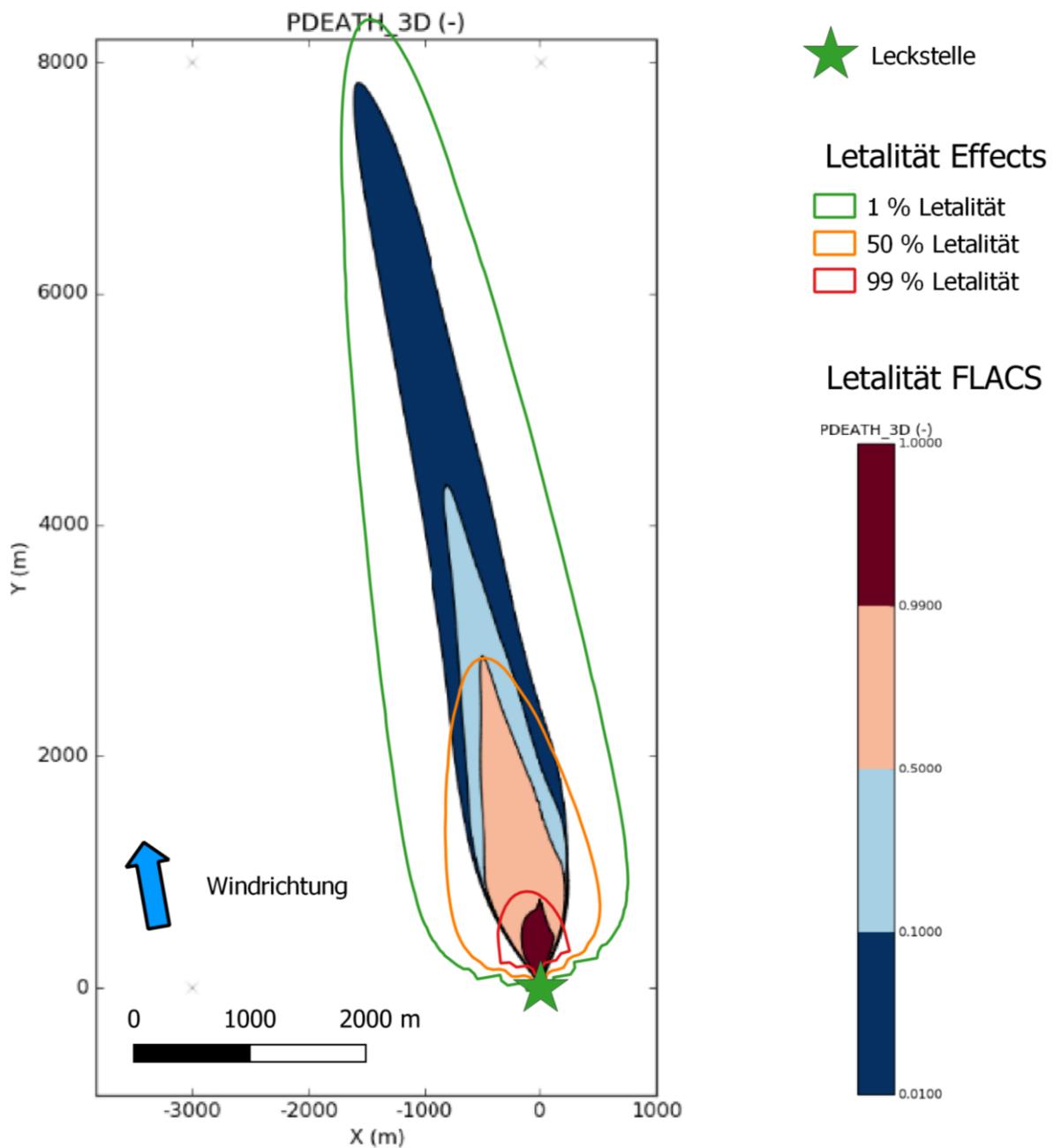
7) EFFECTS Werte berechnet mit Rasterdaten Auflösung 35 bis 50 m

8) Für die Szenarien 2 und 3 wurden für FLACS keine letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen berechnet. Es kann für diese Szenarien deshalb auch keine Anzahl Todesopfer berechnet werden.

4.3 Vergleich EFFECTS und FLACS: Isolinien Letalität 1.5 m über Boden

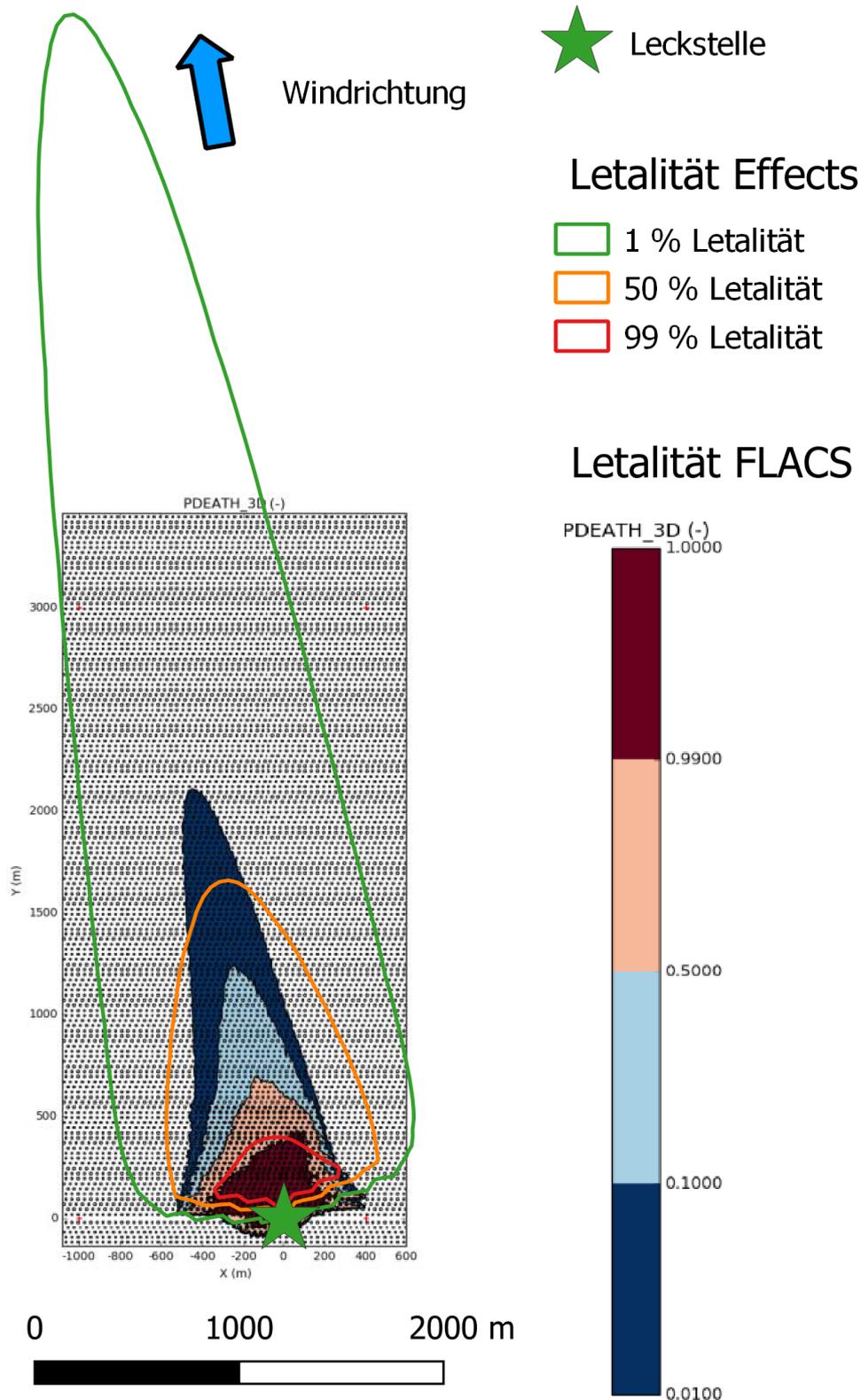
4.3.1 Szenario 0 "Baseline"

Abb. 1 Szenario 0 "Baseline": Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauhigkeit 0.03 m, Expositionszeit 2250 s) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 13.9.2019)



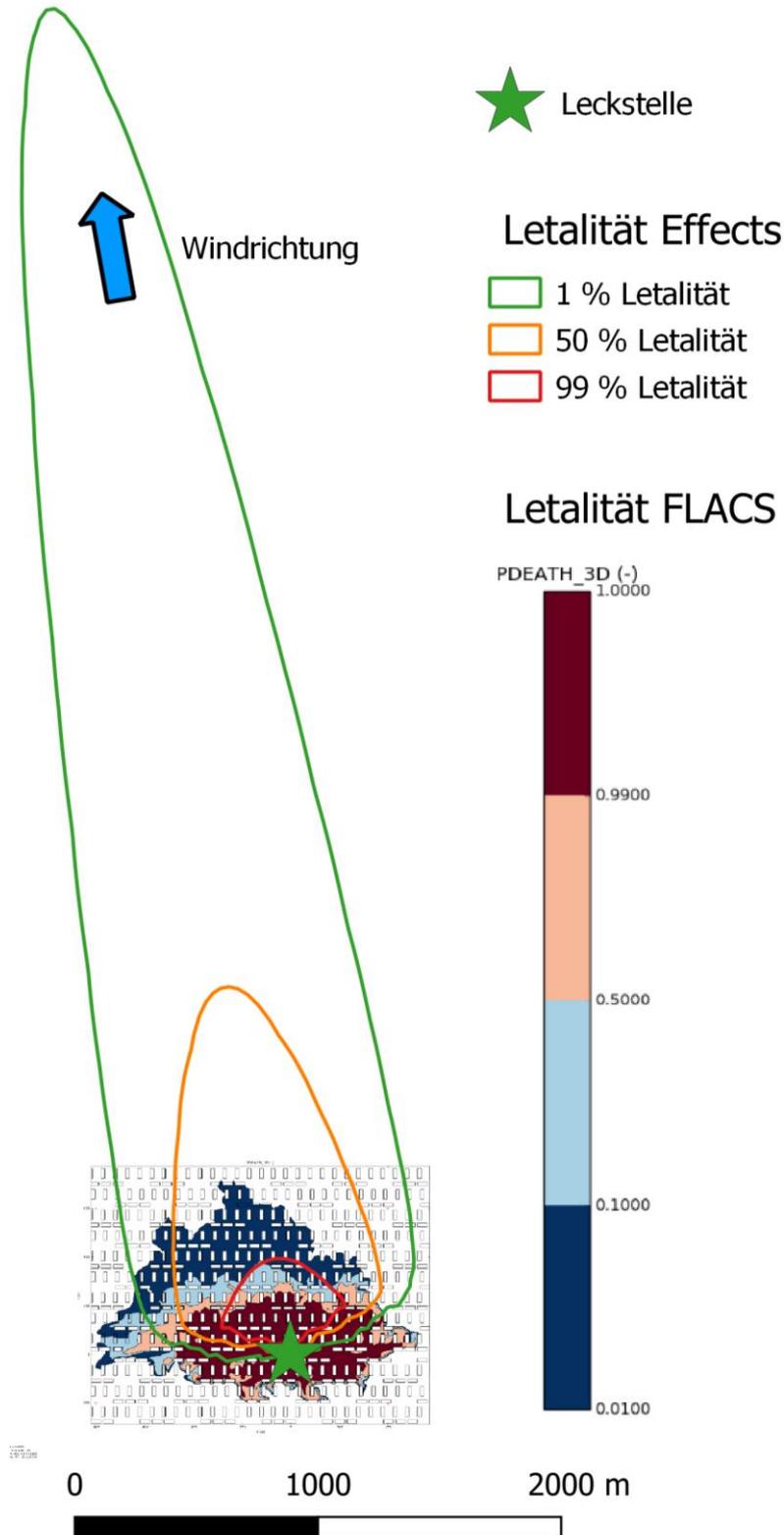
4.3.2 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Abb. 2 Szenario 1 "Einfamilienhäuser": Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauigkeit 1 m, Expositionszeit 8000 s) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 13.9.2019)



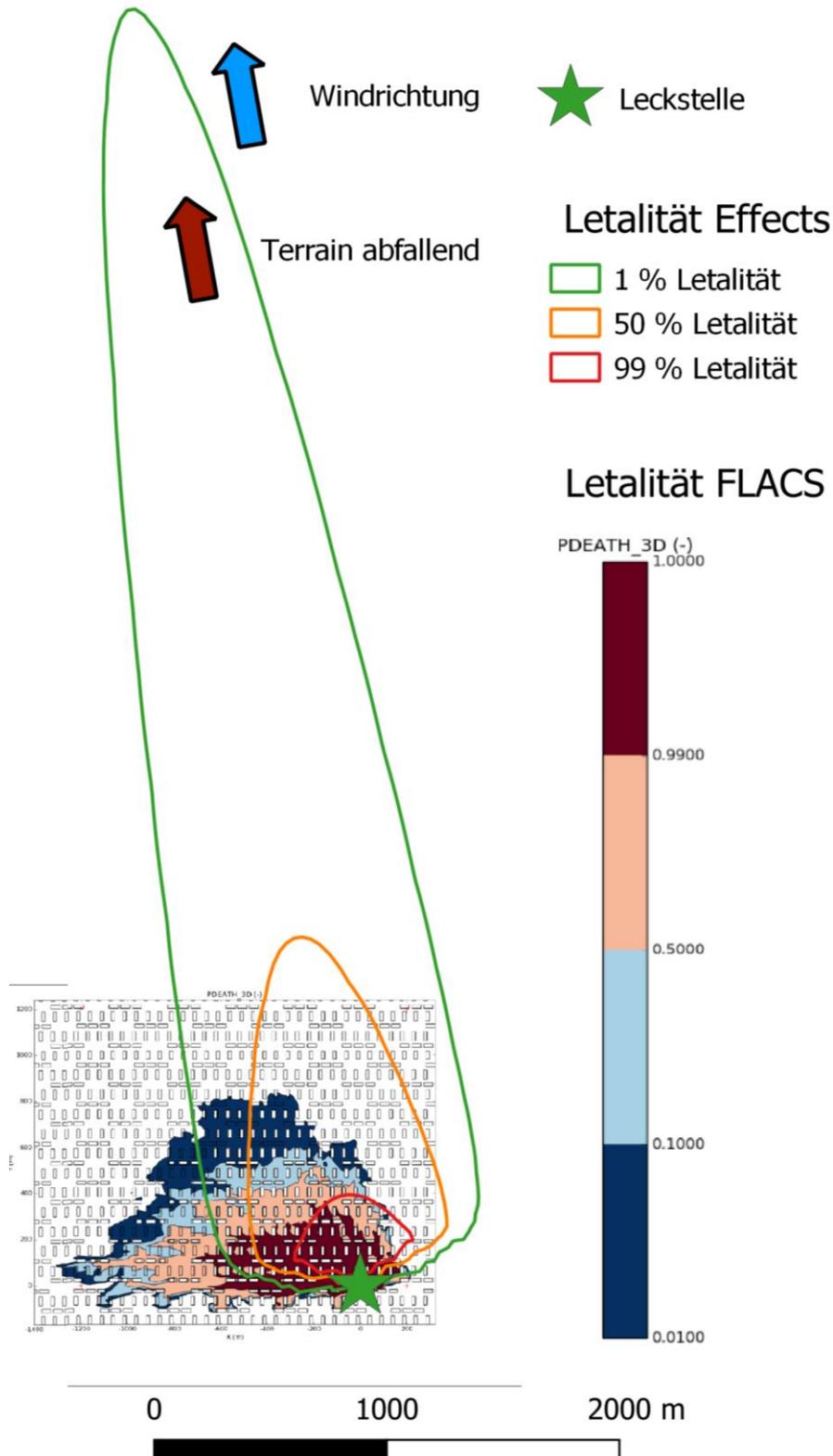
4.3.3 Szenario 2 "Wohnblocks"

Abb. 3 Szenario 2 "Wohnblocks": Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8000 s) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 13.9.2019)



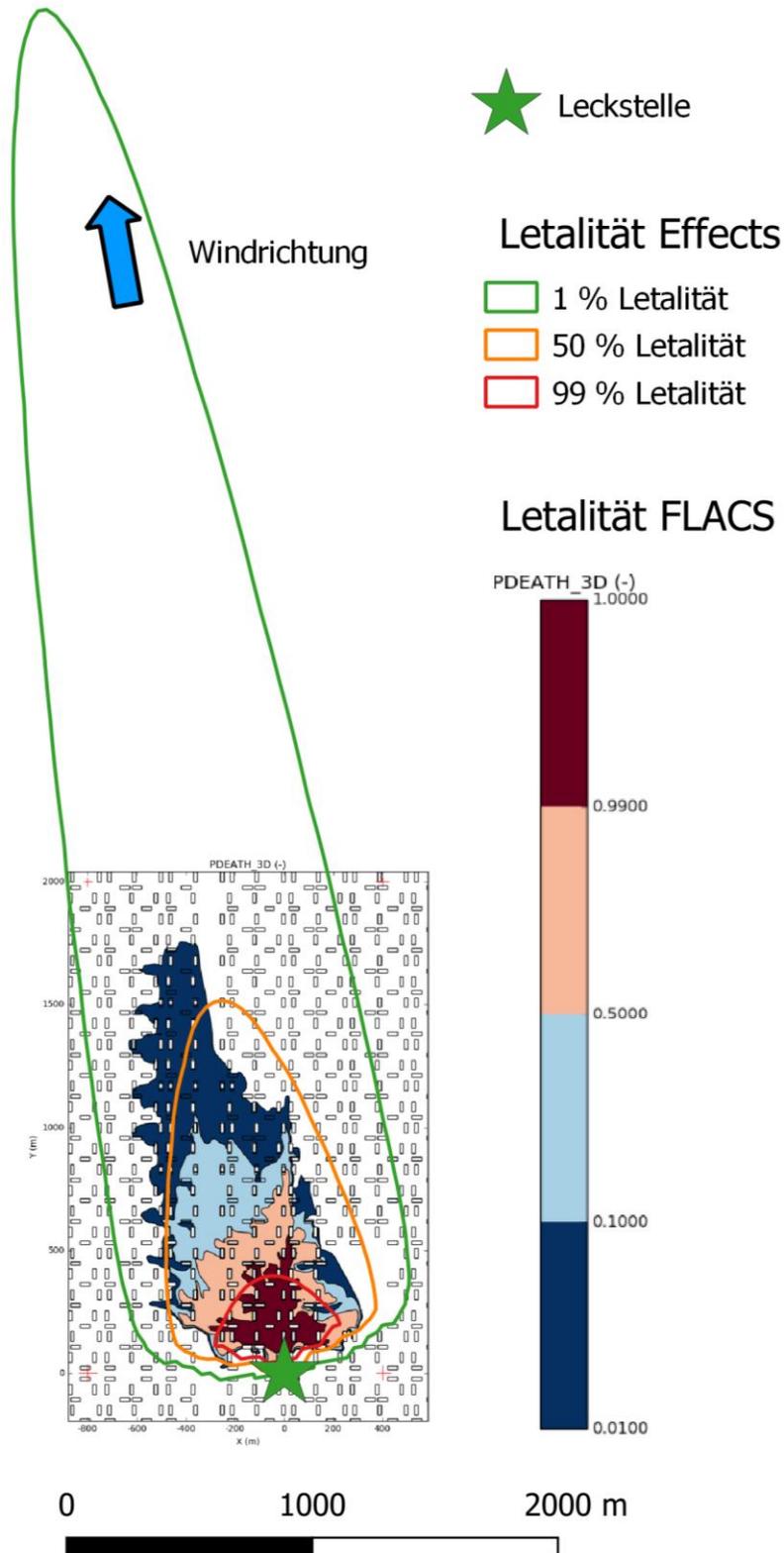
4.3.4 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Abb. 4 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8000 s, ebenes Gelände) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 13.9.2019)



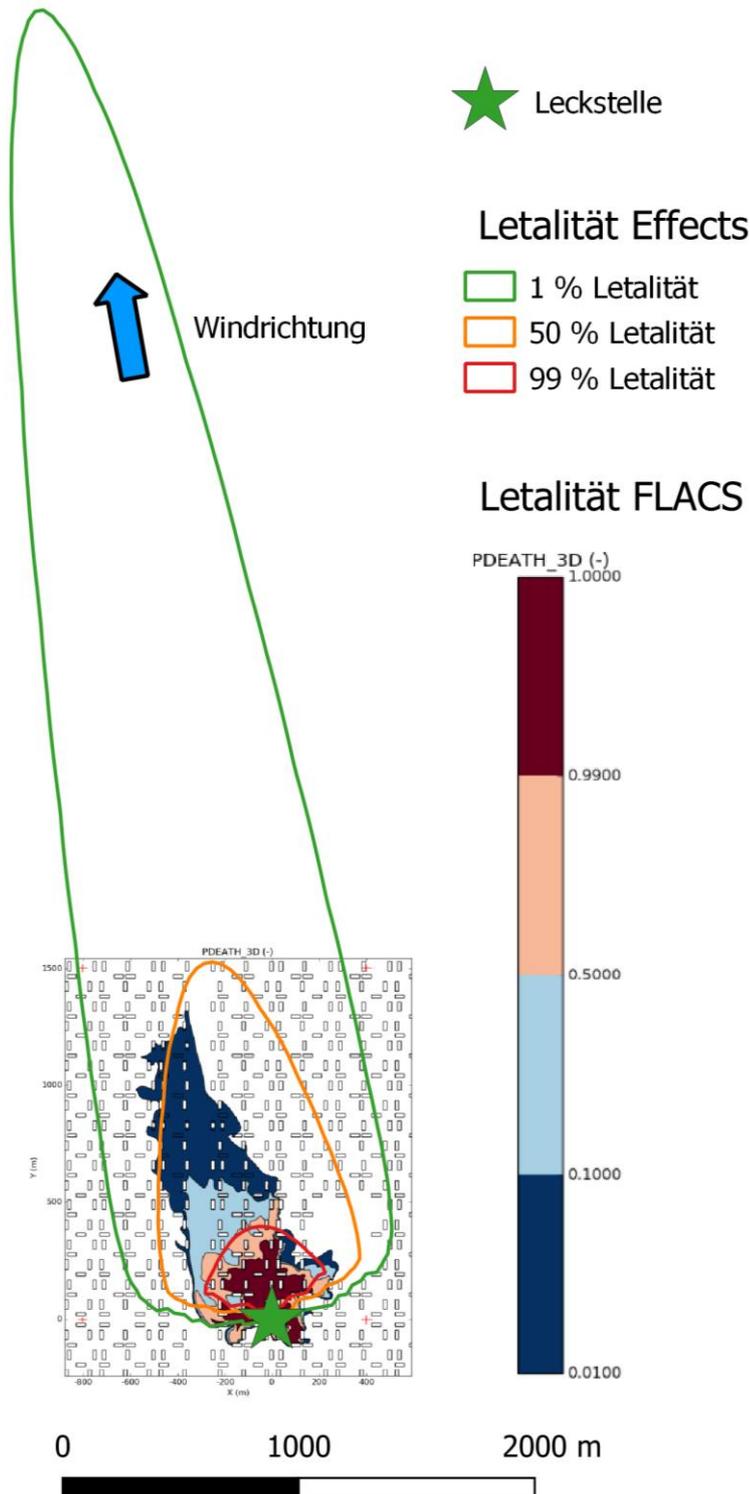
4.3.5 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Abb. 5 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8000 s) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 3.4.2020)



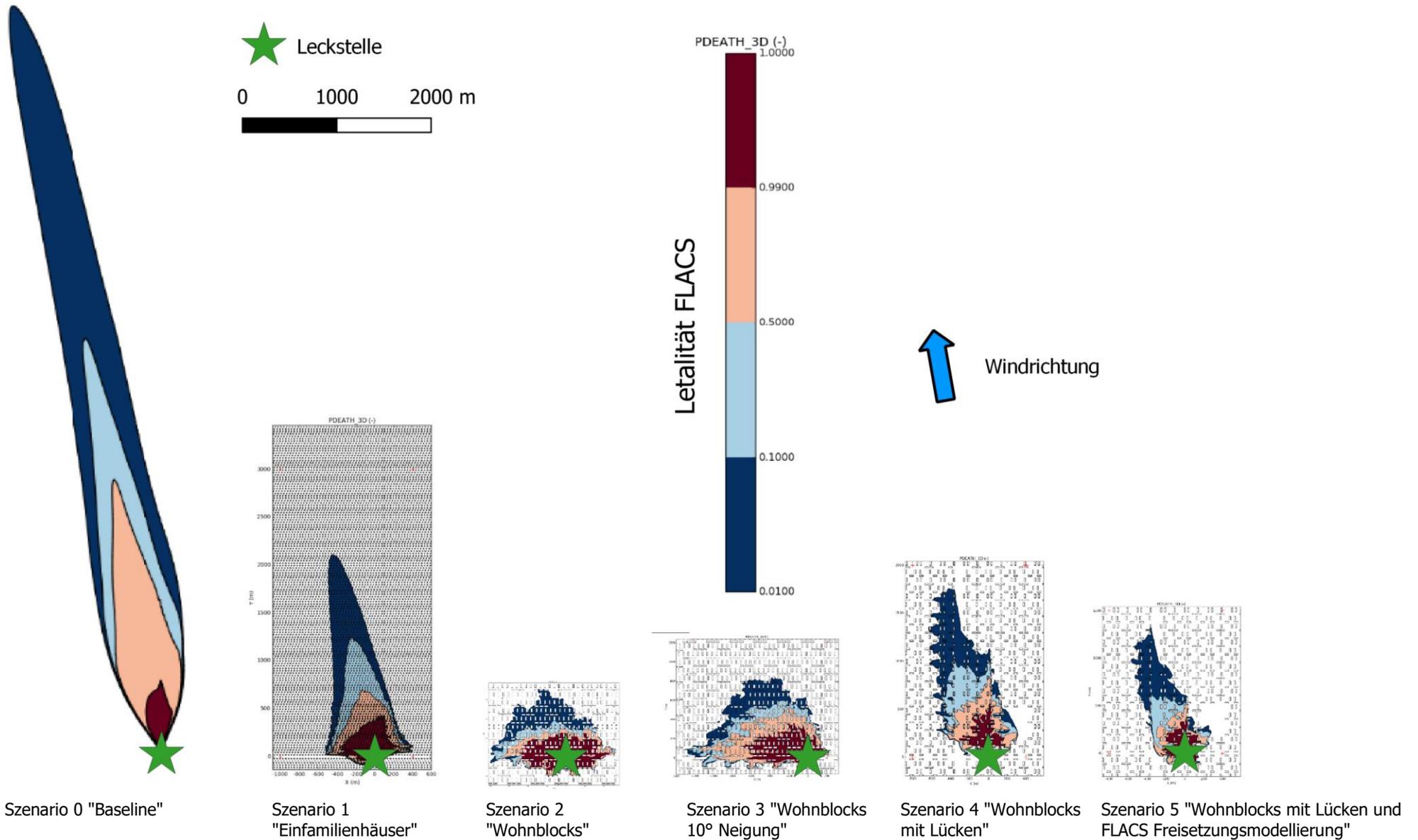
4.3.6 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Abb. 6 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung " Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für EFFECTS (Oberflächenrauigkeit 3 m, Expositionszeit 8000 s, ebenes Gelände) und für FLACS (Quelle FLACS Berechnung: Gexcon AS, 14.8.2020)



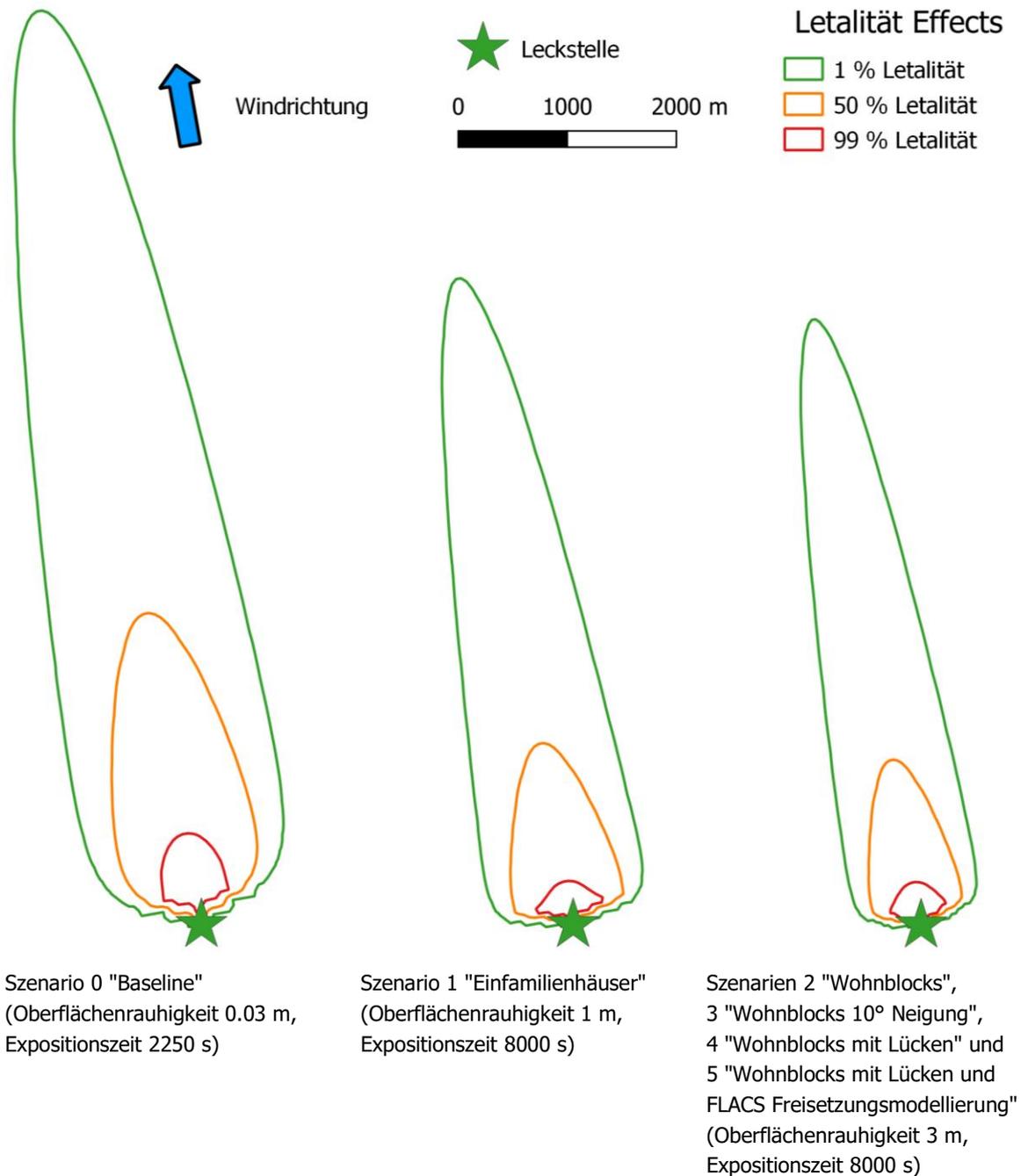
4.3.7 Vergleich FLACS

Abb. 7 Masstäblicher Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für die verschiedenen FLACS-Rechenläufe (Quelle FLACS Berechnungen: Gexcon AS, 13.9.2019, 3.4.2020, 14.8.2020)



4.3.8 Vergleich EFFECTS

Abb. 8 Massstäblicher Vergleich Isolinien Letalität 1.5 m über Boden für die verschiedenen EFFECTS-Rechenläufe



5 Auswertung der Ergebnisse

(Für detaillierte Auswertungen siehe Anhang B)

5.1 Grosse flache Ebene ("Baseline")

Beim Szenario 0 "Baseline" sind die Reichweiten bei den Letalitäten bei beiden Tools praktisch identisch, während die Flächen für die Letalitätsschwellenwerte bei FLACS weniger als halb so gross ausfallen als bei EFFECTS. Der Grund dafür ist vor allem die deutlich schmalere Wolkenform bei FLACS. Vor allem aufgrund der kleineren betroffenen Fläche ist bei FLACS auch die letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche und damit das potentielle Schadensausmass weniger als halb so gross als bei EFFECTS.

Gemäss LNG-Modellevaluation durch das US DOT tendiert FLACS im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten im offenen Gelände dazu, die Wolkenbreite um einen Faktor 2 bis 4 zu unterschätzen. In Windkanalexperimenten, d.h. unter konstanten Laborbedingungen zeigt sich diese Tendenz auch, aber in deutlich geringerem Ausmass. Die Ursache dafür mag darin liegen, dass die CFD Berechnung mit konstanten Rahmenbedingungen - insbesondere für das einströmende Windfeld - durchgeführt werden. Diese Rahmenbedingungen liegen näher an den kontrollierten Laborbedingungen im Windkanal als an der dynamischeren Situation einer Freisetzung im Freien, wo z.B. Fluktuationen des Windfeldes auftreten.

In EFFECTS werden diese Fluktuationen in einer pauschalen Form mit einberechnet, so dass sich eine breitere Gaswolke ergibt.

Die ev. bei FLACS vorhandene Tendenz zum Unterschätzen der Wolkenbreite sowie das Einberechnen von Fluktuationen bei EFFECTS sind mögliche Erklärungen für die Unterschiede zwischen der Wolkenbreite bei den FLACS- und EFFECTS-Ergebnissen beim Szenario 0 "Baseline".

Allerdings wurde für den FLACS Rechenlauf für Szenario 0 "Baseline" die EFFECTS-Freisetzungsmodellierung verwendet. Diese weicht deutlich von der Freisetzungsmodellierung, wie sie mit den Tools und Techniken von FLACS durchgeführt würde, ab, wie der Vergleich der EFFECTS-Freisetzungsmodellierung mit der FLACS-Freisetzungsmodellierung in Szenario 5 zeigt. Es ist davon auszugehen, dass für die FLACS-Berechnungen im Rahmen der Modellevaluation durch das US DOT nicht die EFFECTS-Freisetzungsmodellierung verwendet wurde.

Die Unterschiede zwischen der Freisetzungsmodellierung von EFFECTS und FLACS können sich deutlich auf das Letalitätsergebnis einer FLACS-Berechnung auswirken, wie der Vergleich der FLACS-Rechenläufe von Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" zeigt. Wie sich die unterschiedlichen Freisetzungsmodellierungen beim Szenario 0 "Baseline" auf das Ergebnis der FLACS-Berechnungen auswirken, könnten nur Vergleichsrechnungen aufzeigen. Für das Szenario 0 "Baseline" wurden keine solche Vergleichsrechnungen durchgeführt. Ob die Erkenntnisse aus der Modellevaluation durch das US DOT auf die vorliegenden Ergebnisse

der FLACS-Berechnungen für das Szenario 0 "Baseline" mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung anwendbar sind, ist deshalb unbekannt.

Dazu ist auch zu erwähnen, dass gemäss Gexcon AS CFD Tools grundsätzlich nicht darauf ausgelegt sind, um den Fernbereich einer Gasfreisetzung in einer grossen, flachen Umgebung zu untersuchen. Das äussert sich auch dadurch, dass aufgrund der grossen Ausbreitungsdistanzen in grossen, flachen Umgebungen sehr grosse Simulationsvolumen nötig werden, was wiederum zu sehr langen Rechendauern führt. Solche Berechnungen in grossen, flachen Umgebungen können gemäss Gexcon AS mit Integralmodellen mit deutlich weniger Aufwand durchgeführt werden.

FLACS sollte gemäss Angabe von Gexcon AS aber zuverlässige Resultate in solchen grossen flachen Umgebungen liefern, vorausgesetzt, der Gasaustritt wird passend modelliert und es wird ein genügend grosses Simulationsvolumen verwendet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Gasaustritt durch die Herstellerfirma Gexcon AS im technischen Sinn korrekt modelliert wurde. Welche der beiden Freisetzungsmodellierungen, FLACS oder EFFECTS, besser der Realität entspricht, wurde für die vorliegende Studie aber nicht näher abgeklärt. Ob der FLACS-Rechenlauf mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung für Szenario 0 "Baseline" zuverlässige Resultate liefert, bleibt deshalb unklar. Diese Unsicherheiten sind bei den EFFECTS-Ergebnissen aber gleichermaßen vorhanden (siehe dazu auch Kapitel 5.4).

5.2 Überbaute Szenarien

Die Berechnungen für die Szenarien mit Einfamilienhaus- und Wohnblocküberbauung (Szenarien 1 bis 5) zeigen bei beiden Tools einen deutlichen Einfluss des Überbauungsgrades in Form der Geometrie bei FLACS und in Form der entsprechenden Oberflächenrauigkeit bei EFFECTS auf das Ausbreitungsverhalten des Chlors. Bei FLACS fällt dieser Einfluss jedoch um ein vielfaches stärker aus als bei EFFECTS.

Dies führt bei den Einfamilienhaus- und Wohnblockszenarien (Nr. 1 bis 5) zu erheblichen Differenzen zwischen den beiden Tools, die bei konkreten Anwendung in Störfall-Risikobetrachtungen zu einem völlig anderen Risikobild führen können. Vor allem die Bereiche mit Letalitäten unter 99 % fallen bei den Szenarien Nr. 1 bis 5 bei FLACS viel kleiner aus als bei EFFECTS. Dies ist der hauptsächliche Grund dafür, dass sich in diesen Szenarien bei FLACS ein gegenüber EFFECTS um einen Faktor 4 bis 7 kleineres potentielles Schadensausmass ergibt.

Die Bereiche mit Letalitäten über 99 % hingegen fallen bei einigen überbauten Szenarien (Szenario 1 "Einfamilienhäuser", 2 "Wohnblocks" und 3 "Wohnblocks mit 10° Neigung") bei FLACS grösser aus als bei EFFECTS. Auch bei den anderen beiden überbauten Szenarien (4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung") ist die Differenz zwischen FLACS und EFFECTS bei den Letalitäten >99 % deutlich kleiner als bei den Letalitäten unter 99 %. Ein Grund dafür könnte sein, dass FLACS die Wirkung der Gebäude als Ausbreitungshindernis im Gegensatz zu EFFECTS berücksichtigt. Dadurch ist bei FLACS die Ausbreitung und Verdünnung des

freigesetzten Chlorgases behindert, so dass in der Umgebung der Freisetzung höhere Chlorkonzentrationen entstehen, während die Verdünnungsfahne mit den tieferen Konzentrationen und Letalitäten aufgrund der Hinderniswirkung der Gebäude bei FLACS deutlich kleiner ausfällt als bei Effects.

Zudem sind bei FLACS teilweise andere Areale betroffen als bei EFFECTS. Besonders deutlich treten diese Unterschiede bei den Szenarien 2 "Wohnblocks" und 3 "Wohnblocks 10° Neigung" auf.

Erstaunlicherweise liegen die Differenzen zwischen den EFFECTS- und FLACS-Letalitätsergebnissen (Reichweite, betroffene Flächen) beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei den Szenarien mit Wohnblockbebauung (Szenario 2 bis 5).

Die erheblichen Grössenunterschiede zwischen EFFECTS und FLACS bei den Letalitätsbereichen könnten neben der unterschiedlichen Berücksichtigung der Gebäude in den beiden Tools auch teilweise dadurch verursacht sein, dass FLACS gemäss LNG-Modell-evaluation durch das US DOT die Konzentrationen bei Situationen mit Hindernissen im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten generell unterschätzt. Dies ist jedoch kein FLACS-spezifischer Effekt. Bei anderen CFD Tools ist diese Tendenz - soweit überhaupt untersucht - noch stärker ausgeprägt. Für LNG-Berechnungen mit FLACS empfiehlt das US DOT deshalb, einen Sicherheitsfaktor 2 auf die Konzentrationen anzuwenden. Gemäss Angabe von Gexcon zeigen andere Vergleichsrechnungen mit Freisetzungsexperimenten in Situationen mit Hindernissen jedoch nicht dasselbe Bild wie die Evaluation der PHMSA.

Für EFFECTS stehen uns entsprechend detaillierte Angaben nicht zur Verfügung.

Bei den überbauten Szenarien (Nr. 1 bis 5) treten bei den FLACS-Berechnungen sichtbare Ablenkungseffekte durch die Gebäudegeometrie auf. Besonders deutlich ist der Ablenkungseffekt beim Szenario 2 "Wohnblocks" bei der FLACS-Berechnung sichtbar. Der Gasstrahl prallt beim Szenario 2 "Wohnblocks" nach der Freisetzung auf einen West-Ost orientierten Wohnblock auf und wird in westliche und östliche Richtung umgelenkt. Ebenfalls ist bei den Szenarien 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" eine Beeinflussung durch den in Nord-Süd-Richtung verlaufenden, nur wenig von der Windrichtung abweichenden Korridor gut sichtbar. Das Chlorgas breitet sich bevorzugt in Richtung des Korridors aus.

Solche Effekte können beim Vorhandensein von kanalisierenden oder ablenkenden Elementen, wie sie in der Realität mit Strassen, Gewässern, topographischen Elementen etc. oft vorhanden sind, zum Tragen kommen. EFFECTS kann diese Effekte naturgemäss nicht abbilden.

Insgesamt zeigt sich in den FLACS-Berechnungen ein sehr starker Einfluss der Geometrie. Auch kleinere Unterschiede bei der Geometrie können zu sehr unterschiedlichem Ausbreitungsverhalten führen. Dies ist gut beim Vergleich der Szenarien 2 "Wohnblocks" und 4 "Wohnblocks mit Lücken" sichtbar. Die beiden Szenarien unterscheiden sich voneinander durch eine etwas aufgelockerte Bebauung, vermeiden des Aufpralls des Gasstrahls auf eine Gebäudefront und den Korridor in Szenario 4 "Wohnblocks mit

Lücken". Die Gebäudeabmessungen und alle übrigen Parameter der Simulation sind gleich. Trotzdem gibt es grössere Unterschiede bei den betroffenen Arealen.

Die Geometrie wurde in den vorliegenden Beispielen in Form der Bebauung betrachtet. Es ist aber davon auszugehen, dass auch andere Landschaftselemente oder topographische Formen einen erheblichen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten des Chlorgases haben können.

5.3 Hangneigung

Die FLACS-Ergebnisse für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" zeigen einen deutlichen Einfluss der Hangneigung auf die Letalitäten. Sie führt bei der Wohnblocküberbauung aber nicht zu völlig von der Situation ohne Neigung abweichenden Ergebnissen. Dies könnte auch daran liegen, dass die dichte Wohnblockbebauung die Ausbreitung entlang dem Gefälle stark blockiert. Unter anderen Bedingungen, beispielsweise in weniger dicht bebauten Situationen kommt die Hangneigung ev. stärker zum Tragen. Gemäss LNG-Modellevaluation durch das US DOT tendiert FLACS im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten dazu, die Konzentrationen ab einer Hangneigung von mehr als 4 bis 8.6 % zu unterschätzen. Auch dieser Effekt ist nicht FLACS-spezifisch, sondern er tritt – soweit überhaupt entsprechende Angaben verfügbar sind - bei anderen CFD Tools noch stärker auf. In der Realität könnte deshalb der Einfluss der Hangneigung auf die Letalitäten stärker ausfallen als in den FLACS-Berechnungen.

Zusätzlich zeigt sich beim Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" gegenüber Szenario 2 "Wohnblocks" eine deutliche Verschiebung der betroffenen Flächen in westlicher Richtung. Dadurch wird deutlich, dass die kombinierte Wirkung von Überbauung, Wind und Neigung zu unerwarteten Effekten wie der Verschiebung der betroffenen Flächen in westliche Richtung führen kann.

5.4 Modellierung Austritt (Freisetzung, Verdampfung etc.)

Das Verhalten des Chlors beim Austritt und Flash, der Lachenbildung und Verdampfung bis zur Expansion des Gasstrahls ist in der Realität stark von der konkreten Situation abhängig. Es spielt beispielsweise eine grosse Rolle, ob die Freisetzung aus der Gasphase des Behälters erfolgt, oder ob sich das Leck unterhalb des Flüssigkeitsspiegels befindet. Auch Form, Grösse und Ausrichtung des Lecks haben einen grossen Einfluss. Die Austrittsrichtung, d.h. ob die Freisetzung nach oben, waagrecht oder zum Boden hin erfolgt, hat ebenfalls einen grossen Einfluss. Bei einem Austritt zum Boden hin wird es eher zur Lachenbildung kommen und der Impuls der Freisetzung wird reduziert. Somit kann das Verhalten des Chlors je nach konkreter Situation unterschiedlich ausfallen.

Die Austrittsmodellierungen von EFFECTS und FLACS unterscheiden sich allerdings auch stark, wenn in beiden Tools dieselbe Situation modelliert wird. Besonders auffallend sind die Ergebnisse bei Rainout und Lache: Während sich bei der in der vorliegenden Studie simulierten kontinuierlichen Freisetzung in EFFECTS keine Lache bildet, regnen bei der

Austrittsmodellierung von FLACS knapp 75 % des freigesetzten Chlors in die Lache aus und verdampfen dort während ca. 25 min. Der nach dem Rainout verbleibende Gasstrahl hat bei der FLACS-Austrittsmodellierung einen deutlich grösseren Durchmesser als bei EFFECTS, trotz kleinerer in der Gasphase verbleibenden Gasmenge bei der FLACS-Austrittsmodellierung. Dadurch ergibt sich eine geringere Strömungsgeschwindigkeit des Gasstrahls bei der FLACS-Austrittsmodellierung.

Diese Unterschiede bei der Austrittsmodellierung führen zu einem deutlich kleineren Anfangsimpuls des freigesetzten Chlorgases bei der FLACS-Austrittsmodellierung aufgrund der impulslosen Verdampfung aus der Lache und der kleineren Strömungsgeschwindigkeit des verbleibenden Gasstrahls. Zudem führt die Lachenbildung zu einer starken Verzögerung der Freisetzung des Chlorgases in die Luft.

Beim Vergleich der FLACS-Rechnungen für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" (FLACS-Rechenlauf mit Verwendung der EFFECTS-Austrittsmodellierung) und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmmodellierung" (FLACS-Rechenlauf mit Verwendung der FLACS-Austrittsmodellierung) führen diese Unterschiede zu kleineren Reichweiten, kleineren Letalitätsflächen und zu einem etwa 40 % kleineren potentiellen Schadensausmass. Ebenfalls ist die Ausbreitung des Chlorgases bei der Variante mit FLACS-Austrittsmodellierung etwas weniger stark in Impulsrichtung orientiert.

Die grossen Unterschiede zwischen FLACS und EFFECTS bei der Modellierung des Austritts- und Verdampfungsvorgangs zeigen, dass bei der Abbildung dieser Vorgänge in den Modellen in der Fachwelt keine Einigkeit besteht. Diese Unterschiede können sich deutlich auf das Ergebnis auswirken. Von diesen Unsicherheiten sind FLACS und EFFECTS gleichermaßen betroffen.

5.5 Ergebnisse oberhalb der ersten Meter über Boden

Bei allen Szenarien ergeben sich grosse Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden. Im Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden ist deshalb mit modellierten Werten grosse Vorsicht geboten. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Die entsprechenden Angaben dazu finden sich z.B. in Anhang B 2.1.1.1. Tab. 13 und Anhang B 2.2.1.1 Tab. 17, Anhang B 2.3.1 zu Szenario 0 "Baseline", Anhang B 3.1.1.1 Tab. 23, Anhang B 3.3.1.3, Anhang B 4.1.1.1 Tab. 28, Anhang B 4.1.2.2, Anhang B 4.2.1.1 Tab. 33, Anhang B 4.2.2.1 Tab. 38, Anhang B 4.2.3.2, Anhang B 4.2.4.2 und Anhang B 4.3.1.3 zu Szenario 1 "Einfamilienhäuser" und Szenario 2 "Wohnblocks" sowie an den entsprechenden Stellen zu den weiteren Szenarien in Anhang B.

5.6 Zeitlicher Konzentrationsverlauf

Zum Teil treten auch bei den Ganglinien zum zeitlichen Konzentrationsverlauf sowohl in Bodennähe als auch in 30.5 m Höhe deutliche Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS auf, so dass auch hier beim Umgang mit den Ergebnissen Vorsicht geboten ist.

Dies kann beispielsweise einen Einfluss auf Berechnungen der Chlorkonzentration in Gebäuden haben (z.B. Berechnung Chlorkonzentration im Gebäude anhand der Luftwechselrate im Gebäude). Da die Unterschiede bei den Ganglinien sowohl in Bodennähe als auch in 30.5 m Höhe auftreten, sind sowohl Berechnungen bei Gebäuden, bei denen die Frischluft in Bodennähe angesaugt wird wie auch bei Gebäuden mit Frischluftansaugung auf dem Dach von den Unsicherheiten betroffen.

Die entsprechenden Angaben zum zeitlichen Konzentrationsverlauf finden sich z.B. in Anhang B 2.1.2.1 Abb. 24, Anhang B 2.2.2.1 Abb. 30ff, Anhang B 2.3.3, Anhang B 3.1.2.1 Abb. 40, Anhang B 3.3.3.3, Anhang B 4.1.2.1 Abb. 46, Anhang B 4.1.2.2 Abb. 49, Anhang B 4.2.3.1, Anhang B 4.2.3.2, Anhang B 4.2.4.1, Anhang B 4.2.4.2, Anhang B 4.3.3.3 sowie an den entsprechenden Stellen zu den weiteren Szenarien in Anhang B.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Übersicht

Grundsätzlich besteht der Vorteil von CFD Berechnungen gegenüber Integralmodellen wie EFFECTS in der detaillierten Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und des Strömungsverhaltens der unteren atmosphärischen Schichten sowie der detaillierten Darstellung des räumlichen und zeitlichen Ausbreitungsverhaltens des Chlorgases.

Die herkömmlichen Integralmodelle für Gasausbreitungsberechnungen können komplexe Geometrien wie Überbauungen nicht berücksichtigen. Das Integralmodell in EFFECTS berücksichtigt beispielsweise den Bebauungsgrad oder sonstige Strömungshindernisse auf der Erdoberfläche nur teilweise über den Parameter der Oberflächenrauigkeit über den ganzen Simulationsbereich und ohne räumliche Differenzierung. Der Parameter "Oberflächenrauigkeit" in EFFECTS berücksichtigt somit die Anordnung und Form von Gebäuden, unterschiedlich dichte Verteilung der Hindernisse über den Simulationsbereich, Ablenkungseffekte an Fassaden, Korridore etc. nicht.

Mit den Vergleichsrechnungen von EFFECTS und FLACS konnte gezeigt werden, dass der fundamental verschiedene Umgang mit Strömungshindernissen in den Integralmodellen und in den CFD Tools vor allem in überbauten Situationen zu erheblichen Differenzen zwischen den Ergebnissen der beiden Tools führt.

Hinzu kommt, dass die beiden Tools auch die Anfangsphase der Freisetzung vom Austritt aus dem Behälter über den Flash bis zur Expansion des Gasstrahls sehr verschieden berechnen, was zu unterschiedlichen Resultaten führt. Diese Anfangsphase wird auch in FLACS nicht mit CFD berechnet, sondern mit einem separaten Tool ausserhalb des CFD Simulators. Diese Differenzen entstehen somit nicht durch den Einsatz unterschiedlicher Modellierungsmethoden, d.h. CFD oder Integralmodell, sondern sie sind der Ausdruck davon, dass sich zur Physik dieser hochdynamischen Anfangsphase bei der Freisetzung verflüssigter Gase scheinbar kein einheitliches Verständnis in der Fachwelt etabliert hat und grosse Unsicherheiten oder Interpretationsspielraum bei der Abbildung dieser Anfangsphase in den Modellen bestehen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die Wahl des Tools, mit dem die Gasausbreitung berechnet wird, in vielen Fällen ausschlaggebend für das Ergebnis sein wird.

6.2 Basis für Empfehlungen zur Modellierung von Chlorgasausbreitung

6.2.1 Relevante Modelleigenschaften

In den folgenden Kapiteln wird deshalb versucht, auf Basis der in der vorliegenden Studie gewonnenen Erkenntnisse Empfehlungen für den Einsatz von Tools zur Modellierung von Chlorgasausbreitungen herzuleiten. Die Empfehlungen sollen nach Möglichkeit eine Unterstützung bei der Wahl, welches Tool in welcher Situation am besten verwendet wird, sein. Bei diesen Empfehlungen steht das Ziel im Vordergrund, mit den Modellrechnungen ein möglichst gutes Abbild der Realität zu erreichen.

Folgende Eigenschaften der Tools stehen dabei im Vordergrund:

6.2.1.1 Zu erwartende Unterschiede bei den Ergebnissen der verschiedenen Tools

Die Wahl eines bestimmten Tools aus verschiedenen Optionen ist nur dann relevant, wenn damit zu rechnen ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Tools unterschiedlich ausfallen. Sind die Ergebnisse genügend ähnlich, kann für die Modellierung die weniger aufwändige Variante gewählt werden. Auch bei ähnlichen Ergebnissen verschiedener Tools muss die Validität und Konservativität (siehe nachfolgende Kapitel 6.2.1.2 und 6.2.1.3) beachtet werden, weil z.B. identische Submodelle in verschiedenen Tools zu vergleichbaren, aber trotzdem stark von der Realität abweichenden Ergebnissen führen können.

Einige Unterschiede bei den Ergebnissen lassen sich anhand der im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Vergleichsrechnungen mit FLACS und EFFECTS aufzeigen.

6.2.1.2 Validität des Tools für die betreffende Situation

Unter Validität wird eine Aussage darüber, wie nahe die Simulationsergebnisse eines Tools bei der Realität liegen, verstanden. Die Validität ergibt sich aus dem Vergleich von Messwerten aus realen Freisetzungen mit den Ergebnissen der Abbildung derselben Freisetzung im Modell. Es stellt sich also die Frage, welches Tool im konkreten Anwendungsfall näher bei der Realität liegt, die Validität ist also ein wichtiges Kriterium für den Einsatz eines Modells. Abklärungen zur Validität waren allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. So kann im Rahmen dieser Studie nur ein beschränkter Informationsstand zur Validität in den Empfehlungen berücksichtigt werden.

6.2.1.3 Konservativität des Tools in der betreffenden Situation

Ein Modell kann die Realität nie absolut genau wiedergeben und eine Validität von 100 % erreichen. Gerade bei unsicherer Validität ist es wichtig zu wissen, ob ein Tool die Realität in bestimmten Situationen eher über- oder unterschätzt. Die Konservativität ergibt sich ebenfalls aus dem Vergleich von Messwerten realer Freisetzungen mit den entsprechenden Modellergebnissen und ist ein wichtiges Kriterium für den Einsatz des Modells. Abklärungen zur Konservativität waren ebenfalls nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

6.2.1.4 Aufwand für die Durchführung der Simulation

Bei vergleichbaren Ergebnissen kann das in der Anwendung weniger aufwändige bzw. das kostengünstigere Tool gewählt werden.

6.2.2 Struktur für situationsabhängige Empfehlungen zur Anwendung von EFFECTS und FLACS

Teilweise sind die Modelleigenschaften "Unterschiede bei den Ergebnissen beim Vergleich der Tools", "Validität", "Konservativität" und "Aufwand für die Durchführung der Simulation" durch die Architektur oder den Typ des Modells (z.B. Integral- oder CFD-Modell) bedingt. Beispielsweise ist es in bestimmten geometrischen Situationen für ein Integralmodell gar nicht möglich, eine hohe Validität zu erreichen, da Integralmodelle die Geometrie gar nicht detailliert berücksichtigen können. Als weiteres Beispiel ist eine CFD-Rechnung in der Regel mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden als eine Berechnung mit einem Integralmodell. Diese Eigenschaften sind weitgehend durch den Typ des Modells bedingt.

Es gibt aber auch unter den Modellen und Tools desselben Typs (z.B. verschiedene Integralmodelle) teilweise erhebliche Unterschiede bei den Modelleigenschaften. So ist beispielsweise die Validität für den vorliegenden Anwendungszweck bei den verschiedenen CFD-Tools sehr unterschiedlich dokumentiert. Ebenfalls sind grosse Abweichungen bei den Ergebnissen verschiedener Integralmodelle bekannt, und es ist davon auszugehen, dass solche Abweichungen auch bei den CFD-Tools bestehen.

Die Herleitung von Empfehlungen kann deshalb nicht auf der Ebene des Modelltyps erfolgen, d.h. ob ein CFD-Modell oder ein Integralmodell eingesetzt werden soll, sondern die Empfehlungen müssen in der vorliegenden Studie direkt auf die beiden Tools FLACS und EFFECTS bezogen werden. Dabei ist bei FLACS noch zwischen den beiden in der vorliegenden Studie betrachteten Varianten der Austrittsmodellierung zu unterscheiden (Austrittsmodellierung mit EFFECTS und Austrittsmodellierung mit FLACS). Die Übertragbarkeit auf andere Tools desselben Typs ist nicht gesichert.

Somit stellen sich für die Herleitung von Empfehlungen für EFFECTS oder FLACS die folgenden Fragen:

- 1) In welchen Situationen (verschiedene Bebauungen, Hangneigung) genügt der Einsatz von EFFECTS, und wann ist der mit deutlich mehr Aufwand verbundene Einsatz von FLACS notwendig?
- 2) Falls FLACS eingesetzt werden soll: Wie soll die Austrittsmodellierung durchgeführt werden? Soll sie mit den Tools des FLACS-Pakets durchgeführt oder von EFFECTS übernommen werden?

Im Fokus der vorliegenden Studie steht vor allem die Geometrie, insbesondere in Form der Bebauung. Der grösste Teil der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Vergleichsrechnungen bezieht sich auf diesen Aspekt. Ergänzend wurde noch die Hangneigung in Form einer weiteren Vergleichsrechnung betrachtet.

6.2.3 Limits der Anwendung

Einzigste Informationsquelle zu den Unterschieden bei den Berechnungsergebnissen von EFFECTS und FLACS sind die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten sechs Vergleichsrechnungen.

Jede CFD-Berechnung bildet einen exakt definierten Einzelfall ab, für den eine Vielzahl von Vorgaben, von der Austrittsmodellierung über die Meteosituation bis zur Geometrie der Umgebung festgelegt werden. Die Ergebnisse aus einer CFD-Berechnung sind dann für genau diesen Fall gültig. Jede Änderung eines in den Vorgaben enthaltenen Parameters kann sich im Zusammenspiel mit allen anderen Vorgaben mehr oder weniger stark auf das Ergebnis auswirken. Die Wirkung einer Parameteränderung auf das Ergebnis ist teilweise schlecht vorhersehbar.

Die in den vorliegenden Berechnungen festgestellten Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS können deshalb stark durch einzelne Charakteristika des im Szenario abgebildeten Einzelfalls bestimmt sein. Damit verbundene Unsicherheiten werden kleiner, je grösser die Anzahl der durchgeführten Variantenrechnungen ist.

Im Rahmen des für diese Studie zur Verfügung stehenden Budgets konnte nur eine beschränkte Anzahl Beispielszenarien simuliert werden. Es handelt sich dabei zwar um sehr aussagekräftige Beispiele, aber eben nur um eine kleinere Zahl von Einzelfällen.

Bei den Beispielszenarien handelt es sich um vereinfachte, repetitive und in einem streng rechtwinkligen Raster angeordnete Geometrien. Alle Szenarien wurden mit derselben Art der Freisetzung (kontinuierliche Freisetzung), derselben Leckgrösse und –orientierung sowie derselben Meteosituation berechnet. Mit einer Ausnahme wurde bei allen Szenarien dieselbe Modellierung von Quellterm, Phasenwechsel, Rainout und Expansion des Gasstrahls von EFFECTS verwendet, auch für die FLACS-Berechnungen. Ebenfalls wurde mit einer Ausnahme bei allen Berechnungen dieselbe Hangneigung verwendet. Dies ergab sich zwangsläufig aus der Tatsache, dass jedes Szenario durch eine grosse Anzahl Parameter bestimmt wird, von denen aber für jede Variantenrechnung möglichst nur einer variiert werden sollte, um eine bestimmte Veränderung des Ergebnisses möglichst einem bestimmten Parameter zuschreiben zu können. Daraus ergibt sich bei einer beschränkten Anzahl Beispielszenarien, dass ein grosser Teil der Parameter konstant gehalten werden muss. Es ist nicht auszuschliessen, dass Modifikationen dieser Parameter zu anderen Ergebnissen führen würden. Innerhalb dieser konstant gehaltenen Parameter ergaben die punktuellen Variantenrechnungen zur Anordnung der Gebäude, zur Hangneigung und zur Modellierung des Freisetzungsvorgangs bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit ein konstantes Bild der grossen Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS in überbauten Situationen.

Somit können Empfehlungen, die von den Differenzen zwischen den FLACS- und EFFECTS-Ergebnissen in der vorliegenden Studie abgeleitet wurden, nur für die für alle Rechenläufe verwendete gleiche Freisetzungsort, Leckgrösse und Leckorientierung, Meteosituation etc. gelten. Die entsprechenden Parameter sind in Anhang A zusammengestellt. Je weiter die konkrete Situation, für welche eine Wahl zwischen FLACS und EFFECTS getroffen werden muss, von den Parametern in Anhang A abweicht, um so unsicherer ist die Anwendbarkeit solcher Empfehlungen. Ob sich beispielsweise, wenn die Vergleichsrechnungen zwischen

FLACS und EFFECTS statt mit einer kontinuierlichen mit einer grossen instantanen Freisetzung durchgeführt würden, ähnliche Differenzen ergeben würden, ist unbekannt.

Nachfolgend sind einige Möglichkeiten für sinnvolle zusätzliche Variantenrechnungen zusammengestellt, die im Verlauf der Bearbeitung des Projekts aufgetaucht sind, aber in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt werden konnten. Diese Empfehlungen sind nicht abschliessend, da sich neue Fragen aus zusätzlichen Ergebnissen ergeben können.

- 1) Bei den in der vorliegenden Studie betrachteten Szenarien mit Überbauung verlaufen alle Gebäudefassaden parallel entweder in Nord-Süd-Richtung oder West-Ost-Richtung. Dies kann unter anderem das Windfeld in unnatürlicher Weise beeinflussen und zu Ablenkungs- oder Blockadeeffekten führen. Deshalb wäre es sinnvoll, mit FLACS zusätzliche Berechnungen mit weniger einheitlichen, realen Gebäudeanordnungen (z.B. Blockrandbebauungen oder lange zusammengebaute Häuserreihen) und ev. auch realen Topographien durchzuführen. Idealerweise würden für diese Szenarien auch ausgewählte Variantenrechnungen durchgeführt. Dazu wäre in FLACS beispielsweise eine Modellierung des Quellterms bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit mit den FLACS-eigenen Tools einerseits und der Übernahme der entsprechenden Parameter aus EFFECTS andererseits in Betracht zu ziehen. Ebenfalls wären Variantenrechnungen für verschiedene Freisetzungsorte und -richtungen, Leckgrössen/Freisetzungsformen (sofortige und kontinuierliche Freisetzung) und Meteosituationen empfehlenswert.
- 2) Ebenfalls empfehlenswert wäre eine Berechnung des Szenario 0 "Baseline" mit der neuen FLACS-Version FLACS CFD 20, welche die Definition einer Oberflächenrauigkeit innerhalb des Simulationsvolumens erlauben soll. Dadurch würde die Vergleichbarkeit mit den EFFECTS-Berechnungen verbessert. Auch für dieses Szenario wären ausgewählte Variantenrechnungen betr. Modellierung des Quellterms bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit, betr. Meteosituation und Leckgrössen / Freisetzungsformen in Betracht zu ziehen. Die Baseline-Varianten helfen, im Vergleich mit den Varianten mit Gebäuden den Einfluss und die Bedeutung der Geometrielemente unter verschiedenen Rahmenbedingungen aufzuzeigen.
- 3) Der Einfluss der Hangneigung wurde nur bei einem Szenario mit dichter Überbauung untersucht (Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"). Dabei blieb unklar, ob sich die dichte, Nord-Süd und West-Ost ausgerichtete repetitive Überbauung massgeblich auf den Einfluss der Hangneigung auswirkt. Um den Einfluss der Hangneigung ohne zusätzliche Beeinflussung durch die Geometrie zu ermitteln, wird eine Variantenrechnung mit FLACS für das Baseline-Szenario mit geneigtem Terrain empfohlen. Ebenfalls wäre eine Vergleichsrechnung mit einem geneigten Gelände, das in einer Variante mit angepasstem Gravitationsvektor und in einer anderen Variante anhand einer Stufengeometrie abgebildet wird, empfehlenswert. Je nach Ergebnissen sind ev. auch hier Variantenrechnungen betr. Modellierung des Quellterms bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit, zur Meteosituation und zur Leckgrösse/Freisetzungsform in Betracht zu ziehen.

- 4) Generell wird empfohlen, für die verschiedenen Szenarien Variantenrechnungen zur Meteosituation, zu Freisetzungsort und –richtung, zur Leckgrösse/Freisetzungsform und zur Modellierung des Quellterms bis zum vollständigen Verdampfen aller im Gas-Flüssigkeitsstrahl verbliebenen Flüssigkeit durchzuführen.

6.2.4 Unterteilung der Empfehlungen in Bereiche

Bei den Vergleichsrechnungen wurden die folgenden Einflussgrössen variiert:

- Geometrie (Bebauung)
- Geländeneigung
- Austrittsmodellierung

Die Vergleichsrechnungen können somit Hinweise für eine Differenzierung zur Wahl des Tools für diese drei Einflussgrössen geben. Für die letzten beiden Punkte wurde jedoch nur je eine Vergleichsrechnung durchgeführt, so dass die Aussagekraft allenfalls beschränkt ist.

Die Empfehlungen fokussieren auf die Gasausbreitung in Bodennähe, da diese in der Risikoanalytik die grösste Bedeutung hat.

Die Anwendungsbereiche für die Empfehlungen werden deshalb wie folgt unterteilt:

- 1) Ebenes, offenes Gelände Letalität in Bodennähe
- 2) Ebenes, überbautes Gebiet Letalität in Bodennähe
- 3) Geneigtes Gelände und Gelände mit unebener Topographie Letalität in Bodennähe
- 4) Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden

Es wurde zusätzlich geprüft, ob beim überbauten Gebiet eine Differenzierung der Empfehlungen in Einfamilienhausbebauung und Wohnblockbebauung sinnvoll wäre. Mit den Letalitätsergebnissen der Vergleichsrechnungen mit FLACS und EFFECTS lässt sich eine solche Differenzierung jedoch nicht begründen. Die Differenzen zwischen den EFFECTS- und FLACS-Letalitätsergebnissen (Reichweite, betroffene Flächen) beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei den Szenarien mit Wohnblockbebauung (Szenario 2 bis 5).

6.2.5 Erläuterungen zum Aufwand für eine Modellrechnung mit FLACS und EFFECTS

Der effektive Aufwand für eine Modellrechnung ist sowohl bei FLACS wie auch bei EFFECTS stark von der konkreten Situation abhängig. Dabei können folgende Punkte eine wichtige Rolle spielen:

- Ist das zu modellierende Szenario klar vorgegeben, oder muss es entwickelt werden?
- Kann eine bestehende Freisetzungsmodellierung verwendet werden? Oder muss beispielsweise abgeklärt werden, wie eine reale Freisetzung möglichst gut mit den beschränkten Möglichkeiten der Freisetzungsmodelle wiedergegeben werden kann? Handelt es sich um eine kontinuierliche Freisetzung oder um eine instantane Freisetzung z.B. infolge Behälterbersten? Instantane Freisetzungen sind hochdynamische Vorgänge, deren Modellierung sehr schwierig, entsprechend zeitaufwändig und mit grossen Unsicherheiten behaftet ist.
- Muss bei FLACS Rainout und eine Lache simuliert werden? Dazu muss eine Lachenmodellierung integriert werden und das Rechengitter feiner angepasst werden.
- Handelt es sich um eine geringfügige Anpassung einer bestehenden Simulation, oder muss die Simulation neu aufgebaut werden?
- Können bestehende Parametrierungen verwendet werden, d.h. alle Parameter sind klar festgelegt? Oder sind für manche Parameter vertiefte Abklärungen nötig, um den passenden Wert zu bestimmen?
- Sind Parameter mit grossen Unsicherheiten behaftet, deren Auswirkungen auf die Ergebnisse abgewogen werden müssen?
- Müssen Sensitivitätsrechnungen durchgeführt werden?
- Muss man mit mehreren Rechenläufen beispielsweise den Worst-Case suchen?
- Müssen verschiedene plausible Meteosituationen, Austrittsrichtungen etc. bestimmt und durchgerechnet werden?
- Muss man sich mit vielen Rechenläufen beispielsweise an die maximal mögliche Expositionszeit, bei der das Tool noch funktioniert, heranrechnen (EFFECTS)?
- Wird das Modell/Tool in einem Bereich eingesetzt, in dem die Validität gut belegt ist, oder ist die Validität unsicher oder sind Abweichungen von der Realität bekannt? Je nachdem muss man sich mit der Validität des Modells für den konkreten Fall auseinandersetzen und allenfalls eine Abschätzung vornehmen, wie weit das Ergebnis von der Realität abweichen könnte und ob die Abweichungen noch in einem vertretbaren Rahmen liegen.
- Treten technische Probleme auf, z.B. infolge des grossen Simulationsvolumens bei FLACS oder Limiten bei der Expositionszeit bei EFFECTS? Müssen Fehlermeldungen abgeklärt und die Auswirkungen des Fehlers beurteilt werden?

- Kann bei FLACS eine bestehende Geometrie verwendet werden, oder muss eine aussagekräftige Geometrie entwickelt werden? Handelt es sich um eine vereinfachte, repetitive Geometrie, oder soll eine reale Umgebung modelliert werden, z.B. mit Import von Swisstopo Daten? Bei Import von Swisstopo-Daten: Wieviel manuelle Nachbearbeitung der Geometrie ist nötig? Wie komplex ist die Geometrie?
- Genügt eine Berechnung der Letalität, oder müssen z.B. Konzentrationsganglinien untersucht werden, z.B. weil in FLACS die Expositionszeit nicht begrenzt werden kann? Oder muss z.B. in FLACS die Strömungssituation analysiert werden, um den Einfluss der Hindernisse zu untersuchen oder um eine Erklärung für irritierende Berechnungsergebnisse zu finden?
- Müssen Anpassungen bei der Modellierung gemacht werden, z.B. um einen Sicherheitsfaktor zu integrieren?

Der Aufwand für eine EFFECTS- und eine FLACS-Simulation ist deshalb stark vom konkreten Fall abhängig.

Grundsätzlich ist bei einer FLACS-Simulation mit einem deutlich höheren Aufwand zu rechnen als bei einer EFFECTS-Simulation. Die Differenz beim Arbeitsaufwand kann etwa einen Faktor 5 erreichen.

Je nachdem wie in der obigen Liste beispielhaft aufgeführte Einflussgrößen im konkreten Fall zum Tragen kommen, kann die Differenz beim Arbeitsaufwand auch deutlich grösser ausfallen. Beispielsweise unterscheidet sich bei EFFECTS der Arbeitsaufwand für die Simulation einer Freisetzung in einer leeren Ebene nur wenig vom Arbeitsaufwand für eine Freisetzung in städtischem Gebiet, da EFFECTS die komplexe Geometrie des städtischen Gebiets gar nicht erfassen kann. Bei FLACS kann sich der Arbeitsaufwand aufgrund der komplexen Geometrie im städtischen Gebiet deutlich erhöhen. Der Unterschied zwischen dem Arbeitsaufwand einer EFFECTS-Simulation und demjenigen einer FLACS-Simulation ist deshalb stark vom konkreten Einzelfall abhängig und somit variabel. Bei Simulationen in ebenem, weitgehend leeren Gelände ist jedoch von einer kleineren Differenz beim Arbeitsaufwand für eine EFFECTS- und eine FLACS-Berechnung auszugehen als bei Simulationen in komplexen Geometrien in überbautem Gebiet.

Bei der reinen Rechenzeit sind die Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS sehr gross. Auch für eine sehr aufwändige EFFECTS-Berechnung braucht ein normaler PC selten mehr als eine Stunde. Eine FLACS-Berechnung hingegen dauert gerade bei Szenarien im ebenen, offenen Gelände aufgrund der grossen Reichweiten relevanter Chlorkonzentrationen und der damit verbundenen grossen Simulationsvolumen mehrere Wochen. Falls die Simulation aus irgendeinem Grund wiederholt werden muss, dauert die Berechnung erneut mehrere Wochen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Berechnungen zu beschleunigen, indem sie an ein Rechenzentrum ausgelagert werden.

Der Aufwand an Zeit und Ressourcen ist bei einem EFFECTS-Rechenlauf somit deutlich geringer als bei FLACS. Die Ergebnisse stehen bei EFFECTS viel rascher zur Verfügung.

6.3 Empfehlungen zur Anwendung von FLACS und EFFECTS für verschiedene Situationen

6.3.1 Ebenes, offenes Gelände ("Baseline") und Letalität in Bodennähe

6.3.1.1 Unterschiede bei den Ergebnissen

Die Reichweiten der Letalitäten beim EFFECTS- und beim FLACS-Rechenlauf mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung sind sehr ähnlich. Die betroffenen Flächen und das potentielle Schadensausmass sind bei EFFECTS jedoch deutlich grösser als beim FLACS-Rechenlauf mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung.

Wie sich die Ergebnisse eines FLACS-Rechenlaufes mit FLACS-Freisetzungsmodellierung im Vergleich zu EFFECTS verhalten würden, ist unbekannt. Falls sich die unterschiedliche Freisetzungsmodellierung ähnlich auswirken würde wie bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung", wäre bei einem FLACS Rechenlauf für Szenario 0 "Baseline" mit FLACS Freisetzungsmodellierung mit grösseren Unterschieden zu den EFFECTS Ergebnissen zu rechnen als beim FLACS Rechenlauf für Szenario 0 "Baseline" mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung. Ein entsprechender Rechenlauf könnte hier mehr Klarheit bringen.

6.3.1.2 Validität

Ebenes, offenes Gelände entspricht für ein Integralmodell wie EFFECTS einer Standardsituation, auf die solche Modelle zugeschnitten sind. Wir würden deshalb erwarten, dass die Validität des Tools für diese Situation vom Hersteller im Rahmen der Entwicklung des Tools sichergestellt wurde. Wir haben dies jedoch nicht überprüft.

Für FLACS wurden für die vorliegende Studie die verfügbaren Angaben, insbesondere die Zulassung von FLACS durch die Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration PHMSA des US Department of Transportation DOT für LNG-Gasausbreitungsberechnungen, soweit einbezogen, wie es nötig war, um unter den verfügbaren CFD-Tools eine sinnvolle Auswahl für die Durchführung der vorliegenden CFD-Berechnungen zu treffen. Die Vergleichsrechnungen zu Messwerten einer grösseren Zahl von Freisetzungsversuchen im Rahmen der Zulassung von FLACS durch das US DOT für LNG-Gasausbreitungsberechnungen weisen auf eine genügende Zuverlässigkeit der FLACS-Ergebnisse für die Zwecke des US DOT innerhalb der durch das US DOT definierten Grenzen und Vorbehalte hin.

Die PHMSA empfiehlt, FLACS generell mit einem Sicherheitsfaktor von 2 zu verwenden. Bei den LNG Gasausbreitungsberechnungen, für welche die Zulassung durch das US DOT erfolgte, steht die maximale Reichweite der unteren Zündgrenze im Vordergrund. In diesem Fall wird ein Sicherheitsfaktor von 2 so verstanden, dass statt der Konzentration der unteren Zündgrenze (LFL) die Hälfte der Konzentration der unteren Zündgrenze ($1/2$ LFL) zur Bestimmung der maximalen Reichweite verwendet wird.

Die Wolkenbreite steht bei der Zulassung durch das US DOT nicht im Zentrum des Interesses. Bei den Vergleichsrechnungen zu den Messwerten der Freisetzungsversuche wurde durch die PHMSA jedoch festgestellt, dass FLACS die Wolkenbreite bei Freifeldversuchen in Situationen ohne Ausbreitungshindernisse (unobstructed field trials) systematisch um einen Faktor 2 bis 4 unterschätzt (siehe auch Kapitel 5.1 und Anhang B 2.3.2).

Es ist jedoch davon auszugehen, dass für die Evaluation durch die PHMSA die Tools von FLACS für die Freisetzungsmodellierung verwendet wurden, im Gegensatz zu der vorliegenden Studie, wo ausser für Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" die Freisetzungsmodellierung von EFFECTS übernommen wurde. D.h. die Anwendbarkeit der Erkenntnisse der PHMSA auf den FLACS Rechenlauf für Szenario 0 "Baseline" in der vorliegenden Studie, für den die Freisetzungsmodellierung von EFFECTS übernommen wurde, ist unklar.

Der Vergleich der Ergebnisse der FLACS-Rechenläufe für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" zeigt, dass die Art der Freisetzungsmodellierung einen Einfluss auf das Letalitätsergebnis hat. Bei diesen beiden Szenarien führte die FLACS-Freisetzungsmodellierung zu tieferen Letalitäten als die EFFECTS-Freisetzungsmodellierung. Die Geometrie der Szenarien 4 und 5 ist jedoch grundverschieden von einem ebenen, offenen Gelände. Eine Simulation von Szenario 0 "Baseline" mit FLACS Freisetzungsmodellierung müsste deshalb nicht zwingend ebenfalls zu tieferen Letalitäten führen als die vorliegende Simulation des Szenario 0 "Baseline" mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung. Ein Rechenlauf für Szenario 0 "Baseline" mit FLACS-Freisetzungsmodellierung könnte hier zur Klärung beitragen.

Die grossen Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS beispielsweise bei den Zwischenergebnissen zur Lachenbildung fallen auf. Zu FLACS stehen uns FLACS-Vergleichsrechnungen zu beobachteten Lachengrössen von Chlor- und Ammoniakfreisetzungsexperimenten im Rahmen der Jack Rabbit Studie zur Verfügung. Dabei handelt es sich jedoch nicht wie in der vorliegenden Studie um horizontale, sondern um vertikal nach unten gerichtete Austritte. In diesen Vergleichsrechnungen hat FLACS die Lachengrösse in der Regel überschätzt, jedoch nicht mehr als 60 % des Durchmessers. Die Überschätzung wird teilweise darauf zurückgeführt, dass bei der Parametrierung der FLACS-Rechnungen die Oberflächenrauigkeit für die Lachenberechnung tiefer als in der Realität festgesetzt wurde, was keine modellbedingte Differenz wäre.

6.3.1.3 Konservativität

Zu EFFECTS wurden im Rahmen dieser Studie keine Angaben zur Konservativität recherchiert.

Die Evaluation von FLACS durch die PHMSA hat teilweise Unkonservativitäten festgestellt (Empfehlung Sicherheitsfaktor 2).

Zur Konservativität der in der vorliegenden Studie durchgeführten FLACS-Rechenläufe mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung sind keine Angaben verfügbar.

6.3.1.4 Aufwand

Siehe Kapitel 6.2.5

Der Aufwand an Zeit und Ressourcen ist bei einem EFFECTS-Rechenlauf deutlich geringer als bei FLACS. Die Ergebnisse stehen bei EFFECTS viel rascher zur Verfügung.

Situationen im ebenen, offenen Gelände sind oft mit tiefen Personenbelegungen verbunden. Ob sich angesichts der grossen Unterschiede beim Arbeits- und Zeitaufwand eine CFD Berechnung rechtfertigt, muss im konkreten Fall beurteilt werden.

6.3.1.5 Empfehlung

Ebenes, offenes Gelände ist das typische Anwendungsgebiet von Integralmodellen wie EFFECTS. Wir gehen davon aus, dass die Validität von EFFECTS für diesen Zweck von den Entwicklern des Tools geprüft wurde. Wir halten deshalb den Einsatz von EFFECTS grundsätzlich für sinnvoll. Um zur Validität mehr Sicherheit zu haben und die Konservativität einschätzen zu können, wären entsprechende Recherchen, z.B. Angaben des Herstellers Gexcon, allenfalls sinnvoll. Aufgrund der grossen Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS im Bereich der Freisetzungsmodellierung wären insbesondere Angaben zur Validität und Plausibilität im Bereich der Freisetzungsmodellierung wertvoll.

Eine andere, bedeutend aufwändigere Möglichkeit wäre die FLACS-Berechnung mit FLACS-Freisetzungsmodellierung. Hierzu liegen mit der Evaluation durch die PHMSA Eckwerte zur Validität und Konservativität vor. Eine analoge Anwendung des empfohlenen Sicherheitsfaktors von 2 bei einer solchen FLACS-Berechnung wäre deshalb zu überlegen. Hierzu müsste noch geklärt werden, wie der durch die PHMSA zur Anwendung auf die untere Zündgrenze brennbarer Gase (LNG, v.a. Methan) empfohlene Sicherheitsfaktor für die in der vorliegenden Studie relevanten toxischen Gase eingesetzt werden könnte. Beispielsweise könnte für den vorliegenden Fall eine Verdoppelung der Gaskonzentration bei der Berechnung der toxischen Dosis geprüft werden. Ein solcher Sicherheitsfaktor würde sich nicht linear auf Grössen wie die Letalität an einem bestimmten Ort, die Grösse der betroffenen Flächen oder die Reichweite bestimmter Letalitätsschwellenwerte auswirken.

Die sicherste Variante wäre je ein Rechenlauf mit EFFECTS und FLACS (FLACS-Freisetzungsmodellierung), da der sehr wichtige Punkt der Freisetzungsmodellierung in den beiden Tools sehr unterschiedlich gelöst ist und nicht beurteilt werden kann, welche der beiden Varianten die bessere ist. Durch einen Rechenlauf mit beiden Tools würde diesen Unsicherheiten Rechnung getragen und eine unter anderem durch diese Unsicherheiten bedingte Bandbreite der Ergebnisse aufgezeigt.

Wie gross die Differenzen zwischen diesen beiden Rechenläufen ausfallen würden, lässt sich zurzeit nicht sagen, da für das Szenario 0 "Baseline" kein Rechenlauf mit FLACS-Freisetzungsmodellierung durchgeführt wurde.

Eine Berechnung mit FLACS mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung erscheint uns weniger wichtig, da dies ein Spezialfall darstellt, für den kaum Validierungsrechnungen zur Verfügung stehen.

6.3.2 Ebenes, überbautes Gebiet und Letalität in Bodennähe

6.3.2.1 Unterschiede bei den Ergebnissen

Die Unterschiede bei den Ergebnissen der FLACS und EFFECTS Rechenläufe in überbautem Gebiet (Szenarien 1 bis 5) sind sehr gross, wobei die EFFECTS Rechenläufe konstant das höhere potentielle Gesamt-Schadensausmass ergeben. Ortspezifisch betrachtet können bei den FLACS Rechenläufen aber auch höhere Letalitäten als bei den EFFECTS Rechenläufen vorkommen. Es gibt Orte, an denen der FLACS Rechenlauf eine sehr hohe Letalität ergibt, während die Letalität beim EFFECTS Rechenlauf 0 beträgt. D.h. die von der Letalität betroffenen Areale unterscheiden sich zum Teil bei FLACS und EFFECTS.

Die FLACS Rechenläufe wurden ausser bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung durchgeführt. Der Vergleich der FLACS Rechenläufe von Szenario 4 (mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung) und Szenario 5 (mit FLACS Freisetzungsmodellierung) lässt vermuten, dass auch, wenn die FLACS Rechenläufe mit FLACS Freisetzungsmodellierung durchgeführt würden, es zu grossen Unterschieden zwischen den FLACS und EFFECTS Ergebnissen kommen würde.

Es sei aber darauf hingewiesen, dass alle Berechnungen mit derselben Meteosituation durchgeführt wurden. Es besteht die Möglichkeit, dass sich bei anderen Meteosituationen ein anderes Bild ergeben würde (siehe dazu auch Kapitel 6.2.3.).

6.3.2.2 Validität

Gemäss LNG-Modellevaluation durch die PHMSA des US DOT unterschätzt FLACS die Konzentrationen bei Situationen mit Hindernissen im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten generell. Deshalb empfiehlt die PHMSA die Anwendung eines Sicherheitsfaktors von 2. Gemäss Angabe von Gexcon zeigen andere Vergleichsrechnungen mit Freisetzungsexperimenten in Situationen mit Hindernissen nicht dasselbe Bild wie die Evaluation der PHMSA. Somit ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Ein Sicherheitsfaktor von 2 wird von Gexcon als konservativ angesehen.

Zur Validität der in der vorliegenden Studie durchgeführten FLACS-Rechenläufe mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung sind keine Angaben verfügbar.

In EFFECTS kann die Hindernisdichte nur in einer pauschalen Form über den Parameter der Oberflächenrauigkeit in das Ergebnis einfließen. Gemäss Angabe des Herstellers Gexcon wird dieser Parameter im Modell jedoch nur für die Berechnung der durch die Hindernisse erzeugten Turbulenz und der dadurch verursachten Verdünnung der Gaswolke sowie zur Berechnung des vertikalen Windprofils verwendet. Der Parameter der Oberflächenrauigkeit berücksichtigt jedoch nicht die Behinderung der Ausbreitung durch die Hindernisse und auch keine ablenkenden Effekte der Hindernisse.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass die EFFECTS-Ergebnisse in überbautem Gebiet stark von der Realität abweichen können. Entsprechende Vergleichsrechnungen mit realen Freisetzungen stehen uns jedoch nicht zur Verfügung.

Mit dem User Interface von EFFECTS ist deshalb Vorsicht geboten, da dort explizit eine Oberflächenrauigkeit für "City centre with high and low rise buildings" definiert werden kann.

6.3.2.3 Konservativität

Zu EFFECTS wurden im Rahmen dieser Studie keine Angaben zur Konservativität recherchiert.

Bei FLACS ist das Bild uneinheitlich: Die Evaluation von FLACS durch die PHMSA ergibt eine systematische Unterschätzung der Konzentrationen bei Situationen mit Hindernissen im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten (Empfehlung Sicherheitsfaktor 2) während gemäss Gexcon andere Vergleichsrechnungen nicht dasselbe Bild zeigen.

Zur Konservativität der in der vorliegenden Studie durchgeführten FLACS-Rechenläufe mit EFFECTS-Freisetzungsmodellierung sind keine Angaben verfügbar.

6.3.2.4 Aufwand

Siehe Kapitel 6.2.5

Der Aufwand an Zeit und Ressourcen ist bei einem EFFECTS-Rechenlauf deutlich geringer als bei FLACS. Die Ergebnisse stehen bei EFFECTS viel rascher zur Verfügung.

Im überbauten Gebiet fällt der Mehraufwand für eine FLACS-Berechnung gegenüber einer EFFECTS-Berechnung in der Regel grösser aus als im ebenen, weitgehend leerem Gelände.

6.3.2.5 Empfehlung

Es ist davon auszugehen, dass die EFFECTS-Ergebnisse in überbautem Gebiet stark von der Realität abweichen können. EFFECTS ist durch die Modellarchitektur bedingt nicht in der Lage, die Behinderung der Ausbreitung durch Hindernisse und die ablenkenden Effekte von Hindernissen zu berücksichtigen. In Anbetracht dessen scheint uns EFFECTS nicht das geeignete Tool zu sein, um Chlorgasausbreitungen im überbauten Gebiet zu berechnen. Entsprechende Vergleichsrechnungen mit realen Freisetzungen stehen uns jedoch nicht zur Verfügung.

In Anbetracht des bei den EFFECTS-Ergebnissen deutlich höheren Gesamt-Ausmasses scheint EFFECTS konservative Ergebnisse zu liefern. Beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" fällt bei homogener Personenbelegung das potentielle Schadensausmass bei EFFECTS knapp siebenmal höher aus als bei FLACS. Bei den beiden überbauten Szenarien 1 "Einfamilienhäuser" und 4 "Wohnblocks mit Lücken, bei denen der FLACS-Rechenlauf mit der EFFECTS-Freisetzungsmodellierung berechnet wurde kommt das potentielle Schadensausmass bei EFFECTS etwa viermal höher als bei FLACS zu liegen.

Es kann aber mit EFFECTS ortsspezifisch zu Unkonservativitäten kommen, da davon auszugehen ist, dass EFFECTS die Lage der letalitätsbetroffenen Areale nicht realistisch berechnen kann. Dazu sei aber erwähnt, dass CFD Tools die Lage der letalitätsbetroffenen

Areale zwar realistischer berechnen können, diese aber stark vom simulierten Einzelfall abhängen können (siehe dazu auch Kapitel 6.2.3.).

Wenn man diese Nachteile von EFFECTS nicht in Kauf nehmen will, kommt man um den hohen Aufwand einer FLACS Berechnung nicht herum. Dabei muss je nach Fragestellung in geeigneter Form (z.B. Variantenrechnungen) berücksichtigt werden, dass die FLACS-Ergebnisse stark vom simulierten Einzelfall abhängig sind. In Anbetracht der Erkenntnisse der Evaluation durch die PHMSA wäre die Anwendung eines Sicherheitsfaktors von 2 in Betracht zu ziehen, um konservative Ergebnisse zu erhalten. Dazu wäre zu klären, wie der durch die PHMSA zur Anwendung auf die untere Zündgrenze brennbarer Gase (LNG, v.a. Methan) empfohlene Sicherheitsfaktor für die in der vorliegenden Studie relevanten toxischen Gase eingesetzt werden könnte (siehe dazu Kapitel 6.3.1.5).

Wir gehen davon aus, dass für die FLACS Berechnungen für die Evaluation durch die PHMSA die Tools von FLACS für die Freisetzungsmodellierung verwendet wurden. So scheint es naheliegend, die FLACS Berechnungen im Rahmen der neuen Methodik Transportrisiken Gefahrgut Eisenbahn TRGG Bahn die FLACS Freisetzungsmodellierung zu verwenden, um die Anwendbarkeit der Erkenntnisse der PHMSA zu erhalten.

In Anbetracht dessen, dass die Unterschiede bei der Freisetzungsmodellierung bei FLACS und EFFECTS wahrscheinlich auf grosse Unsicherheiten bei der Modellierung dieses Vorganges hindeuten, wären entsprechende Abklärungen, z.B. Angaben des Herstellers beider Tools, Gexcon AS, zur Freisetzungsmodellierung wünschenswert, um die Validität der beiden Varianten der Freisetzungsmodellierung besser einschätzen zu können. Solange diese Unsicherheiten bestehen, wäre es sinnvoll, im Sinn einer Sensitivitätsanalyse die FLACS-Rechenläufe parallel mit beiden Varianten der Freisetzungsmodellierung, d.h. FLACS Freisetzungsmodellierung und EFFECTS Freisetzungsmodellierung, durchzuführen.

6.3.3 Geneigtes Gelände ("Wohnblocks 10° Neigung") und Gelände mit unebener Topographie und Letalität in Bodennähe

Die nachfolgenden Angaben ergänzen die Angaben aus Kapitel 6.3.1 und Kapitel 6.3.2 um den Aspekt der Hangneigung und Topographie. D.h. für überbautes Gebiet in geneigtem Gelände beispielsweise müssen die Einschränkungen aus Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3 kombiniert werden.

6.3.3.1 Unterschiede bei den Ergebnissen

Mit EFFECTS können nur Berechnungen in horizontaler Ebene durchgeführt werden.

Beim Vergleich der FLACS-Ergebnisse für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" mit einem EFFECTS Rechenlauf in ebenem Gelände ergeben sich grosse Unterschiede. Diese Unterschiede beim Vergleich mit den FLACS-Ergebnissen für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" sind auch dadurch bedingt, dass EFFECTS die Behinderung der Ausbreitung durch Hindernisse und ablenkende Effekte nicht berücksichtigen kann. Um den ausschliesslichen Effekt der geneigten Topographie im FLACS Rechenlauf aufzuzeigen, wäre eine Berechnung des Szenarios 0 "Baseline" mit einer geneigten Ebene nötig.

6.3.3.2 Validität

EFFECTS kann keine Hangneigung und keine Topographie berücksichtigen.

In FLACS gibt es zwei Möglichkeiten, von einer horizontalen Ebene abweichendes Terrain zu modellieren:

- Es kann ein von der Vertikalen abweichender Gravitationsvektor definiert werden. Dadurch wird eine horizontale Ebene zu einer geneigten Ebene. Komplexere Topographien können mit dieser Methode nicht abgebildet werden.
- Die Topographie kann auch als Geometrie im Simulationsvolumen definiert werden. Mit dieser Methode sind komplexere Terrainformen möglich. Da FLACS wie viele andere CFD Tools ein kartesisches Raster verwendet, müssen geneigte Terrainformen durch "Treppenstufen" angenähert werden.

Die PHMSA hat bei ihrer Evaluation festgestellt, dass FLACS die Konzentration mit zunehmender Hangneigung zunehmend unterschätzt. Ab einer Neigung von 10 % wurde der Sicherheitsfaktor von 2 als nicht mehr ausreichend befunden, um diese Unkonservativität zu kompensieren. Bei den von der PHMSA verwendeten FLACS Rechnungen wurde die Methode mit dem Gravitationsvektor verwendet.

Deshalb beschränkt die PHMSA die Anwendung von FLACS für Berechnungen mit von einer horizontalen Ebene abweichendem Terrain auf die Methode mit dem Gravitationsvektor und auf eine maximale Neigung von 10 %. Dabei wird ein Sicherheitsfaktor von 2 empfohlen. Berechnungen mit einer Neigung von mehr als 10 % anhand Anpassung des Gravitationsvektors sowie die Wiedergabe von geneigten oder unebenen Topographien durch Treppenformen werden von der PHMSA nicht akzeptiert, solange nicht aufgezeigt werden kann, dass bei diesen Berechnungen der Sicherheitsfaktor von 2 genügt, um die Unkonservativitäten zu kompensieren. Davon ausgenommen sind geneigte Hindernisse, die sich nur über kurze Distanzen erstrecken, wie Böschungen, Bodenwellen etc. (engl. Originalbezeichnung im PHMSA Dokument: berms, swells etc.).

Die PHMSA verweist darauf, dass bei früheren Validationsstudien in FLACS treppenförmig abgebildetes Terrain die Bewegung der Gaswolke verhinderte.

Somit können gemäss PHMSA mit FLACS zwar unebene und von der Horizontalen abweichende Topographien modelliert werden. Die Validität ist jedoch entweder ungenügend oder unbekannt, mit Ausnahme von bis zu 10 % geneigten Ebenen. Dies ist jedoch nicht ein FLACS-spezifisches Problem, sondern entweder liegen derartige Angaben zur Validität für andere Tools gar nicht vor, oder sie schneiden schlechter ab als FLACS.

6.3.3.3 Konservativität

EFFECTS kann keine Hangneigung und keine Topographie berücksichtigen. Bei Hangaufwärts gerichteter Luftströmung kann eine Berechnung mit EFFECTS als ebenes Gelände, was die Reichweite des Letalitätsbereichs (maximale Distanz von Letalität x zum Freisetzungsort) anbelangt, konservativ sein. Die betroffenen Areale werden so aber nicht realistisch berechnet.

Gemäss Evaluation der PHMSA unterschätzt FLACS die Konzentration zunehmend mit zunehmender Hangneigung.

6.3.3.4 Aufwand

Mit dem weniger aufwändigen EFFECTS können keine Berechnungen in geneigtem und unebenem Gelände durchgeführt werden.

6.3.3.5 Empfehlung

Geneigtes Gelände und Gelände mit unebener Topographie kann mit EFFECTS nicht modelliert werden. Hangaufwärts wäre allenfalls eine Berechnung mit EFFECTS in der Ebene als konservative Abschätzung der maximalen Reichweite denkbar.

Geneigtes Gelände und Gelände mit unebener Topographie kann nur mit FLACS modelliert werden. Bei Berechnungen mit angepasstem Gravitationsvektor mit Neigung bis zu 10 % wäre bei FLACS entsprechend der Empfehlung der PHMSA ein Sicherheitsfaktor von 2 in Betracht zu ziehen.

In allen anderen Fällen liegen uns keine Informationen darüber vor, wie gut die Ergebnisse mit der Realität übereinstimmen. Es besteht die Möglichkeit, dass die Konzentrationen um mehr als einen Faktor 2 unterschätzt werden. D.h. es wäre ein Sicherheitsfaktor von mehr als 2 in Betracht zu ziehen. Wie hoch der Sicherheitsfaktor effektiv sein müsste, ist unbekannt.

Deshalb erachten wir weitere Abklärungen zur Validität von Berechnungen mit angepasstem Gravitationsvektor mit Neigung über 10 % und bei Berechnung mit Annäherung der Topographie durch Treppengeometrien als unerlässlich.

6.3.4 Konzentrationen und Letalitäten oberhalb der ersten Meter über Boden

Die nachfolgenden Angaben ergänzen die Angaben aus Kapitel 6.3.1, Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3 um den Bereich oberhalb von ca. 2 m über Boden. D.h. für überbautes Gebiet in geneigtem Gelände beispielsweise müssen die Einschränkungen aus Kapitel 6.3.2, Kapitel 6.3.3 und Kapitel 6.3.4 kombiniert werden.

6.3.4.1 Unterschiede bei den Ergebnissen

FLACS liefert bei der maximalen Höhe über Boden, in der eine bestimmte Chlor-konzentration erreicht wird, systematisch viel höhere Werte als EFFECTS. Das gleiche Bild ergibt sich beim Vergleich der EFFECTS Ergebnisse mit den Letalitäten in 30.5 m Höhe bei den FLACS-Rechenläufen (Plots bei den Szenarien 2 bis 5 vorhanden). Die Konzentrationsunterschiede in der Höhe treten sogar besonders deutlich bei Szenario 0 "Baseline" auf. Im Szenario 0 "Baseline" sind keine Strömungshindernisse vorhanden. Zudem wurde die FLACS- und EFFECTS-Rechenläufe für Szenario 0 "Baseline" mit derselben Freisetzungsmodellierung durchgeführt (beide EFFECTS-Freisetzungsmodellierung). Die Unterschiede

können deshalb nicht ausschliesslich durch die in Kapitel 6.3.2.2 beschriebenen Limiten von EFFECTS bei der Berücksichtigung von Strömungshindernissen verursacht sein.

Neben der Freisetzungmodellierung und dem Umgang mit Strömungshindernissen muss somit noch ein weiterer gewichtiger Unterschied zwischen den Modellen von FLACS und EFFECTS bestehen, der vor allem oberhalb des Bereichs ab ca. 2 m über Boden zum Tragen kommt. Welches der beiden Tools hier von der Realität abweicht, ist unbekannt. Diese unbefriedigende Situation mag ihre Ursache auch darin haben, dass der Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden bei der Validierung der Modelle weniger Beachtung findet.

6.3.4.2 Validität

Zur Validität von EFFECTS und FLACS im Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden liegen uns keine Informationen vor.

6.3.4.3 Konservativität

Zur Konservativität von EFFECTS und FLACS im Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden liegen uns keine Informationen vor.

6.3.4.4 Aufwand

Siehe Kapitel 6.2.5

Der Aufwand an Zeit und Ressourcen ist bei einem EFFECTS-Rechenlauf deutlich geringer als bei FLACS.

6.3.4.5 Empfehlung

In überbauten Geometrien ist EFFECTS auch für die Berechnung von Chlorkonzentrationen und Letalitäten oberhalb der ersten Meter über Boden aufgrund der Limiten von EFFECTS bei der Berücksichtigung von Strömungshindernissen kaum das geeignete Tool (siehe dazu Kapitel 6.3.2.5).

Somit bleibt in überbautem Gebiet nur FLACS. Allerdings stehen uns keine Informationen zur Validität und Konservativität von FLACS im Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden zur Verfügung. Entsprechende Abklärungen hierzu wären empfehlenswert. Die Anwendung eines Sicherheitsfaktors wie bei den FLACS-Ergebnissen in Bodennähe wäre in Betracht zu ziehen.

Für den Bereich oberhalb ca. 2 m über Boden in ebenem, offenem Gelände ist keine Empfehlung für das eine oder andere Tool (EFFECTS oder FLACS) möglich, da uns keine Informationen zur Validität und Konservativität in diesem Bereich zur Verfügung stehen. Da die Unterschiede zwischen den beiden Tools sehr gross sind, empfiehlt sich eine Berechnung mit beiden Tools um den Streubereich zu kennen. Auch hier wären entsprechende Abklärungen zur Validität und Konservativität der beiden Tools im Bereich oberhalb der ersten Meter über Boden empfehlenswert.

6.3.5 Übersicht

Tab. 5 Übersicht Empfehlungen zum Einsatz von CFD-Berechnungen in Bodennähe

		Ausbreitungshindernisse	
		Offenes Gelände	überbaut
Topographie	Eben	<p>EFFECTS und/oder FLACS</p> <p>EFFECTS: ev. zusätzliche Abklärung Validität/Konservativität, insbesondere bei der Freisetzungsmodellierung</p> <p>FLACS: FLACS-Freisetzungsmodellierung verwenden, Sicherheitsfaktor 2</p> <p>Rechnung mit beiden Tools zeigt Streubereich auf</p>	<p>FLACS</p> <p>Sicherheitsfaktor 2</p> <p>Validität der Freisetzungsmodellierung abklären oder FLACS-Berechnungen je mit FLACS Freisetzungsmodellierung und mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung durchführen</p>
	Uneben, geneigt	<p>FLACS</p> <p>Validität der Freisetzungsmodellierung abklären oder FLACS-Berechnungen je mit FLACS Freisetzungsmodellierung und mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung durchführen</p> <p>Berechnung mit angepasstem Gravitationsvektor bis max 10 % Neigung: Sicherheitsfaktor 2</p> <p>Bei höheren Neigungen und Annäherung der Topographie durch Treppengeometrie Validität abklären, Sicherheitsfaktor >2</p> <p>(EFFECTS Hangaufwärts ev. als konservative Abschätzung der max. Reichweite)</p>	<p>FLACS</p> <p>Validität der Freisetzungsmodellierung abklären oder FLACS-Berechnungen je mit FLACS Freisetzungsmodellierung und mit EFFECTS Freisetzungsmodellierung durchführen</p> <p>Berechnung mit angepasstem Gravitationsvektor bis max 10 % Neigung: Sicherheitsfaktor 2</p> <p>Bei höheren Neigungen und Annäherung der Topographie durch Treppengeometrie Validität von FLACS abklären, Sicherheitsfaktor >2</p>

Für diese Übersicht über die Empfehlungen zum Einsatz der Tools FLACS und EFFECTS müssen die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Limiten der Anwendung beachtet werden.

6.3.6 Letalitätsraster

Das BAV beabsichtigt gemäss Besprechung vom 23.10.2019 bei der neuen Methodik TRGG Bahn die Ausmassberechnungen anhand eines Letalitätsrasters durchzuführen. D.h. das Einflussgebiet eines Störfalls wird in gleich grosse quadratische Flächen unterteilt und jeder dieser Flächen eine bestimmte Letalität zugeordnet. Dieses Letalitätsraster soll mit EFFECTS oder FLACS berechnet und in der Methodik TRGG Bahn hinterlegt werden.

Basiert das Letalitätsraster auf CFD-Berechnungen mit FLACS, kommt der für die Berechnungen des Rasters verwendeten Geometrie eine grosse Bedeutung zu, da diese einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat, wie die in der vorliegenden Studie beschriebenen Simulationsergebnisse zeigen.

Im Zusammenhang mit diesem Raster werden voraussichtlich noch einige Abklärungen und Überlegungen nötig sein. Beispielsweise stellt sich die Frage, ob mit einem Raster gearbeitet werden soll, das für eine bestimmte Geometrie erzeugt wurde. Dies würde einem Raster entsprechen, das für einen ganz bestimmten Einzelfall zutrifft, für von diesem Einzelfall abweichende Situationen jedoch unpassend sein kann. Oder ob mit einem in irgendeiner Form verallgemeinerten Raster gearbeitet werden soll, z.B. auf Basis verschiedener Variantenrechnungen. Da die räumliche Verteilung der Letalitäten bei verschiedenen Geometrien sehr unterschiedlich ausfallen kann, wird ein solches allgemeingültiges Raster für eine konkrete Situation allerdings nur beschränkt zutreffen können.

Die Berechnung eines Letalitätsrasters, das in der neuen Methodik TRGG Bahn verwendet werden soll, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Die für die vorliegende Studie berechneten Szenarien wurden nicht als Basis für dieses Letalitätsraster, sondern im Hinblick auf eine möglichst gute Vergleichbarkeit von EFFECTS und FLACS und um die Differenzen zwischen diesen beiden Tools möglichst gut herauszuarbeiten, definiert.

Falls sich die neue Methodik TRGG Bahn am Worst Case orientieren soll, ist zu beachten, dass die Szenarien in der vorliegenden Studie nicht dem Worst Case entsprechen. Es handelt sich nicht um instantane, sondern um kontinuierliche Freisetzungen. Ebenfalls zeigen Vergleichsrechnungen mit EFFECTS, dass die verwendete Meteosituation bei Berechnung mit EFFECTS einem eher schlechten Fall, aber nicht dem Worst Case entspricht (siehe Kapitel 2.3.2). FLACS und EFFECTS können sich bezüglich der Worst Case Meteosituation unterscheiden, so dass nicht dieselben Parameterkombinationen bei beiden Tools zum höchsten potentiellen Schadensausmass führen. Die in der vorliegenden Studie berechneten Szenarien können deshalb nicht unbesehen als Basis für das Letalitätsraster der neuen Methodik TRGG Bahn verwendet werden.

6.3.7 Empfehlungen für weitergehende Anwendungen, Objektschutz etc.

Wenn genaue Informationen zur räumlichen Lage der betroffenen Areale in einer konkreten Umgebung benötigt werden, d.h. welche konkreten Gebiete bei einer Freisetzung an einem bestimmten Ort in welchem Letalitätsbereich liegen etc., sind aufgrund des starken Einflusses der Geometrie in überbauten Gebieten, in unebenen oder

geneigtem Gelände sowie bei vorhandenen ablenkenden Strukturen CFD-Berechnungen mit Abbildung der örtlichen Geometrie notwendig.

Die Berechnung von Ganglinien, d.h. dem zeitlichen Konzentrationsverlauf an einem bestimmten Punkt beispielsweise im Zusammenhang mit Fragen zur Lüftung im Rahmen von Objektschutzmassnahmen sollte nicht alleine mit einem Integralmodell wie EFFECTS durchgeführt werden. Hier sind zusätzlich CFD-Berechnungen für die örtliche Situation notwendig.

Allerdings bestehen starke Einschränkungen bei der Verwendbarkeit solcher Berechnungsergebnisse durch die grossen Unsicherheiten oberhalb des Bereichs ab ca. 2 m über Boden (siehe z.B. Kapitel 6.3.4.1 und 6.3.4.5). Dieser Höhenbereich kann beispielsweise zur Dimensionierung von Objektschutzmassnahmen (z.B. Konzentrationen auf Dachhöhe) relevant sein.

6.3.8 Allgemeine Empfehlungen zu CFD-Berechnungen

Ein zentraler Punkt beim Einsatz eines CFD Tools ist, wie bei jedem Modell, dass die Validität des Tools für den Einsatzzweck so gut wie möglich belegt ist. D.h. dass im Vergleich mit realen Freisetzungen gezeigt werden kann, dass die Simulationsergebnisse des Tools genügend realitätsnah sind. Zu FLACS finden sich die entsprechenden Angaben in den Kapiteln 6.3.1.2, 6.3.2.3, 6.3.3.3 und 6.3.4.3.

Die vorliegenden Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Geometrie bei CFD-Berechnungen einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat. Es ist deshalb sehr wichtig, die Geometrie in den CFD-Berechnungen möglichst realitätsnah abzubilden.

Da jede CFD-Berechnung nur einen exakt definierten Einzelfall abbilden kann, sind Variantenrechnungen zur Meteosituation, zur Freisetzung (Art der Freisetzung, Ort, Richtung) und weiteren Parametern, die nicht eindeutig festgelegt werden können, unerlässlich. Der Auswahl und Definition der zu berechnenden Varianten kommt eine grosse Bedeutung zu, da diese einen grossen Einfluss auf das Endergebnis haben können. Da entlang einer Bahnlinie nur schon eine grosse Zahl möglicher Freisetzungsorte in Frage kommen, die zu einem unterschiedlichen Ausbreitungsverhalten führen können, kann mit den Variantenrechnungen ein grosser Aufwand verbunden sein.

Dort, wo dieser Aufwand einer CFD-Berechnung gerechtfertigt ist, wird er jedoch mit einem auf die konkrete Situation zugeschnittenen Ergebnis und einem hohen Informationsgehalt belohnt. In einigen Fällen ist eine CFD-Berechnung ohnehin die einzige Möglichkeit, überhaupt etwas Sinnvolles modellieren zu können.

Anhang

- A Szenariendefinition**
- B Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse**
- C Vergleichsrechnungen Meteosituation mit EFFECTS**
- D Konzentrations-Letalitätsberechnungen (EFFECTS)**
- E EFFECTS Dispersionsberechnungen Reports und Vergleiche**
- F Herleitung Bevölkerungsdichten zur Berechnung der Todesopferzahlen**
- G Import Swisstopo Daten**
- H Grundlagen und Literatur**

A Szenariendefinition

A 1 Szenario 0 "Baseline"

A 1.1 Geometrie (nur FLACS)

Das Szenario 0 "Baseline" hat folgende Charakteristika:

- Ebenes Gelände, nicht geneigt
- Sonst keine Gebäude oder andere Geometrie

Abb. 9 Geometrie Szenario 0 "Baseline"

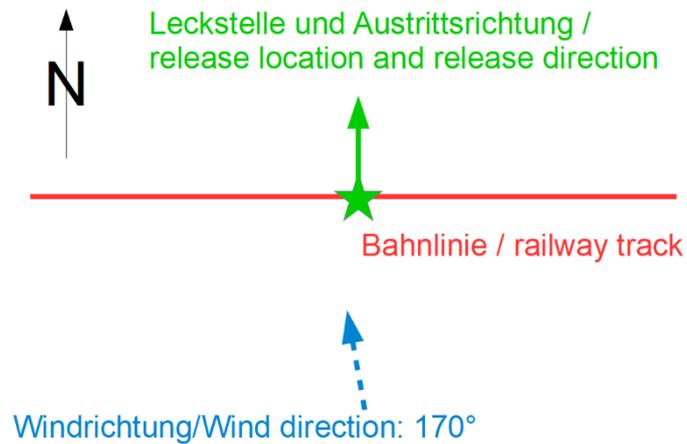
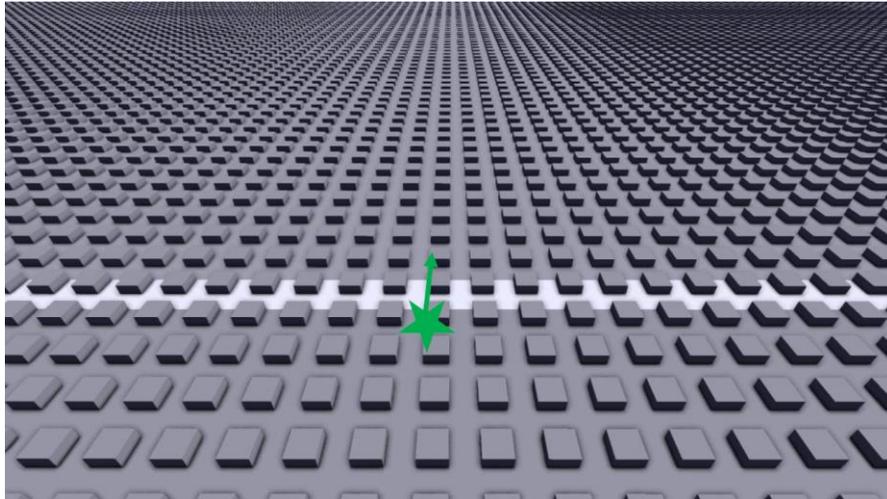


Abb. 10 3D Darstellung der Geometrie für Szenario 0 "Baseline" in FLACS, Austrittsstelle markiert als grüner Stern, Austrittsrichtung markiert mit einem grünen Pfeil (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



In der aktuellen FLACS-Version wird der Parameter Oberflächenrauigkeit (ground roughness oder aerodynamic roughness length) nur für den Bereich ausserhalb des Simulationsvolumens verwendet, d.h. als Randbedingung. Für den Bereich innerhalb des Simulationsvolumens steht in der aktuellen FLACS Version kein Parameter zur Definition der Oberflächenrauigkeit zur Verfügung. Dort sind bei FLACS alle Oberflächen glatt. Eine Oberflächenrauigkeit entsteht innerhalb des Simulationsvolumens nur durch die Geometrie. Deshalb muss im Simulationsvolumen eine Geometrie definiert werden, die näherungsweise der gewünschten Oberflächenrauigkeit von 0.03 m entspricht. Diese Geometrie wurde auf Basis des Ansatzes von Lettau (Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description, Journal of applied meteorology Vol. 8, 1969) festgelegt:

$$Z_0 = 0.5h * s / S$$

wobei: z_0 = Oberflächenrauigkeit in cm

h = Hindernishöhe in cm

s = windexponierte Silhouettenfläche eines Hindernisses in cm^2

S = spezifische Fläche in $\text{cm}^2 = A/n$

A = Gesamtfläche des betrachteten Bereichs in der Horizontalen in cm^2

n = gesamte Anzahl Hindernisse im betrachteten Bereich

Auf dieser Basis wurde die Oberflächenrauigkeit von 0.03 m im Simulationsvolumen von FLACS durch Quader mit 1×1 m Grundfläche und 0.5 m Höhe in 1 m Abstand abgebildet.

Im äusseren Bereich des Simulationsvolumens wurde eine um den Faktor 10 gröbere Quaderstruktur gewählt, da sonst die maximale Anzahl geometrischer Objekte, die FLACS verarbeiten kann, überschritten worden wäre. D.h. es wurden Quader mit 10 m Seitenlänge in 10 m Abstand verwendet.

Gexcon plant eine neue Version von FLACS, welche die Möglichkeit bietet, den Parameter Oberflächenrauigkeit auch innerhalb des Simulationsvolumens zu verwenden.

A 1.2 Parameter

Tab. 6 Parameter Szenario 0 "Baseline"

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Umgebungsbedingungen				
Lufttemperatur	15°C	x	x	Mail BAV 2018-11-27
Windgeschwindigkeit in 10m Höhe	1.5 m/s	x	x	Methodikentwurf BAV
Pasquill-Klasse	F	x	x	Methodikentwurf BAV, Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Windrichtung	170°	x	x	Bespr mit BAV 2019-02-27
Oberflächenrauigkeit	0.03 m Offenes Grasland	x	x	Mail BAV 2018-11-27 In FLACS wird die Oberflächenrauigkeit nur für den Bereich ausserhalb des Simulationsvolumens verwendet. Innerhalb des Simulationsvolumens entsteht die Oberflächenrauigkeit durch die Geometrie. (Mail Gexcon 2018-12-11)
Luftdruck	952 hPa	x	x	MeteoSchweiz Normwert 1981-2010 Luftdruck auf Stationshöhe Bern, Zürich
Relative Luftfeuchtigkeit	83 %		x	Mail BAV 2018-11-27 MeteoSchweiz Standardnormwerte 1961-1990 Relative Luftfeuchtigkeit 2 m Bern, Zürich sind ca. 78 %
Sonneneinstrahlung	120 W/m ²		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Bodentemperatur	15°C		x	Mail BAV 2018-11-27
Bodentyp	Average subsoil		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Bodenrauigkeit	flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Stoff und Kesselwagen				
Stoff	Chlor flüssig	x	x	Methodikentwurf BAV
Dichte der Flüssigphase	1.57 t/m ³			Methodikentwurf BAV
Temperatur des Tanks	15°C		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Druck im Behälter	Dampfdruck bei gegebener Temperatur (gemäss EFFECTS 5.888 bar)		x	Methodikentwurf BAV Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Tankvolumen	54 m ³		x	Methodikentwurf BAV
Tankdurchmesser	2.55 m			Methodikentwurf BAV
Tanklänge	11.215 m		x	Methodikentwurf BAV
Füllstand	76 %		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) (Methodikentwurf BAV: 84 %)
Leck				
Freisetzung	Kontinuierliche Freisetzung	x	x	Methodikentwurf BAV
Leckdurchmesser	75 mm		x	Methodikentwurf BAV
Höhe des Lecks über Boden	1.85 m	x	x	Mail BAV 2018-11-27
Austrittsrichtung	Nord	x		
Austrittswinkel	Horizontal	x	x	Methodikentwurf BAV S.36
Konstante Austrittsrate	164.74 kg/s	x	z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Austrittsdauer	225 s	x	z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Temperatur Jet	-34.03°C	x	z	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) Abklärung Gexcon/TNO 2019-02-05
Repräsentative Temperatur Jet	14.179°C		z	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) Abklärung Gexcon/TNO 2019-02-05, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan

x = ja

z = Zwischenergebnis

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Durchmesser Jet	0.54673 m	x	z	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Ausflusskoeffizient	C=1		x	Methodikentwurf BAV
Höhe des Lecks über Tankunterseite	$d_{\text{Tank}}/3 = 0.85 \text{ m}$		x	Methodikentwurf BAV
Art der Expansion	Adiabatisch		x	Methodikentwurf BAV
Behälterinhalt zu Beginn der Freisetzung	58'678 kg		z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Behälterinhalt am Ende der Freisetzung	21'412 kg		z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Freigesetzte Menge	37'266 kg		z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Toxische Einwirkung				
Zeitdauer, über welche die Konzentration gemittelt wird	600 s		x	Methodikentwurf BAV (default EFFECTS)
Berechnung der Dauer der toxischen Einwirkung basiert auf	Dauer wird gezählt ab Ankunft der toxischen Wolke am betreffenden Punkt („Time limit for cloud exposure“ in EFFECTS)		x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Maximale Expositionszeit	1'800s und 2'250s (2'250s ist maximaler Wert für Szenario 0, bei dem EFFECTS noch korrekt rechnet)		x	Vorschlag BAV (Mail BAV 2018-11-27) wäre 1'800s. FLACS hat keine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit (Mail Gexcon 2019-02-05). Deshalb wird für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in EFFECTS eine zusätzliche Berechnung mit einem möglichst hohen Wert durchgeführt (Bespr. BAV 2019-02-27).
Höhe der Messung über Boden	1.5 m	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Probit	a = -6.35 b = 0.5 n = 2.75 (C in mg/m ³ , t in min)	x	x	Methodikentwurf BAV, HART V1.1 S. 42 In der aktuellen HART Version V1.2 S. 42 sind b und n vertauscht. Annahme: HART V1.1 stimmt, da in den anderen RIVM Dokumenten (z.B. BEVI) b und n wie in HART V1.1 definiert sind

x = ja

z = Zwischenergebnis

A 2 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

A 2.1 Geometrie (nur FLACS)

Das Szenario 1 "Einfamilienhäuser" hat folgende Charakteristika:

- Regelmässige Anordnung von Quadern (Gebäuden) mit grob der Abmessung eines Einfamilienhauses über die gesamte Simulationsfläche. Gebäudedichte vergleichbar mit dem Quartier Bernastrasse in Wettingen (1.1 Häuser/1000m²).
- Höhe der Einfamilienhaus-Quader: 8 m
- Ebenes Gelände, nicht geneigt

Abb. 11 Geometrie Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

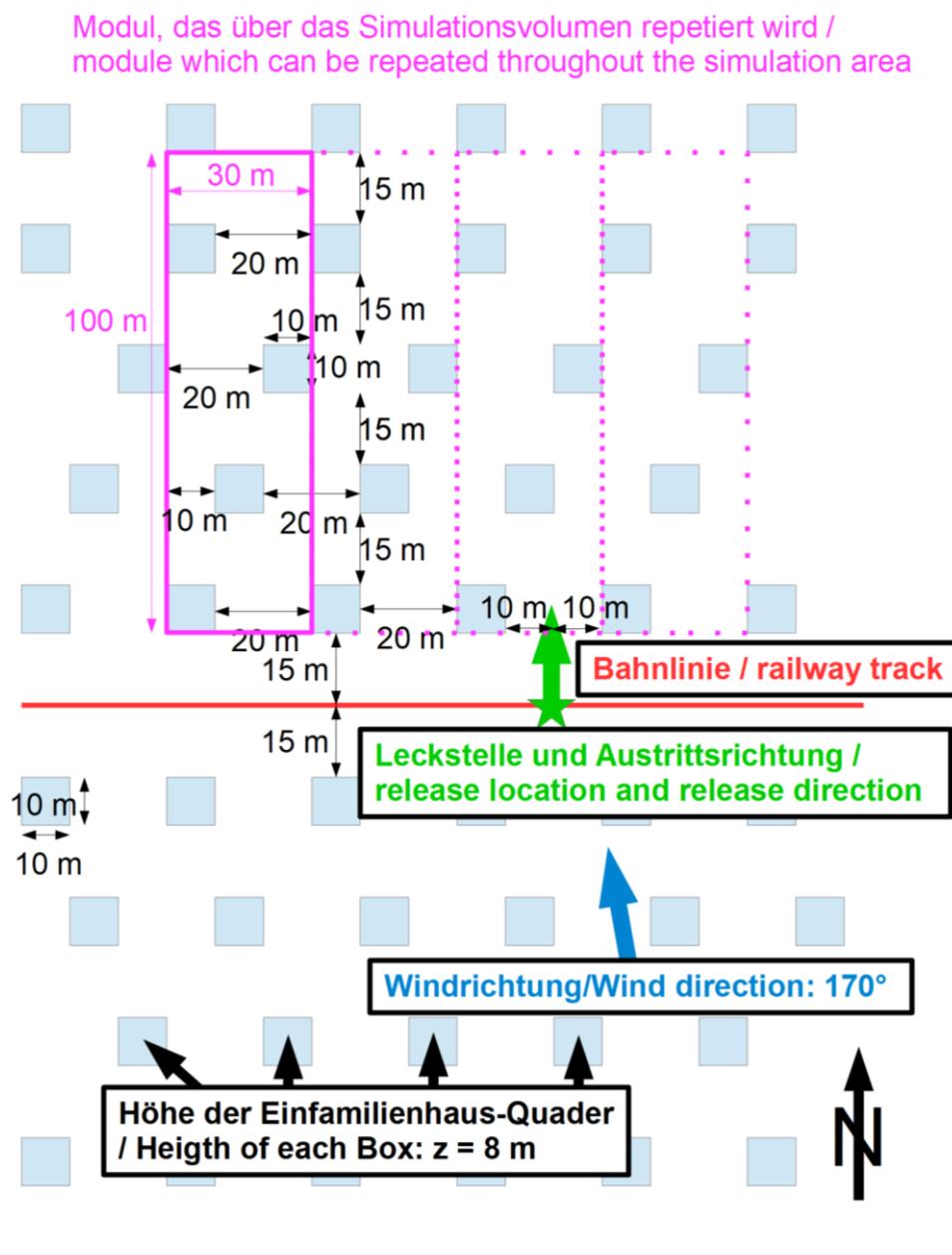
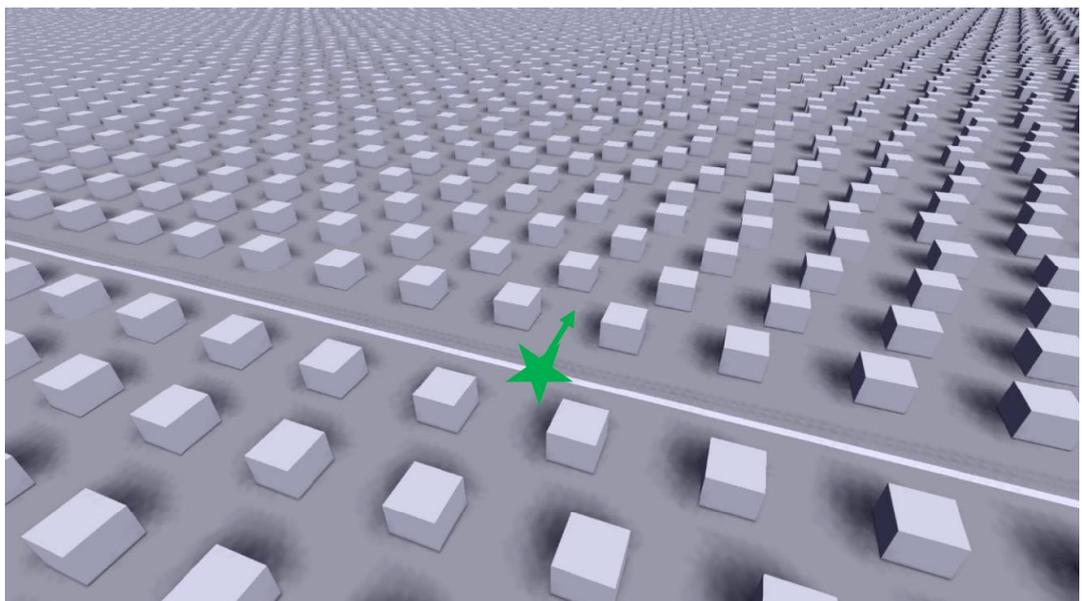


Abb. 12 Muster Szenario 1 "Einfamilienhäuser" (Wettingen Bernastrasse)



Abb. 13 3D Darstellung der Geometrie für Szenario 1 "Einfamilienhäuser" in FLACS, Austrittsstelle markiert als grüner Stern, Austrittsrichtung markiert mit einem grünen Pfeil (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



A 2.2 Parameter

Wie Szenario 0, ausser:

Tab. 7 Parameter Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Umgebungsbedingungen				
Oberflächenrauigkeit	1 m	x	x	Methodikentwurf BAV In FLACS wird die Oberflächenrauigkeit nur für den Bereich ausserhalb des Simulationsvolumens verwendet. Innerhalb des Simulationsvolumens entsteht die Oberflächenrauigkeit durch die Geometrie. (Mail Gexcon 2018-12-11)

x=ja, z=Zwischenergebnis

A 3 Szenario 2 "Wohnblocks"

A 3.1 Geometrie (nur FLACS)

Das Szenario 2 "Wohnblocks" hat folgende Charakteristika:

- Regelmässige Anordnung von Quadern (Gebäuden) mit grob den Abmessungen eines Wohnblocks über die gesamte Simulationsfläche.
- Höhe der Wohnblock-Quader: 30 m
- Ebenes Gelände, nicht geneigt

Im Quartier Wettingen Hardstrasse, das als Ausgangspunkt für die Geometrie des Szenario 2 "Wohnblocks" diente, weisen gemäss Google Streetview nur die Gebäude nördlich der Hardstrasse in Abb. 15 eine Höhe von 10 Stockwerken und somit ca. 30 m auf. Allerdings stehen diese Gebäude weniger dicht als in der für die FLACS-Rechnung verwendeten Geometrie. Die Gebäude südlich der Hardstrasse weisen gemäss Google Streetview inkl. zurückversetztem Attikageschoss 5 Stockwerke auf. Die Bebauungsdichte in Szenario 2 "Wohnblocks" liegt deshalb über derjenigen des Quartiers Wettingen Hardstrasse in Abb. 15.

Abb. 14 Geometrie Szenario 2 "Wohnblocks"

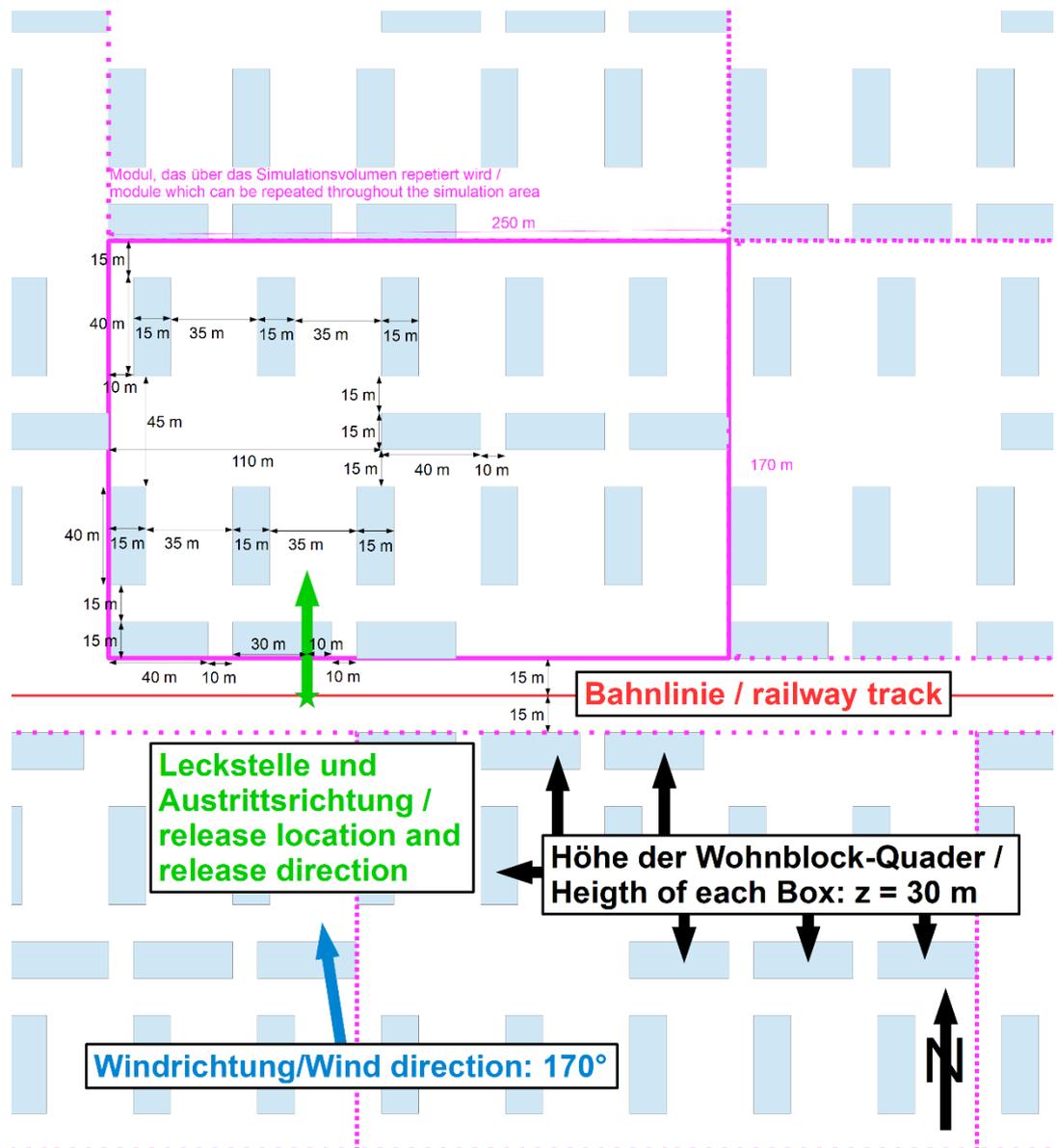
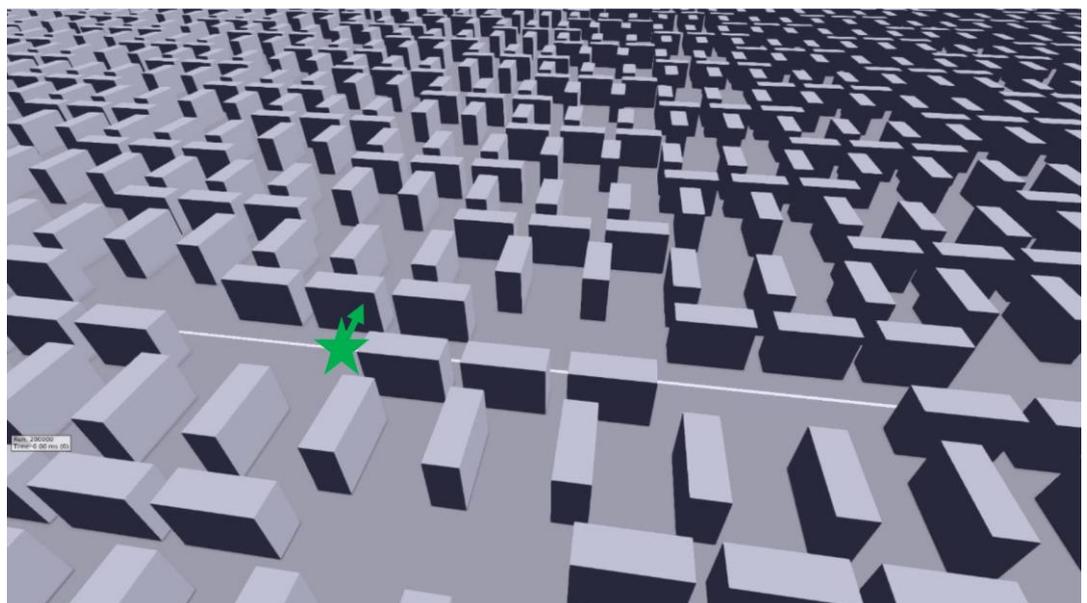


Abb. 15 Muster Szenario 2 "Wohnblocks" (Wettingen Hardstrasse)



Abb. 16 3D Darstellung der Geometrie für Szenario 2 "Wohnblocks" in FLACS, Austrittsstelle markiert als grüner Stern, Austrittsrichtung markiert mit einem grünen Pfeil (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



A 3.2 Parameter

Wie Szenario 0, ausser:

Tab. 8 Input Szenario 2 "Wohnblocks"

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Umgebungsbedingungen				
Oberflächen- rauhigkeit	1 m Zusätzliche EFFECTS Berechnung mit 3 m, entspricht höchster Roughness Length Klasse 8 in EFFECTS, beschrieben mit "City centre with high- and low rising buildings"	x	x	Bespr. BAV 2019-03-26 In FLACS wird die Oberflächenrauhigkeit nur für den Bereich ausserhalb des Simulationsvolumens verwendet. Innerhalb des Simulationsvolumens entsteht die Oberflächenrauhigkeit durch die Geometrie. (Mail Gexcon 2018-12-11)
Toxische Einwirkung /toxic effect				
Maximale Expositionszeit	1'800 s und 8'000 s		x	Vorschlag BAV (Mail BAV 2018-11-27) wäre 1'800s. FLACS hat keine Funktion zur Begrenzung der Expositionszei (Mail Gexcon 2019-02-05). Deshalb wird für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in EFFECTS eine zusätzliche Berechnung mit einem möglichst hohen Wert durchgeführt (Bespr. BAV 2019-02-27).

x=ja, z=Zwischenergebnis

A 4 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

A 4.1 Geometrie (nur FLACS)

Wie Szenario 2 ausser :

- Terrain in Windrichtung um 10° (17.6 %) abfallend

Es wurde eine relativ starke Hangneigung gewählt, um den Einfluss der Hangneigung möglichst deutlich zu sehen.

Gemäss Zulassung durch das US DOT tendiert FLACS dazu, bei mehr als 4 bis 8.6 % abwärts gerichteten Neigungen die Konzentrationen vor allem im Fernbereich zu unterschätzen. Bei 8.6 % Neigung stimmte die Konzentration im Nahbereich mit dem Experiment überein, während sie im Fernbereich um einen Faktor 2 unterschätzt wurde. Bei 11.6 % Neigung wurde die Konzentration im Nahbereich um einen Faktor 2 oder weniger und im Fernbereich um einen Faktor 2 oder mehr unterschätzt.

A 4.2 Parameter

Wie Szenario 2

Keine EFFECTS-Berechnung eigens für Szenario 3, da in EFFECTS keine geeigneten Oberflächen simuliert werden können.

A 5 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

A 5.1 Geometrie (nur FLACS)

Wie Szenario 2, aber mit anders angeordneten Gebäuden.

Die Bebauungsdichte in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" ist etwa doppelt so hoch wie diejenige des Quartiers Wettingen Hardstrasse südlich der Hardstrasse in Abb. 15 und etwa um einen Drittel höher als der Bereich des Quartiers Wettingen Hardstrasse mit den zehnstöckigen Gebäuden nördlich der Hardstrasse.

A 5.2 Parameter

Wie Szenario 2 "Wohnblocks"

Keine EFFECTS-Berechnung eigens für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken", da die Unterschiede zwischen der Geometrie in Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" mit EFFECTS nicht abgebildet werden können.

A 6 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

A 6.1 Geometrie (nur FLACS)

Wie Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

A 6.2 Parameter

Die Freisetzung wird in FLACS mit über die gesamte Dauer der Freisetzung konstanten Parametern wie Freisetzungsrate, Rainoutanteil, Jet-Temperatur und -Durchmesser etc. simuliert.

Der CFD-Code zur Dispersionsberechnung und der Poolsimulator von FLACS wären dafür ausgerüstet, um zeitlich variierenden Input verarbeiten. FLACS verfügt aber über keine Möglichkeit, die nötigen Freisetzungparameter wie Freisetzungsrate, Rainoutanteil, Jet-Temperatur und -Durchmesser etc. zeitabhängig zu berechnen. Diese Parameter können mit FLACS nur für den Anfangszustand berechnet werden. Üblicherweise werden diese Parameter verwendet und über die gesamte Freisetzungsdauer konstant beibehalten.

Für eine zeitabhängige Berechnung wäre der behelfsmässige Einsatz eines zusätzlichen Tools wie beispielsweise FRED nötig, was aber nicht mehr einer Simulation, wie sie üblicherweise mit FLACS durchgeführt wird, entspricht.

Der Hersteller Gexcon empfiehlt üblicherweise konservativ eine Freisetzungsdauer, bis bei der berechneten Freisetzungsrate der gesamte Behälterinhalt freigesetzt wäre, zu verwenden. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit FLACS-EFFECTS wird für das vorliegende Szenario 5 aber eine Freisetzungsdauer aufgeführt, welche die gleiche gesamte freigesetzte Menge wie bei den EFFECTS-Rechenläufen ergibt (ca. 2/3 des Behälterinhalts).

Da nur die Freisetzungparameter für den Anfangszustand der Freisetzung verwendet werden, gehen das Behältervolumen, Füllstand etc. nicht in die Berechnung ein. Diese Parameter wären vor allem für den zeitlichen Verlauf der Freisetzung relevant.

Der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule über dem Leck könnte bei der Berechnung der anfänglichen Freisetzungparameter mit FLACS berücksichtigt werden. In der Realität würden der Flüssigkeitsspiegel und damit der hydrostatische Druck im Verlauf der Freisetzung absinken. Dieses Absinken kann jedoch mit dem FLACS Tool für die Berechnung der Freisetzungparameter nicht berücksichtigt werden, da dieses nur den Anfangszustand berechnen kann. Gexcon empfiehlt deshalb, den hydrostatischen Druck wegzulassen. Der Einfluss des hydrostatischen Drucks ist im vorliegenden Szenario 5 nicht sehr gross.

Für die Lachensimulation werden die Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitzahl und Bodenrauigkeit eines "Standardbodens", d.h. eines durchschnittlichen Bodens verwendet.

Dies entspricht gemäss dem Hersteller Gexcon einer üblichen Vorgehensweise. Diese Standardwerte können jedoch von einem Bahnschotter abweichen, wie folgenden beiden Tabellen aus der EFFECTS-Dokumentation zeigen:

Tab. 9 Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitzahl und weitere Parameter für verschiedene Bodenoberflächen bei der Lachensimulation (Auszug aus der EFFECTS-Dokumentation, EFFECTS Version 11.0.7)

Material	λ_s (J/(s·m·K))	ρ_s (kg/m ³)	$C_{p,s}$ (J/(kg·K))	$a_s \times 10^{-7}$ (m ² /s)
Isolation concrete	0.207	900	920	2.5
Light concrete	0.418	1800	920	2.5
Heavy concrete	1.3	2400	920	5.9
Clinkers	0.7	2000	836	4.2
Average subsoil 8 wt% moist	0.9	2500	836	4.3
Dry sandy subsoil	0.3	1600	799	2.0
Wet sand 8 wt% moist / clay	0.6	1940	937	3.3
Wood	0.2	550	2300	1.6
Gravel	2.5	2000	1140	11
Carbon steel	46	7840	460	128

Tab. 10 Oberflächenrauigkeit für verschiedene Bodenoberflächen bei der Lachensimulation (Auszug aus der EFFECTS-Dokumentation, EFFECTS Version 11.0.7)

Subsoil	Average roughness
Flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard	0.005 m
Relatively flat sandy soil, gravel	0.010 m
Rough sandy soil, arable land, meadows	0.020 m
Very rough overgrown sandy soil with holes	0.025 m
Quiet water	0.005 m
Rippling water	0.020 m

Es können keine EFFECTS-Berechnung eigens für Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" durchgeführt werden, da in EFFECTS keine FLACS Freisetzungsmodellierung möglich ist. Die Ergebnisse der FLACS-Berechnungen für das Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" werden deshalb mit denselben EFFECTS-Rechenläufen verglichen, die bereits für Szenario 2, 3 und 4 verwendet wurden.

Tab. 11 Parameter Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Umgebungsbedingungen				
Lufttemperatur	15°C	x	x	Mail BAV 2018-11-27
Windgeschwindigkeit in 10m Höhe	1.5 m/s	x	x	Methodikentwurf BAV
Pasquill-Klasse	F	x	x	Methodikentwurf BAV, Mail BAV 2018-11-27
Windrichtung	170°	x	x	Bespr mit BAV 2019-02-27
Oberflächenrauigkeit	1 m (zusätzliche EFFECTS Berechnung mit 3 m, entspricht höchster Roughness Length Klasse 8 in EFFECTS, beschrieben mit "City centre with high- and low rising buildings")	x	x	Bespr. BAV 2019-03-26 Wert wird in FLACS für den Bereich ausserhalb des Simulationsvolumens verwendet Mail Gexcon 2018-12-11
Luftdruck	952 hPa	x	x	MeteoSchweiz Normwert 1981-2010 Luftdruck auf Stationshöhe Bern, Zürich
Relative Luftfeuchtigkeit	83 %	x	x	Mail BAV 2018-11-27 MeteoSchweiz Standardnormwerte 1961-1990 Relative Luftfeuchtigkeit 2 m Bern, Zürich sind ca. 78 %
Sonneneinstrahlung	120 W/m ²	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Bodentemperatur	15°C	x	x	Mail BAV 2018-11-27
Bodentyp	Average subsoil: Conductivity: 0.9 Wm ⁻¹ K ⁻¹ Thermal diffusivity: 4.3 * 10 ⁻⁷ m ² s ⁻¹	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), 2020-04-03 Mail Gexcon 2020-02-19, 2020-02-25

x = ja
z = Zwischenergebnis
- = nicht verwendet

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Bodenrauigkeit (pool)	0.005 m (flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard)	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), 2020-04-03 Mail Gexcon 2020-02-19, 2020-02-25
Stoff und Kesselwagen				
Stoff	Chlor flüssig	x	x	Methodikentwurf BAV
Dichte der Flüssigphase	1.57 t/m ³ (Angabe Methodikentwurf BAV)	z 1.56 t/m ³ (Berechnung mit FLACS)	-	Methodikentwurf BAV Mail Gexcon 2020-02-19
Temperatur des Tanks	15°C	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Druck im Behälter	Dampfdruck bei gegebener Temperatur	z (gemäss FLACS 5.79 bar)	x (gemäss EFFECTS 5.888 bar)	Methodikentwurf BAV Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 2020-02-19 (FLACS berechnet den Druck an der Lecköffnung anhand Temperatur, Partialdruck anderer Gase im Behälter, hydrostatischem Druck)
Tankvolumen	54 m ³	-	x	Methodikentwurf BAV
Tankdurchmesser	2.55 m	-	-	Methodikentwurf BAV
Tanklänge	11.215 m	-	x	Methodikentwurf BAV
Füllstand	76 %	-	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) (Methodikentwurf BAV: 84 %)
Leck				
Freisetzung	Kontinuierliche Freisetzung	x	x	Methodikentwurf BAV
Leckdurchmesser	75 mm	x	x	Methodikentwurf BAV

x = ja
z = Zwischenergebnis
- = nicht verwendet

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Höhe des Lecks über Boden	1.85 m	x	x	Mail BAV 2018-11-27
Austrittsrichtung	Nord	x	x	
Austrittswinkel	Horizontal	x	x	Methodikentwurf BAV S.36
Konstante Austrittsrate	Leicht unterschiedliche Werte FLACS und EFFECTS	z 171 kg/s	z 164.74kg/s	Mail BAV 2018-11-27, 2020-04-03, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 25.2.2020
Austrittsdauer	Leicht unterschiedliche Werte FLACS und EFFECTS	x 217 s Dauer, die dieselbe gesamte Freisetzungsmenge wie bei EFFECTS ergibt	z 225 s	Mail BAV 2018-11-27, 2020-04-03, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 25.2.2020
Temperatur Jet	Unterschiedliche Werte FLACS und EFFECTS	z -62.9°C	z -34.03°C	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) Abklärung Gexcon/TNO 2019-02-05 Mail Gexcon 19.2.2020
Repräsentative Temperatur Jet		-	z 14.179°C	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set) Abklärung Gexcon/TNO 2019-02-05, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Durchmesser Jet	Unterschiedliche Werte FLACS und EFFECTS	z 2.26 m (jet area 4 m ²)	z 0.54673 m	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 19.2.2020

x = ja
z = Zwischenergebnis
- = nicht verwendet

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Massenanteil Rainout	Unterschiedliche Werte FLACS und EFFECTS	z 0.746	z 0	Methodikentwurf BAV S. 31 Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set), aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 19.2.2020
Ausflusskoeffizient	C=1	x	x	Methodikentwurf BAV
Höhe des Lecks über Tankunterseite	$d_{\text{Tank}}/3 = 0.85 \text{ m}$	-	x	Methodikentwurf BAV, Mail BAV 2020-04-03 Mail Gexcon 19.2.2020, 25.2.2020 Bei FLACS nicht verwendet weil: FLACS berechnet nur Freisetzungs-parameter für den Anfang der Freisetzung. Am Anfang beeinflusst die Höhe des Lecks über Tankunterseite nur den Hydrostatischen Druck. Der hydrostatische Druck wird in der vorliegenden Berechnung nicht berücksichtigt
Art der Expansion	Adiabatisch	x	x	Methodikentwurf BAV
Behälterinhalt zu Beginn der Freisetzung	58'678 kg	-	z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Bei FLACS nicht verwendet, da für Freisetzungparameter am Anfang der Freisetzung nicht relevant)
Behälterinhalt am Ende der Freisetzung	21'412 kg	-	z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan
Freigesetzte Menge	37'266 kg	x	z	Mail BAV 2018-11-27, aktualisierte Berechnung mit EFFECTS 10.2.0.19011 suisseplan Mail Gexcon 25.2.2020 Bei FLACS wird die freigesetzte Menge für die Berechnung der Freisetzungsdauer bei konstanter Austrittsrate verwendet

x = ja
z = Zwischenergebnis
- = nicht verwendet

Parameter	Wert	Verwendet für Rechnung mit		Bemerkung
		FLACS	EFFECTS	
Toxische Einwirkung				
Zeitdauer, über welche die Konzentration gemittelt wird	600 s	-	x	Methodikentwurf BAV (default EFFECTS)
Berechnung der Dauer der toxischen Einwirkung basiert auf	Dauer wird gezählt ab Ankunft der toxischen Wolke am betreffenden Punkt	-	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Maximale Expositionszeit	1'800s und 8'000s (8'000s ist maximaler Wert für Szenario 5, bei dem EFFECTS noch korrekt rechnet)	-	x	Vorschlag BAV (Mail BAV 2018-11-27) wäre 1'800s. FLACS hat keine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit (Mail Gexcon 2019-02-05). Deshalb wird für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in EFFECTS eine zusätzliche Berechnung mit einem möglichst hohen Wert durchgeführt (Bespr. BAV 2019-02-27).
Höhe der Messung über Boden	1.5 m und 30.5 m	x	x	Mail BAV 2018-11-27 (EFFECTS comparison Set)
Probit	a = -6.35 b = 0.5 n = 2.75 (C in mg/m ³ , t in min)	x	x	Methodikentwurf BAV, HART V1.1 S. 42 In der aktuellen HART Version V1.2 S. 42 sind b und n vertauscht. Annahme: HART V1.1 stimmt, da in den anderen RIVM Dokumenten (z.B. BEVI) b und n wie in HART V1.1 definiert sind

x = ja
z = Zwischenergebnis
- = nicht verwendet

B Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse

B 1 Allgemeine Erläuterungen und Bemerkungen zu den Ergebnissen

B 1.1 Expositionszeit

FLACS hat keine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit für die Berechnung der toxischen Dosis. Gemäss Vorschlag des BAV für die neue Methodik TRGG Bahn soll die Expositionszeit auf 1'800 s beschränkt werden. Bei EFFECTS hingegen bestehen vor allem bei Szenario 0 deutliche Einschränkungen bei der maximal möglichen Expositionszeit, bei der EFFECTS die Berechnung noch korrekt durchführen kann (maximal 2'250 s bei Szenario 0 "Baseline"). Eine Dosis- und Letalitätsberechnung mit vergleichbaren Expositionszeiten in FLACS und EFFECTS ist deshalb insbesondere für Szenario 0 nicht möglich.

Allerdings zeigt Abb. 24, dass bei den FLACS Berechnungen für Szenario 0 die Dauer des Wolkendurchgangs zumindest für den Bereich mit deutlichem Konzentrationsanstieg unter 2'250 s bleibt. D.h. es ist anzunehmen, dass bei Szenario 0 "Baseline" eine Begrenzung der Expositionszeit in FLACS beispielsweise auf 2'250 s ab Ankunft der Gaswolke nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen für die toxische Dosis und die Letalität führen würde.

Die EFFECTS-Vergleichsrechnungen für das Szenario 1 bzw. die Szenarien 2, 3, 4 und 5 mit 1 m und 3 m Oberflächenrauigkeit konnten zusätzlich mit 8000 s Expositionszeit durchgeführt werden.

Abb. 40 zeigt, dass bei den FLACS Berechnungen für Szenario 1 die Dauer des Wolkendurchgangs klar unter 8'000 s bleibt. Gleich verhält es sich mit Abb. 46 für Szenario 2 "Wohnblocks", Abb. 81 für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung", Abb. 90 für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Abb. 103 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung". D.h. es ist anzunehmen, dass eine Begrenzung der Expositionszeit in FLACS beispielsweise auf 8'000 s ab Ankunft der Gaswolke ebenfalls nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen für die toxische Dosis und die Letalität führen würde.

B 1.2 Isolinien in der Horizontalen für eine bestimmte maximale Chlorkonzentration

Für jedes der berechneten Szenarien werden mit FLACS und EFFECTS Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 1.5 m über Boden dargestellt. Bei Szenario 2 "Wohnblocks", Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung", Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" werden die Isolinien auch in 30.5 m Höhe dargestellt.

Diese Isolinien zeigen die maximale Konzentration, die im Verlauf der Freisetzung und Ausbreitung des Chlorgases am betreffenden Ort erreicht wird. Diese maximalen Konzentrationen treten aber in der Regel nicht an allen Orten gleichzeitig auf. D.h. diese Isolinien stellen keinen Schnitt durch eine zu einem bestimmten Zeitpunkt real vorhandene Gaswolke dar, sondern ein Maximum über die Zeit. Die Konzentrations-Isolinien einer real vorhandenen Gaswolke können je nach Zeitpunkt im Verlauf der Freisetzung deutlich anders aussehen als die Isolinien für die maximalen Chlorkonzentrationen.

Dies verdeutlichen die nachfolgende Abb. 21 und Abb. 22 am Beispiel des Szenarios 0 "Baseline". Abb. 21 zeigt die Isolinien für die maximale Konzentration, die irgendwann im Verlauf der Freisetzung erreicht wird. Abb. 22 zeigt die Isolinien für die momentan zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandene Konzentration. Abb. 22 stellt somit einen horizontalen Schnitt durch die gerade vorhandene Chlorgaswolke dar.

Abb. 21 Szenario 0 "Baseline",

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 1.5m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

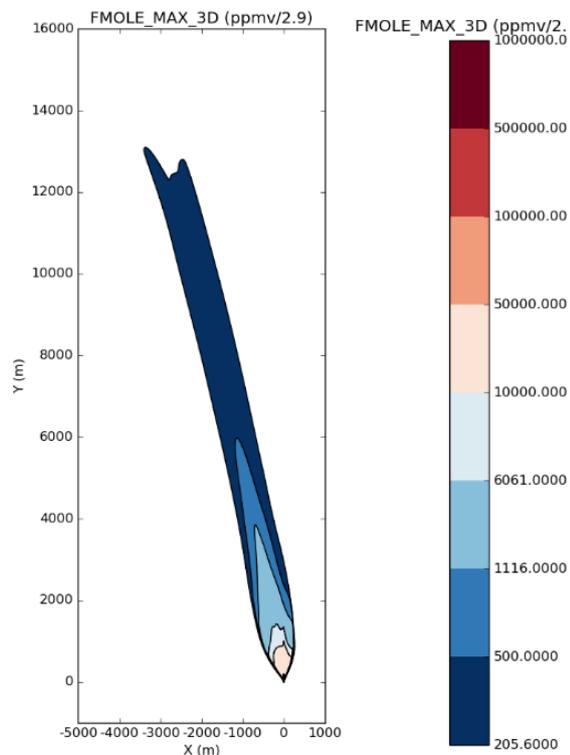
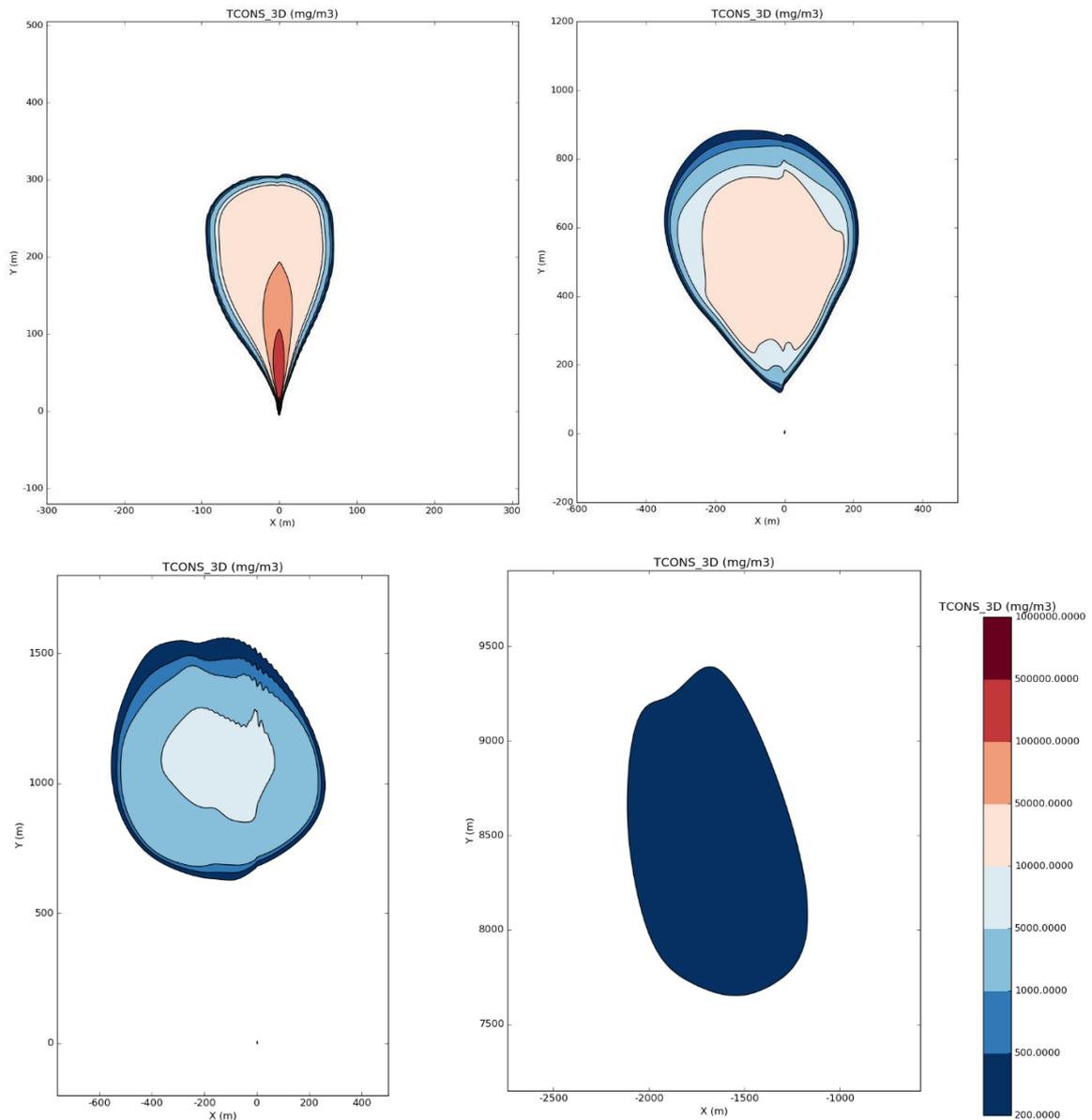


Abb. 22 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien in der Horizontalen für die momentane Chlorkonzentration 1 min, 5 min, 10 min
und 60 min (von links nach rechts und oben nach unten) nach der Freisetzung 1.5m
über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



Im vorliegenden Bericht sind sowohl für EFFECTS wie auch FLACS die Isolinien für die maximale Chlorkonzentration im Verlauf der Freisetzung dargestellt. D.h. bei Szenario 0 "Baseline" beispielsweise können Abb. 23 (FLACS) und Abb. 28 (EFFECTS) direkt miteinander verglichen werden. Hingegen sind obige Abb. 22 (FLACS) und Abb. 28 (EFFECTS) nicht miteinander vergleichbar. Abb. 22 bildet die Chlorgaswolke zu bestimmten Zeitpunkten ab, Abb. 28 hingegen fasst die gesamte Freisetzung und Ausbreitung im Verlauf der Zeit in einem einzigen Diagramm zusammen.

B 1.3 Vertikale Schnitte und Plots entlang der Wolkenachse bzw. parallel zu den Koordinatenachsen

In FLACS sind nicht koordinatenachsenparallele Schnitte, Plots etc. entlang der Wolkenachse nur mit grösserem Aufwand möglich. EFFECTS hingegen gibt nur Plots entlang der Wolkenachse aus. Deshalb steht nicht zu jedem Schnitt oder Plot entlang der Wolkenachse von EFFECTS auch das Pendant dazu von FLACS zur Verfügung. Zum Teil sind anstelle eines Plots entlang der Wolkenachse bei den FLACS Ergebnissen jeweils einige y-achsenparallele Schnitte dargestellt. Einer dieser Schnitte verläuft meist auf der x-Position der Austrittsstelle ($x=0$) und die anderen parallel dazu (positive oder negative x-Werte). Es gibt jedoch nicht zu allen Plots entlang der Wolkenachse von EFFECTS auch einige y-achsenparallele Plots von FLACS.

Die Vergleichbarkeit der koordinatenachsenparallelen Schnitte von FLACS mit den Schnitten entlang der Wolkenachse von EFFECTS ist eingeschränkt. Beispielsweise fallen die Chlorkonzentrationen auf den koordinatenachsenparallelen Schnitten mit der Distanz rascher ab als bei einem Schnitt entlang der Wolkenachse. Der Schnitt entlang der Wolkenachse bildet bei einfachen Wolkenformen in der Regel die maximal vorhandene Konzentration in der betreffenden Distanz ab, die y-achsenparallelen Schnitte hingegen nicht. Bei komplexeren Wolkenformen, wie sie vor allem bei den FLACS-Rechnungen für die Szenarien 2 bis 5 auftreten, sind Schnitte entlang der Wolkenachse nur noch beschränkt sinnvoll, da eine Wolkenachse schwierig festzustellen ist.

B 1.4 Berechnungen maximale Reichweite, Fläche pro Letalitätsbereich, mittlere Letalität und letalitätsgewichtete Äquivalenzflächen

B 1.4.1 EFFECTS

Die maximalen Reichweiten der Letalitätsbereiche (z.B. Tab. 2, Tab. 18, Tab. 19 etc.) konnten den EFFECTS-Reports entnommen werden.

Die Flächen innerhalb der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden und die maximale Breite quer zum Wind (z.B. Tab. 2, Tab. 3, , Tab. 18, Tab. 19 etc.) wurden für EFFECTS anhand der Isolinien für die entsprechenden Letalitäten berechnet.

Die mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität hingegen wurden für EFFECTS mit gröberen Rasterdaten (Rasterweite 35 bis 50 m) berechnet. Dies führt zu kleineren Differenzen und ist auch der Grund dafür, dass bei den Szenarien 0 bis 5 bei EFFECTS die Fläche im Letalitätsbereich >99 % kleiner ist als die entsprechende letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität.

B 1.4.2 FLACS

Für die Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser", 4 "Wohnblocks mit Lücken" und 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS-Freisetzungsmodellierung" wurden aus den FLACS-Ergebnissen für die Letalität Rasterdaten mit einer Auflösung von 5 m extrahiert. Bei diesen Szenarien wurden die Flächen pro Letalitätsbereich, die mittleren Letalitäten und die letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen anhand der Rasterdaten berechnet (Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4, Tab. 14, Tab. 15, Tab. 24, Tab. 25, Tab. 51, Tab. 52, Tab. 57 und Tab. 58)

FLACS berechnet innerhalb der Gebäudegeometrien teilweise keine Letalitäten, d.h. in den Rasterdaten ist innerhalb dieser Gebäudegrundrisse eine Letalität von 0 % verzeichnet. Dies ist dann der Fall, wenn der kartesische Raster für die CFD-Berechnung im Bereich des Gebäudes eine genügend hohe Auflösung hat, so dass das Gebäude nicht oder nur teilweise in ein poröses Volumen umgerechnet werden muss. In EFFECTS hingegen sind keine Gebäudegeometrien vorhanden, da EFFECTS Hindernisse im Ausbreitungspfad wie Gebäude, Vegetation etc. nur in Form des Parameters "Oberflächenrauigkeit" teilweise berücksichtigt. Deshalb berechnet EFFECTS überall eine Letalität. Gebäudegrundrisse werden in EFFECTS keine ausgespart. Zum Erhalt der Vergleichbarkeit der Flächen pro Letalitätsbereich und der darauf basierenden letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen von EFFECTS und FLACS wurden deshalb bei den Flächenberechnungen für FLACS die betroffenen Gebäudegrundrisse zum entsprechenden Letalitätsbereich grob hinzuaddiert.

Bei den übrigen Szenarien, für die keine Rasterdaten extrahiert wurden (Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblcoks 10° Neigung"), wurden die maximalen Reichweiten und die Flächen pro Letalitätsbereich anhand der Letalitätskonturen (z.B. Abb. 52) berechnet. Die Berechnung von mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen ist bei diesen Szenarien nicht möglich.

Die maximalen Reichweiten wurden für alle Szenarien dem Bericht Gexcon AS (2020-10-16): Dispersion analysis of chlorine release, Ref. No: Gexcon-20-F100586-RA-1 Rev. 04, Trondheim entnommen.

B 2 Szenario 0 "Baseline"

B 2.1 FLACS

B 2.1.1 Übersicht

B 2.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 12 Szenario 0 "Baseline"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	13'267 m	993 m	10'782'690 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	3'864 m	849 m	1'665'886 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'375 m	662 m	473'884 m ²

Tab. 13 Szenario 0 "Baseline "
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
 Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	90 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	40 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	30 m

B 2.1.1.2 Letalität

Tab. 14 Szenario 0 "Baseline"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis (Quelle/Grundlage: Gexcon AS 13.9.2019, Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	7'958 m	892 m	4'535'175 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	2'846 m	757 m	1'087'325 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	760 m	370 m	117'100 m ²

Tab. 15 Szenario 0 "Baseline"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentielles Schadensausmass 1.5 m über Boden (Datengrundlage: Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche [m²]	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100% Letalität [m²]
1 bis 50 %	3'447'850 m ²	9 %	303'639 m ²
50 bis 99 %	970'225 m ²	79 %	771'205 m ²
>99%	117'100 m ²	100 %	116'659 m ²
Total (>1 %)	4'535'175 m ²	26 %	1'191'502 m ²

B 2.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Parameter von EFFECTS-Berechnung übernommen, siehe Anhang B 2.2.1.3

B 2.1.2 Chlorkonzentration

B 2.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 23 Szenario 0 "Baseline",

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 1.5m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

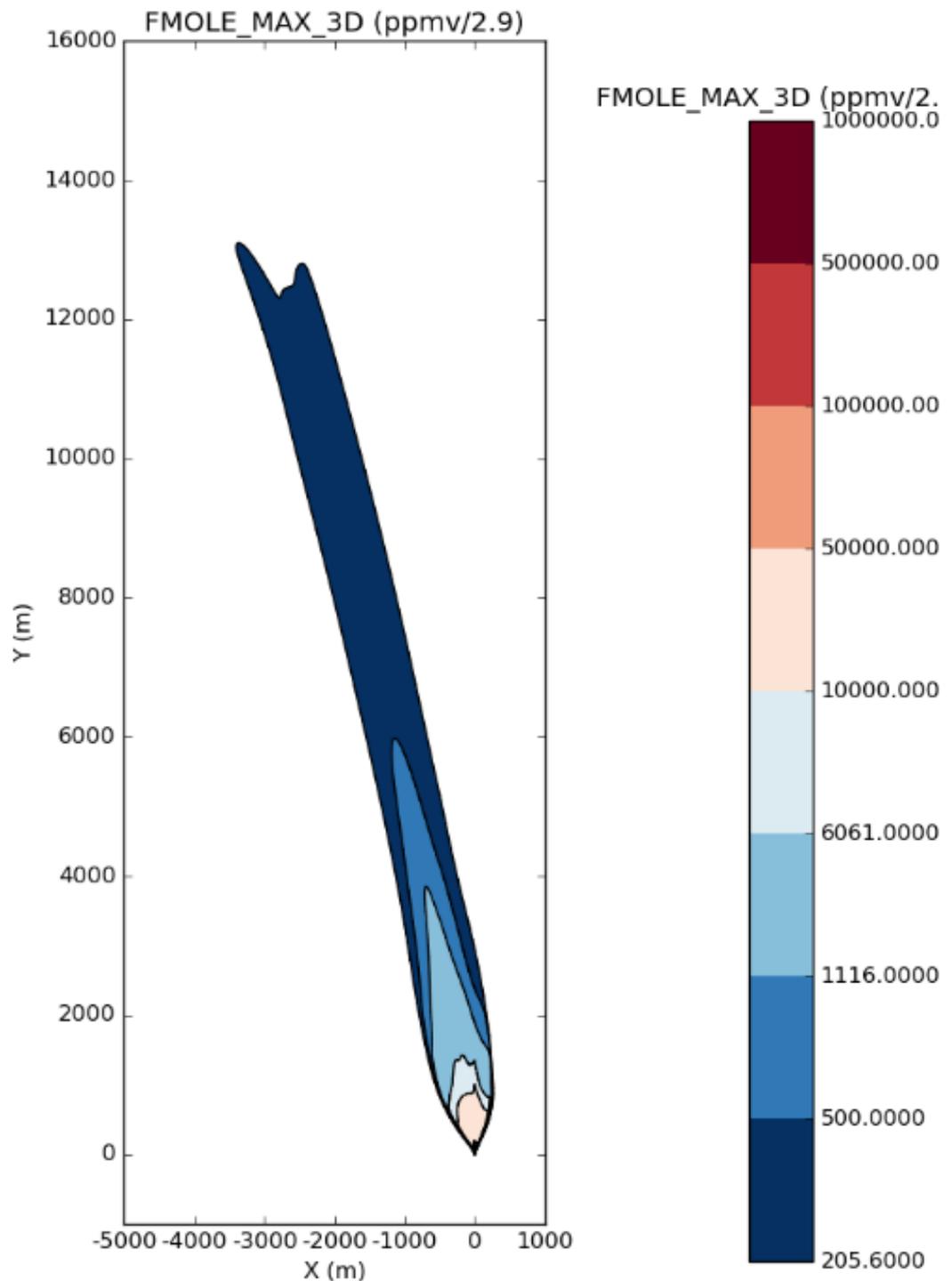


Abb. 24 Szenario 0 "Baseline",
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m,
200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m
über Boden (x-Achse: Zeit in s)
Die Freisetzung startet bei t=300 s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

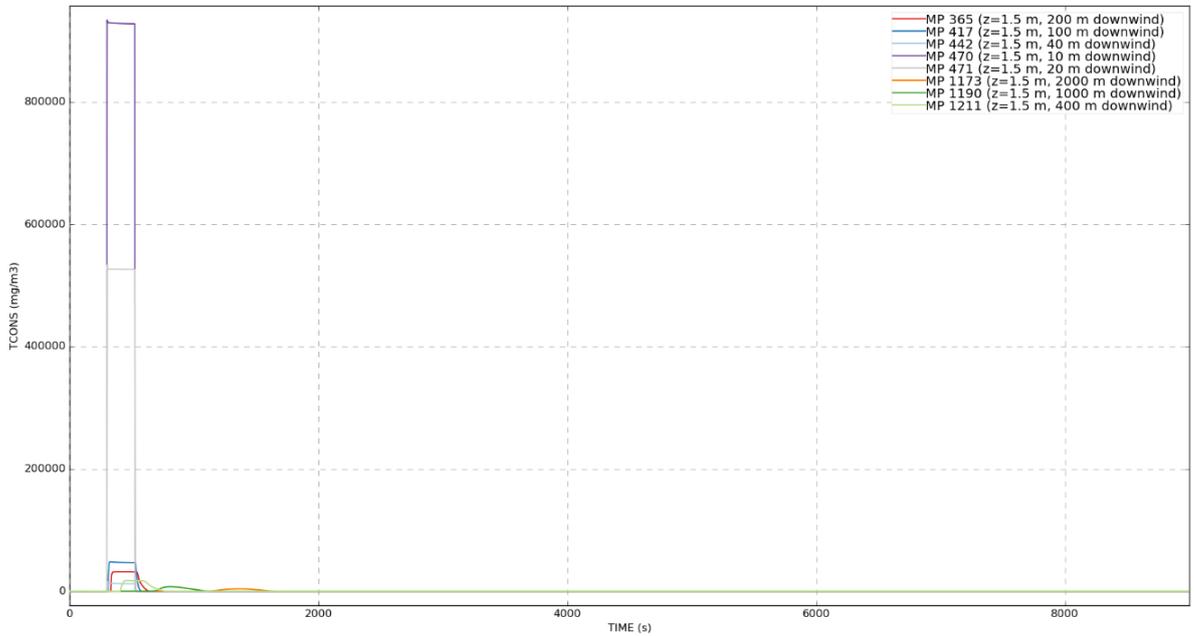
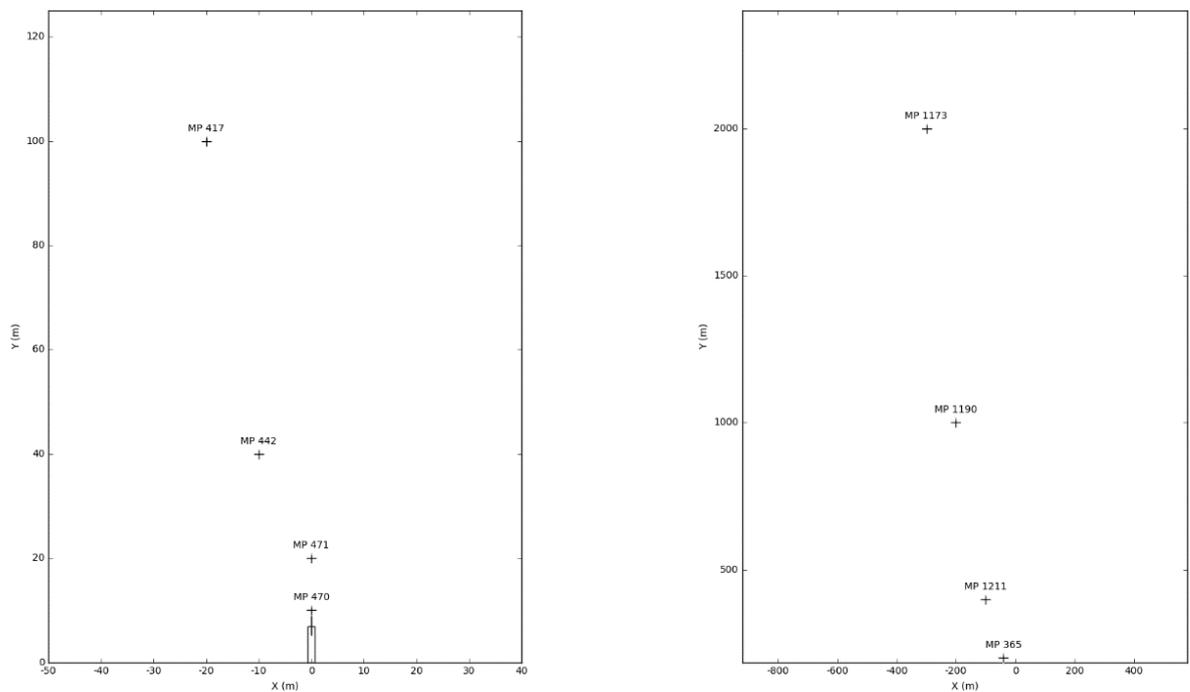
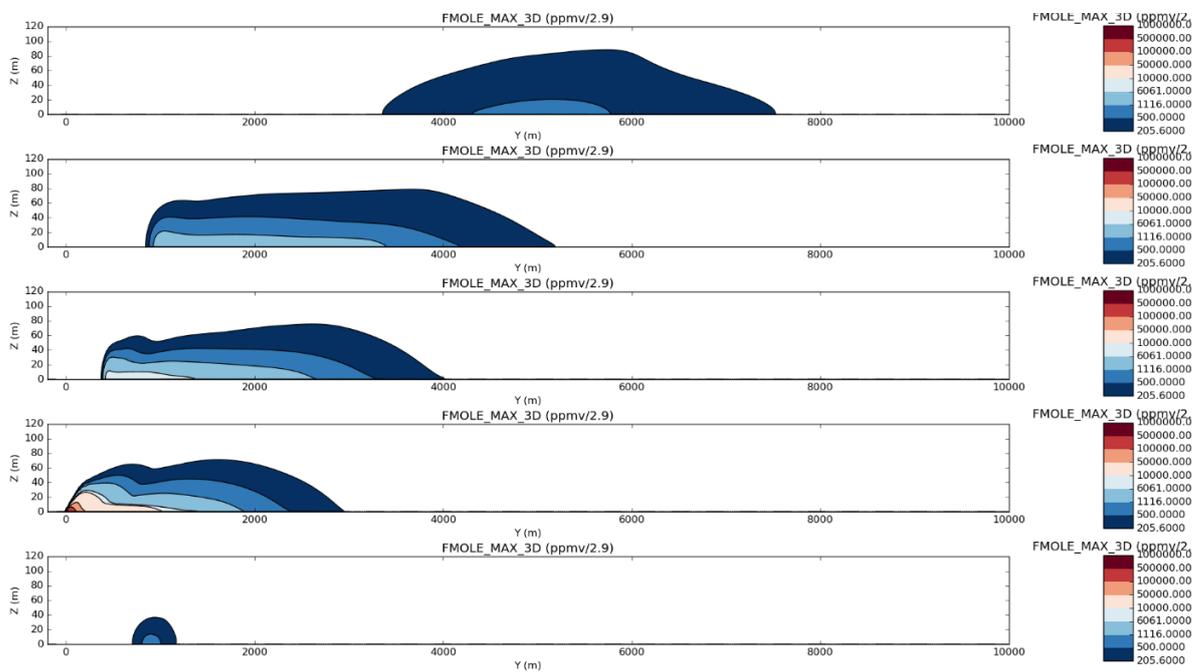


Abb. 25 Szenario 0 "Baseline",
Lage der Messpunkte für Abb. 24 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



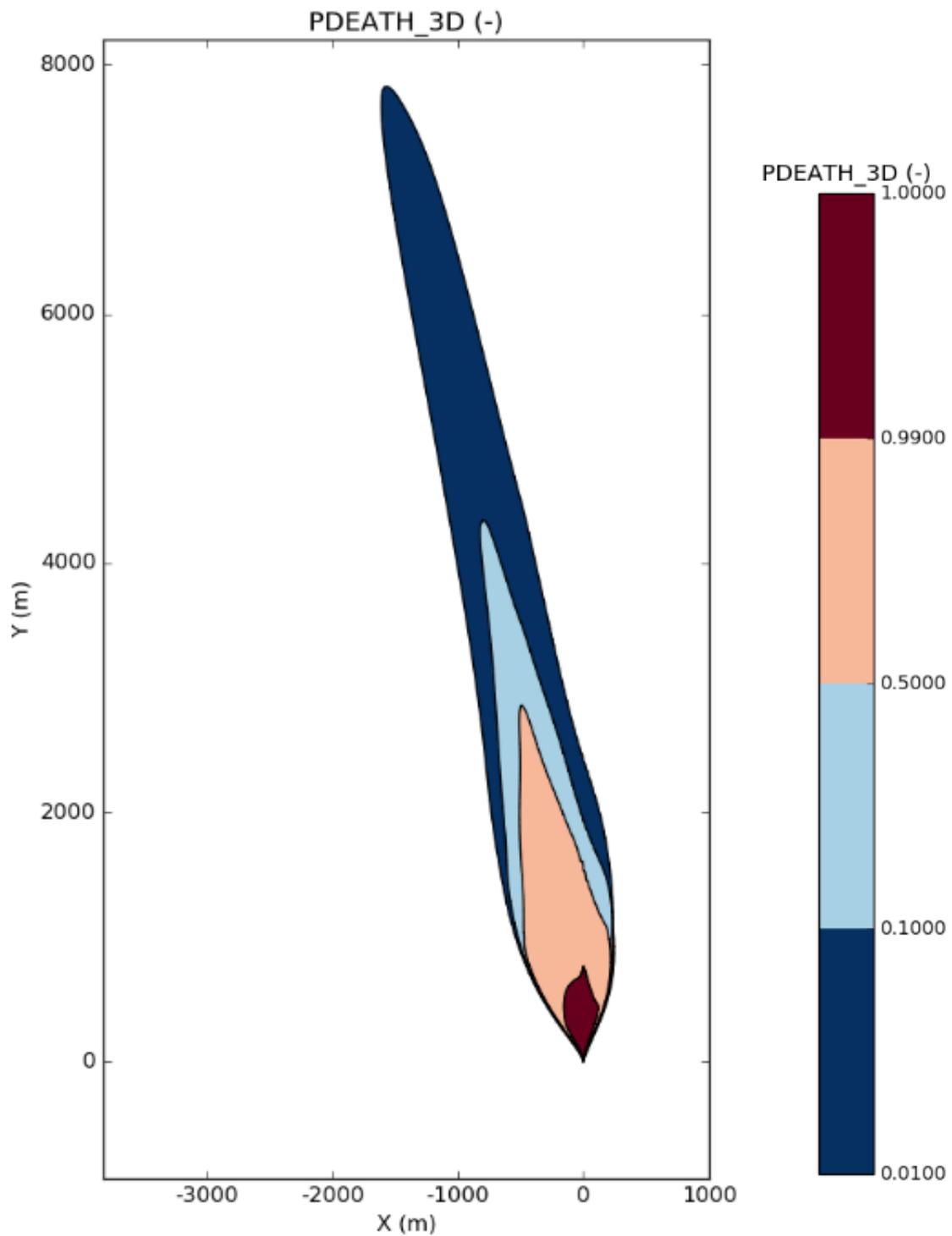
B 2.1.2.2 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 26 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten): $x=-1000$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle), $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 2.1.3 Letalität

Abb. 27 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1,5m über
Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 2.1.4 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Anhang B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

B 2.2 EFFECTS

B 2.2.1 Übersicht

B 2.2.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 16 Szenario 0 "Baseline"

Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	8'549 m	1'937 m	12'357'789 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	3'111 m	1'389 m	3'098'999 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'022 m	840 m	580'484m ²

Tab. 17 Szenario 0 "Baseline "

Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
Boden

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	14.5 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	8 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	6.2 m

B 2.2.1.2 Letalität

Tab. 18 Szenario 0 "Baseline"

Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis bei 1'800 s Expositionszeit

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	8'365 m	1'881 m	11'672'575 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	2'862 m	1'284 m	2'643'540 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	852 m	605 m	313'713 m ²

Tab. 19 Szenario 0 "Baseline"

Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis bei der in EFFECTS maximal möglichen Expositionszeit von 2'250 s

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	8'563 m	1'889 m	12'006'636 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	2'917 m	1'284 m	2'686'126 m ²
99% Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	853 m	604m	313'593 m ²

Tab. 20 Szenario 0 "Baseline"
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen potentiellles Schadensausmass bei 2'250 s
 Expositionszeit

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenz- fläche 100 % Letalität
1 bis 50 %	9'320'510 m ²	12 %	1'125'087 m ²
50 bis 99 %	2'372'533 m ²	77 %	1'816'246 m ²
>99 %	313'593 m ²	100 %	313'935 m ²
Total (>1 %)	12'006'636 m ²	27 %	3'255'268 m ²

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden neben der Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800s mit der in EFFECTS für das Szenario 0 "Baseline" maximal möglichen Expositionszeit von 2'250 s durchgeführt. Bei einer höheren Expositionszeit als 2'250 s würde EFFECTS die toxische Dosis nicht mehr korrekt berechnen.

Da die Letalitätsdistanzen und –flächen bei beiden Expositionszeiten sehr nahe beieinanderliegen, wurden die Schadensausmassberechnungen nur für die Variante mit 2'250 s Expositionszeit durchgeführt.

Die Flächen innerhalb der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden wurden für EFFECTS anhand der Isolinien für die entsprechenden Letalitäten berechnet. Die mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität hingegen wurden für EFFECTS mit gröberen Rasterdaten (Rasterweite 35 bis 50 m) berechnet. Dies führt zu kleineren Differenzen und ist auch der Grund dafür, dass bei den Szenarien 0 bis 5 bei EFFECTS die Fläche im Letalitätsbereich >99 % kleiner ist als die entsprechende letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität

B 2.2.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Tab. 21 Szenario 0 "Baseline"
Übersicht Zwischenergebnisse der EFFECTS Berechnungen zum Austritt,
Phasenübergang und Expansion des Gasstrahls

Parameter	Wert
Konstante Austrittsrate	164.74 kg/s
Austrittsdauer	225 s
Temperatur Jet	-34.03°C
Durchmesser Jet	0.54673 m
Rainout	0 kg/s

B 2.2.2 Chlorkonzentration

B 2.2.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 28 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³
(1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s
Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über
Boden, Rasterweite : 500 m



Abb. 29 Szenario 0 "Baseline",
maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 1.5 m über Boden

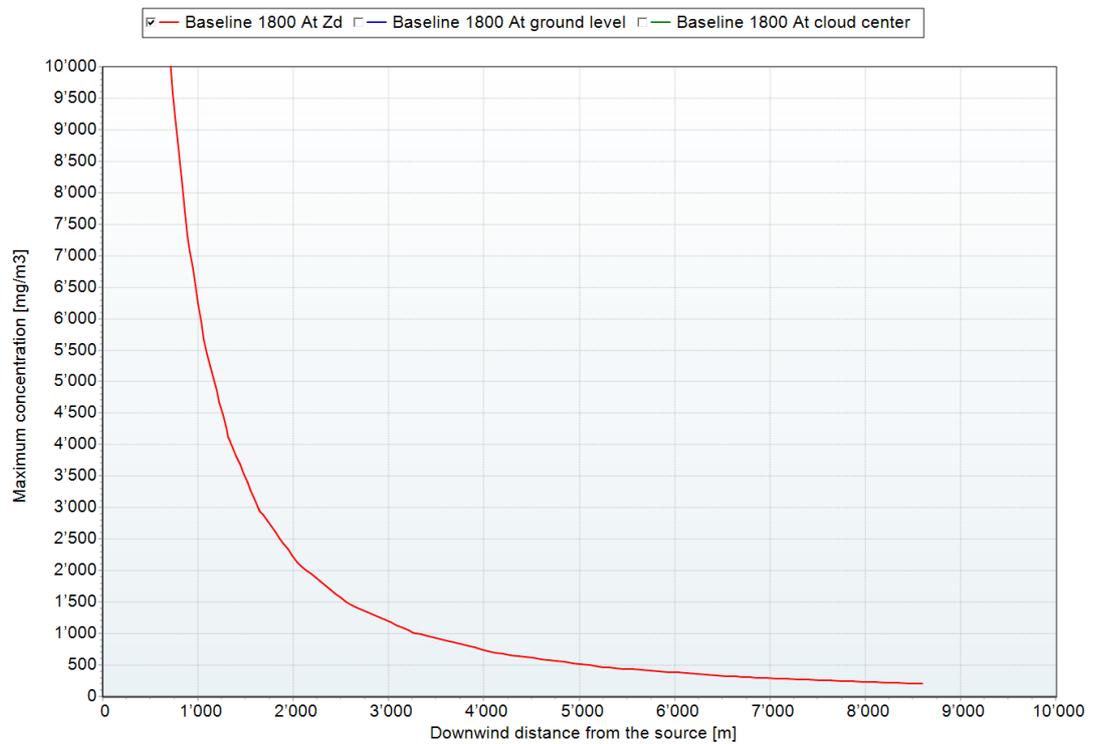


Abb. 30 Szenario 0 "Baseline",
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m und 40 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

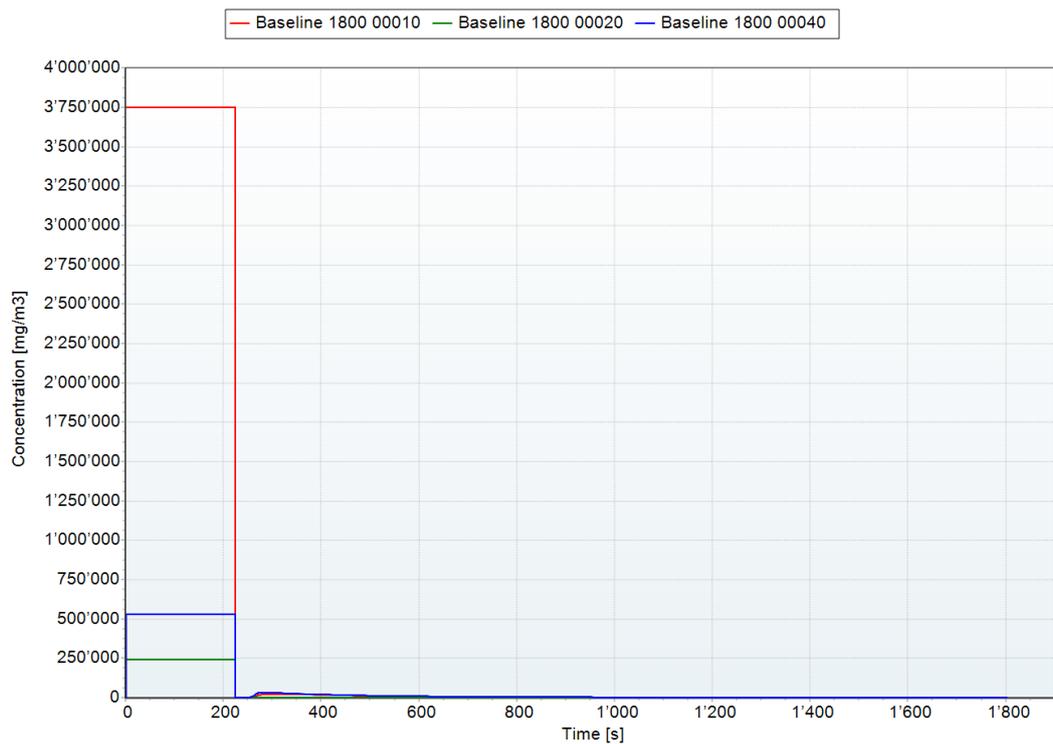


Abb. 31 Szenario 0 "Baseline",
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und 400 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

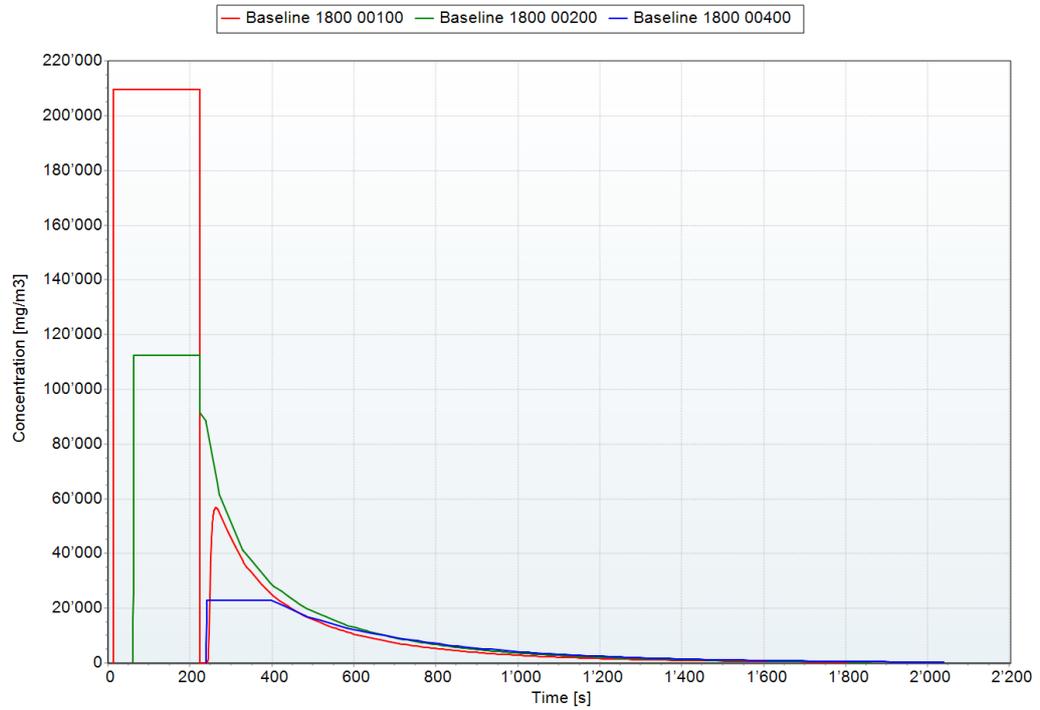


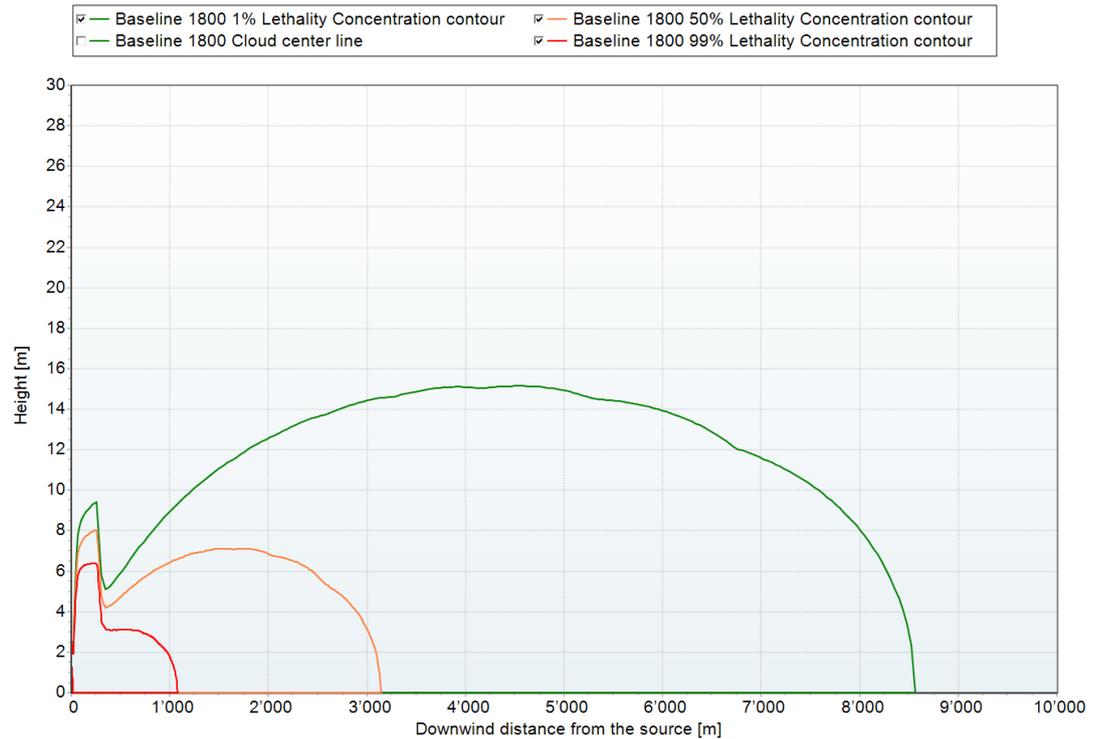
Abb. 32 Szenario 0 "Baseline",
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 1'000 m, 2'000 m, 4'000 m
und 10'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden



B 2.2.2.2 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 33 Szenario 0 "Baseline",

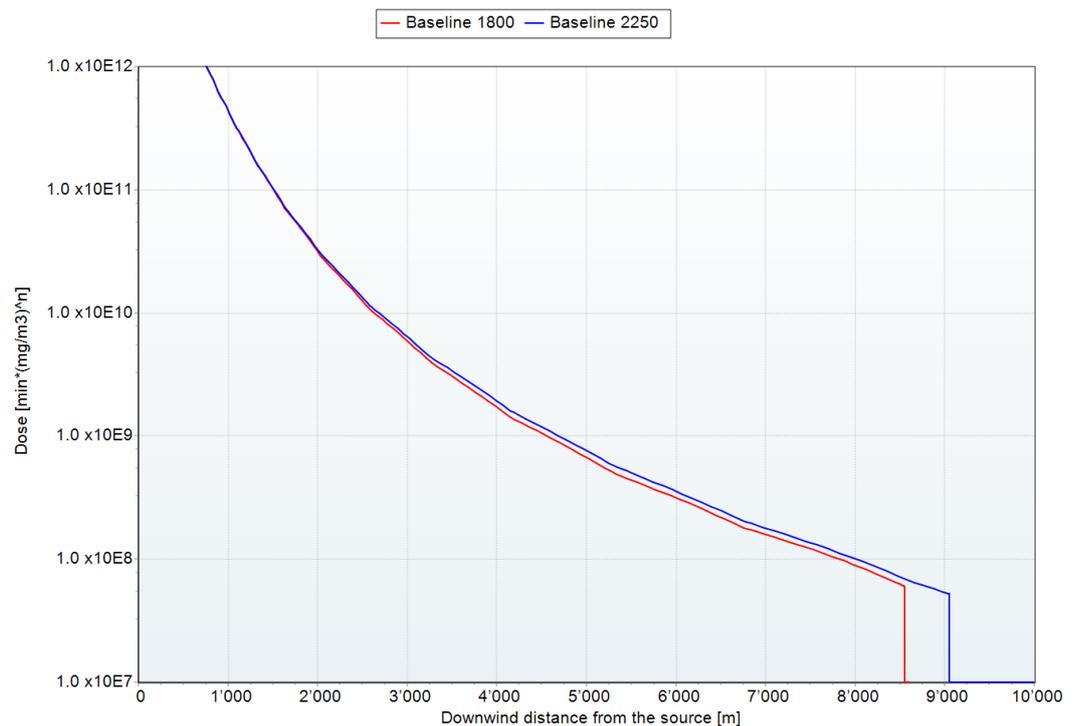
Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x=Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y= Höhe über Boden



B 2.2.3 Toxische Dosis

Die Berechnungen der toxischen Dosis wurden für eine Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800s und der im vorliegenden Fall in EFFECTS maximal möglichen Expositionszeit von 2'250 s durchgeführt.

Abb. 34 Szenario 0 "Baseline",
toxische Dosis in Windrichtung bei 1'800 s und 2'250 s Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1,5 m über Boden



B 2.2.4 Letalität

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden für eine Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800s und der in EFFECTS im vorliegenden Fall maximal möglichen Expositionszeit von 2'250 s durchgeführt.

Abb. 35 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 1'800 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

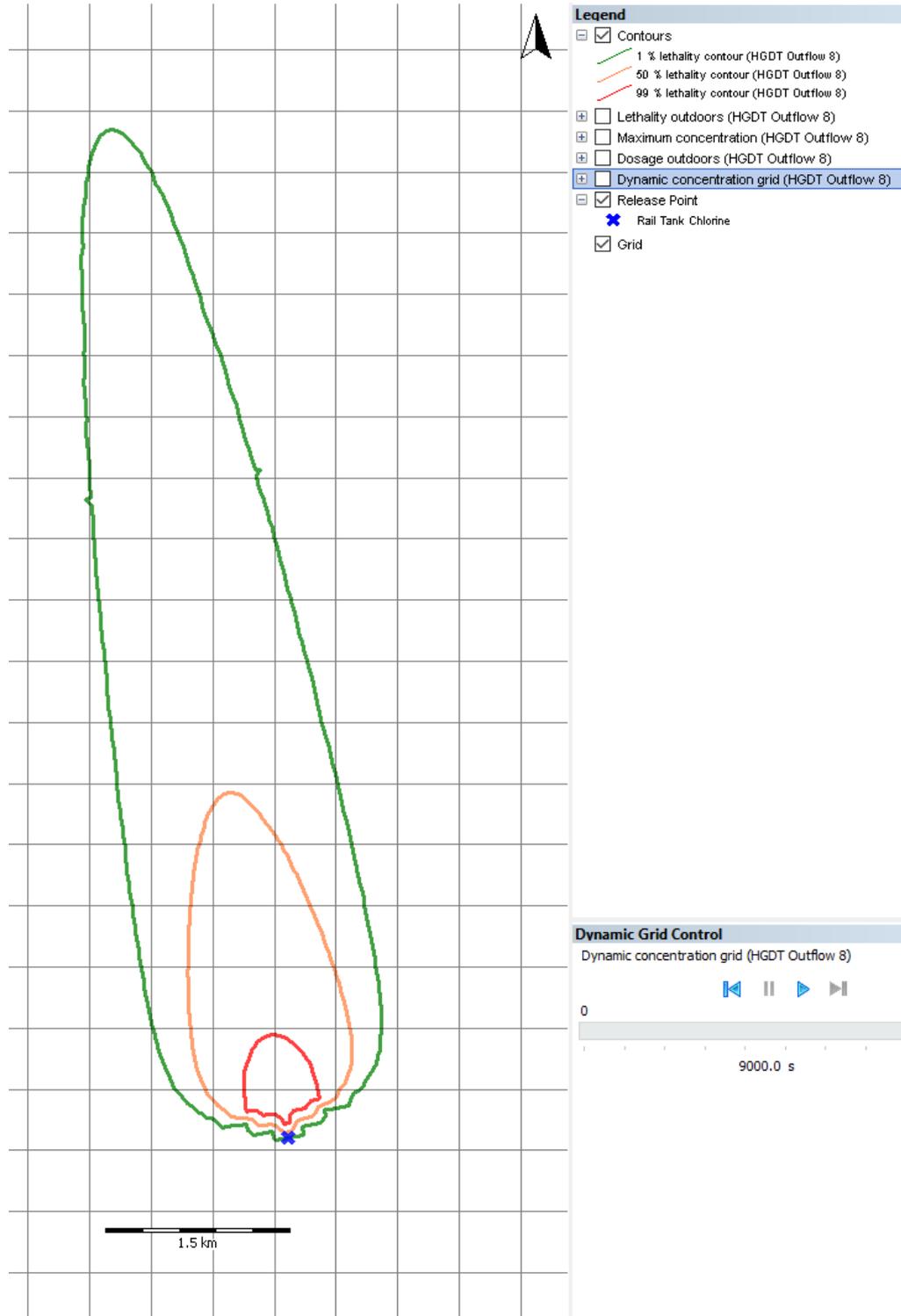


Abb. 36 Szenario 0 "Baseline",
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 2'250 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

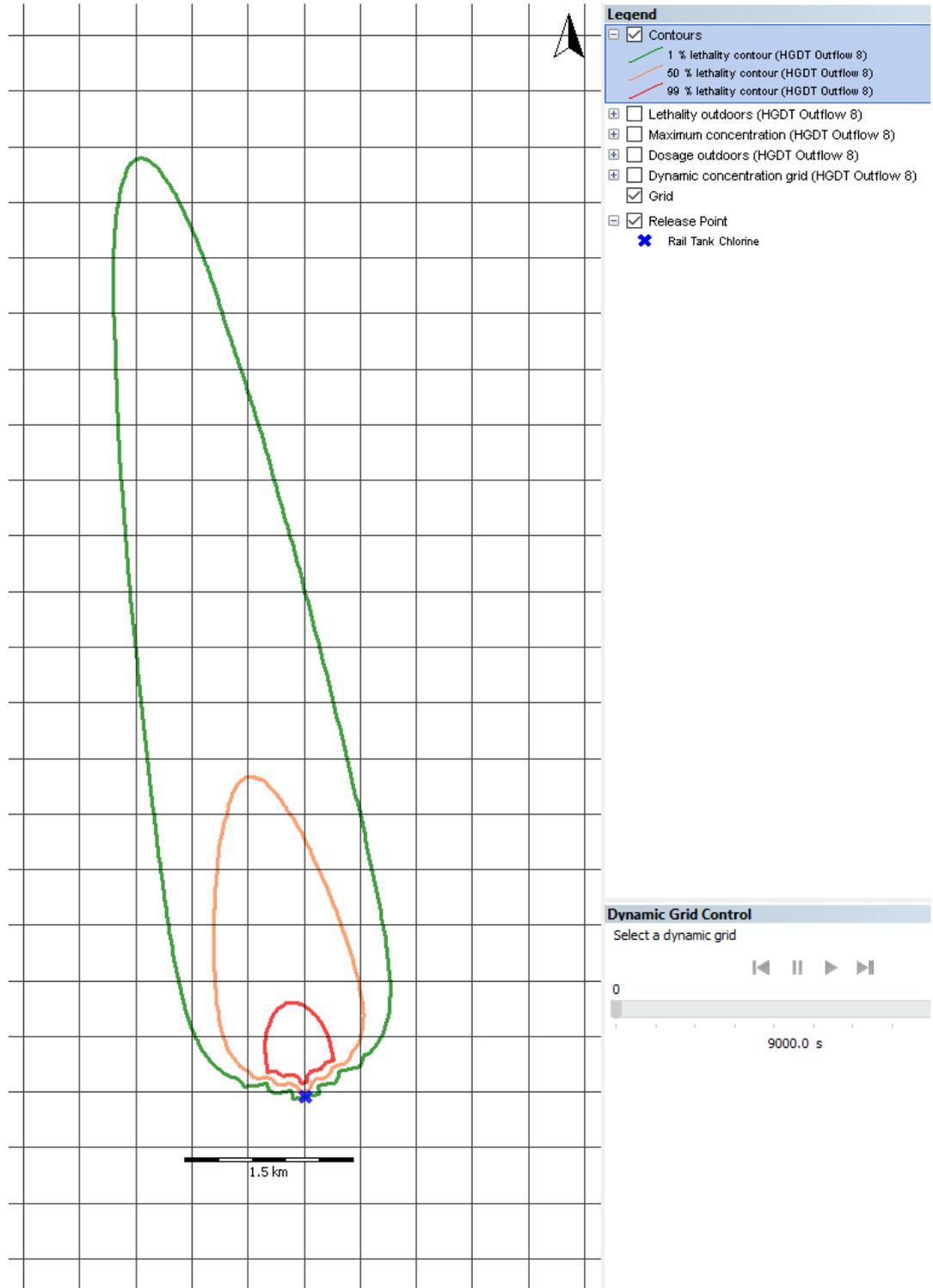
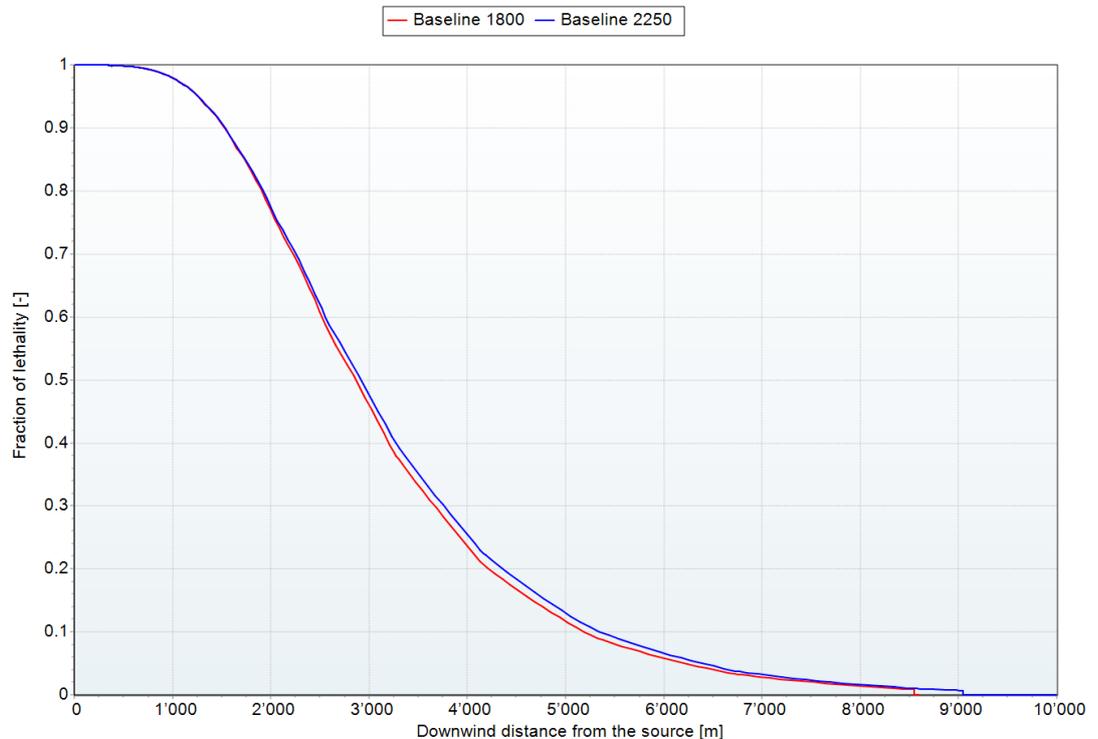


Abb. 37 Szenario 0 "Baseline",
Letalität in Windrichtung bei 1'800 s und 2'250 s Expositionszeit ab Ankunft der
Gaswolke, 1,5 m über Boden



B 2.2.5 Bemerkungen zu den EFFECTS-Ergebnissen

Die längere Expositionszeit von 2'250 s hat in Szenario 0 "Baseline" im Vergleich zur Berechnung mit einer Expositionszeit von 1800 s vor allem bei der maximalen Reichweite der tiefen Letalitätsbereiche in Windrichtungen einen erkennbaren Einfluss. Dies ist gut nachvollziehbar: Im Nahbereich ist die toxische Dosis durch den hohen Peak geprägt, so dass die nachfolgende zusätzliche Expositionszeit mit tieferen Konzentrationen nur noch wenig Dosisbeitrag leistet. Im Fernbereich hingegen ist der Konzentrationsverlauf stark ausgeglättet und kein eigentlicher Peak mehr vorhanden. Die Expositionszeit hat deshalb einen stärkeren Einfluss auf die toxische Dosis. Insgesamt unterscheiden sich die Letalitäten bei einer Expositionszeit von 1'800 s und 2'250 s relativ wenig. Bei einer deutlich längeren Expositionszeit könnten im Fernbereich die Unterschiede jedoch grösser ausfallen.

In Abb. 30 liegen die Chlorkonzentrationen in 10 m und 40 m Abstand zur Freisetzung höher als in 20 m Abstand. Es wäre jedoch ein kontinuierliches Absinken mit zunehmender Distanz von der Freisetzung zu erwarten. Der Grund dafür könnte sein, dass die Ganglinien in Windrichtung ab der Austrittsstelle erfasst werden. Die Windrichtung weicht jedoch um 10° von der Austrittsrichtung ab, so dass ev. die Ganglinie in 20 m Abstand nicht auf der Achse des Gasstrahls, d.h. nicht am Bereich mit der höchsten Chlorkonzentration aufgezeichnet wird.

Das zwischenzeitliche Absinken der Chlorkonzentration im Verlauf der Kurve in 100 m Abstand zur Freisetzung in Abb. 31 scheint unplausibel. Ähnliche Effekte können bei einigen FLACS-Berechnungen jedoch ebenfalls beobachtet werden, z.B. in Abb. 40 Ganglinie in 10 m und 20 m Abstand zur Freisetzung.

Die unterschiedliche Aufzeichnungsdauer der Kurven in Abb. 32 (viel längere Aufzeichnungsdauer bei der Kurve für 10'000 m als bei den anderen Kurven) ist nicht nachvollziehbar. Bei den Ganglinien für die Chlorkonzentration in einem bestimmten Abstand zur Freisetzung kommen die Modelle von EFFECTS ev. an ihre Grenzen.

B 2.3 Vergleiche und Analysen

B 2.3.1 Chlorkonzentration

Beim Szenario 0 "Baseline" ergeben die FLACS-Berechnungen bis zu ca. 50 % höhere maximale Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ in 1.5 m Höhe als die EFFECTS Berechnungen. Da die Chlorgaswolke in FLACS aber deutlich schmaler ist als in EFFECTS, ergeben sich in FLACS etwas kleinere betroffene Flächen.

CFD Tools berechnen üblicherweise den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen, während Integralmodelle über eine bestimmte Zeitdauer (bei den vorliegenden EFFECTS-Berechnungen 10 min) gemittelte Konzentrationen ausgeben. Konzentrationspeaks werden somit bei den Integralmodellen geglättet. Es ist deshalb zu erwarten, dass die maximalen Reichweiten von Konzentrationsschwellenwerten bei den Integralmodellen kleiner ausfallen als bei CFD Tools.

Sehr grosse Differenzen treten bei der maximalen Höhe über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ auf. Hier ergeben sich bei FLACS um mindestens einen Faktor 5 höhere Werte als bei EFFECTS.

B 2.3.2 Letalität

Die Unterschiede zwischen der Berechnung mit 1'800 s und 2'250 s Expositionszeit in EFFECTS sind recht klein. Es wird deshalb nicht separat auf die beiden verschiedenen Expositionszeiten eingegangen.

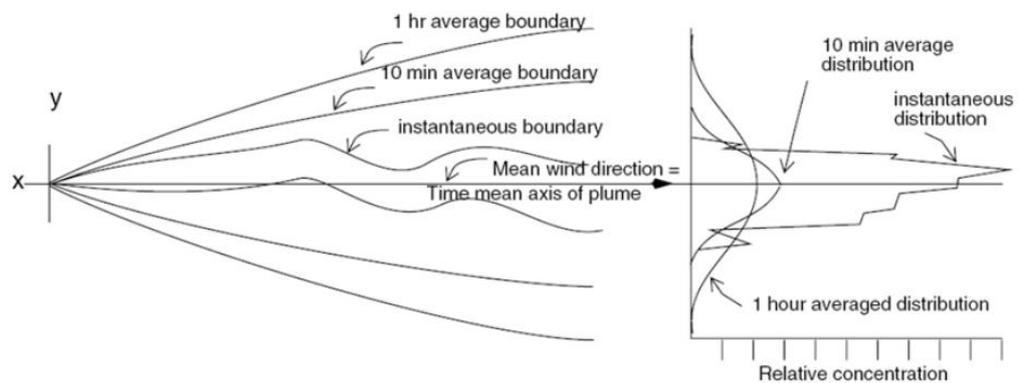
Die maximalen Reichweiten bei den Letalitäten fallen bei EFFECTS und FLACS praktisch gleich aus. Aufgrund der schmalen Gaswolke fallen die betroffenen Flächen bei FLACS jedoch weniger als halb so gross aus wie bei EFFECTS. Vor allem aufgrund der kleineren betroffenen Fläche ist bei FLACS auch die letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche und damit das potentielle Schadensausmass weniger als halb so gross als bei EFFECTS.

EFFECTS berücksichtigt bei der Berechnung der Letalität gewisse Fluktuationen des Windfelds. Die Gaskonzentrationen werden dabei über eine bestimmte Zeit ausgemittelt (siehe Abb. 38). Die breitere Gaswolke bei EFFECTS könnte durch diese Ausmittlungsfunktion verursacht werden.

Gemäss Modellevaluation durch das US DOT tendiert FLACS hingegen im Vergleich zu Messwerten aus Freisetzungsexperimenten im offenen Gelände dazu, die Wolkenbreite um

einen Faktor 2 bis 4 zu unterschätzen. In Windkanalexperimenten, d.h. unter konstanten Laborbedingungen zeigt sich diese Tendenz auch, aber in deutlich geringerem Ausmass. Die Ursache dafür mag teilweise darin liegen, dass die CFD Berechnung mit konstanten Rahmenbedingungen - insbesondere für das einströmende Windfeld - durchgeführt werden. Diese Rahmenbedingungen liegen näher an den kontrollierten Laborbedingungen im Windkanal als an der dynamischeren Situation einer Freisetzung im Freien, wo z.B. Fluktuationen des Windfeldes auftreten.

Abb. 38 Ausmitteln der Fluktuationen des Windfelds in EFFECTS (Quelle: EFFECTS Hilfefunktion)



Die von der Letalität betroffenen Areale stimmen bei den beiden Tools abgesehen von der deutlich schmaleren Gaswolke bei FLACS gut überein.

B 2.3.3 Zeitlicher Verlauf

Beim zeitlichen Verlauf der Chlorkonzentration steigt bei FLACS beim am nächsten bei der Freisetzung gelegenen Messpunkt (10 m Abstand) die Konzentration auf den höchsten Wert an. Die Rangfolge der Konzentrationen der übrigen Messpunkte folgt ebenfalls dem Abstand zur Freisetzung, d.h. je weiter weg der Messpunkt, umso tiefer die Konzentration. Eine Ausnahme bildet der Messpunkt in 40 m Abstand, der eine tiefere Konzentration erreicht als die Messpunkte im Abstand von 100 m, 200 m und 400 m.

Der Grund dafür liegt darin, dass in FLACS der Monitorpunkt in 40 m Abstand nicht genau nördlich der Freisetzung liegt, sondern etwas in westliche Richtung versetzt, d.h. mehr in Windrichtung. Da die Ausbreitung des Gasstrahls bei den vorgegebenen Parametern im Nahbereich stark Impulsgeprägt ist, liegt dieser Monitorpunkt wahrscheinlich nicht an demjenigen Ort, an dem die höchsten Konzentrationen erreicht werden.

Ev. aus einem ähnlichen Grund steigt bei EFFECTS die Konzentration in einem Abstand von 40 m auf einen doppelt so hohen Wert an wie in einem Abstand von 20 m.

Bei EFFECTS steigen die Ganglinien im Bereich näher als 400 m auf viel höhere Werte als bei FLACS, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Ganglinien bei FLACS und ev. auch bei EFFECTS nicht zwingend die im Wolkenquerschnitt erreichten Maxima wiedergeben. Wird

bei EFFECTS nur der rechteckige Peak betrachtet, liegen die Wolkendurchgangszeiten in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei FLACS.

Bei den grösseren Distanzen dreht sich das Bild. Die FLACS-Ganglinien erreichen höhere Werte, jedoch bei etwa einem Faktor 3 kürzeren Durchgangszeiten.

Die Wolke scheint sich in FLACS etwa 50 bis 75 % rascher in Windrichtung zu bewegen als in EFFECTS. Bei beiden Tools breitet sich das Chlor zudem rascher aus als die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe. Die FLACS Berechnungen zeigen, dass der sich aufgrund der von EFFECTS übernommenen Parameter zur Beschreibung des expandierten Gasstrahls ergebende Anfangsimpuls des Gasstrahls bis in grössere Distanzen die Strömungsgeschwindigkeit der Luft beeinflusst. Der Anfangsimpuls ist beinahe in Windrichtung orientiert, so dass er sich zur Windströmung addiert und zu einem schnelleren Strömen der Gaswolke führt.

B 2.3.4 Ergebnis

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

Die FLACS Berechnungen ergeben höhere Reichweiten als EFFECTS für die Konzentrationsschwellenwerte in 1.5 m Höhe. Diese werden aber durch die schmalere Gaswolke und die im Fernbereich kürzere Wolkendurchgangsdauer in FLACS wieder mehr als kompensiert, so dass die Reichweiten bei den Letalitäten praktisch identisch sind und die Flächen für die Letalitätsschwellenwerte sowie das potentielle Schadensausmass bei FLACS weniger als halb so gross ausfallen als bei EFFECTS.

Mögliche Gründe für die Unterschiede bei der Breite der Gaswolke sind der unterschiedliche Umgang mit Fluktuationen des Windfelds bei den beiden Tools und eine allfällige Tendenz von FLACS, die Wolkenbreite zu unterschätzen. Einen gewissen Einfluss auf die Differenzen hat ev. auch die Abbildung der Oberflächenrauigkeit in FLACS anhand der Geometrie. Das damit erzeugte Windfeld entspricht nicht ganz einem auf Basis des Parameters "Oberflächenrauigkeit" berechneten Windfeld.

Vorsicht ist bei der Verwendung der Ergebnisse oberhalb der ersten Meter über Boden geboten. Die grossen Unterschiede bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden deuten auf Unsicherheiten bei den Modellen hin. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen ist bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Bei den Ganglinien zum zeitlichen Konzentrationsverlauf ist das Bild uneinheitlich. Zum Teil treten deutliche Unterschiede auf, so dass auch hier beim Umgang mit den Ergebnissen Vorsicht geboten ist.

B 3 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

B 3.1 FLACS

B 3.1.1 Übersicht

B 3.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 22 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	3'258 m	942 m	1'576'920 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'004 m	904 m	457'255 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	514 m	815 m	209'575 m ²

Tab. 23 Szenario 1 "Einfamilienhäuser "
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
 Boden (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	85 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	35 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800s Expositionszeit)	25 m

B 3.1.1.2 Letalität

Tab. 24 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019, Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	2'134 m	936 m	999'425 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	697 m	921 m	337'325 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	440 m	660 m	157'250 m ²

Tab. 25 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentiell Schadensausmass (Datengrundlage: Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität
1 bis 50 %	662'100 m ²	11 %	75'901 m ²
50 bis 99 %	180'075 m ²	79 %	141'538 m ²
>99 %	157'250 m ²	100 %	157'026 m ²
Total (>1 %)	999'425 m ²	37 %	374'465 m ²

B 3.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Parameter von EFFECTS-Berechnung übernommen, identisch mit Szenario 0 "Baseline", siehe Anhang B 2.2.1.3

B 3.1.2 Chlorkonzentration

B 3.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 39 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

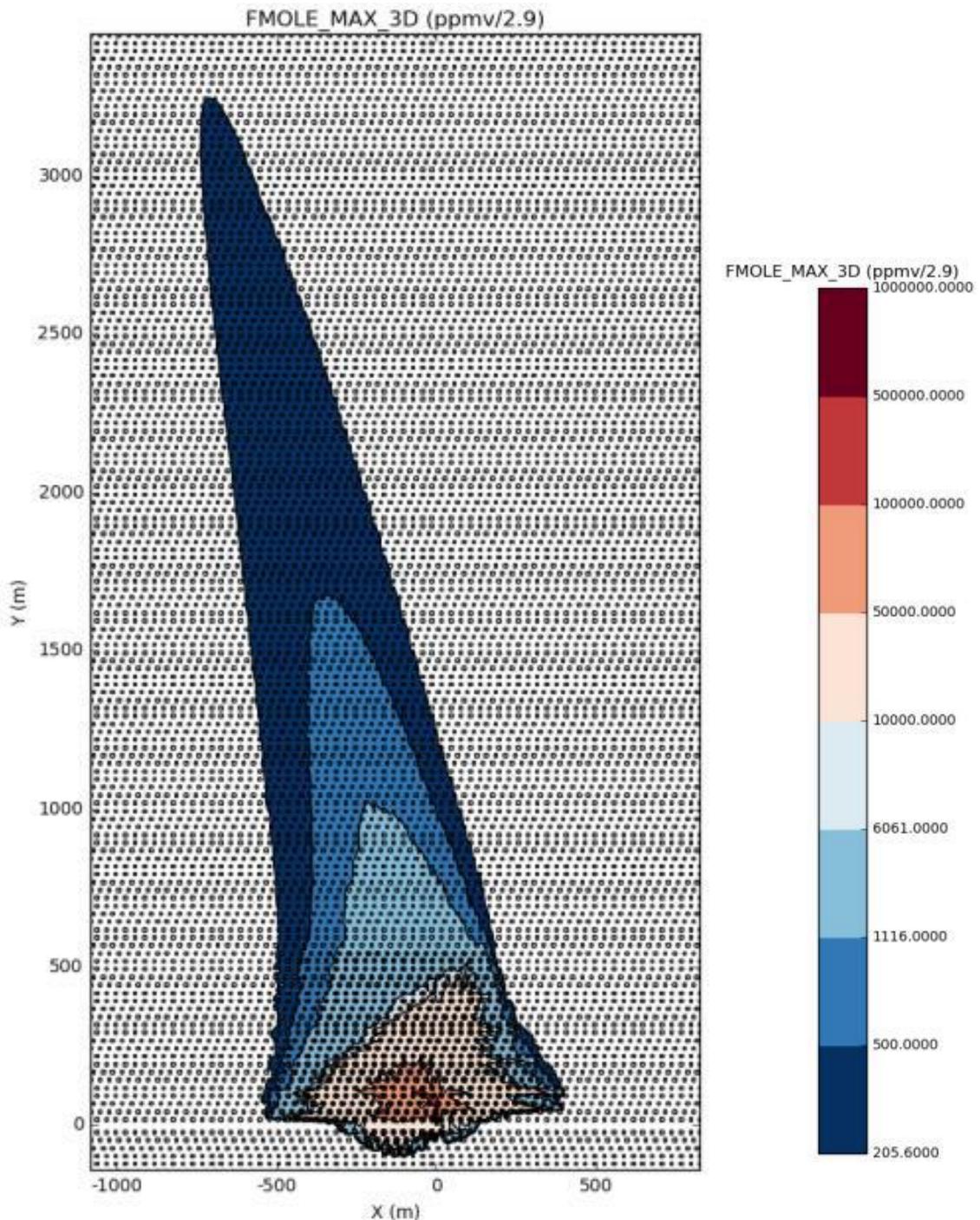


Abb. 40 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

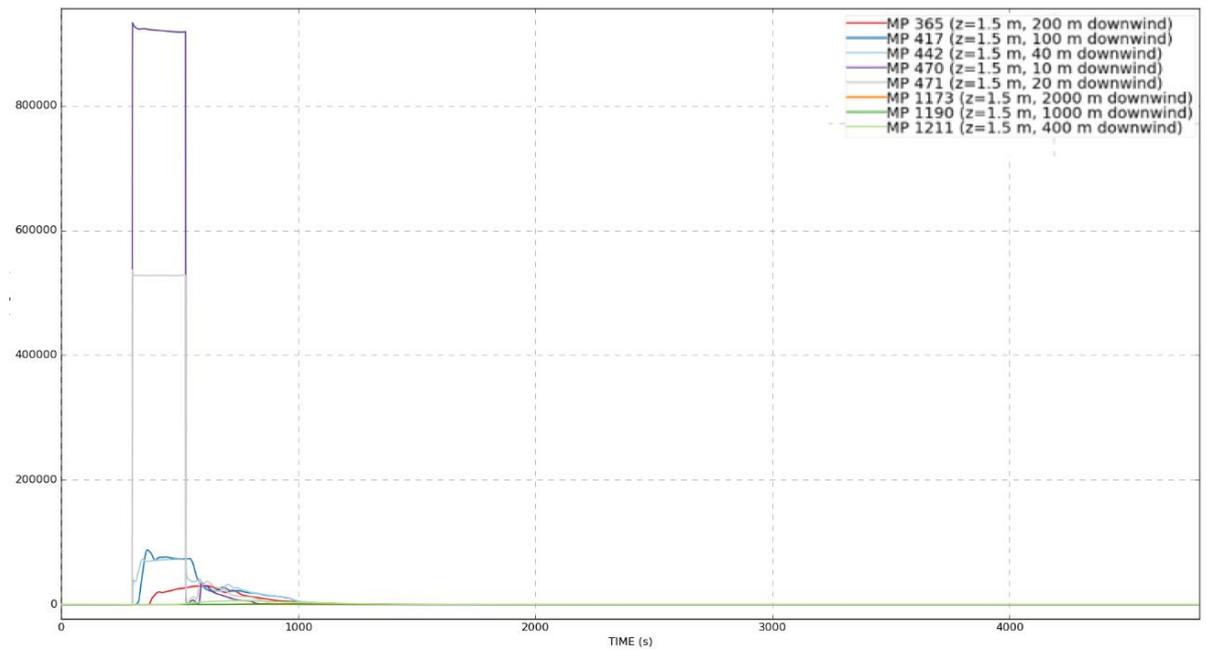
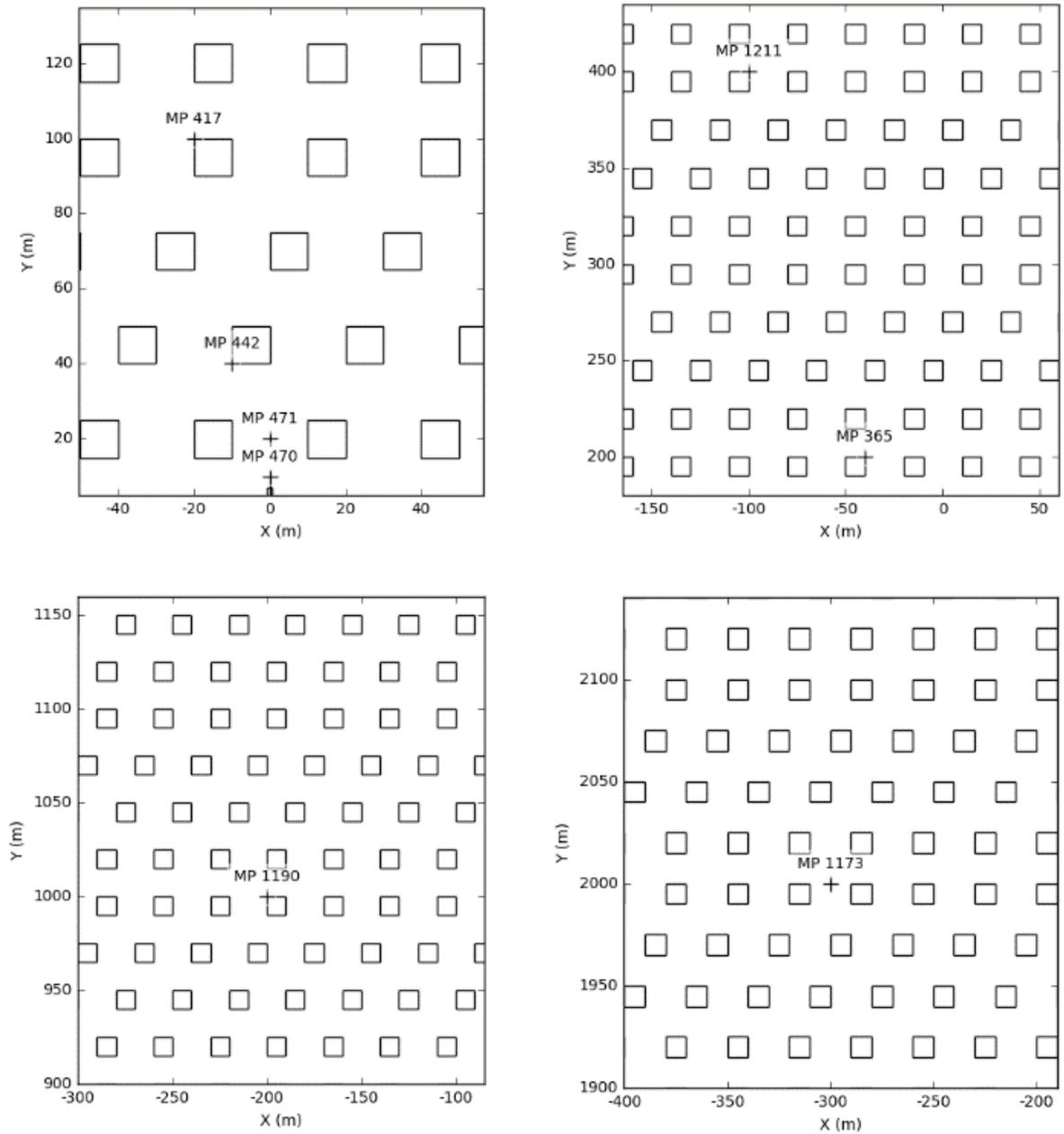


Abb. 41 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

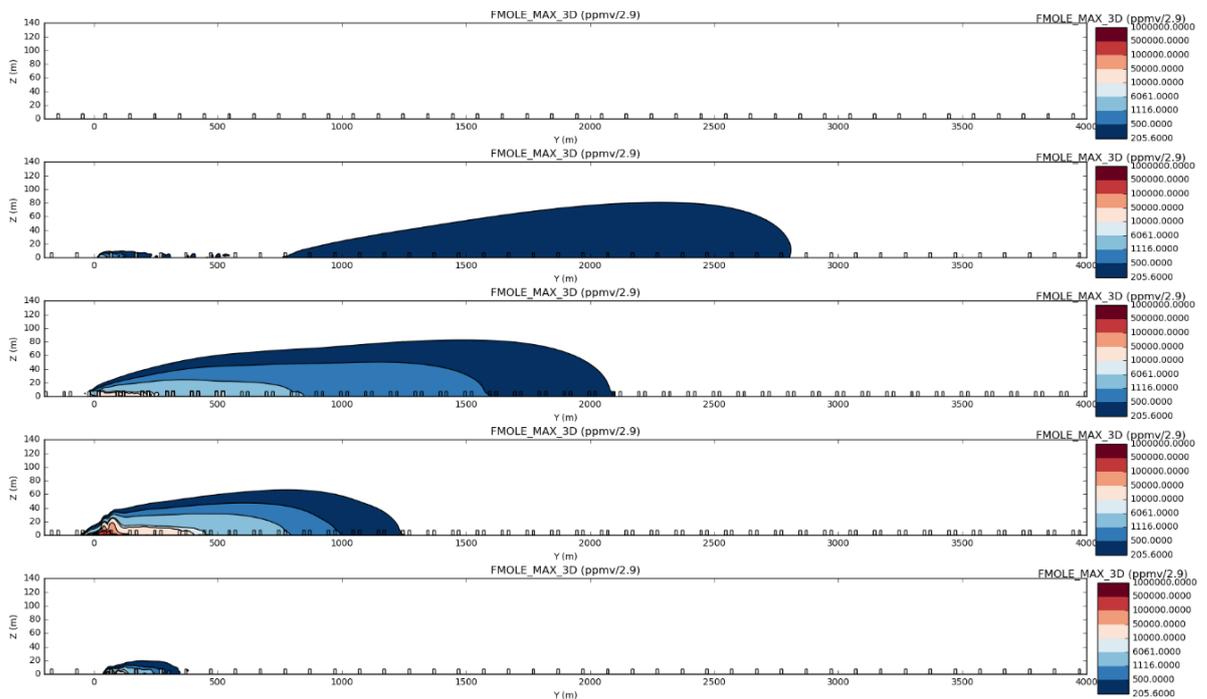
Lage der Messpunkte für Abb. 40 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 3.1.2.2 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 42 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

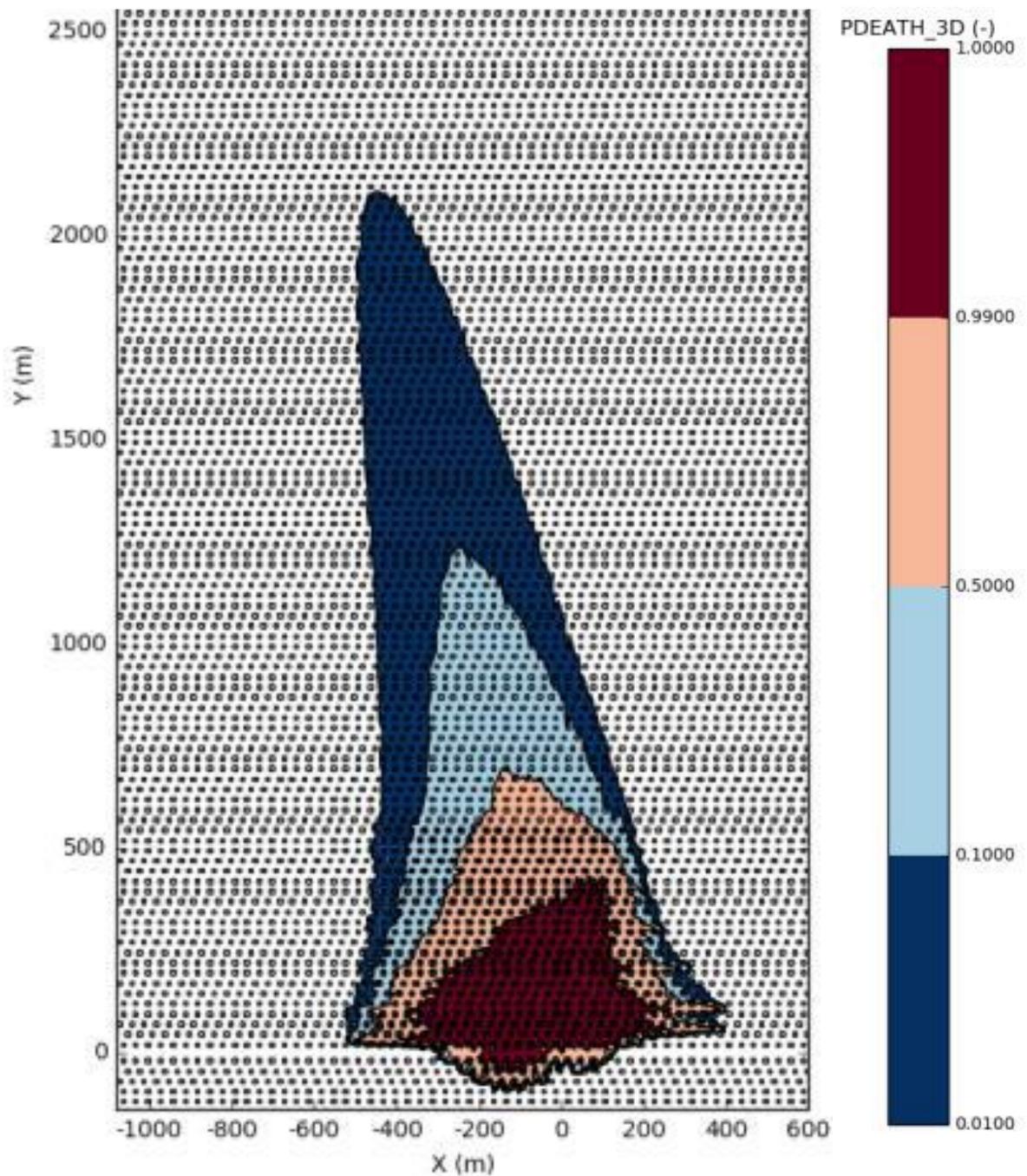
Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten) $x=-750$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle) und $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 3.1.3 Letalität

Abb. 43 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



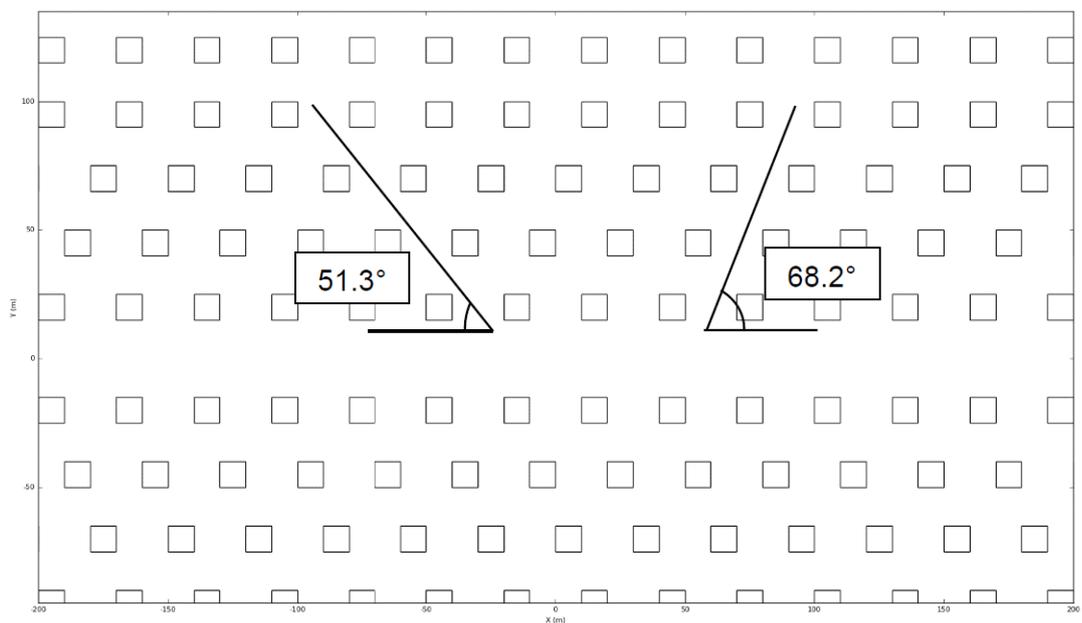
B 3.1.4 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Anhang B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

Bei der Anordnung der Gebäude in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" ergeben sich ansatzweise zwei in unterschiedlichen Winkeln verlaufende Korridore (siehe Abb. 44). Dies könnte zu einer asymmetrischen Ausbreitung der Chlorgaswolke beitragen. Dieser Effekt ist in den Ergebnissen aber schwierig festzustellen, da das Windfeld um 10° von der Nord-Süd-Achse abweicht und somit ebenfalls nicht achsensymmetrisch ist.

Abb. 44 Korridore bei der Anordnung der Gebäude in Szenario 1 "Einfamilienhäuser"
(Quelle: Gexcon AS, 11.9.2019)



B 3.2 EFFECTS

Siehe Anhang B 4.2, gleicher Rechenlauf wie bei Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit.

Die Parameter unterscheiden sich bei den EFFECTS Rechnungen beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser und bei der Variante des Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit nicht.

B 3.3 Vergleiche und Analysen

B 3.3.1 Chlorkonzentration

B 3.3.1.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den FLACS-Berechnungen ergeben sich beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" deutlich kleinere maximale Reichweiten und betroffene Flächen für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m^3 , $1'116 \text{ mg/m}^3$ und $6'061 \text{ mg/m}^3$ als beim Szenario 0 "Baseline". Die

Unterschiede betragen bis zu einem Faktor 7 bei den betroffenen Flächen und bis zu einem Faktor 4 bei der maximalen Reichweite. Der Einfluss der Einfamilienhausgeometrie auf das Ausbreitungsverhalten des Chlors ist somit sehr gross.

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ hingegen liegen bei beiden Szenarien auf einem ähnlichen Niveau.

B 3.3.1.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den EFFECTS-Berechnungen fallen bei der maximalen Reichweite der drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ die Unterschiede zwischen dem Szenario 0 "Baseline" und 1 "Einfamilienhäuser" kleiner aus als bei FLACS. Die Differenz liegt maximal bei knapp einem Faktor 2.

Die betroffenen Areale sind, abgesehen davon, dass bei Szenario 1 die Gasfahne "gestaucht" ist, bei beiden EFFECTS-Rechenläufen (Szenario 0 und Szenario 1) recht ähnlich.

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" sind bis zu 50 % grösser als bei Szenario 0 "Baseline" bei den EFFECTS-Berechnungen.

B 3.3.1.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Beim Vergleich der maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ 1.5 m über Boden beim FLACS und EFFECTS-Rechenlauf für Szenario 1 "Einfamilienhäuser" liegen die Werte bei den hohen Konzentrationen etwa gleichauf, während sich bei den mittleren und tiefen Konzentrationen bei FLACS bis zu einen Faktor 2 tiefere Werte ergeben. Bei den betroffenen Flächen liegen die EFFECTS-Werte durchwegs höher, mit ca. einem Faktor 1.5 bei den hohen und einem Faktor 4 bei den mittleren und tiefen Konzentrationen.

Bei der maximalen Höhe über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ hingegen liefert FLACS systematisch um ca. einen Faktor 3 höhere Werte als EFFECTS.

B 3.3.2 Letalität

B 3.3.2.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den FLACS-Berechnungen ergeben sich beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" im tiefen und mittleren Letalitätsbereich (1 % und 50 %) viel kleinere maximale Reichweiten und betroffene Flächen 1.5 m über Boden als beim Szenario 0 "Baseline". Die Differenzen betragen bis zu einem Faktor 4 bei der maximalen Reichweite und bei der betroffenen Fläche. Bei den hohen Letalitäten (99 %) ergibt sich in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" eine etwas kleinere maximale Reichweite und dafür aufgrund der sehr unterschiedlichen Proportionen der betroffenen Flächen eine etwas grössere betroffene Fläche als in Szenario 0 "Baseline".

Das potentielle Schadensausmass (letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität) fällt insgesamt beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" um mehr als einen Faktor 3 tiefer aus als beim Szenario 0 "Baseline". Diese Differenz wird ausschliesslich durch die Bereiche mit Letalität zwischen 1 % und 99 % verursacht. Das potentielle Schadensausmass liegt beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" bei den hohen Letalitäten (>99 %) aufgrund der etwas grösseren betroffenen Fläche beim Szenario 1 sogar etwas höher als beim Szenario 0 "Baseline".

Bei den betroffenen Arealen gibt es zusätzlich zu den viel kleineren Abmessungen noch weitere Unterschiede zwischen den FLACS-Berechnungen für Szenario 0 "Baseline" und Szenario 1 "Einfamilienhäuser": Das Chlor breitet sich bei Szenario 1 bereits von Beginn an mit hohen Letalitäten deutlich stärker quer zum Wind und geringfügig sogar gegen den Wind aus.

Auch bei den Letalitäten zeigt es sich, dass bei den FLACS-Berechnungen der Einfluss der Einfamilienhausgeometrie sehr gross ist.

B 3.3.2.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Auch bei den EFFECTS-Berechnungen ergeben sich beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser" kleinere maximale Reichweiten und betroffene Flächen 1.5 m über Boden als beim Szenario 0 "Baseline". Die Differenzen betragen aber maximal einen Faktor 2.5.

Die letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche ist bei den EFFECTS Berechnungen bei Szenario 1 etwa halb so gross wie bei Szenario 0.

Bei den betroffenen Arealen zeigt sich bei den EFFECTS Berechnungen deutlich schwächer derselbe Effekt wie bei FLACS, dass sich das Chlor bei Szenario 1 bereits von Beginn an mit hohen Letalitäten stärker quer zum Wind ausbreitet.

Die Unterschiede zwischen der Berechnung mit 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit in EFFECTS sind verhältnismässig klein. Es wird deshalb nicht separat auf die beiden verschiedenen Expositionszeiten eingegangen.

B 3.3.2.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Werden die Ergebnisse von FLACS und EFFECTS für Szenario 1 "Einfamilienhäuser" 1.5 m über Boden verglichen, liegen für 99 % Letalität die maximale Reichweite, maximale Breite quer zum Wind, die Grösse der betroffenen Fläche und die letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche nahe beieinander. Bei den mittleren und tiefen Letalitäten liegt die maximale Reichweite bei EFFECTS um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei FLACS. Die betroffene Fläche und die letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche ist bei EFFECTS bei den mittleren und tiefen Letalitäten sogar um einen Faktor 5 bis 8 höher als bei FLACS.

Wie bei Szenario 0 "Baseline" ist die Gaswolke bei FLACS schmaler als bei EFFECTS, was neben der kleineren Reichweite bei FLACS ein Grund ist für die grösseren betroffenen Flächen bei EFFECTS. Ev. hat auch hier im Szenario 1 "Einfamilienhäuser" die in Kapitel B 2.3.2 erwähnte Ausmittelung von Fluktuationen des Windfelds in EFFECTS einen Einfluss.

B 3.3.3 Zeitlicher Verlauf

B 3.3.3.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Die Geschwindigkeit der Gasausbreitung unterscheidet sich zwischen den FLACS-Berechnungen für Szenario 0 "Baseline" und Szenario 1 "Einfamilienhäuser" nur geringfügig. Teilweise dauert der Wolkendurchgang in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" etwas länger und die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist etwas reduziert. Dies ist nachvollziehbar, da der Impuls der Freisetzung durch die Einfamilienhäuser abgebremst wird.

Der Monitorpunkt in 40 m Abstand zur Freisetzung tanzt bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" kaum mehr aus der Reihe, wahrscheinlich, weil ein Teil des Gasstrahls durch ein Gebäude etwas in Richtung des Monitorpunkts abgelenkt wird, so dass er näher am Bereich der höchsten Konzentrationen zu liegen kommt.

B 3.3.3.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Die Ausbreitung des Chlors in Windrichtung erfolgt bis in eine Distanz von ca. 4'000 m zur Freisetzung in Szenario 0 "Baseline" etwas schneller als in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" (bzw. Szenario 2 "Wohnblocks"). Der Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, dass sich aufgrund der grösseren Oberflächenrauigkeit in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" (bzw. Szenario 2 "Wohnblocks") in Bodennähe tiefere Windgeschwindigkeiten ergeben.

Ab einer Distanz von ca. 4'000m breitet sich das Chlor in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" (bzw. Szenario 2 "Wohnblocks") erstaunlicherweise wieder rascher aus als in Szenario 0 "Baseline". Über die Ursache können nur Vermutungen angestellt werden. Möglicherweise entsteht dieser Effekt, da in Szenario 1 "Einfamilienhäuser" (bzw. Szenario 2 "Wohnblocks") das Chlor aufgrund der höheren Turbulenz rascher in schneller strömende Luftschichten hochgemischt wird, wo es rascher in Windrichtung verfrachtet wird und auch wieder in bodennahe Schichten heruntergemischt wird. In dieses Bild passt, dass die höchste Chlorkonzentration in einer Höhe von 30.5 m ebenfalls in einer Distanz von ca. 4'000 m auftritt. Ob EFFECTS diese Effekte überhaupt so detailliert abbilden kann, ist jedoch unklar.

B 3.3.3.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Bei den Ergebnissen beider Tools ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Peak Konzentration eines Monitorpunkts mit dem Abstand des Monitorpunkts zur Freisetzung.

EFFECTS zeichnet an allen Punkten zum Teil sehr viel höhere Konzentrationen auf als FLACS.

B 3.3.4 Ergebnis

Die Berechnungen zeigen einen sehr grossen Einfluss der Geometrie auf das Ausbreitungsverhalten des Chlors, der bei FLACS deutlich stärker ausfällt als bei EFFECTS.

Obwohl die in FLACS für Szenario 1 "Einfamilienhäuser" verwendete Geometrie sehr homogen ist, gibt es Anzeichen von Ablenkungseffekten an den geometrischen Strukturen. Solche Effekte könnten beim Vorhandensein beispielsweise von stärker kanalisierenden

Elementen, wie sie in der Realität mit Strassen etc. oft vorhanden sind, stärker zum Tragen kommen.

Die Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS bei den maximalen Reichweiten für Konzentration und Letalität sowie bei der Grösse der betroffenen Fläche 1.5 m über Boden und den letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen sind bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" gesamthaft grösser als bei Szenario 0 "Baseline".

Die Differenzen liegen teilweise bereits in einer Grössenordnung, die sich auf das Ergebnis bei der konkreten Anwendung in Störfall-Risikobetrachtungen entscheidend auswirken kann.

Grössere Differenzen treten zwischen EFFECTS und FLACS auch bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden auf, so dass in diesem Bereich Vorsicht geboten ist. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen ist bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Auch bei den Ganglinien treten insbesondere bei der Grössenordnung der erreichten Konzentrationen teilweise sehr grosse Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS auf, so dass auch hier beim Umgang mit den Ergebnissen Vorsicht geboten ist.

B 4 Szenario 2 "Wohnblocks"

B 4.1 FLACS

B 4.1.1 Übersicht

B 4.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 26 Szenario 2 "Wohnblocks"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	973 m	1'414 m	819'053 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	752 m	1'268 m	361'428 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	580 m	1'052 m	289'076 m ²

Tab. 27 Szenario 2 "Wohnblocks"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 30.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'015 m	1'185 m	795'159 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	611 m	966 m	147'665 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	470 m	24 m	168 m ²

Tab. 28 Szenario 2 "Wohnblocks"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	70 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	50 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	35 m

B 4.1.1.2 Letalität

Tab. 29 Szenario 2 "Wohnblocks"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	805 m	1'325 m	612'009 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	710 m	1'200 m	310'892 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	522 m	990 m	234'341 m ²

Tab. 30 Szenario 2 "Wohnblocks"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentielles Schadensausmass 1.5 m über Boden (Grundlage: Gexcon AS 13.9.2019)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche (m²)	Mittlere Letalität (%)	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität (m²)
1 bis 50 %	301'117	-	-
50 bis 99 %	76'551	-	-
>99 %	234'341	-	-
Total (>1 %)	612'009	-	-

Für die Berechnung der mittleren Letalität und der letalitätsgewichteten Äquivalenzfläche wären Rasterdaten für die Letalität nötig. Für Szenario 2 "Wohnblocks" wurden aus den FLACS-Ergebnissen keine Rasterdaten extrahiert.

Tab. 31 Szenario 2 "Wohnblocks"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 30.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Letalität 30.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität $\geq x\%$
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	768 m	1'060 m	499'947 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	485 m	661 m	10'782 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	0 m	0 m	0 m ²

B 4.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Parameter von EFFECTS-Berechnung übernommen, identisch mit Szenario 0 "Baseline",
 siehe Anhang B 2.2.1.3

B 4.1.2 Chlorkonzentration

B 4.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 45 Szenario 2 "Wohnblocks"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

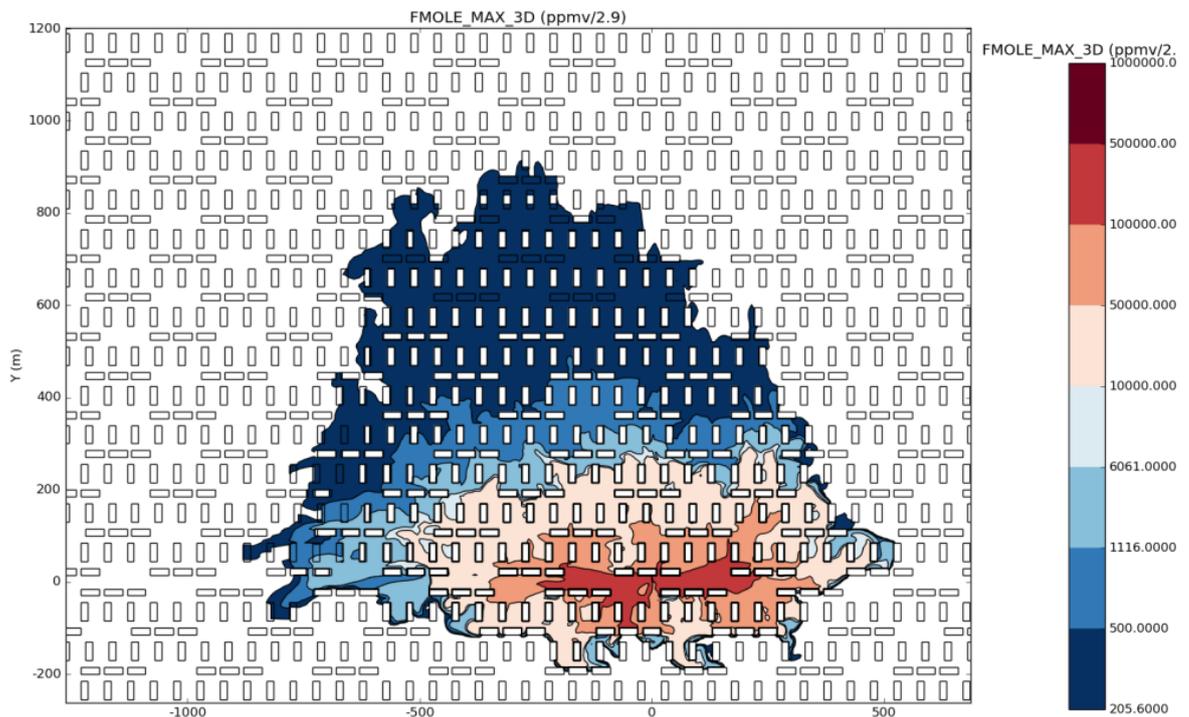


Abb. 46 Szenario 2 "Wohnblocks"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

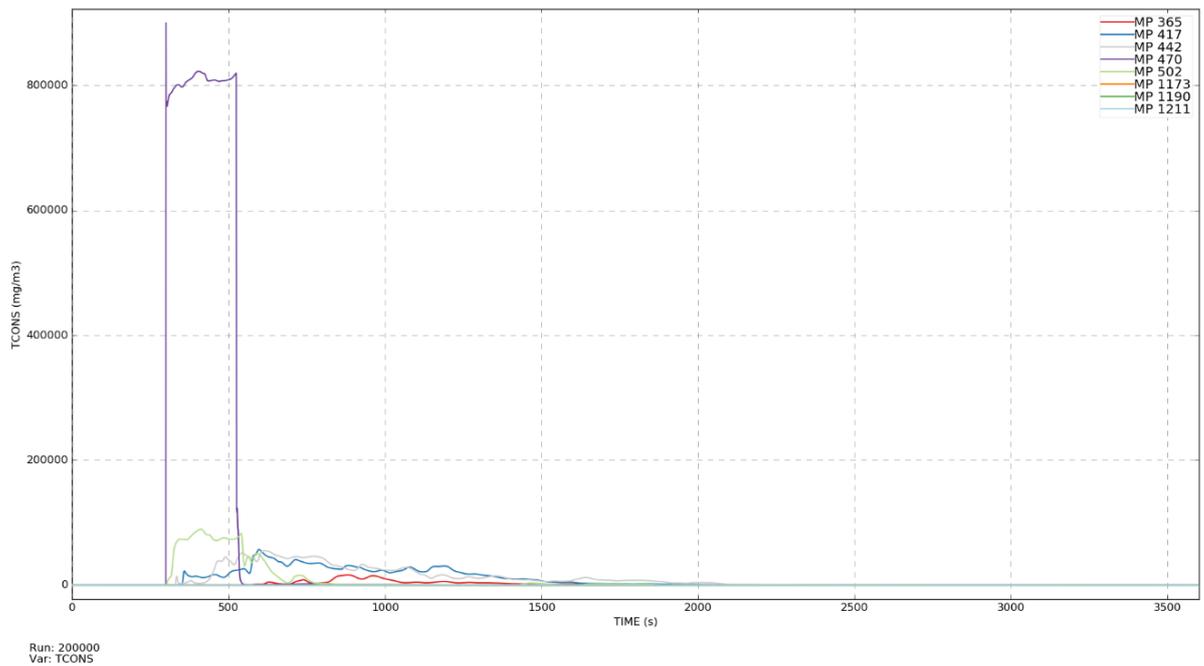
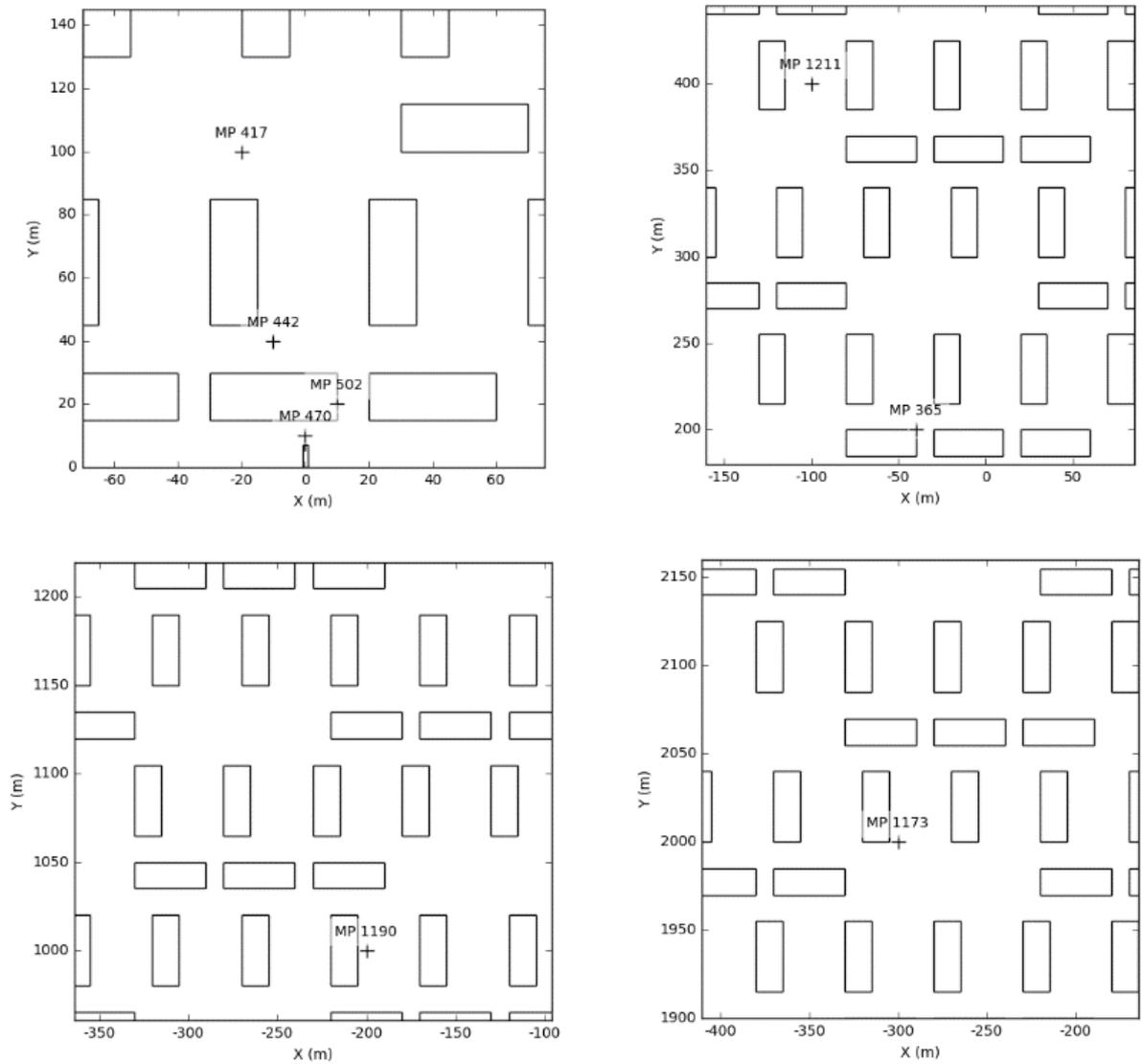


Abb. 47 Szenario 2 "Wohnblocks"

Lage der Messpunkte für Abb. 46 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 4.1.2.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden

Abb. 48 Szenario 2 "Wohnblocks"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

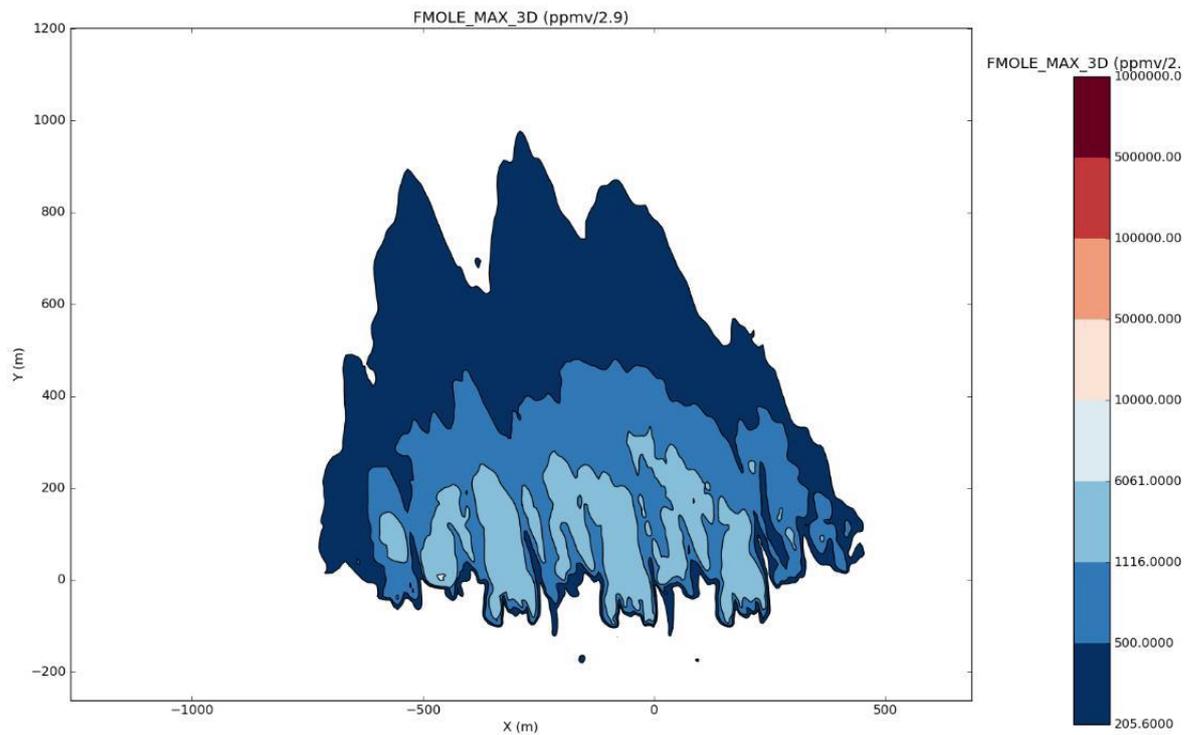


Abb. 49 Szenario 2 "Wohnblocks"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt auf einem Gebäudedach in 20 m, 70 m, 200 m, 400 m, und 800 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

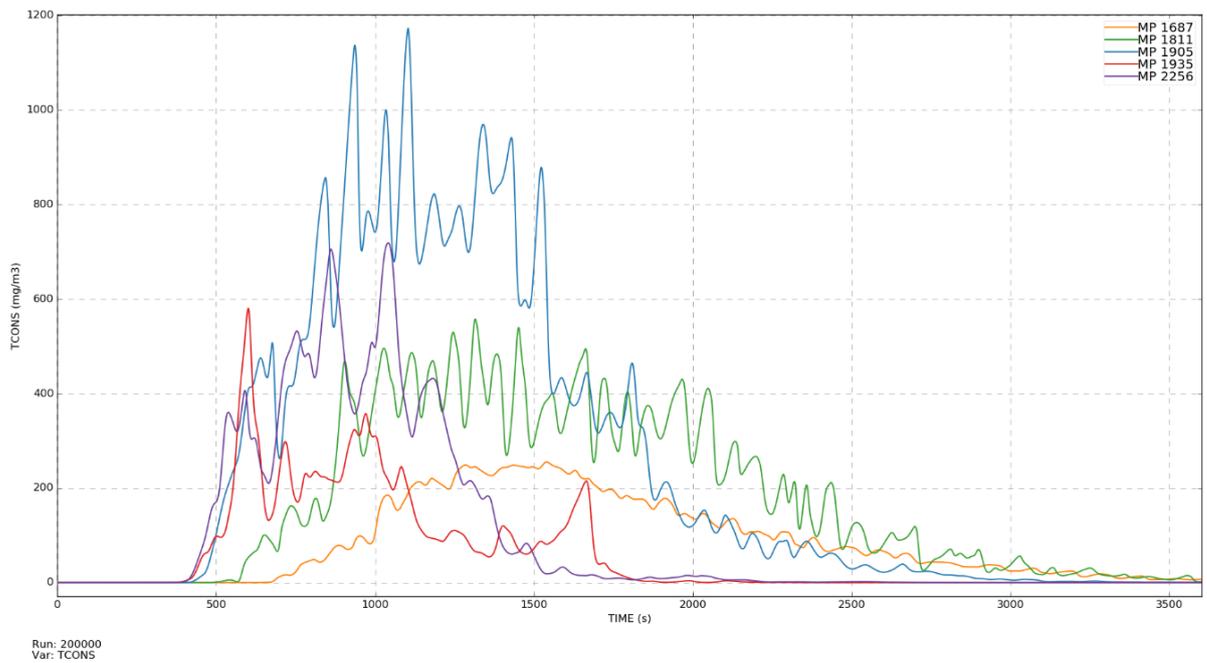
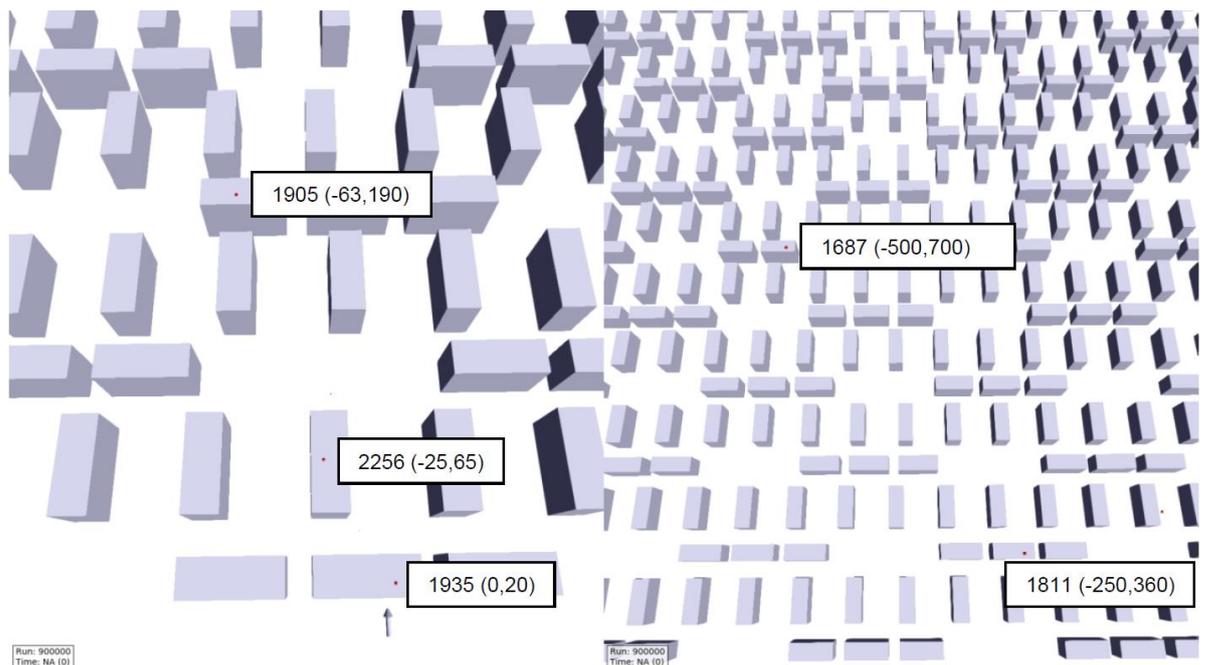


Abb. 50 Szenario 2 "Wohnblocks"

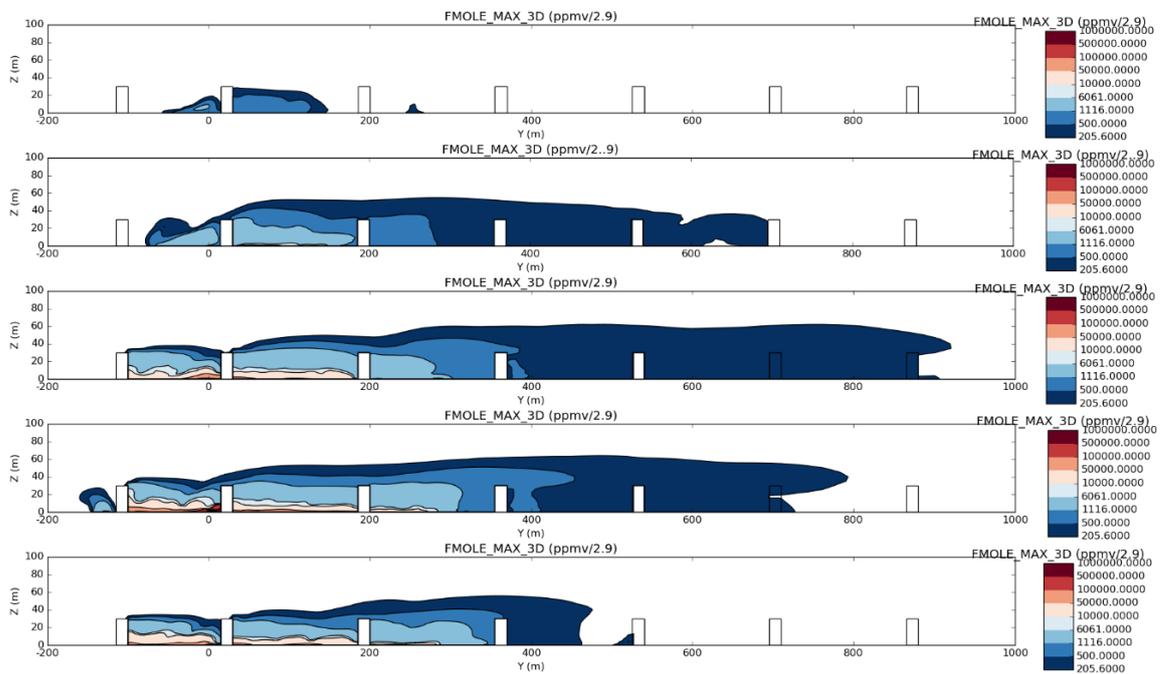
Lage der Messpunkte für Abb. 49 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 4.1.2.3 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 51 Szenario 2 "Wohnblocks"

Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten) $x=-750$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle) und $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

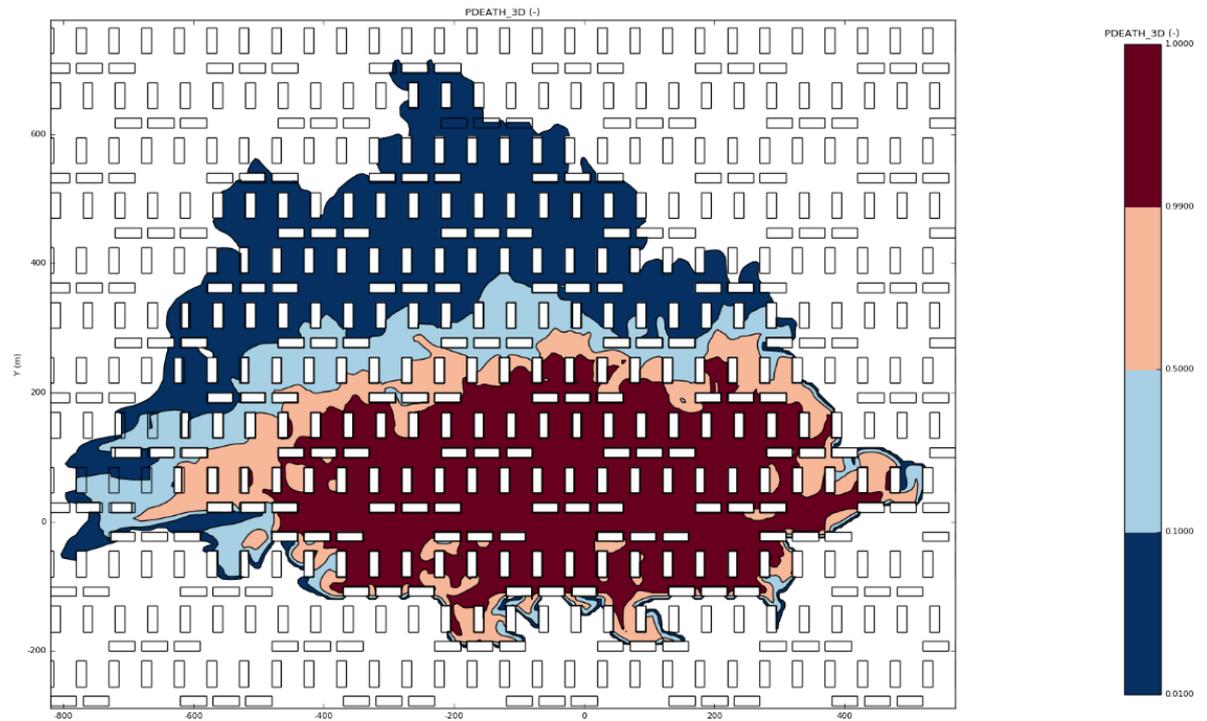


B 4.1.3 Letalität

B 4.1.3.1 Letalität 1.5 m über Boden

Abb. 52 Szenario 2 "Wohnblocks"

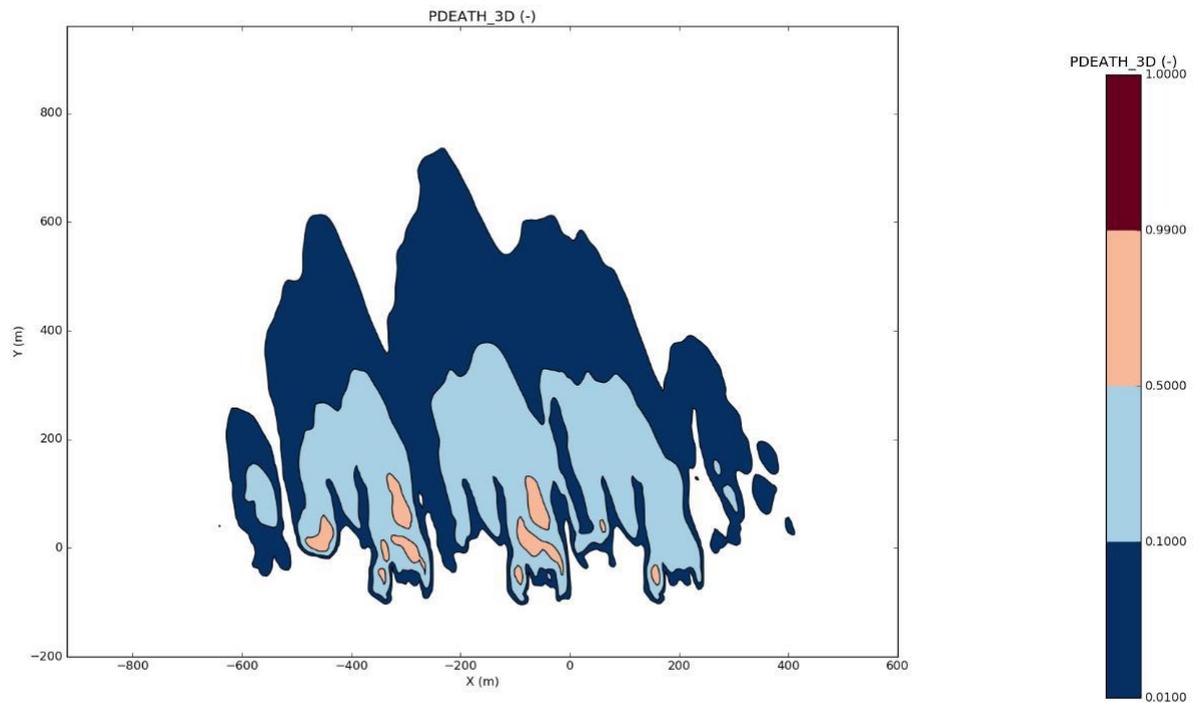
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 4.1.3.2 Letalität 30.5 m über Boden

Abb. 53 Szenario 2 "Wohnblocks"

Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 4.1.4 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Anhang B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

B 4.2 EFFECTS

B 4.2.1 Übersicht Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m

B 4.2.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 32 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzentration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1% Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	6'302 m	1'514 m	6'760'424 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	2'006 m	1'176 m	1'580'497 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	583 m	879 m	296'994 m ²

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³ noch eine toxische Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min}(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$ erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

Tab. 33 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über Boden

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	24 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	12 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	10 m

B 4.2.1.2 Letalität

Tab. 34 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden bei 1'800s Expositionszeit

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	5'799 m	1'441 m	5'973'939 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	1'697 m	1'016 m	1'196'299 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	407 m	618 m	125'703 m ²

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 noch eine toxische Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min(mg/m}^3)^{2.75}$ erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

Tab. 35 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis bei einer Expositionszeit von 8'000s

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität $\geq x\%$
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	6'055 m	1'451 m	6'204'153 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	1'698 m	1'015 m	1'194'335 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	407 m	621 m	125'620 m ²

Tab. 36 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen potentiell Schadensausmass bei 8'000 s Expositionszeit

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität
1 bis 50 %	5'009'818 m ²	12 %	579'047 m ²
50 bis 99 %	1'068'715 m ²	77 %	787'760 m ²
>99 %	125'620 m ²	100 %	137'276 m ²
Total (>1 %)	6'204'153 m ²	24 %	1'504'083 m ²

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

Da die Letalitätsdistanzen und –flächen bei beiden Expositionszeiten sehr nahe beieinanderliegen, wurden die Schadensausmassberechnungen nur für die Variante mit 8'000 s Expositionszeit durchgeführt.

Die Flächen innerhalb der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden wurden für EFFECTS anhand der Isolinien berechnet. Die mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität hingegen wurden für EFFECTS mit größeren Rasterdaten (Rasterweite 35 bis 50 m) berechnet. Dies führt zu kleineren Differenzen und ist auch der Grund dafür, dass bei allen Szenarien bei EFFECTS die Fläche im Letalitätsbereich >99 % kleiner ist als die entsprechende letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³ noch eine toxische Dosis von 6.9x10⁷ min(mg/m³)^{2.75} erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

B 4.2.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

identisch mit Szenario 0 "Baseline", siehe Anhang B 2.2.1.3

B 4.2.2 Übersicht Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m

B 4.2.2.1 Chlorkonzentration

Tab. 37 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzentration ≥ x mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	6'110 m	1'239 m	5'553'724 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'941 m	960 m	1'285'758 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	560 m	701 m	254'014 m ²

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³ noch eine toxische Dosis von 6.9x10⁷ min(mg/m³)^{2.75} erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

Tab. 38 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über Boden

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	27 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	16 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	12.5 m

B 4.2.2.2 Letalität

Tab. 39 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
 Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden bei 1'800s Expositionszeit

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min} (\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	5'499 m	1'168 m	4'733'499 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min} (\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	1'548 m	839 m	912'651 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min} (\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	402 m	510 m	120'511 m ²

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von $205.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ noch eine toxische Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min} (\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$ erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

Tab. 40 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden bei einer Expositionszeit von 8'000s

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	5'677 m	1174 m	4'866'910 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	1'549 m	839 m	912'490 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	402 m	516 m	120'462 m ²

Tab. 41 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Übersicht Ergebnisse EFFECTS Berechnungen potentiellles Schadensausmass bei 8'000 s Expositionszeit

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100% Letalität
1 bis 50 %	3'954'420 m ²	11 %	438'343 m ²
50 bis 99 %	792'028 m ²	76 %	596'214 m ²
>99 %	120'462 m ²	100 %	124'607 m ²
Total (>1 %)	4'866'910 m ²	24 %	1'159'163 m ²

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

Da die Letalitätsdistanzen und –flächen bei beiden Expositionszeiten sehr nahe beieinanderliegen, wurden die Schadensausmassberechnungen nur für die Variante mit 8'000 s Expositionszeit durchgeführt.

Die Flächen innerhalb der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden wurden für EFFECTS anhand der Isolinien berechnet. Die mittleren Letalitäten und letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität hingegen wurden für EFFECTS mit größeren Rasterdaten (Rasterweite 35 bis 50 m) berechnet. Dies führt zu kleineren Differenzen und ist auch der Grund dafür, dass bei allen Szenarien bei EFFECTS die Fläche im Letalitätsbereich >99 % kleiner ist als die entsprechende letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 100 % Letalität

In 30.5 m Höhe wurde weder die Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 noch eine toxische Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$ erreicht. Deshalb werden für 30.5 m Höhe keine maximalen Reichweiten, maximalen Breiten quer zum Wind und keine Flächen angegeben.

B 4.2.2.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

identisch mit Szenario 0 "Baseline", siehe Anhang B 2.2.1.3

B 4.2.3 Chlorkonzentration Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m

B 4.2.3.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

Abb. 54 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
Isolinien für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800s
Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und
 $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden, Rasterweite :
500 m

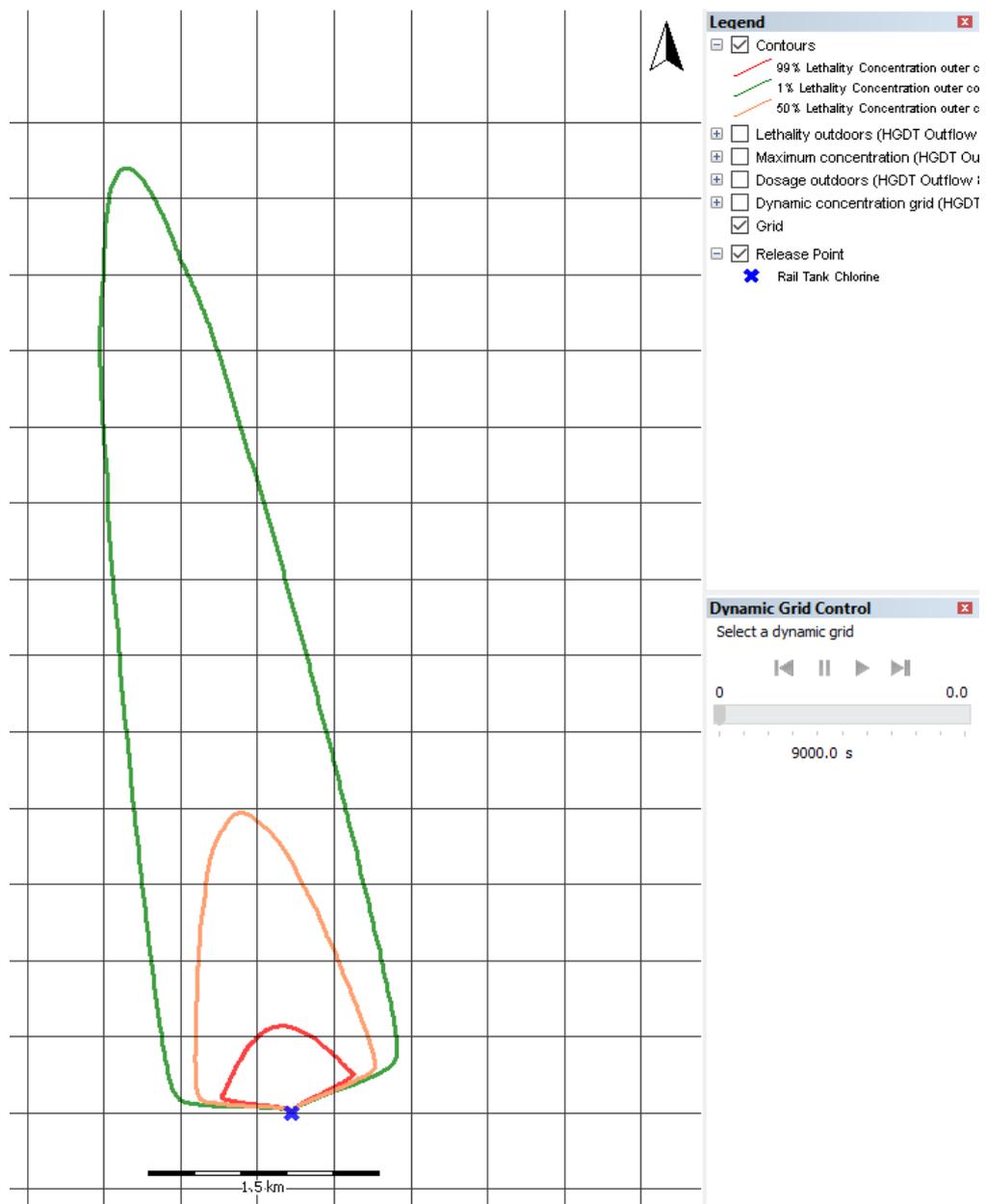


Abb. 55 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 1.5 m über Boden

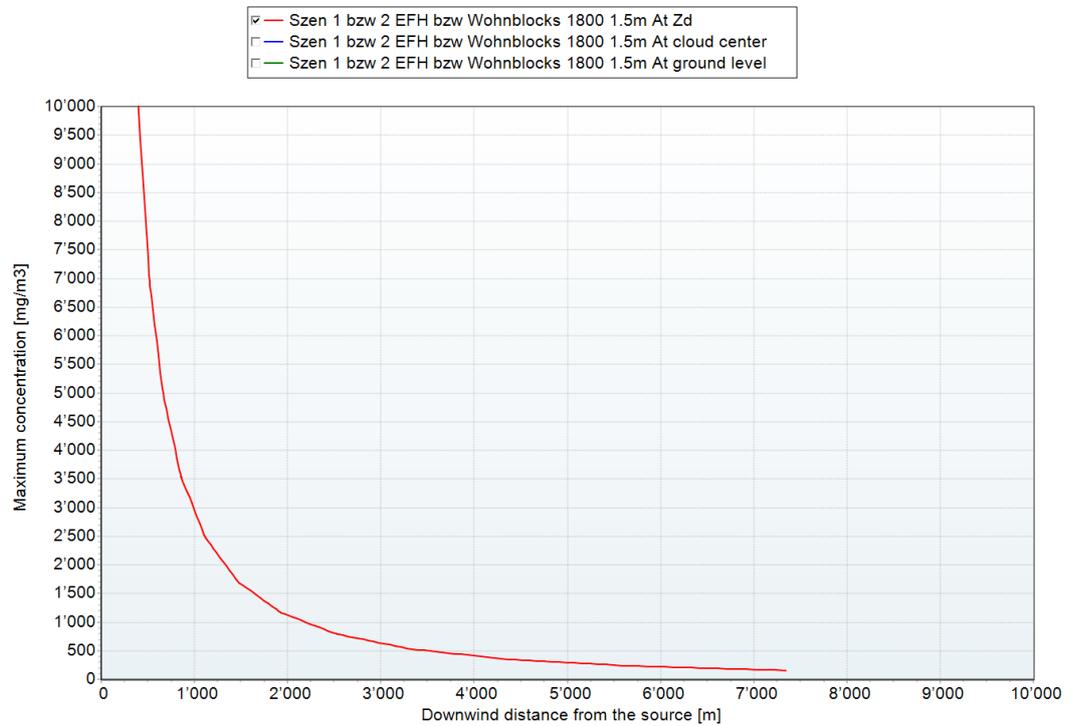


Abb. 56 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m und 40 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

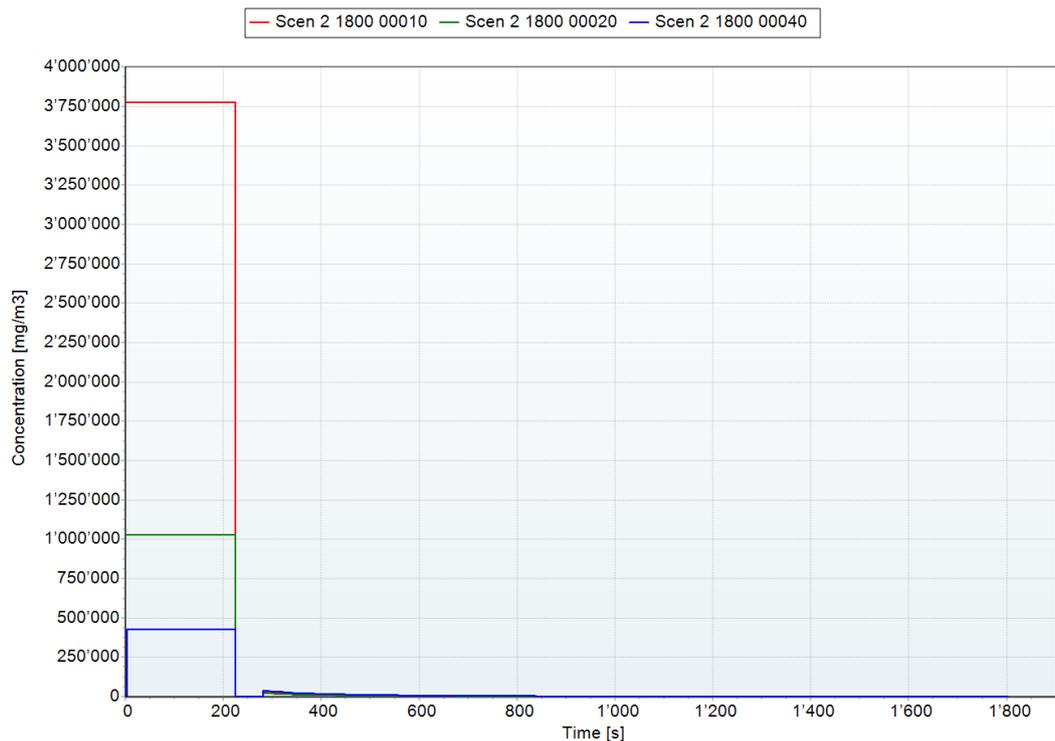


Abb. 57 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und 400 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

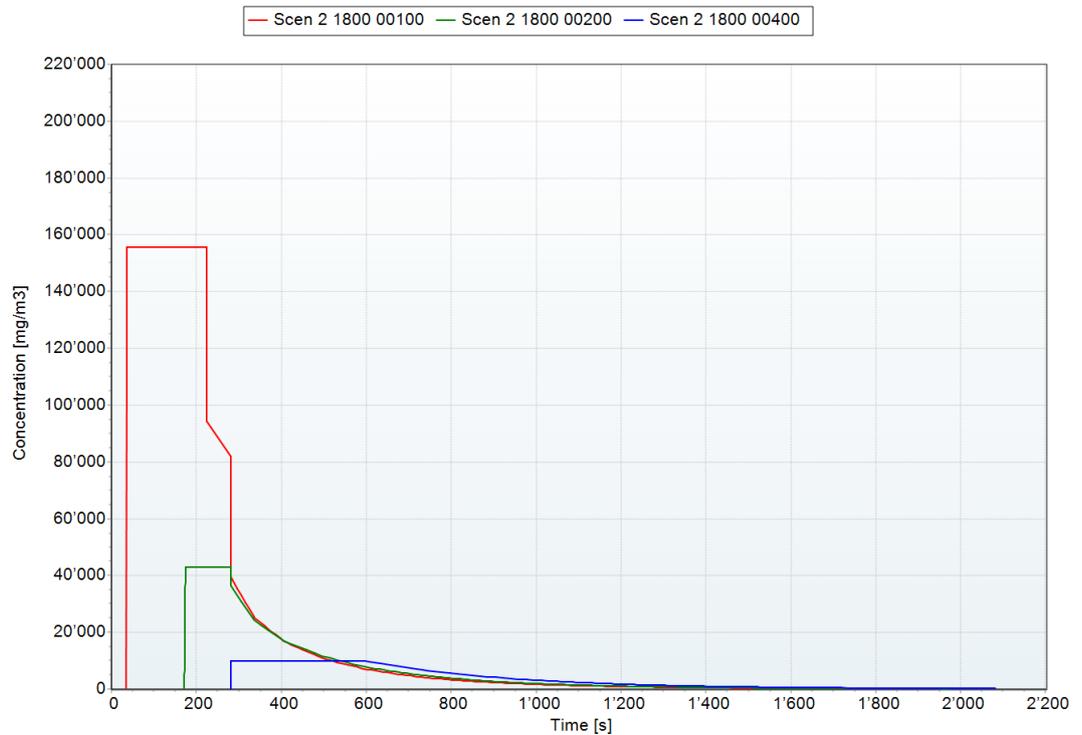


Abb. 58 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 1'000 m, 2'000 m, 4'000 m
und 10'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden



B 4.2.3.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

30.5 m über Boden liegen die Chlorkonzentrationen unter 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1800 s Expositionszeit). Deshalb sind keine Isolinien für die Chlorkonzentrationen dargestellt.

Abb. 59 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 30.5 m über Boden

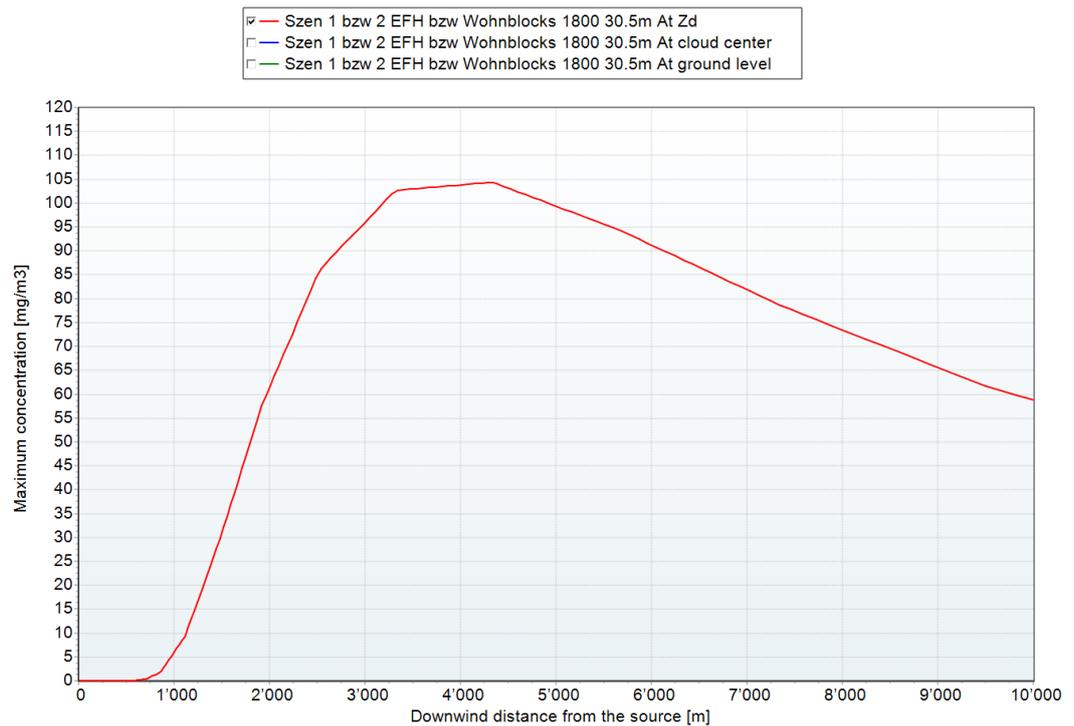


Abb. 60 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und 400 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden

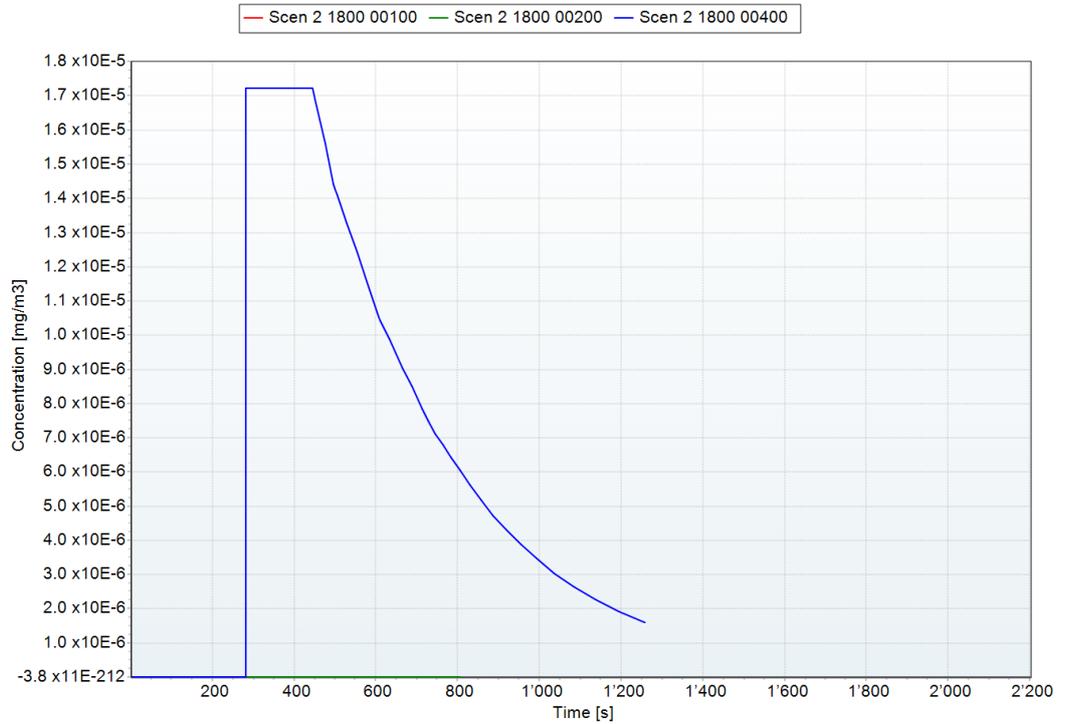
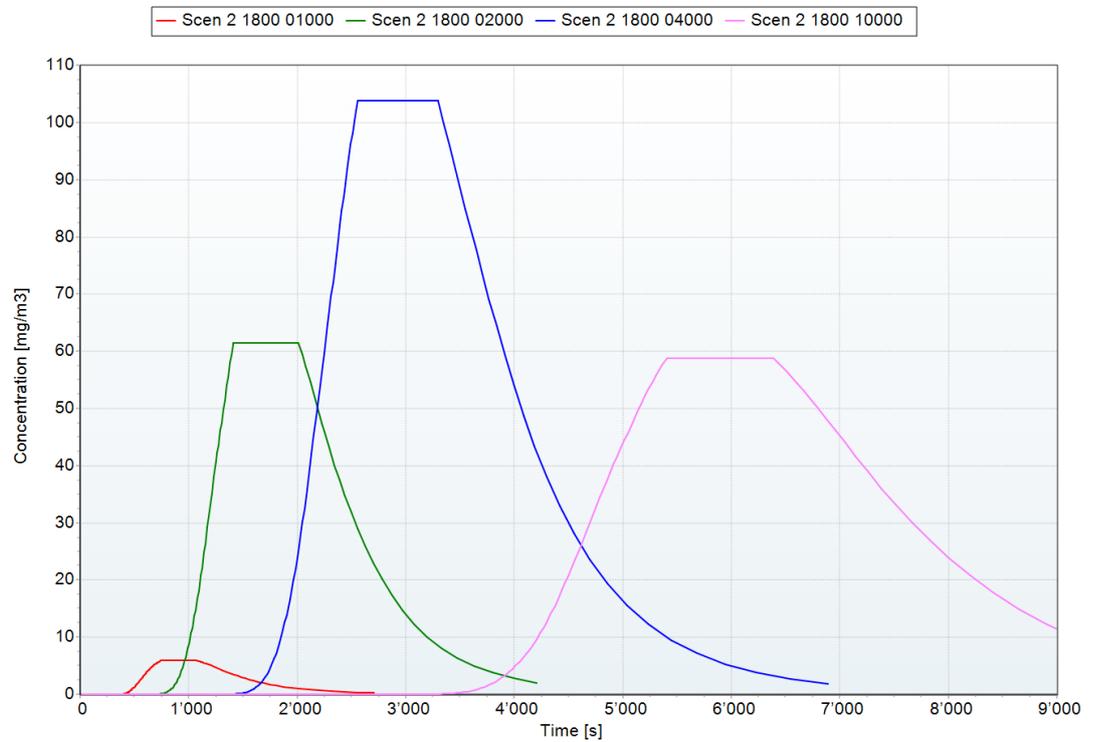


Abb. 61 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 1'000 m, 2'000 m, 4'000 m
und 10'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden

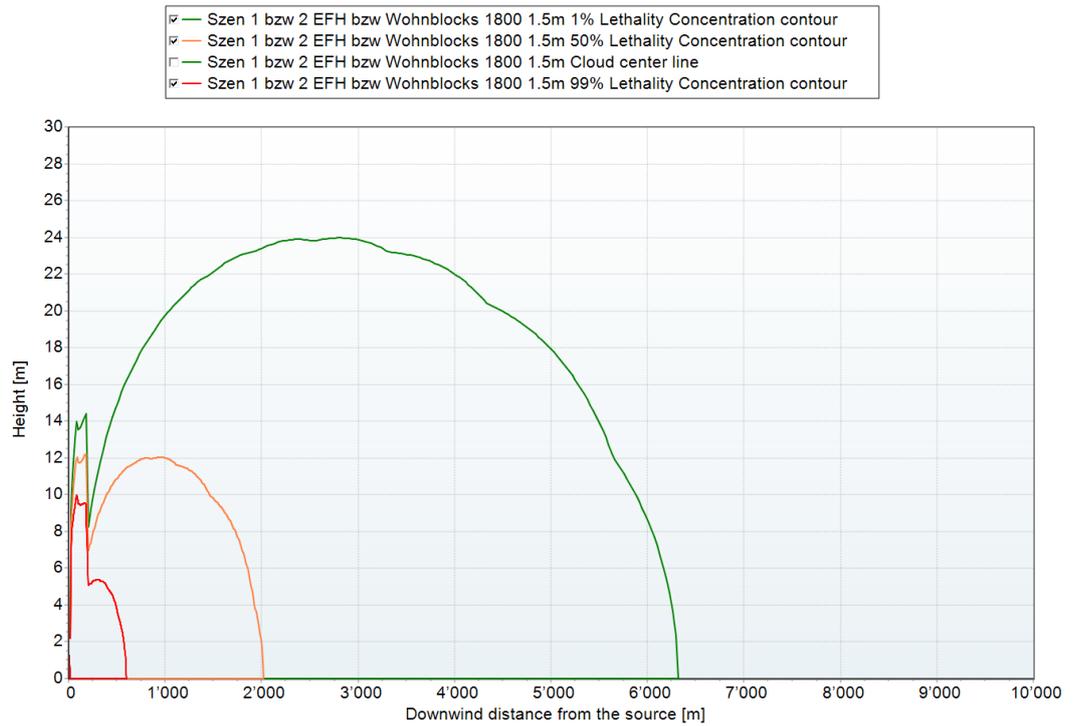


Näher als 400 m in Windrichtung von der Freisetzung gemessen ist gemäss EFFECTS Berechnung in 30.5m Höhe kein Chlor vorhanden.

B 4.2.3.3 Chlorkonzentration vertikal (Oberflächenrauigkeit 1 m)

Abb. 62 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)

Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x=Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y= Höhe über Boden



B 4.2.4 Chlorkonzentration Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m

B 4.2.4.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

Abb. 63 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Isolinien für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

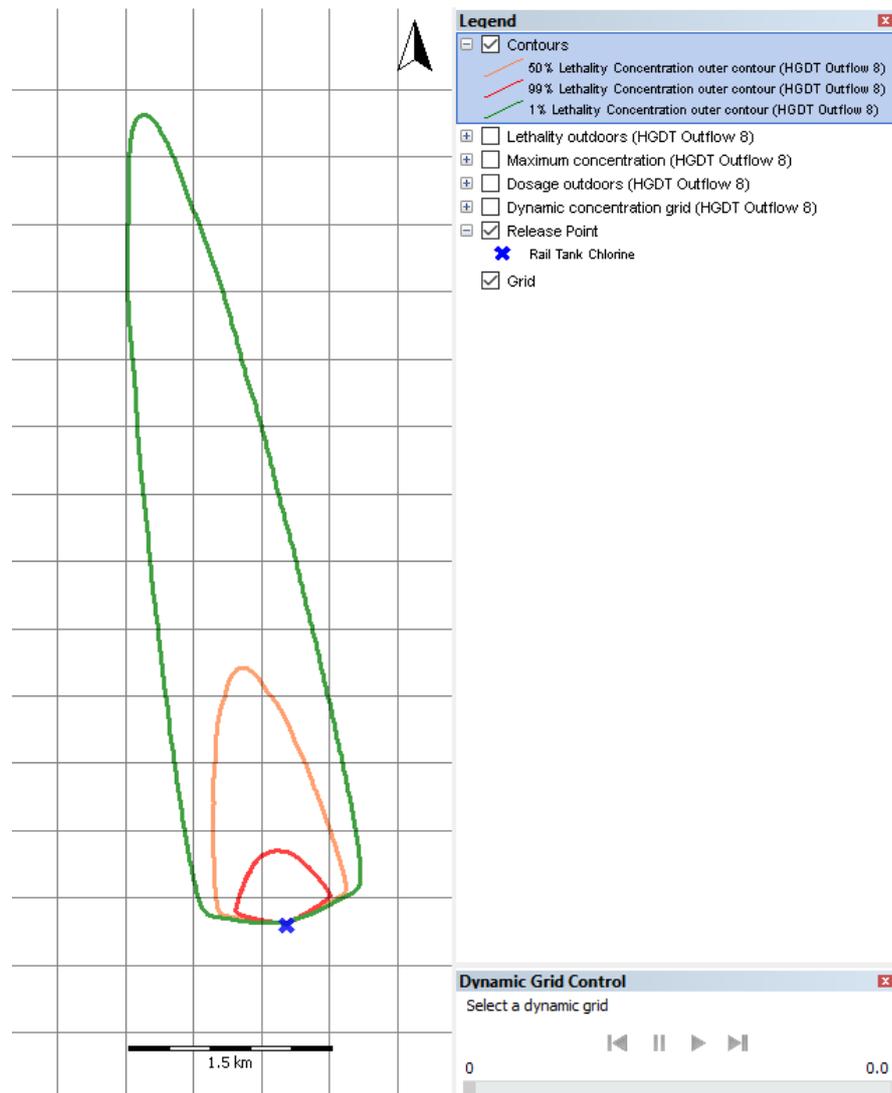


Abb. 64 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 1.5 m über Boden

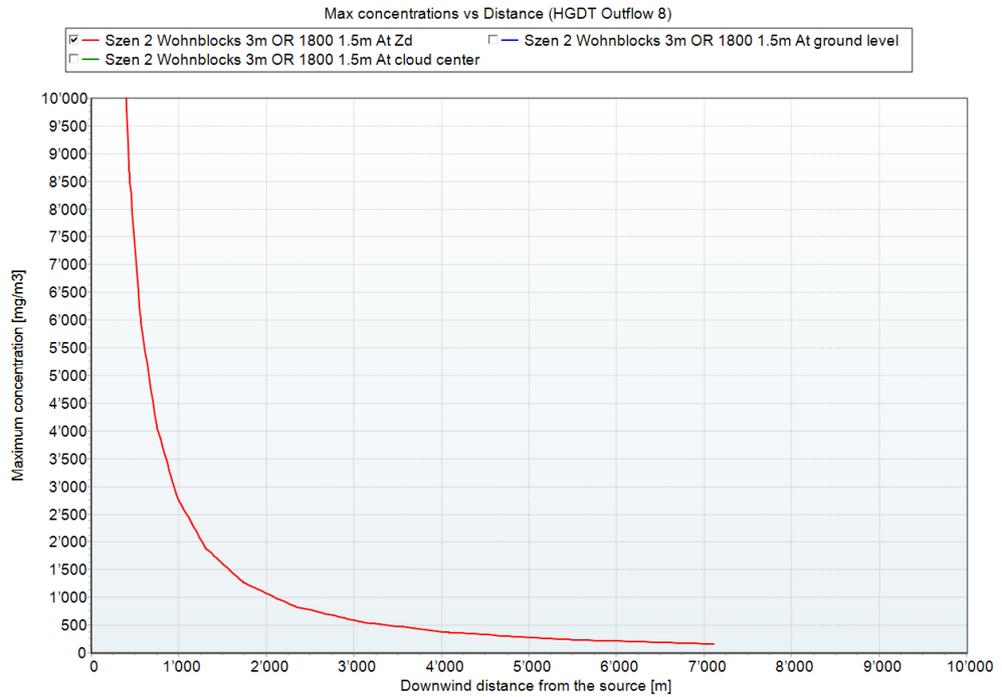


Abb. 65 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m und 40 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

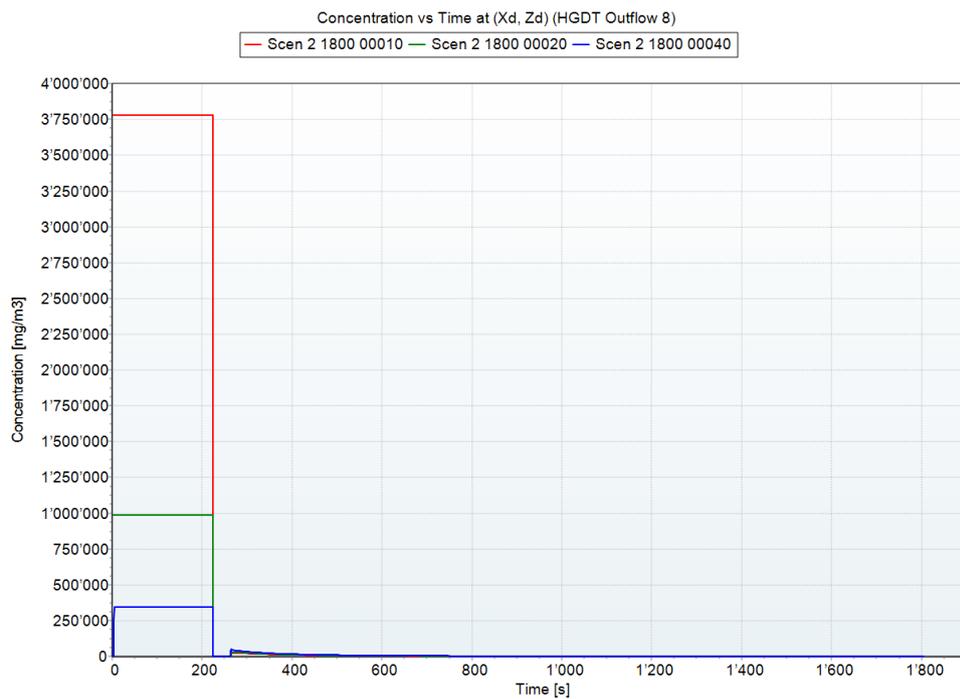


Abb. 66 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und 400 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

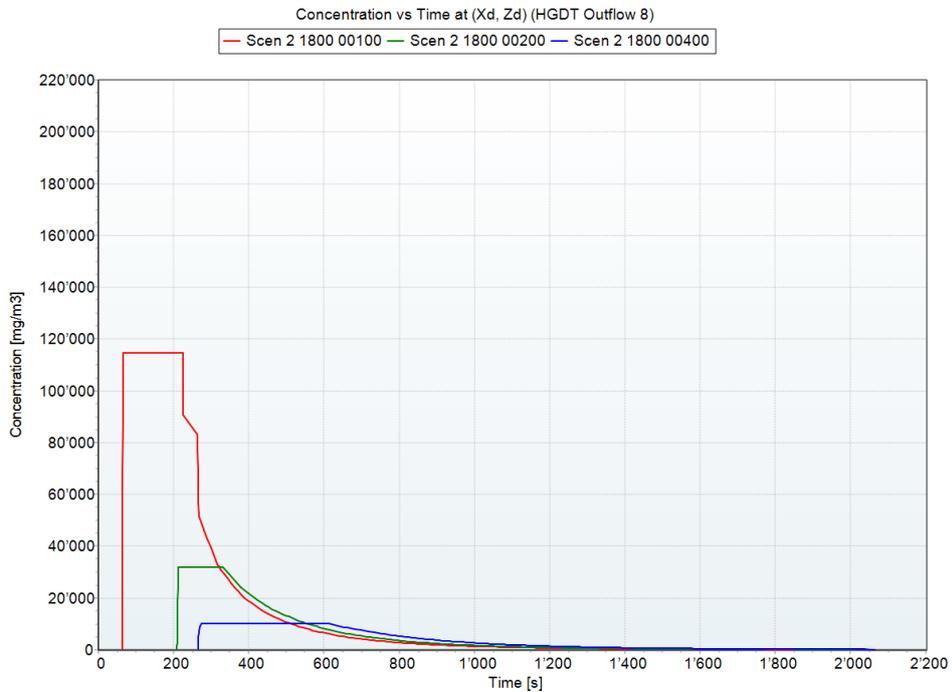
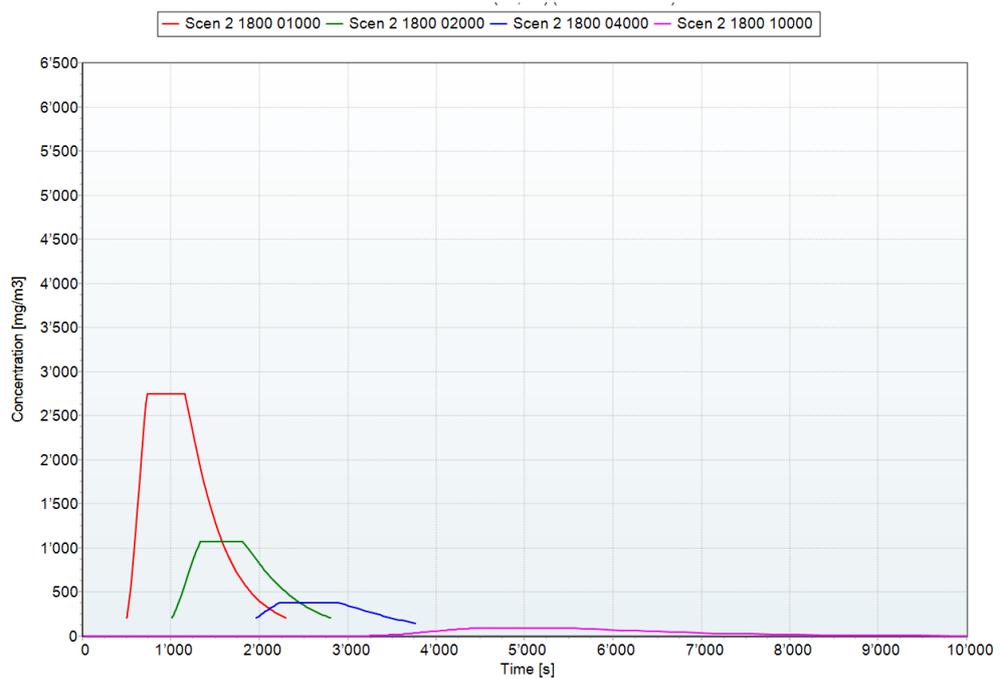


Abb. 67 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 1'000 m, 2'000 m, 4'000 m
und 10'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden



B 4.2.4.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

30.5 m über Boden liegen die Chlorkonzentrationen unter 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1800s Expositionszeit). Deshalb sind keine Isolinien für die Chlorkonzentrationen dargestellt.

Abb. 68 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 30.5 m über Boden

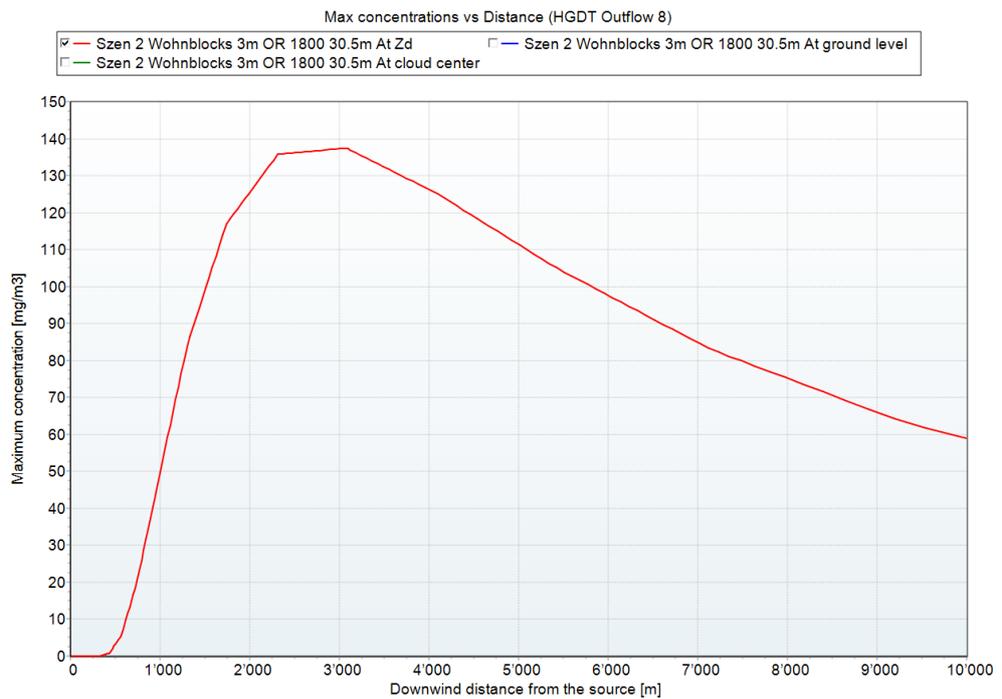


Abb. 69 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und 400 m
Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden

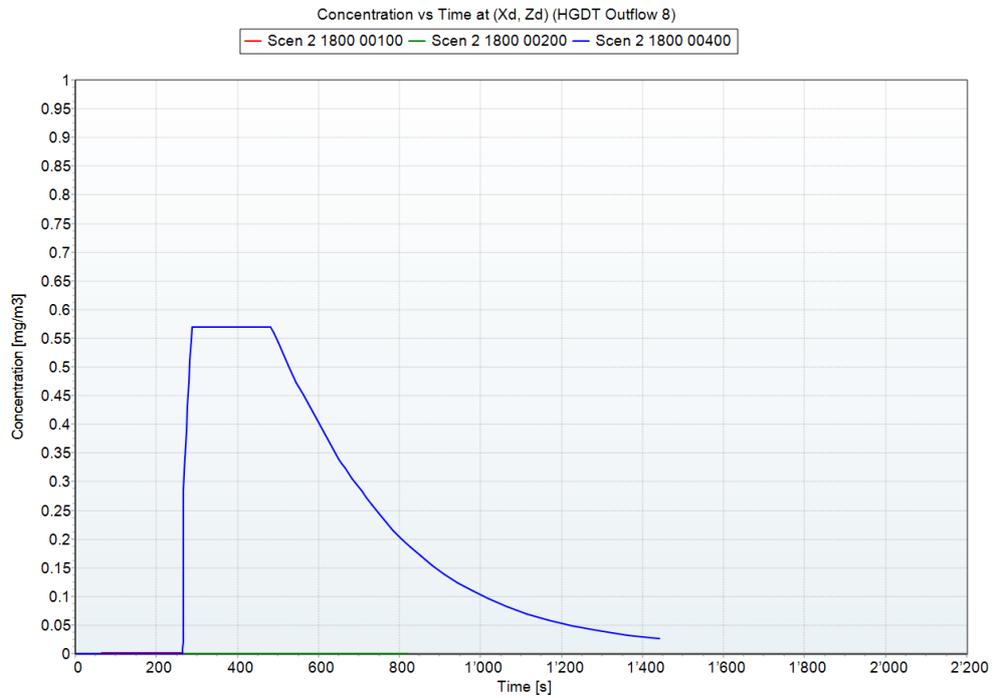
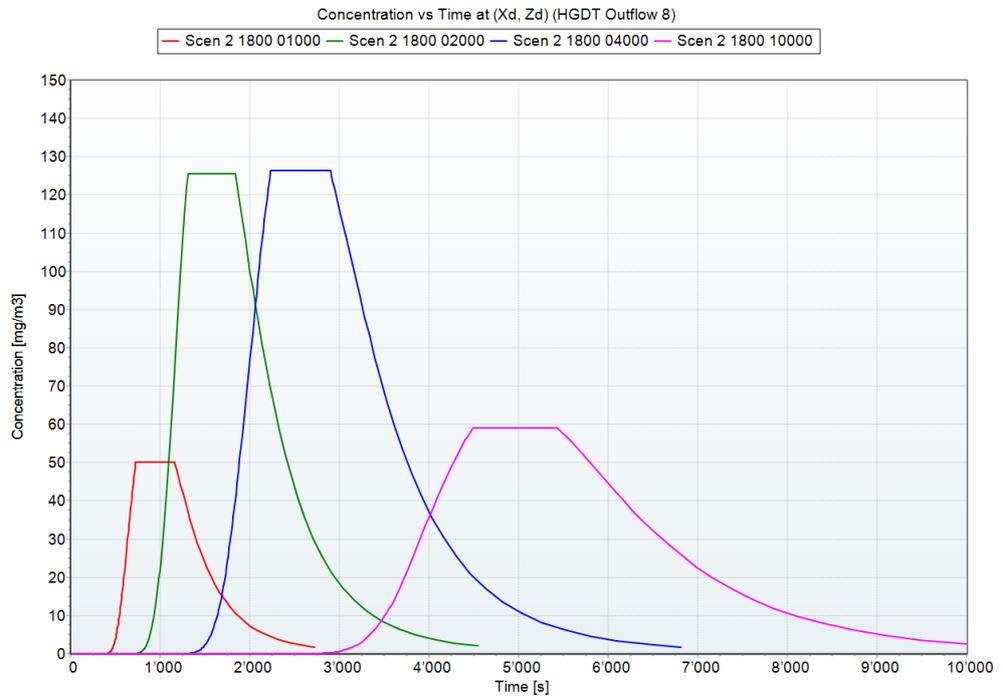


Abb. 70 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 1'000 m, 2'000 m, 4'000 m
und 10'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden

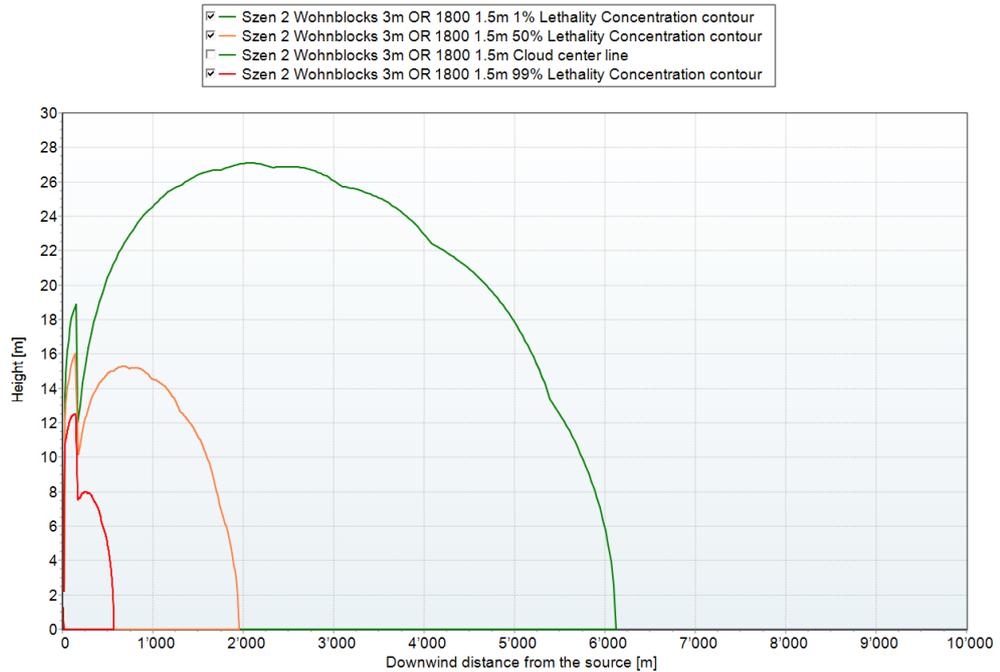


Näher als 400 m in Windrichtung von der Freisetzung gemessen ist gemäss EFFECTS Berechnung in 30.5 m Höhe kein Chlor vorhanden.

B 4.2.4.3 Chlorkonzentration vertikal (Oberflächenrauigkeit 3 m)

Abb. 71 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)

Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x=Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y= Höhe über Boden

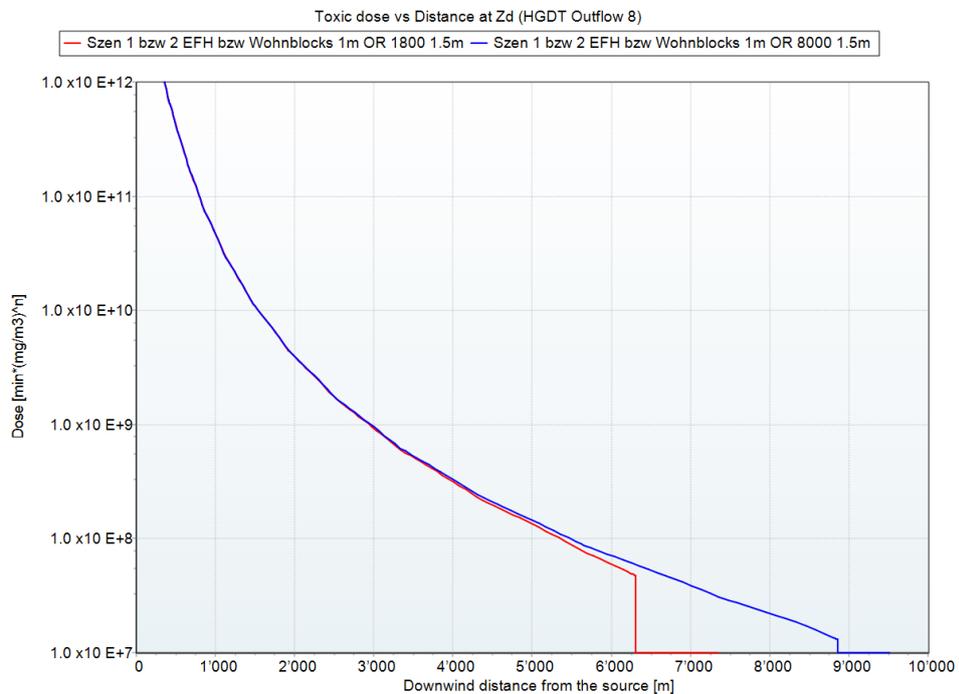


B 4.2.5 Toxische Dosis Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m

Die Berechnungen der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

B 4.2.5.1 Toxische Dosis 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

Abb. 72 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
toxische Dosis in Windrichtung bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden



B 4.2.5.2 Toxische Dosis 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

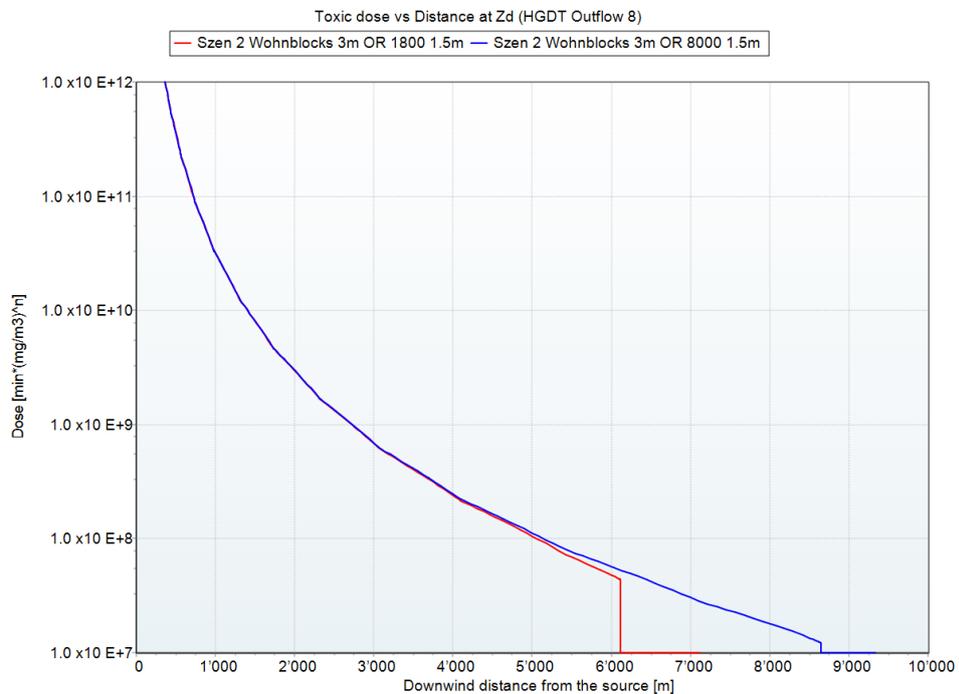
30.5 m über Boden liegt die toxische Dosis unter 1 % Letalität bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit. Deshalb sind keine Kurven zur toxischen Dosis dargestellt.

B 4.2.6 Toxische Dosis Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m

Die Berechnungen der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

B 4.2.6.1 Toxische Dosis 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

Abb. 73 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
toxische Dosis in Windrichtung bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden



B 4.2.6.2 Toxische Dosis 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

30.5 m über Boden liegt die toxische Dosis weit unter 1 % Letalität bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit. Deshalb sind keine Kurven zur toxischen Dosis dargestellt.

B 4.2.7 Letalität Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 1 m

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

B 4.2.7.1 Letalität 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

Abb. 74 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 1'800 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

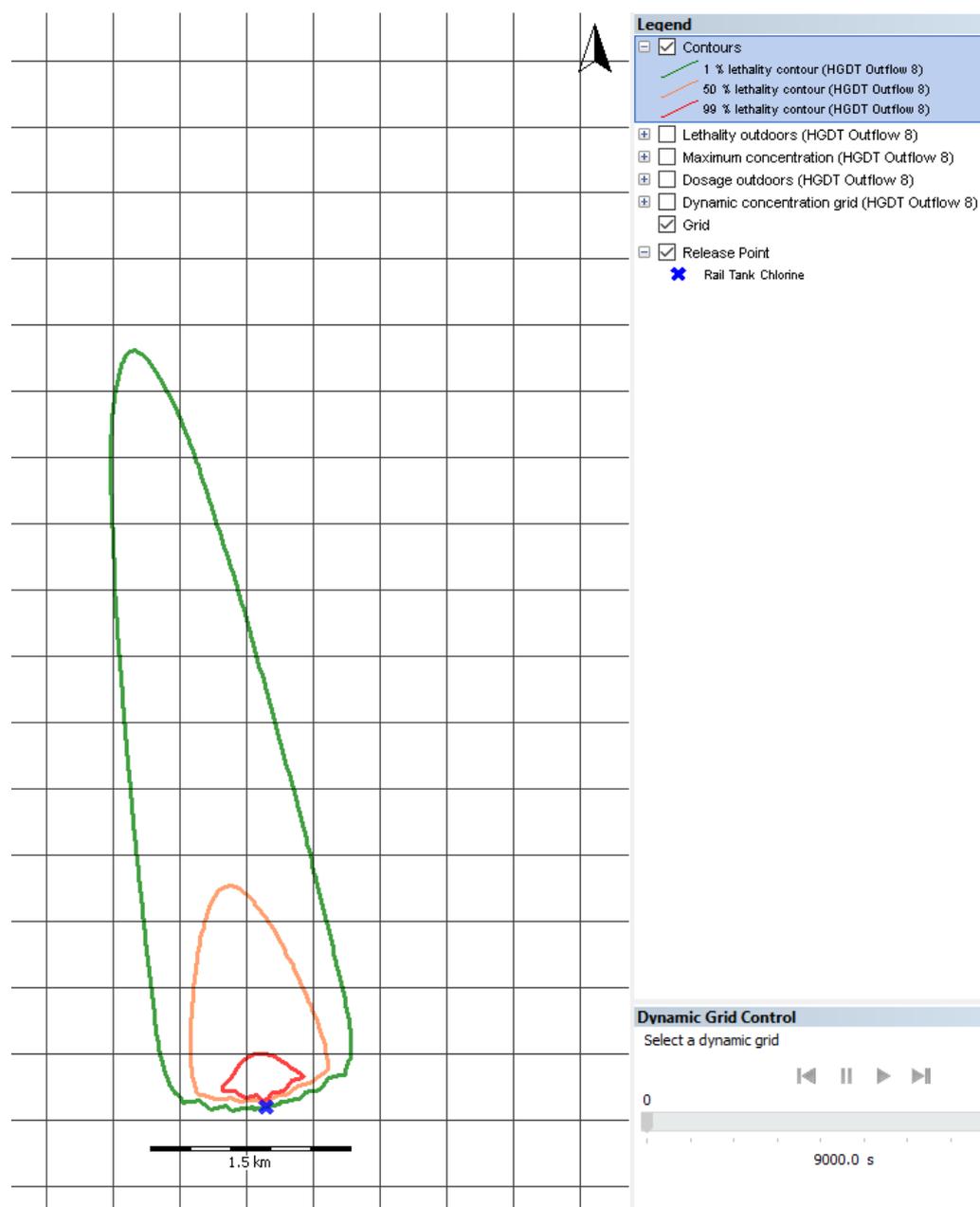


Abb. 75 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 8'000 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

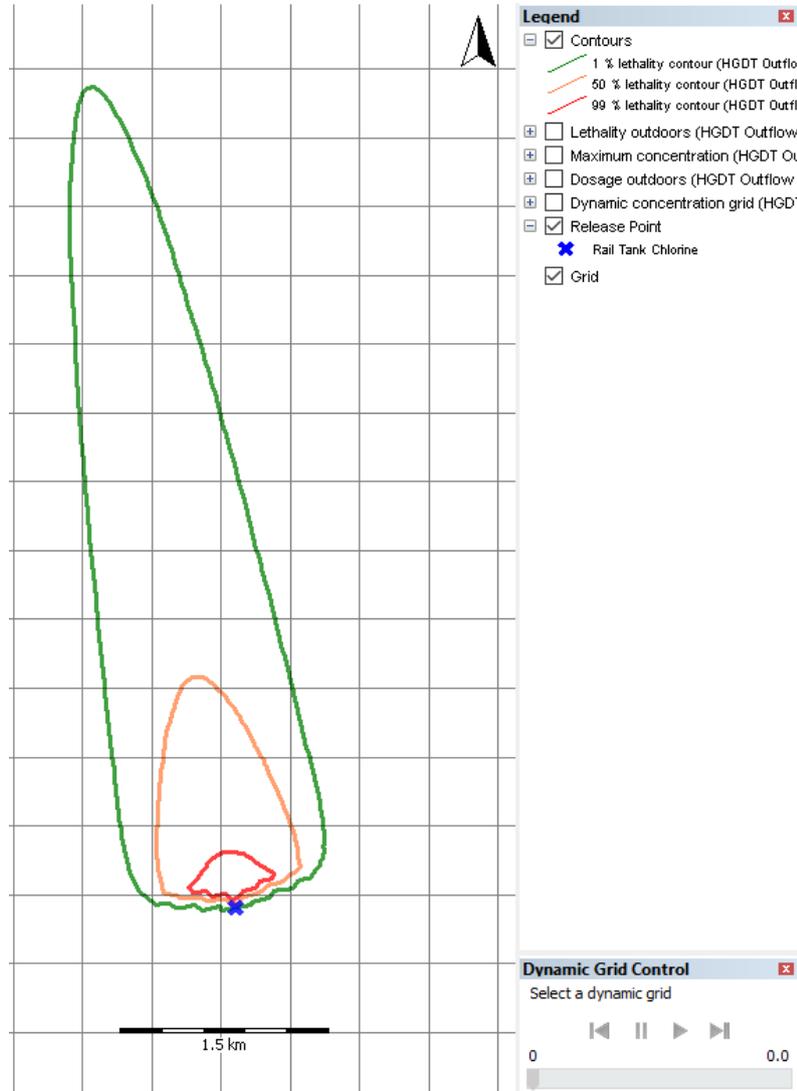
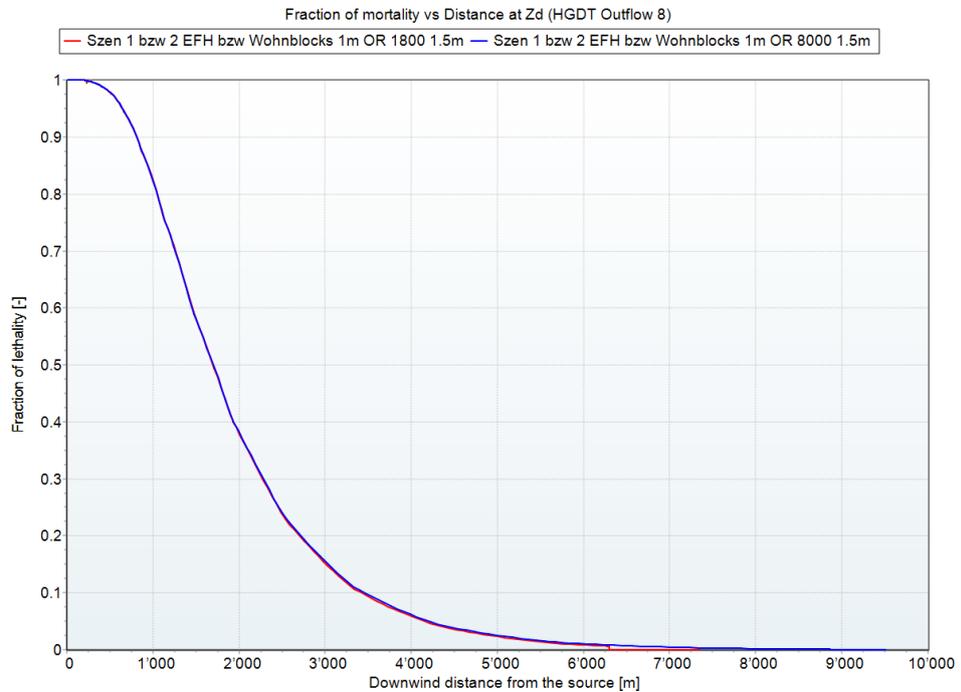


Abb. 76 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 1 m)
Letalität in Windrichtung bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit ab Ankunft der
Gaswolke, 1,5 m über Boden



B 4.2.7.2 Letalität 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 1 m)

30.5 m über Boden liegt die toxische Dosis unter 1 % Letalität bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit. Deshalb sind keine Kurven zur Letalität dargestellt.

B 4.2.8 Letalität Berechnung mit Oberflächenrauigkeit 3 m

Die Letalitätsberechnungen auf Basis der toxischen Dosis wurden in zwei Varianten durchgeführt: Eine Variante mit einer Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke von 1'800 s und eine Variante mit 8'000 s.

B 4.2.8.1 Letalität 1.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

Abb. 77 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 1'800 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

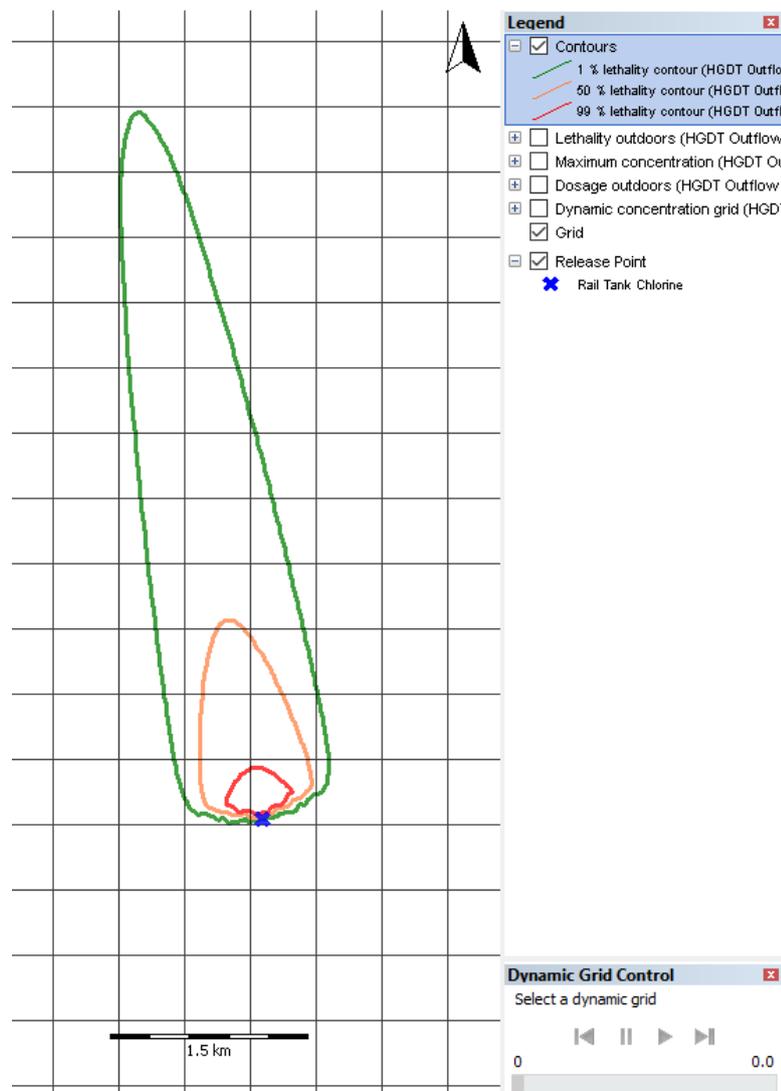


Abb. 78 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Isolinien 1 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis @ 8'000 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden, Rasterweite : 500 m

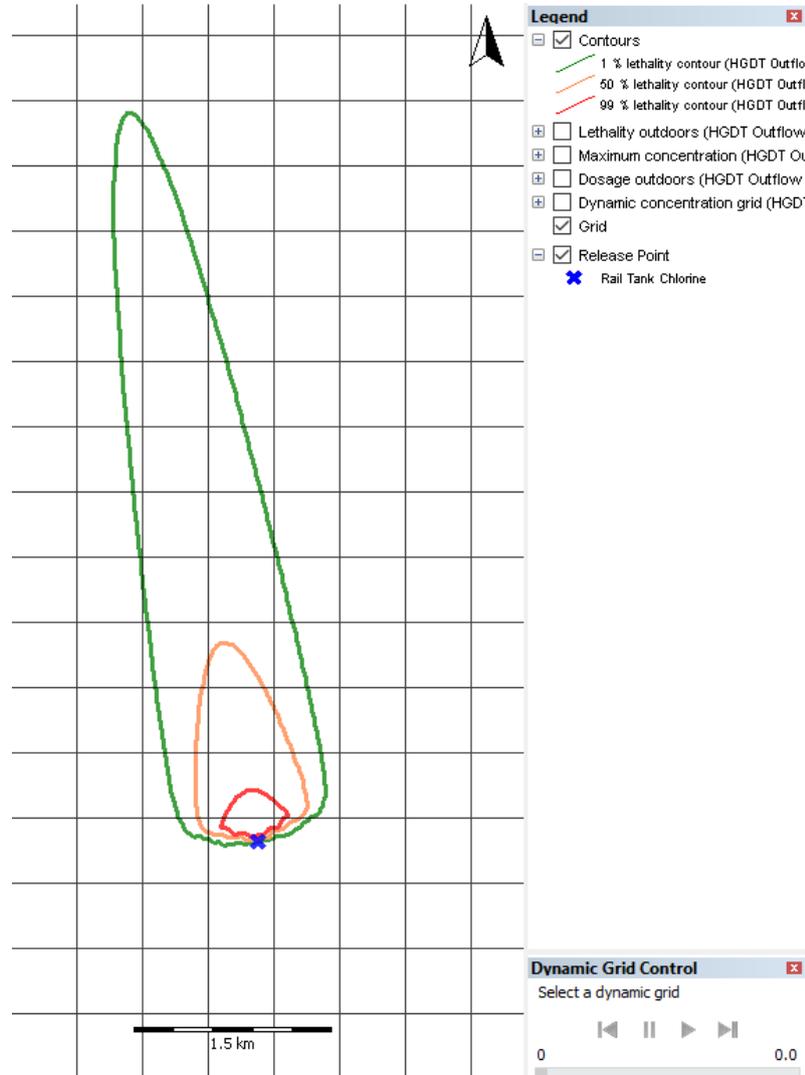
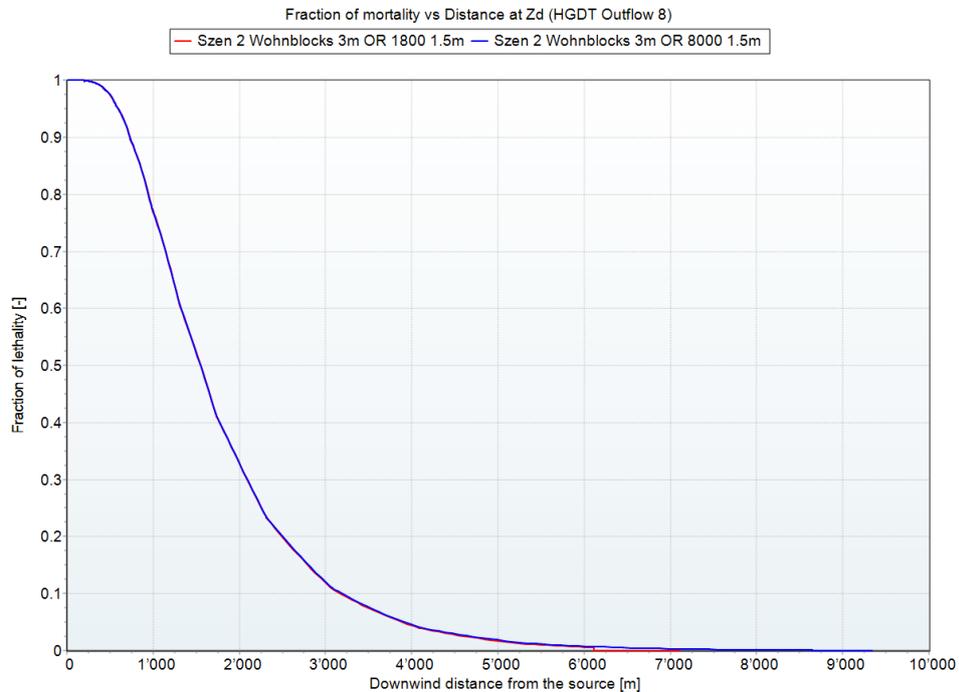


Abb. 79 Szenario 2 "Wohnblocks" (Oberflächenrauigkeit 3 m)
Letalität in Windrichtung bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit ab Ankunft der
Gaswolke, 1.5 m über Boden



B 4.2.8.2 Letalität 30.5 m über Boden (Oberflächenrauigkeit 3 m)

30.5 m über Boden liegt die toxische Dosis weit unter 1 % Letalität bei 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit. Deshalb sind keine Kurven zur Letalität dargestellt.

B 4.2.9 Bemerkungen zu den EFFECTS Ergebnissen

Beim Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m Oberflächenrauigkeit hat die sehr hohe Expositionszeit von 8'000 s im Vergleich zur Berechnung mit einer Expositionszeit von 1800 s nur bei der maximalen Reichweite der tiefen Letalitätsbereiche in Windrichtungen einen erkennbaren Einfluss. Insgesamt ist der Einfluss der sehr langen Expositionszeit jedoch gering.

Im Gegensatz zum Szenario 0 "Baseline" sinkt die Chlorkonzentration beim Szenario 2 "Wohnblocks" bei den Ganglinien in Abb. 56 und Abb. 65 von 10 m über 20 m bis 40 m Abstand zur Freisetzung kontinuierlich ab. Die unterschiedliche Aufzeichnungsdauer der Kurven in Abb. 58 und Abb. 67 (viel längere Aufzeichnungsdauer bei der Kurve für 10'000 m als bei den anderen Kurven) ist jedoch auch beim Szenario 2 "Wohnblocks" vorhanden. Es gelten deshalb dieselben Vorbehalte wie in Kapitel B 2.2.5.

B 4.3 Vergleiche und Analysen

B 4.3.1 Chlorkonzentration

B 4.3.1.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den FLACS-Berechnungen liegen die maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ beim Szenario 2 "Wohnblocks" vor allem bei 205.6 mg/m³ viel tiefer als bei den Szenarien 0 "Baseline" und 1 "Einfamilienhäuser". Die Differenz zu Szenario 0 "Baseline" beträgt bei 205.6 mg/m³ knapp ein Faktor 14.

Die Differenzen bei den Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der obengenannten Schwellenwerte sind nur geringfügig kleiner. Der Einfluss der Wohnblockgeometrie auf die Chlorkonzentrationen ist somit sehr gross.

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ hingegen liegen bei allen Szenarien 0 "Baseline", 1 "Einfamilienhäuser" und 2 "Wohnblocks" grob betrachtet auf einem ähnlichen Niveau.

Die Abmessungen der Flächen mit Chlorkonzentrationen über 205.6 mg/m³ in 30.5 m Höhe ist beim Szenario 2 "Wohnblocks" ziemlich ähnlich wie in 1.5 m Höhe. Bei den höheren Schwellenwerten 1'116 mg/m³ und vor allem bei 6'061 mg/m³ werden die Flächen deutlich kleiner, da auf dem Weg von der Freisetzung des Chlors in Bodennähe bis auf 30.5 m Höhe bereits eine Vermischung mit der Luft stattfindet und wahrscheinlich auch oberhalb der Dächer der Wohnblocks das Chlor stärker mit der Luft vermischt wird.

B 4.3.1.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

In EFFECTS wurden für das Szenario 2 "Wohnblocks" zwei Varianten gerechnet: 1 m Oberflächenrauigkeit und 3 m Oberflächenrauigkeit. Die Ergebnisse für diese beiden Varianten sind sehr ähnlich, so dass nicht separat darauf eingegangen wird.

Die Berechnung mit 1 m Oberflächenrauigkeit in EFFECTS gilt auch für das Szenario 1 "Einfamilienhäuser". Somit unterscheiden sich die Ergebnisse für das Szenario 2 "Wohnblocks" vom Szenario 1 "Einfamilienhäuser" bei EFFECTS nur wenig, auch wenn für Szenario 1 "Einfamilienhäuser" die Variante mit 1 m Oberflächenrauigkeit und für das Szenario 2 "Wohnblocks" die Variante mit 3 m Oberflächenrauigkeit genommen würde.

Die maximalen Reichweiten der drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ sowie die Flächen innerhalb dieser Konzentrationsbereiche sind in EFFECTS beim Szenario 2 "Wohnblocks" maximal um etwas mehr als einen Faktor 2 kleiner als beim Szenario 0 "Baseline".

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ bei Szenario 2 "Wohnbocks" sind bis zu einem Faktor 2 grösser als bei Szenario 0 "Baseline" bei den EFFECTS-Berechnungen.

Im Szenario 0 "Baseline" ergeben sich in 1.5 m über Boden höhere Chlorkonzentrationen bis in weitere Distanzen als bei Szenario 2 "Wohnblocks" (und Szenario 1

"Einfamilienhäuser"). Weiter in der Höhe ergeben sich jedoch in Szenario 2 "Wohnblocks" (und Szenario 1 "Einfamilienhäuser") höhere Chlorkonzentrationen (siehe Anhang E).

Der Grund dafür liegt bei der grösseren Oberflächenrauigkeit in Szenario 2 "Wohnblocks". Diese führt zu einer höheren Turbulenz und damit stärkeren vertikalen Durchmischung des freigesetzten Chlors als in Szenario 0 "Baseline". Dadurch wird das Chlor in Bodennähe stärker verdünnt, dafür aber in höhere Bereiche hochgemischt.

B 4.3.1.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Beim Vergleich der maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ 1.5 m über Boden beim FLACS und EFFECTS-Rechenlauf für Szenario 2 "Wohnblocks" ergibt sich folgendes Bild: Beim höchsten Schwellenwert von 6'061 mg/m³ sind die Reichweiten bei beiden Tools praktisch identisch. Dann nehmen die Unterschiede zu bis zum Schwellenwert von 205.6 mg/m³ mit einer um mehr als einen Faktor 6 kleineren Reichweite bei FLACS. Bei den Flächen innerhalb der Konzentrationsbereiche verhalten sich die Unterschiede zwischen FLACS und EFFECTS ähnlich wie bei den maximalen Reichweiten.

In 30.5 m Höhe ergibt sich bei FLACS eine ähnlich grosse Fläche mit Chlorkonzentrationen über 205.6 mg/m³ wie in Bodennähe, während bei EFFECTS diese Konzentration in 30.5m Höhe gar nicht mehr vorkommt.

So erstaunt es nicht, dass bei der maximalen Höhe über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ FLACS systematisch höhere Werte als EFFECTS liefert, mit ca. einem Faktor 3 Unterschied.

B 4.3.2 Letalität

B 4.3.2.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den FLACS-Berechnungen ergeben sich beim Szenario 2 "Wohnblocks" im tiefen und mittleren Letalitätsbereich (1 % und 50 %) deutlich kleinere maximale Reichweiten und betroffene Flächen 1.5 m über Boden als beim Szenario 0 "Baseline". Die Differenzen betragen bis zu über einem Faktor 10.

Bei den hohen Letalitäten (99 %) hingegen ergibt sich bei FLACS beim Szenario 2 "Wohnblocks" eine um etwa einen Faktor 2 grössere betroffene Fläche als bei Szenario 0 "Baseline".

Zudem sind deutliche Unterschiede bei den Proportionen der betroffenen Fläche feststellbar. Die Ausdehnung der betroffenen Fläche quer zum Wind ist bei den hohen Letalitäten (99 %) bei Szenario 2 "Wohnblocks" deutlich grösser als bei Szenario 0 "Baseline". Hier machen sich deutliche Ablenkungseffekte durch die Geometrie bemerkbar. Zudem breitet sich in Szenario 2 "Wohnblocks" das Chlor mit hohen Letalitäten deutlich gegen den Wind aus.

Auch bei den Letalitäten zeigt sich somit ein sehr grosser Einfluss der Wohnblockgeometrie bei den FLACS-Berechnungen.

Gegenüber dem Szenario 1 "Einfamilienhäuser" ergeben sich bei FLACS beim Szenario 2 "Wohnblocks" vor allem eine mehr als einen Faktor 2 kleinere Reichweite bei der 1 % Letalität 1.5 m über Boden. Ansonsten sind bei den hohen und mittleren Letalitäten (99 % und 50 %) die maximalen Reichweiten bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" und Szenario 2 "Wohnblocks" recht ähnlich. Die maximale Breite der Letalitätsbereiche ist in FLACS bei Szenario 2 "Wohnblocks" etwas grösser als bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser".

Die betroffenen Flächen im Letalitätsbereich zwischen 1 % und 99 % sind beim Szenario 2 "Wohnblocks" um etwa einen Faktor 2 kleiner als beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser", bei den Letalitäten >99 % hingegen ist die betroffene Fläche beim Szenario 2 "Wohnblocks" grösser als beim Szenario 1 "Einfamilienhäuser".

Die Abmessungen der Flächen mit mindestens 1 % Letalität in 30.5 m Höhe ist beim Szenario 2 "Wohnblocks" ziemlich ähnlich wie in 1.5 m Höhe. Bei den höheren Letalitäten hingegen werden die Flächen in 30.5 m Höhe deutlich kleiner bzw. die Letalität von 99 % wird gar nicht erreicht. Dieses Bild stimmt gut überein mit den Beobachtungen zu den Chlorkonzentrationen in Kapitel B 4.3.1.1.

B 4.3.2.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

In EFFECTS wurden für das Szenario 2 "Wohnblocks" zwei Varianten gerechnet: 1 m Oberflächenrauigkeit und 3 m Oberflächenrauigkeit. Das potentielle Schadensausmass für Personen im Freien bei homogener Personendichte ist bei der Variante mit 3 m Oberflächenrauigkeit ca. 25 % kleiner als bei 1 m Oberflächenrauigkeit. Die Ergebnisse sind somit sehr ähnlich. Infolgedessen unterscheiden sich die Ergebnisse für das Szenario 2 "Wohnblocks" vom Szenario 1 "Einfamilienhäuser" bei EFFECTS ebenfalls nur wenig, da die Berechnung mit 1 m Oberflächenrauigkeit in EFFECTS auch für das Szenario 1 "Einfamilienhäuser" gilt.

Ebenfalls sind in EFFECTS die Unterschiede zwischen der Berechnung mit 1'800 s und 8'000 s Expositionszeit verhältnismässig klein. Es wird deshalb nicht separat darauf eingegangen.

Auch bei den EFFECTS-Berechnungen ergeben sich beim Szenario 2 "Wohnblocks" kleinere maximale Reichweiten und betroffene Flächen 1.5 m über Boden als beim Szenario 0 "Baseline". Die Differenzen betragen aber maximal einen Faktor 2 bei den maximalen Reichweiten und knapp 3 bei den betroffenen Flächen. Beim potentiellen Schadensausmass für Personen im Freien bei homogener Personendichte liegen die Unterschiede in der gleichen Grössenordnung.

Auch beim Szenario 2 "Wohnblocks" breitet sich bei EFFECTS das Chlor von Beginn an mit hohen Letalitäten stärker quer zum Wind aus als bei Szenario 0 "Baseline", allerdings ist dieser Effekt bei EFFECTS deutlich schwächer als bei FLACS.

B 4.3.2.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Werden die Ergebnisse von FLACS und EFFECTS für Szenario 2 "Wohnblocks" 1.5 m über Boden verglichen, ergeben sich vor allem bei 1 % Letalität viel höhere Reichweiten bei EFFECTS (Faktor 7). Mit zunehmender Letalität nehmen die Unterschiede ab (Faktor 2 bei

50 % Letalität) und ändern bei der betroffenen Fläche sogar das Vorzeichen: Bei 99 % Letalität ergibt sich bei FLACS eine leicht grössere Reichweite als bei EFFECTS.

Bei den betroffenen Flächen 1.5 m über Boden ergibt sich ein ähnliches Bild: Im Letalitätsbereich zwischen 1 und 99 % ist die betroffene Fläche bei FLACS um mehr als einen Faktor 10 kleiner, während dem sie bei den Letalitäten über 99 % bei FLACS etwa doppelt so gross ist.

Bei den betroffenen Arealen gibt es nur im Bereich der hohen Letalitäten eine teilweise Übereinstimmung von EFFECTS und FLACS. Die in FLACS zu beobachtende Ausbreitung des Chlors gegen den Wind ist in EFFECTS nicht vorhanden.

Während bei FLACS in 30.5 m Höhe verbreitet Letalitäten zwischen 1 und 50 % auftreten, wird in dieser Höhe bei EFFECTS nirgends eine Letalität von 1 % erreicht.

B 4.3.3 Zeitlicher Verlauf

B 4.3.3.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Teilweise scheint sich bei den FLACS-Berechnungen die Chlorgaswolke in Szenario 2 "Wohnblocks" in Bodennähe etwas langsamer auszubreiten als in Szenario 0 "Baseline" und Szenario 1 "Einfamilienhäuser". Dies ist aufgrund der Hindernisse im Ausbreitungspfad in Szenario 2 "Wohnblocks" zu erwarten.

Die Ganglinien in Bodennähe in Szenario 2 "Wohnblocks" sind stark geprägt durch die Lage der Monitorpunkte vor, neben und hinter Gebäuden. So steigt beispielsweise die Konzentration beim Monitorpunkt in 20 m Abstand aufgrund der Lage neben einem Gebäude viel weniger stark an als bei Szenario 0 "Baseline" und Szenario 1 "Einfamilienhäuser". Trotzdem folgen die Ganglinien grob der Regel, dass mit zunehmendem Abstand zur Freisetzung der Peak kleiner wird.

In 30.5 m Höhe sind wahrscheinlich turbulenzbedingte starke Schwankungen bei den Ganglinien festzustellen, die mit zunehmender Distanz zur Freisetzung abnehmen. Der Wolkendurchgang scheint im Vergleich zu den Ganglinien in Bodennähe verlängert. Der Grund dafür könnte sein, dass während der Ausbreitung des Chlorgases bis in 30.5 m Höhe der Peak bereits zu einem gewissen Grad ausgeglättet wurde.

B 4.3.3.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Auf die Variante mit 1 m Oberflächenrauigkeit wurde schon bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" eingegangen. Die Ganglinien der Variante mit 3 m Oberflächenrauigkeit unterscheiden sich kaum von der Variante mit 1 m Oberflächenrauigkeit.

B 4.3.3.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Das Chlorgas scheint sich bei Szenario 2 "Wohnblocks" in 1.5 m Höhe über Boden auf den ersten 200 m in EFFECTS etwas schneller auszubreiten als in FLACS. Der Verlauf der Ganglinie ist, mit Ausnahme des Nahbereichs der Freisetzung, bei beiden Tools sehr verschieden. Dies ist zu erwarten, da die Ganglinien bei FLACS stark durch die Lage der Monitorpunkte zu den Gebäuden geprägt ist.

EFFECTS zeichnet an allen Punkten zum Teil viel höhere Konzentrationen auf als FLACS.

In 30.5 m Höhe sind die Ganglinien von EFFECTS und FLACS völlig verschieden. Die Konzentrationen liegen bei EFFECTS erwartungsgemäss viel tiefer. Während die Ganglinie bei EFFECTS in 400 m Abstand einen deutlichen Peak aufweist, steigt sie bei FLACS allmählich an und sinkt wieder ab. Die Wolkendurchgangsdauer ist bei FLACS deutlich länger. In ca. 100 m ist der Verlauf ähnlicher, die Durchgangsdauer ist bei FLACS aber viel länger. Dies zeigt, dass die beiden Modelle in dieser Höhe über Boden deutlich voneinander abweichen.

B 4.3.4 Ergebnis

Bei den maximalen Reichweiten für Konzentration und Letalität und den betroffenen Flächen 1.5 m über Boden treten vor allem bei den tieferen und mittleren Letalitäten sehr grosse Differenzen zwischen den FLACS- und EFFECTS-Ergebnissen auf.

Wie bei den anderen Szenarien treten auch grössere Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden auf, so dass auch in diesem Bereich Vorsicht beim Umgang mit Berechnungsergebnissen geboten ist. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen ist bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Bei den Ganglinien treten insbesondere bei der Grössenordnung der erreichten Konzentrationen teilweise sehr grosse Unterschiede zwischen EFFECTS und FLACS auf. Ferner wird sichtbar, dass EFFECTS naturgemäss Verzögerungen beim Wolkendurchgang oder den Einfluss von Hindernissen wie z.B. einem Wohnblock nicht räumlich auflösen kann.

Noch deutlich stärker als bei Szenario 1 "Einfamilienhäuser" wird der sehr grosse Einfluss der Geometrie auf das Ausbreitungsverhalten bei den FLACS-Berechnungen sichtbar. Es treten bei der FLACS-Berechnung auch deutliche Ablenkungseffekte auf. Der Gasstrahl prallt nach der Freisetzung auf einen West-Ost orientierten Wohnblock auf und wird in westliche und östliche Richtung umgelenkt. Ebenfalls wird der nur leicht nach Westen von der Nordrichtung abweichende Wind durch die West-Ost verlaufenden Gebäude stärker in westliche Richtung gelenkt.

EFFECTS kann diese Effekte naturgemäss nicht abbilden.

B 5 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

B 5.1 FLACS

B 5.1.1 Übersicht

B 5.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 42 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"
Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
(Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1323 m	1'555 m	979'128 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1243 m	1'465 m	510'771 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	985 m	1'169 m	325'650 m ²

Tab. 43 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 30.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'269 m	1'326 m	934'416 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	860 m	996 m	189'751 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	458 m	424 m	6'778 m ²

Tab. 44 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
 Boden (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	70 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	50 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	40 m

B 5.1.1.2 Letalität

Tab. 45 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x%
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	1'303 m	1'522 m	805'884 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	1'144 m	1'357 m	413'948 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3)^{2.75}$)	720 m	892 m	184'602 m ²

Tab. 46 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentielles Schadensausmass 1.5 m über Boden (Grundlage: Gexcon AS 13.9.2019)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche	Mittlere Letalität	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität
1 bis 50 %	391'936 m ²	-	-
50 bis 99 %	229'345 m ²	-	-
>99 %	184'602 m ²	-	-
Total (>1 %)	805'884 m ²	-	-

Für die Berechnung der mittleren Letalität und der letalitätsgewichteten Äquivalenzfläche wären Rasterdaten für die Letalität nötig. Für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" wurden aus den FLACS-Ergebnissen keine Rasterdaten extrahiert.

Tab. 47 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 30.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 13.9.2019)

Letalität 30.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität $\geq x\%$
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 6.9×10^7 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	1'101 m	1'022 m	573'098 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.2×10^9 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	609 m	552 m	7'720 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.6×10^{11} min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	0	0	0 m ²

B 5.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

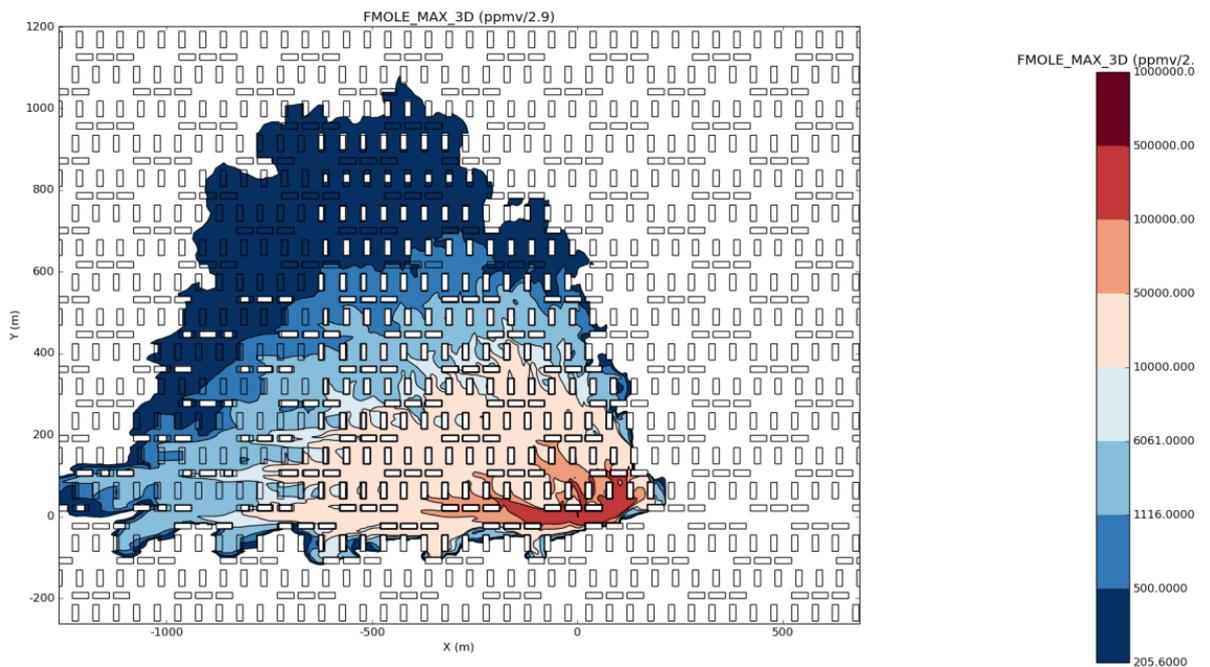
Parameter von EFFECTS-Berechnung übernommen, identisch mit Szenario 0 "Baseline", siehe Anhang B 2.2.1.3

B 5.1.2 Chlorkonzentration

B 5.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 80 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



)
)
)

Abb. 81 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

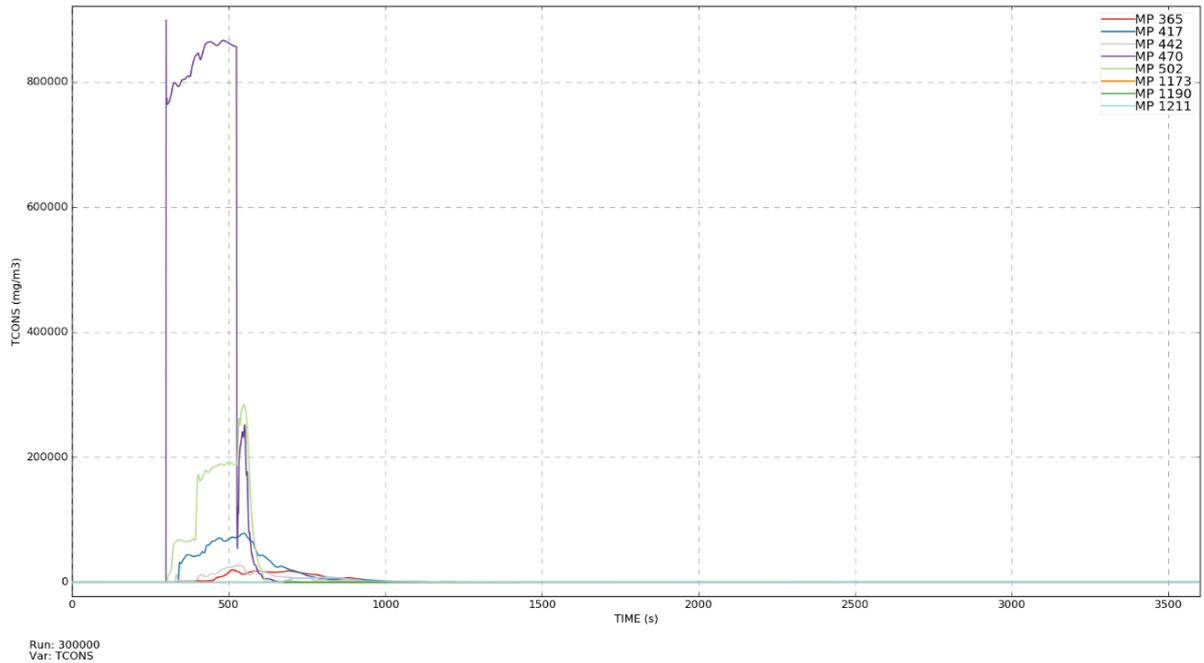
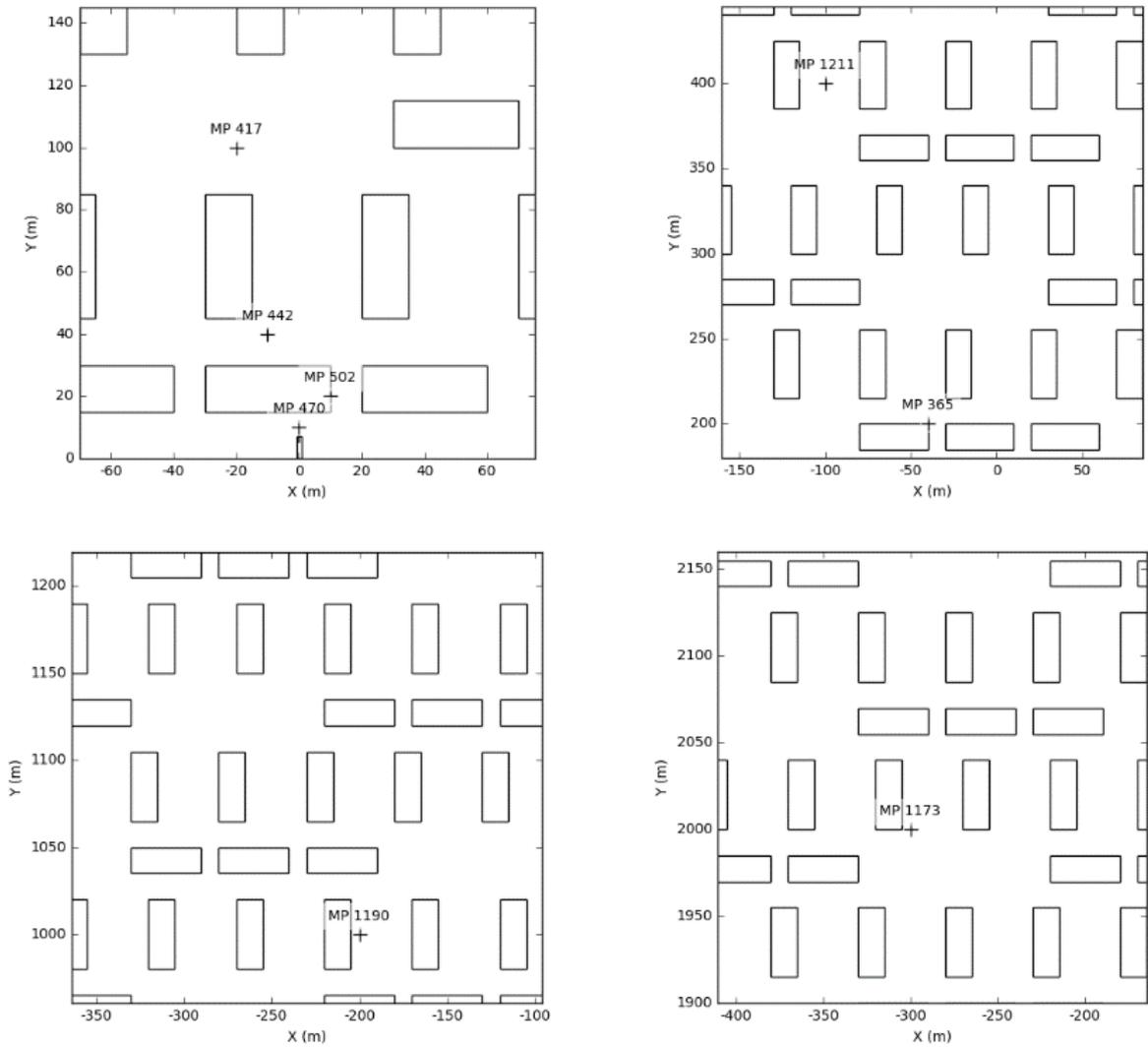


Abb. 82 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Lage der Messpunkte für Abb. 81 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 5.1.2.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden

Abb. 83 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

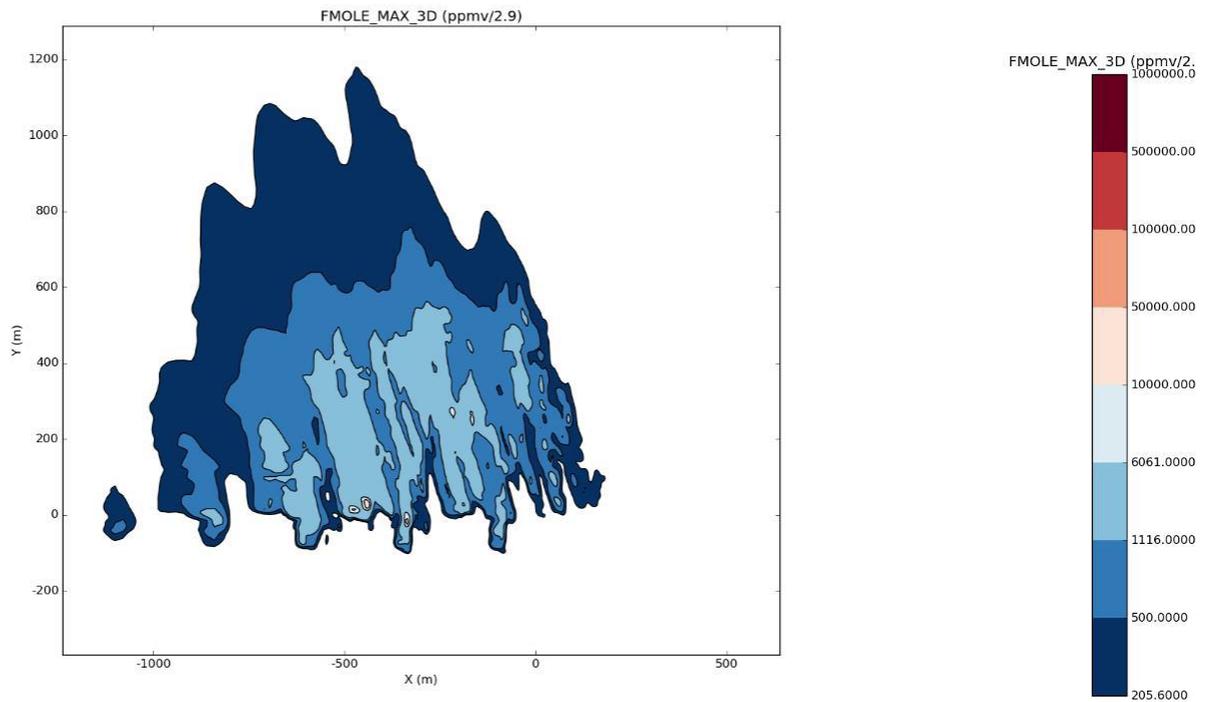


Abb. 84 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 20 m, 70 m, 200 m, 400 m, und 800 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)

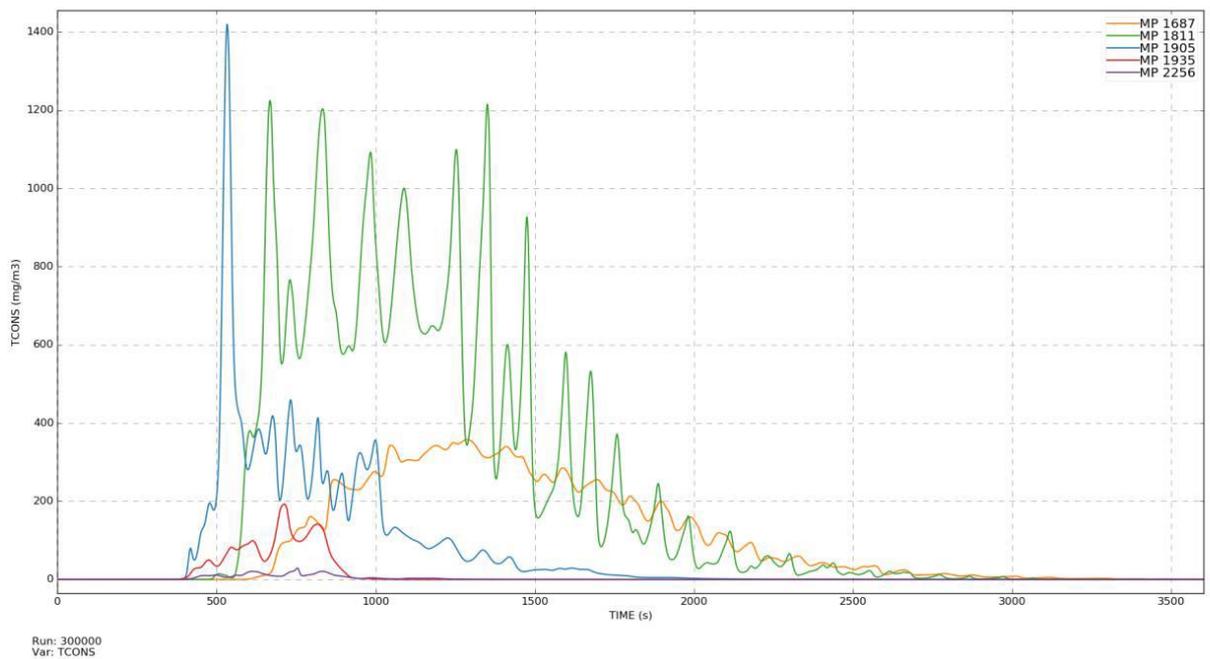
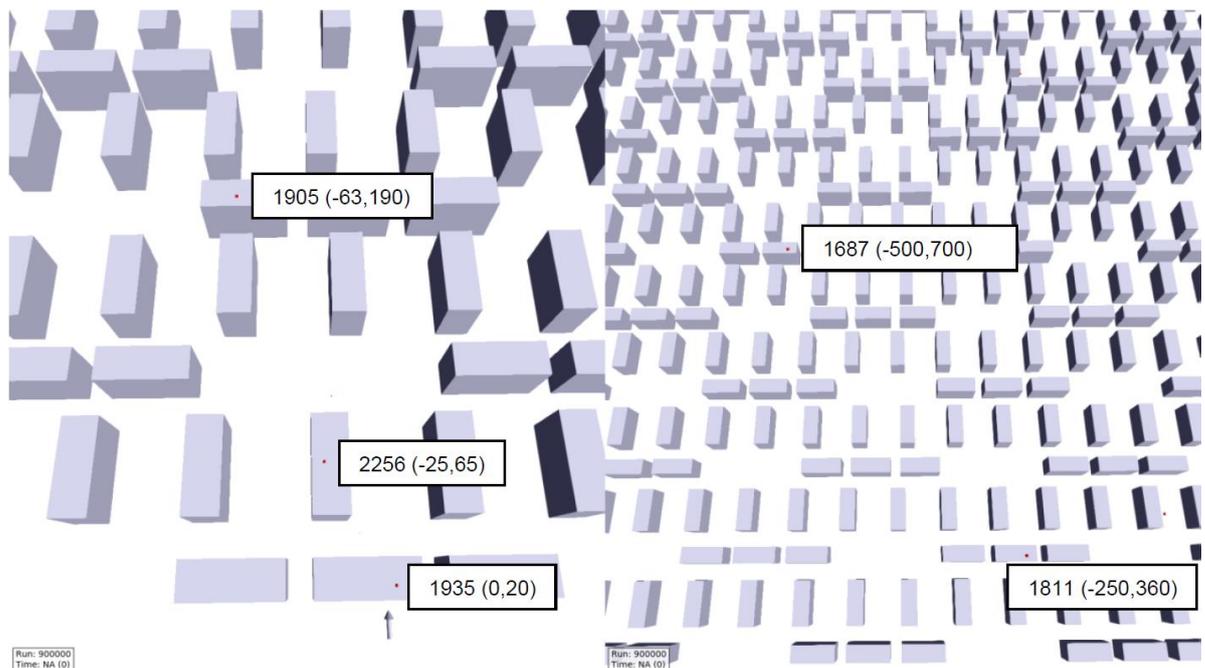


Abb. 85 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

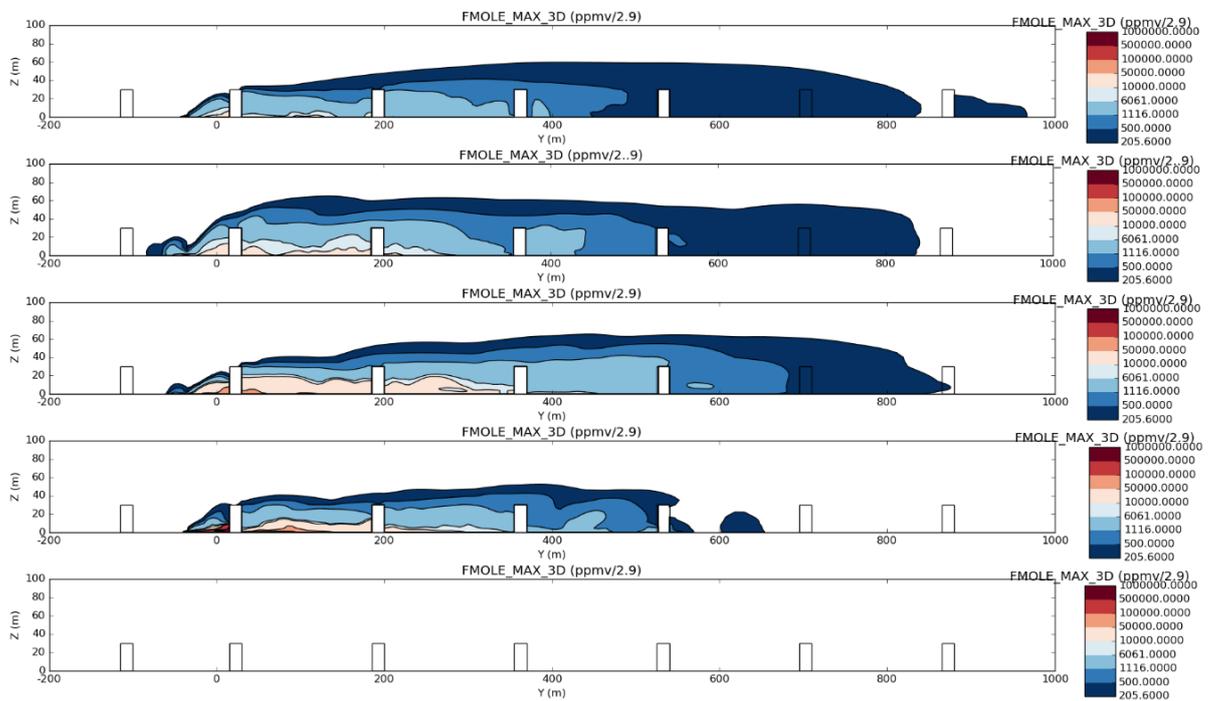
Lage der Messpunkte für Abb. 84 (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 5.1.2.3 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 86 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

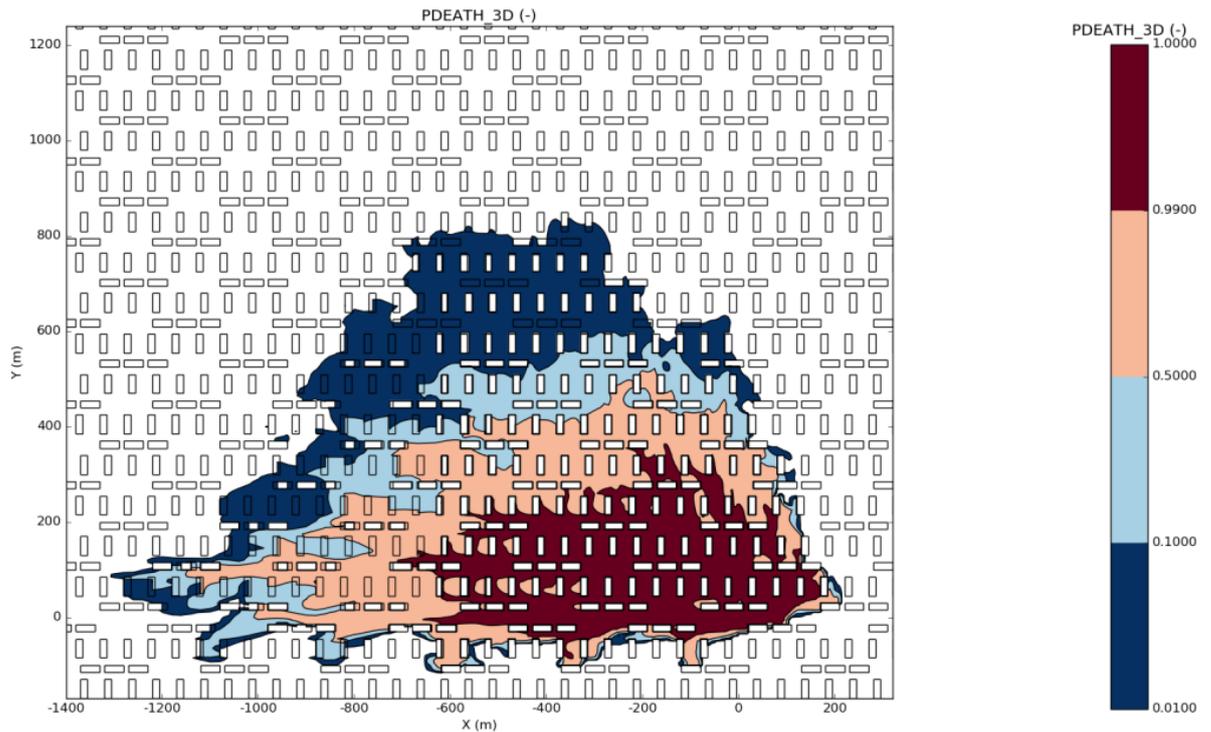
Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten) $x=-750$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle) und $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 5.1.3 Letalität

B 5.1.3.1 Letalität 1.5 m über Boden

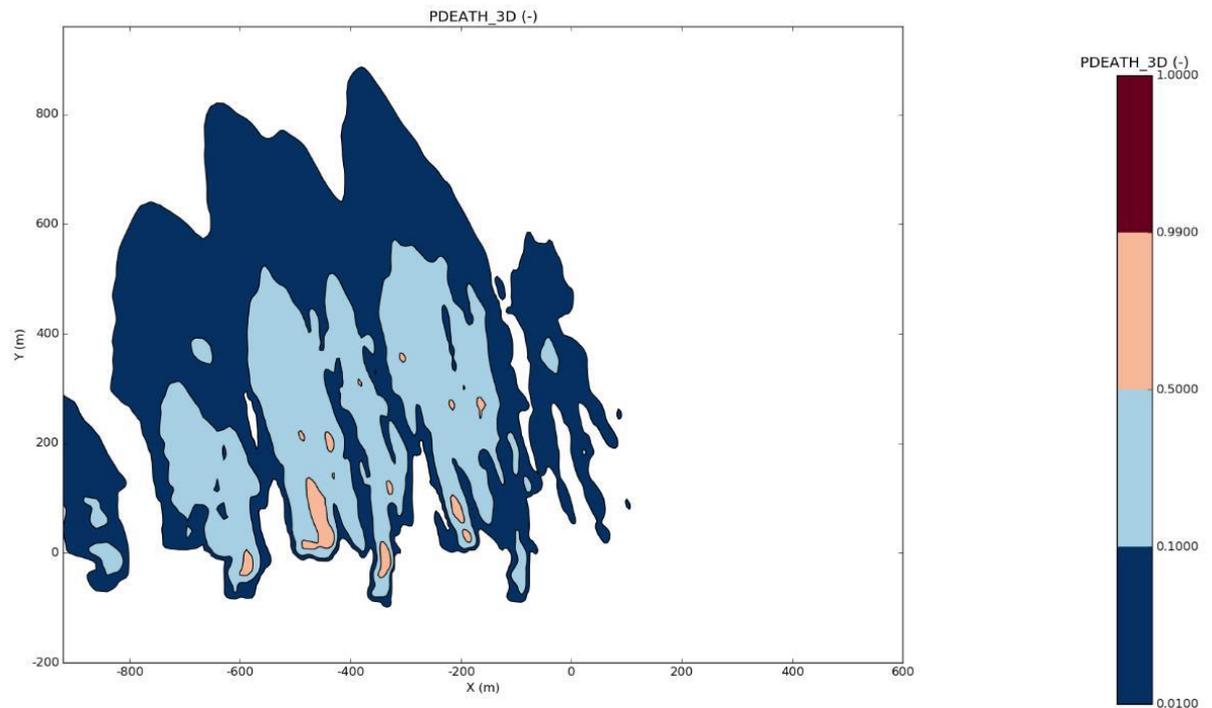
Abb. 87 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1.5 m über
Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 5.1.3.2 Letalität 30.5 m über Boden

Abb. 88 Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 13.9.2019)



B 5.1.4 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Kap. B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

B 5.2 EFFECTS

Siehe Kap. B 4.2, gleicher Rechenlauf wie bei Szenario 2 "Wohnblocks"

EFFECTS kann keine Hangneigung berücksichtigen. EFFECTS rechnet alle Gasfreisetzungen in einer horizontalen Ebene.

B 5.3 Vergleiche und Analysen

B 5.3.1 Chlorkonzentration

B 5.3.1.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Im Vergleich zu Szenario 2 "Wohnblocks" ergeben sich bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" grössere Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³. Die Differenzen bleiben aber unter einem Faktor 2. Die Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der obengenannten Schwellenwerte sind bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" ebenfalls geringfügig grösser als bei Szenario 2 "Wohnblocks".

In 30.5 m Höhe ergibt sich ein vergleichbares Bild, mit Ausnahme des Schwellenwerts von 6'061 mg/m³. Dieser wird in beiden Szenarien "Wohnblocks" und "Wohnblocks 10° Neigung" in 30.5 m Höhe nur punktuell erreicht, so dass sich bei diesem Schwellenwert rasch grosse, aber wenig aussagekräftige Unterschiede bei den Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb des Schwellenwerts ergeben können.

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ sind in beiden Szenarien praktisch gleich.

B 5.3.1.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

EFFECTS kann keine Hangneigung berücksichtigen. EFFECTS rechnet alle Gasfreisetzungen in einer horizontalen Ebene. Eine Berechnung in EFFECTS für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" müsste deshalb ohne Berücksichtigung der Neigung durchgeführt werden, d.h. gleich wie beim Szenario 2 "Wohnblocks".

B 5.3.1.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

EFFECTS kann keine Hangneigung berücksichtigen. EFFECTS rechnet alle Gasfreisetzungen in einer horizontalen Ebene. Eine Berechnung in EFFECTS für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" müsste deshalb ohne Berücksichtigung der Neigung durchgeführt werden, d.h. gleich wie beim Szenario 2 "Wohnblocks".

Beim Vergleich der maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ 1.5 m über Boden beim FLACS-Rechenlauf für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" und beim EFFECTS-Rechenlauf für Szenario 2 "Wohnblocks" ergibt sich folgendes Bild: Beim höchsten Schwellenwert von 6'061 mg/m³ ergibt die FLACS Rechnung eine um knapp einen Faktor 2 grössere Reichweite. Bei den mittleren und tiefen Letalitäten hingegen ergibt die EFFECTS-Berechnung die grössere Reichweite um knapp einen Faktor 2 bzw. 5. Bei den Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der obengenannten Schwellenwerte ergibt sich ein sehr ähnliches Bild.

In 30.5 m Höhe über Boden ergibt sich bei FLACS eine ähnlich grosse Reichweite und Fläche mit Chlorkonzentrationen über 205.6 mg/m³ wie in 1.5 m Höhe. Erst bei den Schwellenwerten 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ ergeben sich kleinere Reichweiten und vor allem kleinere Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der Schwellenwerte. In

EFFECTS hingegen wird in 30.5 m Höhe auch der tiefste der drei Schwellenwerte gar nirgends erreicht.

Somit erstaunt es nicht, dass bei der maximalen Höhe über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ FLACS systematisch höhere Werte als EFFECTS liefert, mit ca. einem Faktor 3 Unterschied.

B 5.3.2 Letalität

B 5.3.2.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Im Vergleich zu Szenario 2 "Wohnblocks" ergeben sich bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" um ca. 50 % grössere Reichweiten für die drei Letalitäten 1 %, 50 % und 99 % in 1.5 m Höhe über Boden. Bei der Reichweite der Konzentrationsschwellenwerte sind die Differenzen zwischen den beiden Szenarien 2 "Wohnblocks" und 3 "Wohnblocks 10° Neigung" etwas grösser als bei den Letalitäten. Offensichtlich werden die höheren Konzentrationen bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" teilweise durch einen etwas rascheren Wolkendurchgang kompensiert.

Die maximalen Breiten quer zum Wind bewegen sich bei beiden Rechenläufen in einer ähnlichen Grössenordnung.

Die Grösse der betroffenen Flächen liegt bei den Letalitäten zwischen 1 % und 50 % und den Letalitäten über 99 % bei Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" ebenfalls in einer ähnlichen Grössenordnung. Bei den Letalitäten zwischen 50 % und 99 % ist die betroffene Fläche beim Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" hingegen etwa dreimal so gross wie beim Szenario 2 "Wohnblocks".

Die betroffenen Areale sind bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" im Vergleich zu Szenario 2 "Wohnblocks" in westliche Richtung verschoben. Der Grund dafür ist, dass die Ebene in Windrichtung geneigt ist, so dass sich der Einfluss der Neigung und des Windes kumulieren und zusammen mit den west-ost-orientierten Gebäudereihen eine stärkere Ablenkung in westliche Richtung stattfindet.

In 30.5 m Höhe sind die Reichweiten für die drei Letalitäten 1 %, 50 % und 99 % und die Grössen der betroffenen Flächen bei beiden Szenarien, Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung", sehr ähnlich.

B 5.3.2.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Eine Berechnung in EFFECTS für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" müsste ohne Berücksichtigung der Neigung durchgeführt werden, d.h. gleich wie beim Szenario 2 "Wohnblocks".

B 5.3.2.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Die Unterschiede zwischen den FLACS-Ergebnissen für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" und den EFFECTS-Ergebnissen für Szenario 2 "Wohnblocks" 1.5 m über Boden fallen etwas kleiner aus als wenn von beiden Tools die Ergebnisse für das Szenario 2 "Wohnblocks" verglichen werden.

Bei der maximalen Reichweite sind bei 1 % Letalität die Unterschiede aber immer noch sehr gross (ca. Faktor 4 grösser bei EFFECTS). Mit zunehmender Letalität nehmen die Unterschiede bei der Reichweite ab. Bei 99 % Letalität drehen sich die Verhältnisse und die FLACS-Berechnung ergibt für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" eine nahezu doppelt so grosse Reichweite wie die EFFECTS Berechnung.

Bei den betroffenen Flächen ist das Bild ähnlich: Im tiefen Letalitätsbereich 1 % bis 50 % ist die betroffene Flächengrösse 1.5 m über Boden bei EFFECTS ca. zehnmals grösser als bei FLACS. Mit zunehmender Letalität nimmt der Unterschied ab, und bei 99 % Letalität ist die betroffene Fläche bei FLACS ca. 50 % grösser als bei EFFECTS.

Da das betroffene Areal bei EFFECTS deutlich grösser ist, und auch die Verschiebung in westliche Richtung in EFFECTS nicht auftritt, ergeben sich nur auf der Westseite nahe am Freisetzungsort Überlappungen.

Während bei FLACS in 30.5 m Höhe verbreitet Letalitäten zwischen 1 und 50 % auftreten, wird in dieser Höhe bei EFFECTS nirgends eine Letalität von 1 % erreicht.

B 5.3.3 Zeitlicher Verlauf

B 5.3.3.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Der im Vergleich zu Szenario 2 "Wohnblocks" raschere Wolkendurchgang bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" ist bei den Ganglinien 1.5 m über Boden deutlich sichtbar, z.B. in 100 m und 200 m Distanz zur Freisetzung (MP 417 und 365). Die Ganglinien sind bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" deutlich weniger in die Länge gezogen als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Möglicherweise ist der raschere Wolkendurchgang aber nicht der einzige Grund für die kürzeren Ganglinien. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Monitorpunkte mehr am Rand der Gaswolke zu liegen kommen, wo die Konzentrationen rascher absinken, da bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" die Gaswolke deutlich stärker nach Westen abgelenkt wird.

Ebenfalls ist sichtbar, dass sich die Chlorgaswolke in Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" etwas rascher bewegt. Der Anstieg vor allem der beiden Ganglinien in 100 m und 200 m Distanz zur Freisetzung (MP 417 und 365) erfolgt früher.

Die Konzentrationen bei den Ganglinien in 1.5 m über Boden der beiden FLACS-Berechnungen für Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" liegen meist auf einem ähnlichen Niveau.

Auch in 30.5 m Höhe zeigt sich der etwas raschere Wolkendurchgang bei Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung".

B 5.3.3.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Eine Berechnung in EFFECTS für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" müsste ohne Berücksichtigung der Neigung durchgeführt werden, d.h. gleich wie beim Szenario 2 "Wohnblocks".

B 5.3.3.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den FLACS-Ganglinien in 1.5 m Höhe für Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" und den EFFECTS-Ganglinien für Szenario 2 "Wohnblocks" in 1.5 m Höhe sind die zum Teil viel höheren Konzentrationen bei EFFECTS im Nahbereich der Freisetzung, sowie die Form der Ganglinie.

Ebenfalls ist sichtbar, dass sich in EFFECTS die Wolke etwas langsamer bewegt und der Durchgang länger dauert. Allerdings ist unklar, wie weit dieser Unterschied durch die Ablenkung der Gaswolke nach Westen in FLACS bedingt ist.

In 30.5 m Höhe erreichen die Ganglinien für Szenario 2 "Wohnblocks" in EFFECTS viel tiefere Werte als in FLACS. Der Wolkendurchgang scheint in EFFECTS etwas rascher abzulaufen.

B 5.3.4 Ergebnis

Die beim Vergleich der FLACS- und EFFECTS-Ergebnisse für Szenario 2 "Wohnblocks" festgestellten Differenzen bei den Reichweiten, betroffenen Flächen und maximalen Höhen bleiben auch beim Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" in etwas kleinerem Ausmass bestehen.

Insgesamt hat die Hangneigung bei der Wohnblocküberbauung einen deutlichen Einfluss auf die Reichweiten und betroffenen Flächen. Sie führt bei der Wohnblocküberbauung aber nicht zu völlig von der Situation ohne Neigung abweichenden Ergebnissen.

Dies könnte auch daran liegen, dass die dichte Wohnblockbebauung die Ausbreitung entlang dem Gefälle stark blockiert. Unter anderen Bedingungen, beispielsweise in weniger dicht bebauten Situationen kommt die Hangneigung ev. stärker zum Tragen. Um dies zu klären, wären Variantenrechnungen nötig.

Bei den FLACS-Ergebnissen für das Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" wird deutlich, dass die kombinierte Wirkung von Überbauung, Wind und Neigung zu unerwarteten Effekten wie der Verschiebung der betroffenen Flächen in westliche Richtung führen kann.

B 6 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

B 6.1 FLACS

B 6.1.1 Übersicht

B 6.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 48 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 14.8.2020)

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzentration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	2'260 m	932 m	1'178'874 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1'020 m	821 m	393'643 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	681 m	665 m	175'592 m ²

Tab. 49 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 30.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 14.8.2020)

Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzentration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	2'266 m	722 m	1'068'338 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	748 m	527 m	209'781 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	481 m	290 m	17'697 m ²

Tab. 50 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
 Boden (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	85 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	60 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	50 m

B 6.1.1.2 Letalität

Tab. 51 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen
 Dosis 1.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 3.4.2020, 8.4.2020 und
 Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind²	Fläche mit Letalität ≥ x %¹
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 6.9×10^7 min (mg/m ³) ^{2.75})	1'792 m	872 m	800'650 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.2×10^9 min (mg/m ³) ^{2.75})	820 m	755 m	253'350 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.6×10^{11} min (mg/m ³) ^{2.75})	555 m	503 m	92'700 m ²

¹ Berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m

² Berechnet mit Letalitätskonturen

Tab. 52 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentiell Schadensausmass 1.5 m über Boden (Datengrundlage: Rasterdaten vom 19.2.2021)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche¹	Mittlere Letalität¹	Letalitätsgewichtete äquivalenzfläche 100 % Letalitat¹
1 bis 50 %	547'300 m ²	11 %	62'612 m ²
50 bis 99 %	160'650 m ²	80 %	127'957 m ²
>99 %	92'700 m ²	100 %	92'480 m ²
Total (>1 %)	800'650 m ²	35 %	283'049 m ²

¹ Berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m

Tab. 53 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 30.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 3.4.2020 und 8.4.2020)

Letalität 30.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Letalität ≥ x %
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $6.9 \times 10^7 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	1'679 m	645 m	592'854 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.2 \times 10^9 \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	533 m	315 m	52'999 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von $7.6 \times 10^{11} \text{ min (mg/m}^3\text{)}^{2.75}$)	240 m	94 m	2'366 m ²

B 6.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Parameter von EFFECTS-Berechnung übernommen, identisch mit Szenario 0 "Baseline",
 siehe Anhang B 2.2.1.3

B 6.1.2 Chlorkonzentration

B 6.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 89 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

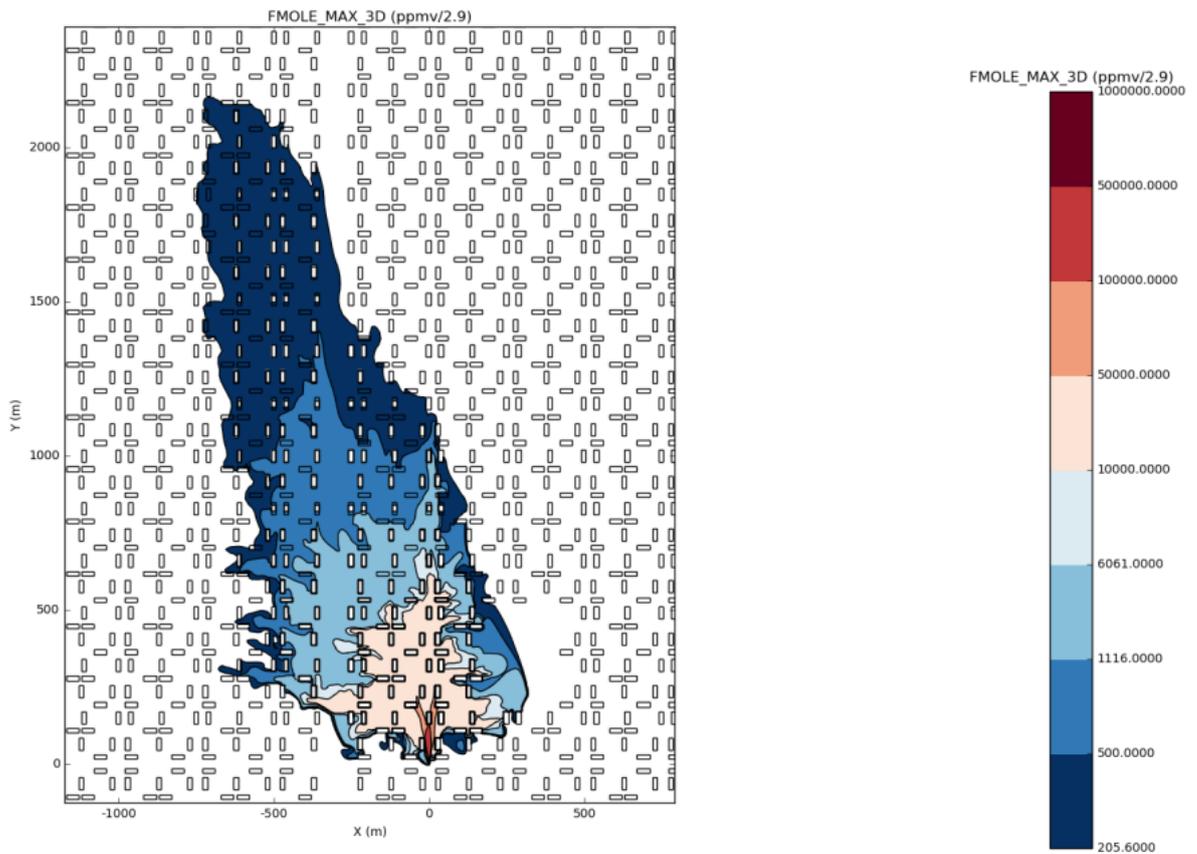


Abb. 90 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Oben: gesamte Skala auf der y-Achse

Unten: Skala auf der y-Achse bei 50'000 mg/m³ gekappt

Die Freisetzung startet bei t=300 s (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

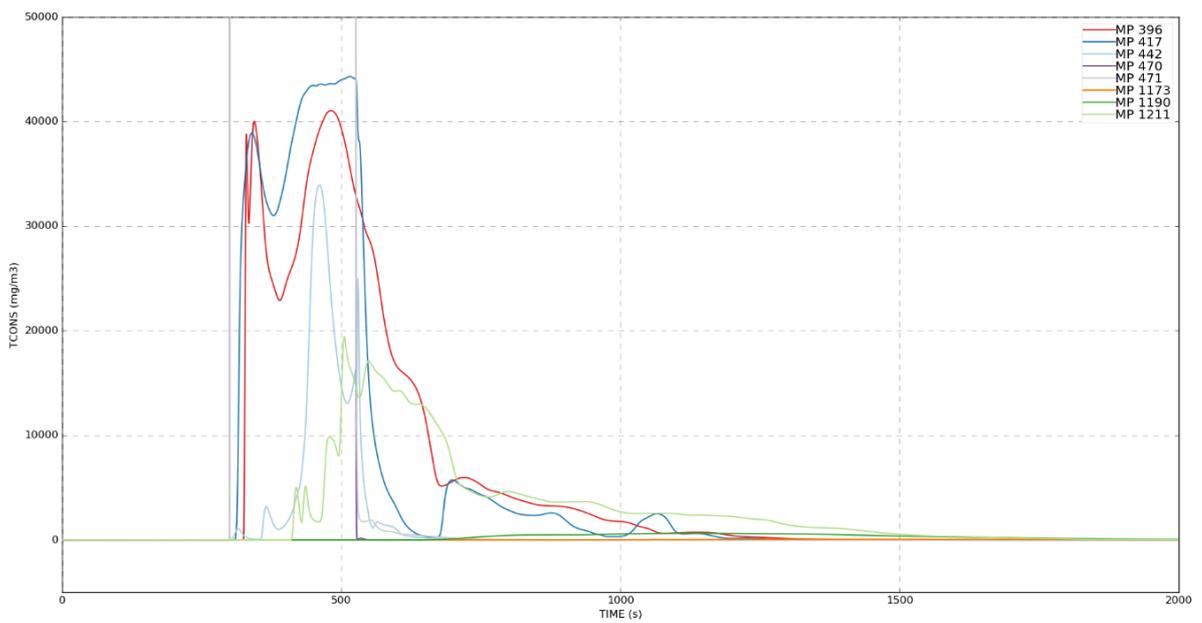
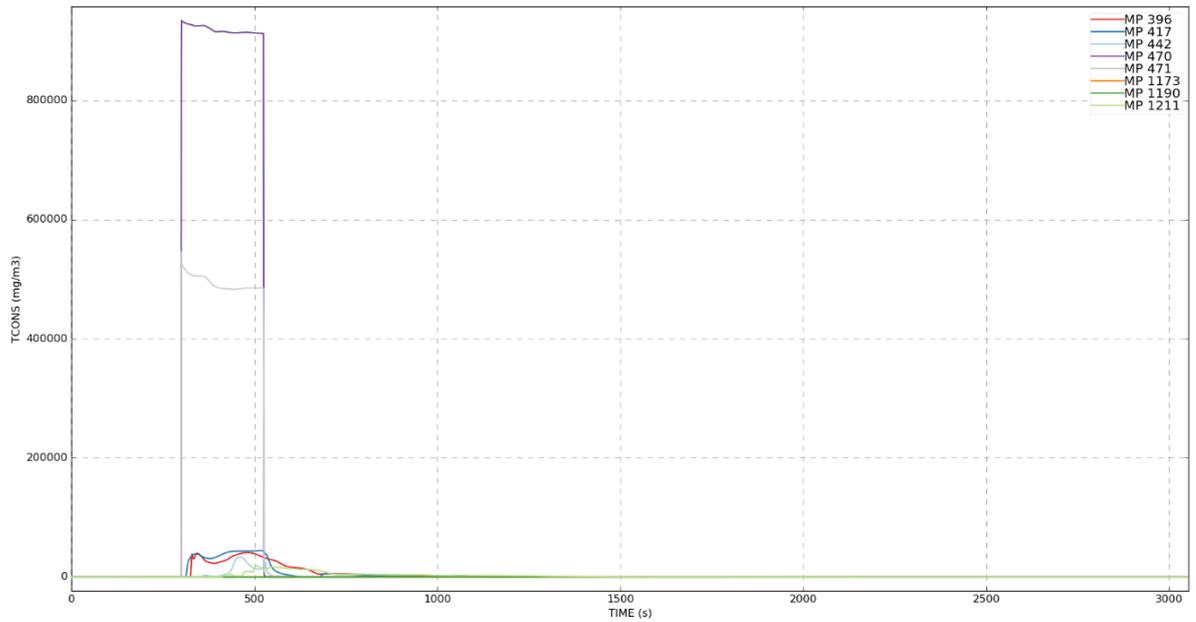
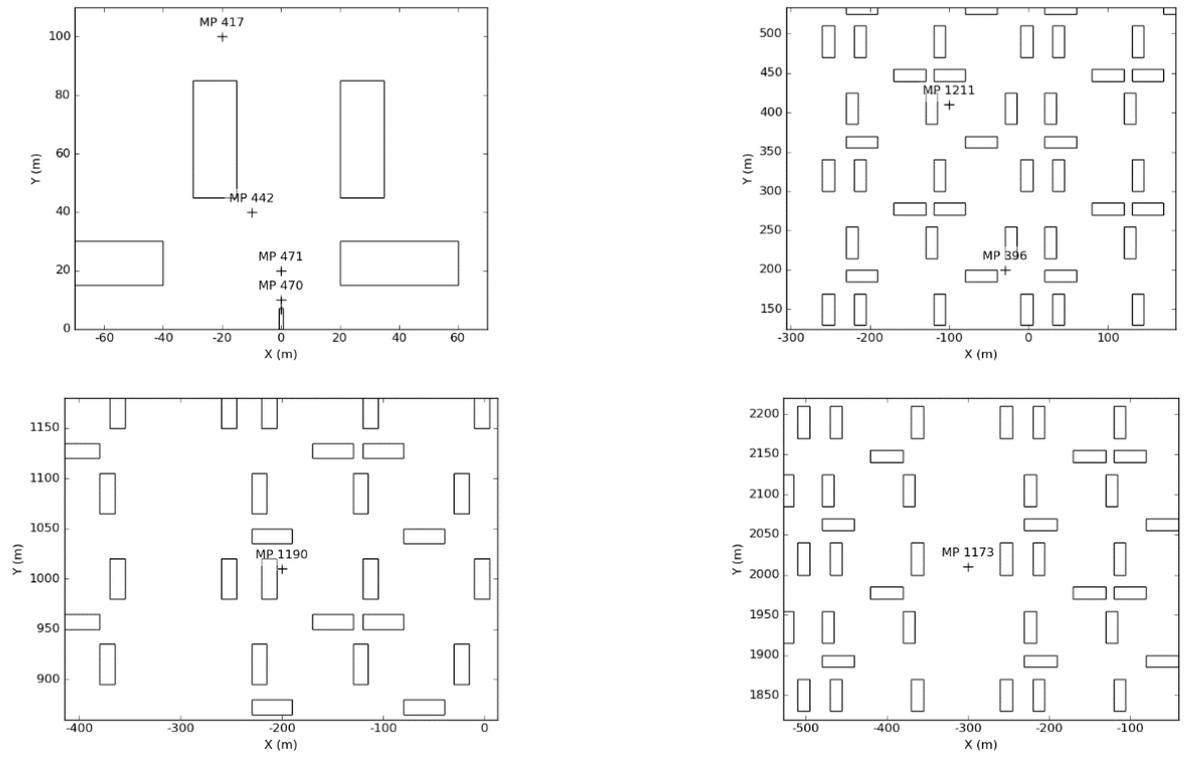


Abb. 91 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Lage der Messpunkte für Abb. 90 (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 6.1.2.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden

Abb. 92 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

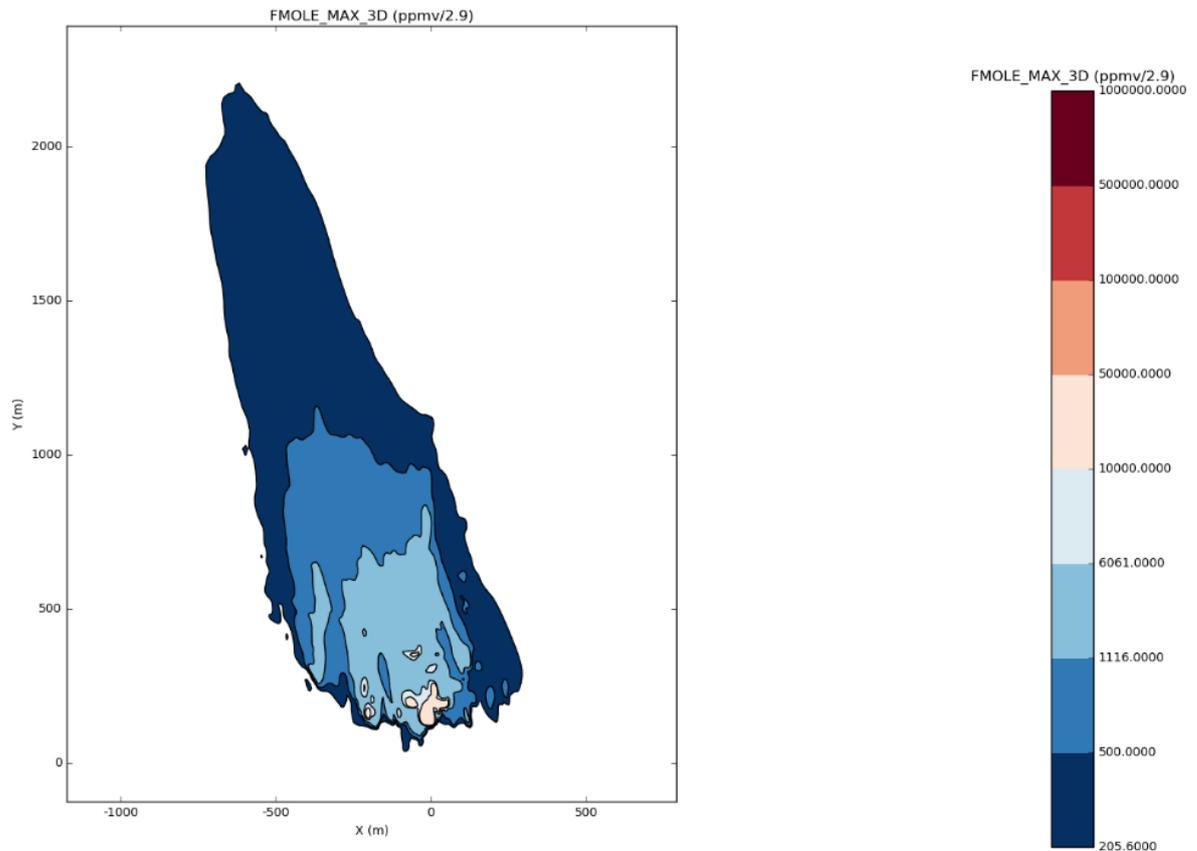


Abb. 93 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an Punkten in ca. 70 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1000 m und 2000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden. Die Messpunkte wurden jeweils auf die nächsten Gebäude im jeweiligen Abstandsbereich gesetzt, d.h. der effektive Abstand des Messpunkts zur Freisetzung kann von den obigen Angaben abweichen.

x-Achse: Zeit in s

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

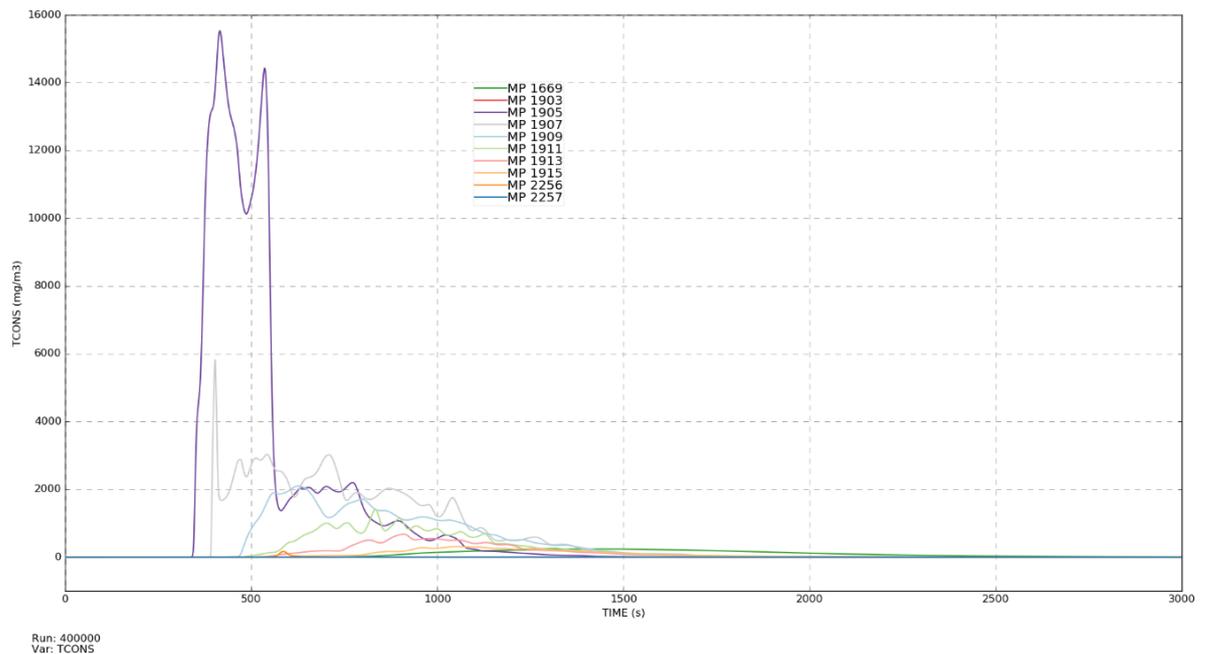
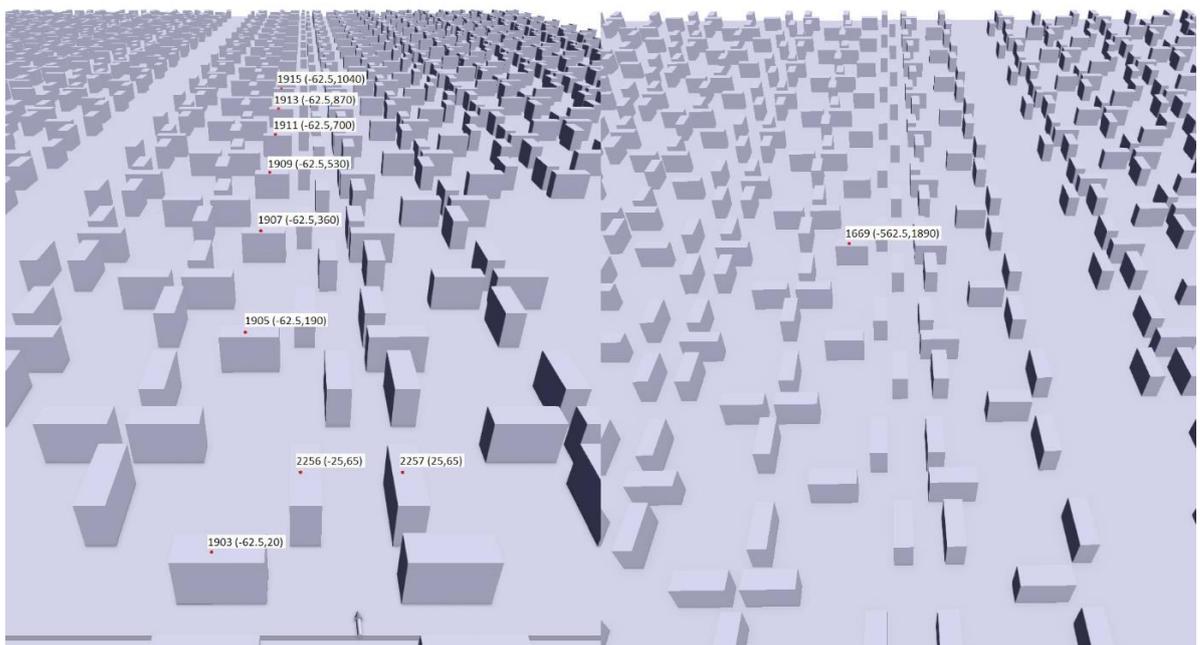


Abb. 94 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

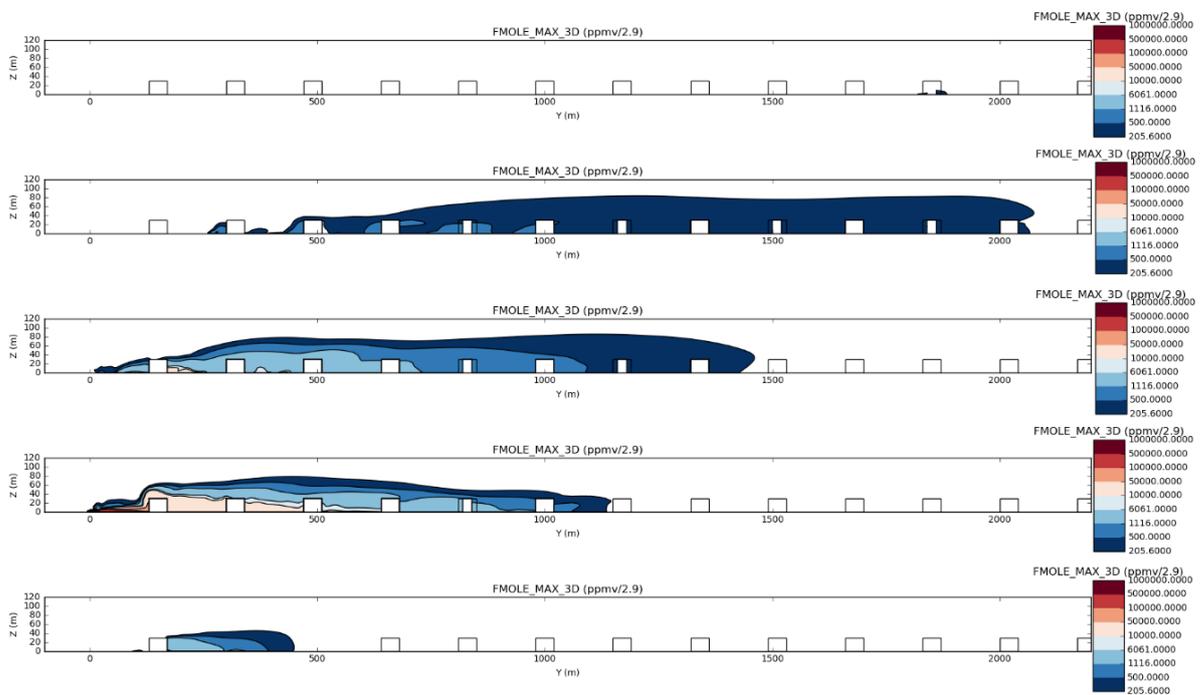
Lage der Messpunkte für Abb. 93 (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 6.1.2.3 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 95 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten) $x=-750$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle) und $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

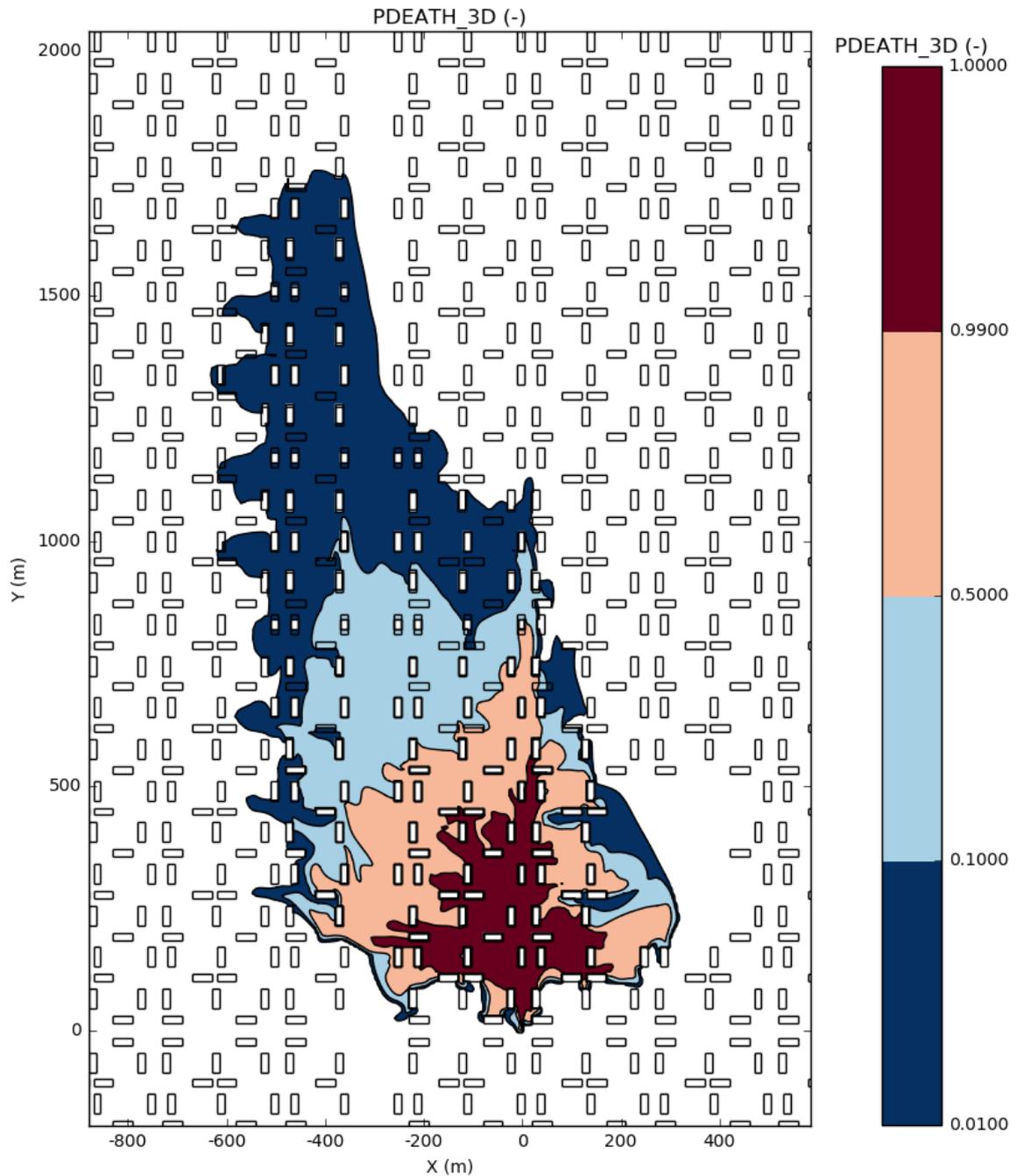


B 6.1.3 Letalität

B 6.1.3.1 Letalität 1.5 m über Boden

Abb. 96 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

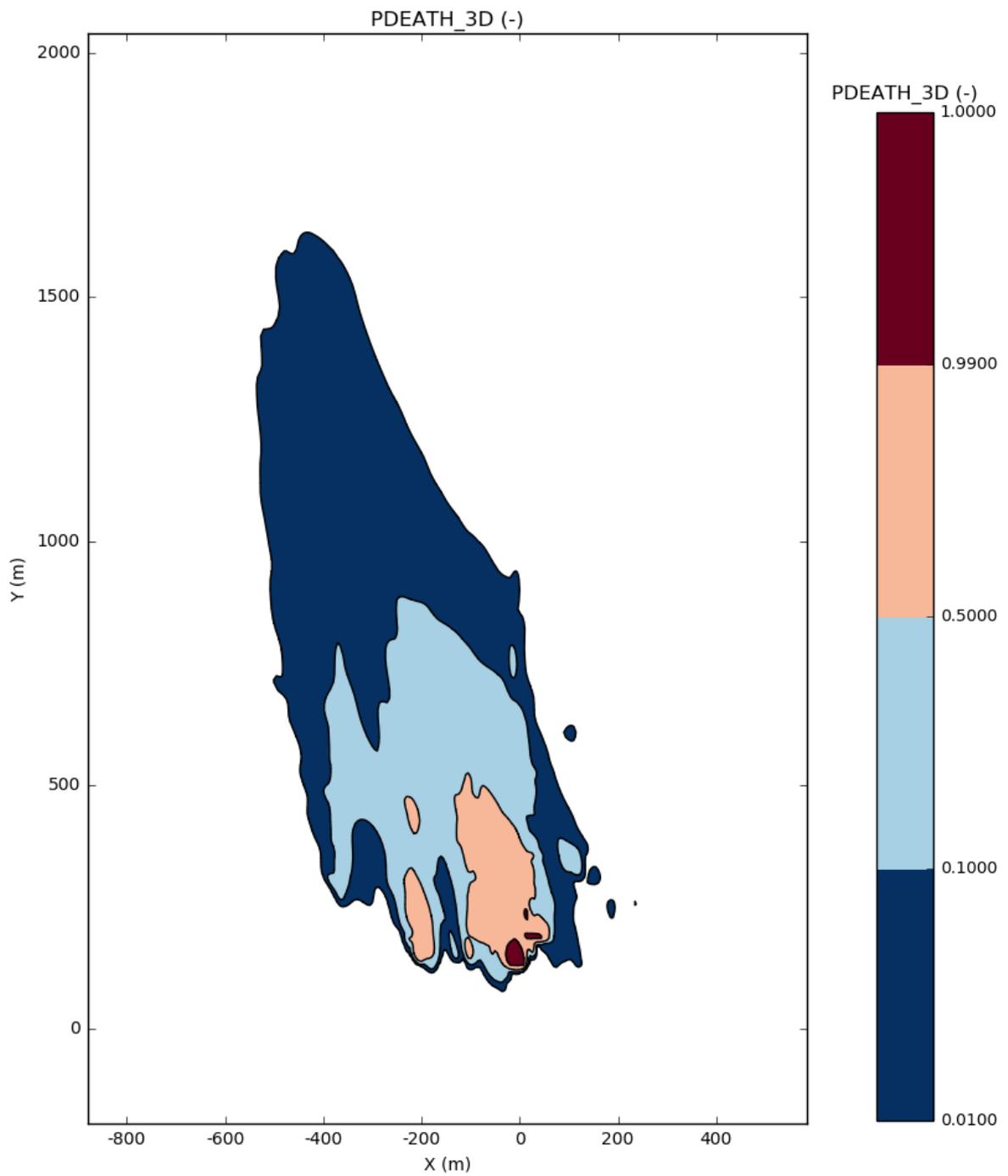
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 3.4.2020)



B 6.1.3.2 Letalität 30.5 m über Boden

Abb. 97 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 3.4.2020)



B 6.1.4 Windfeld

B 6.1.4.1 Windfeld 1.5 m über Boden

Abb. 98 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Windfeld vor Beginn der Freisetzung, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

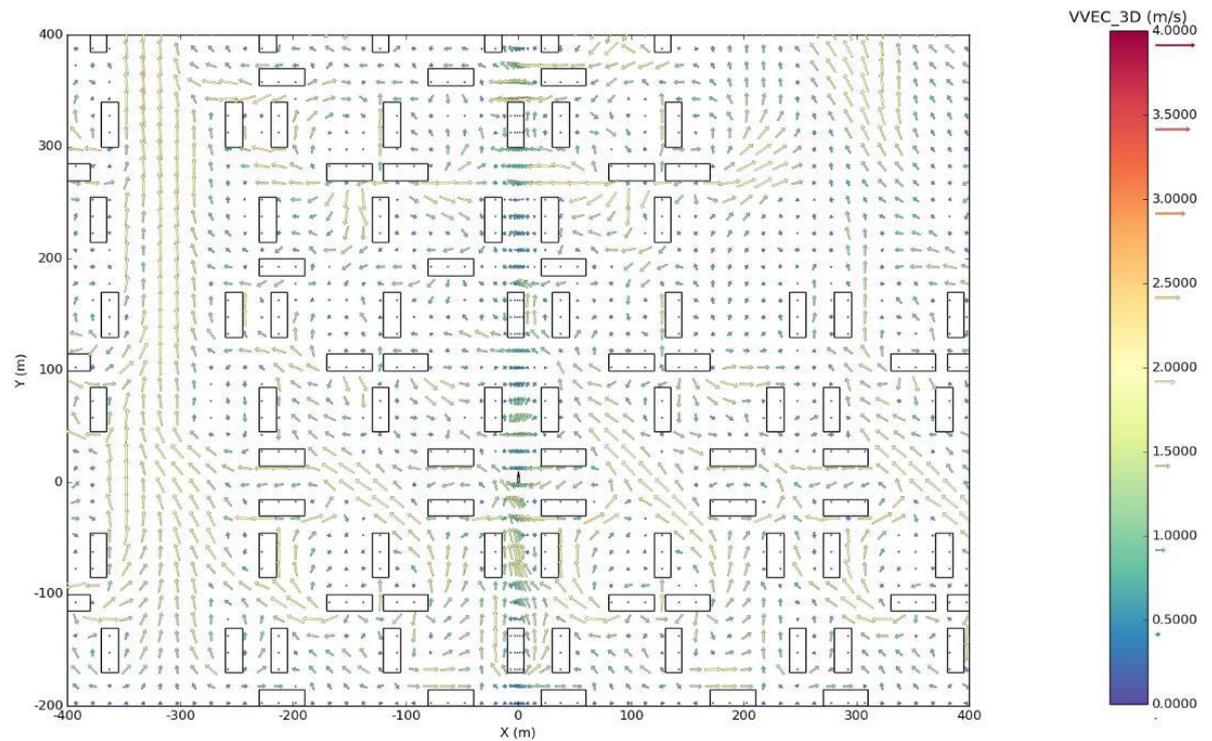


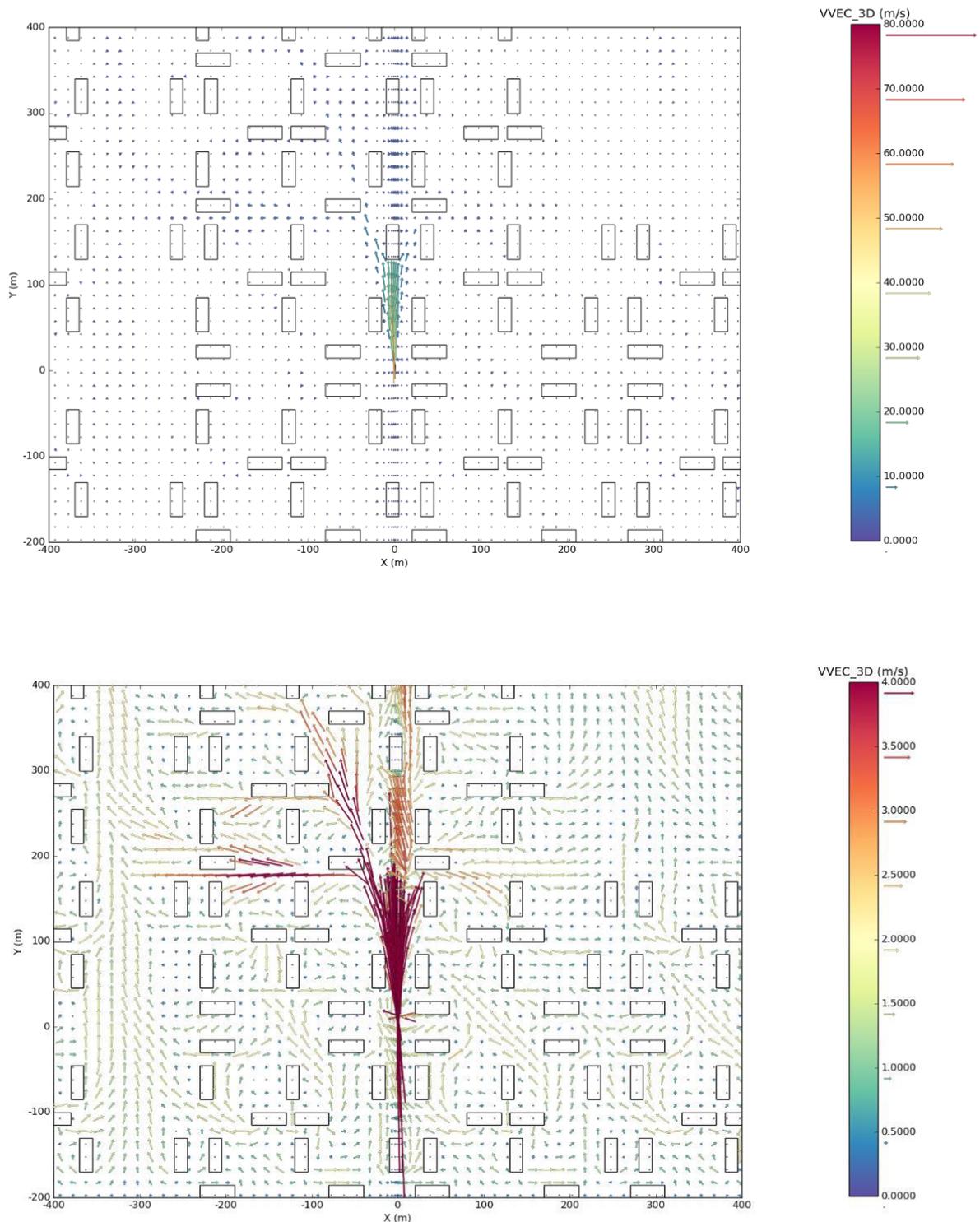
Abb. 99 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Windfeld 180 s nach Beginn der Freisetzung, 1.5 m über Boden

oben: Skalierung 0 bis 80 m/s Windgeschwindigkeit

unten: Skalierung 0 bis 4 m/s Windgeschwindigkeit

(Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 6.1.4.2 Windfeld 30.5 m über Boden

Abb. 100 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Windfeld vor Beginn der Freisetzung, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

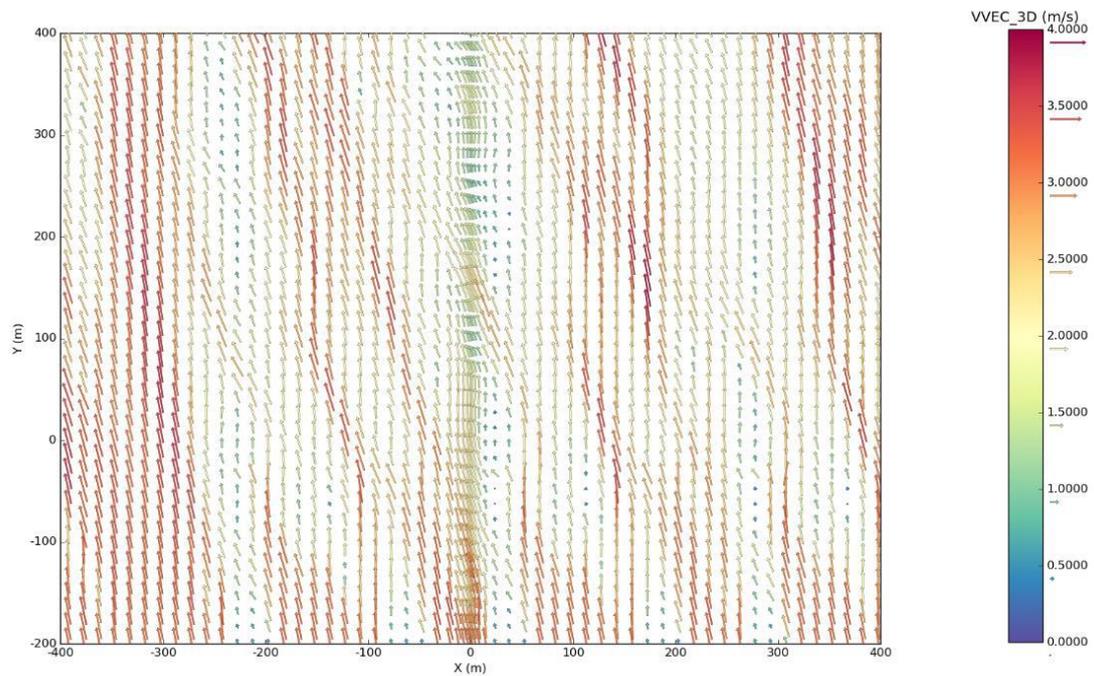
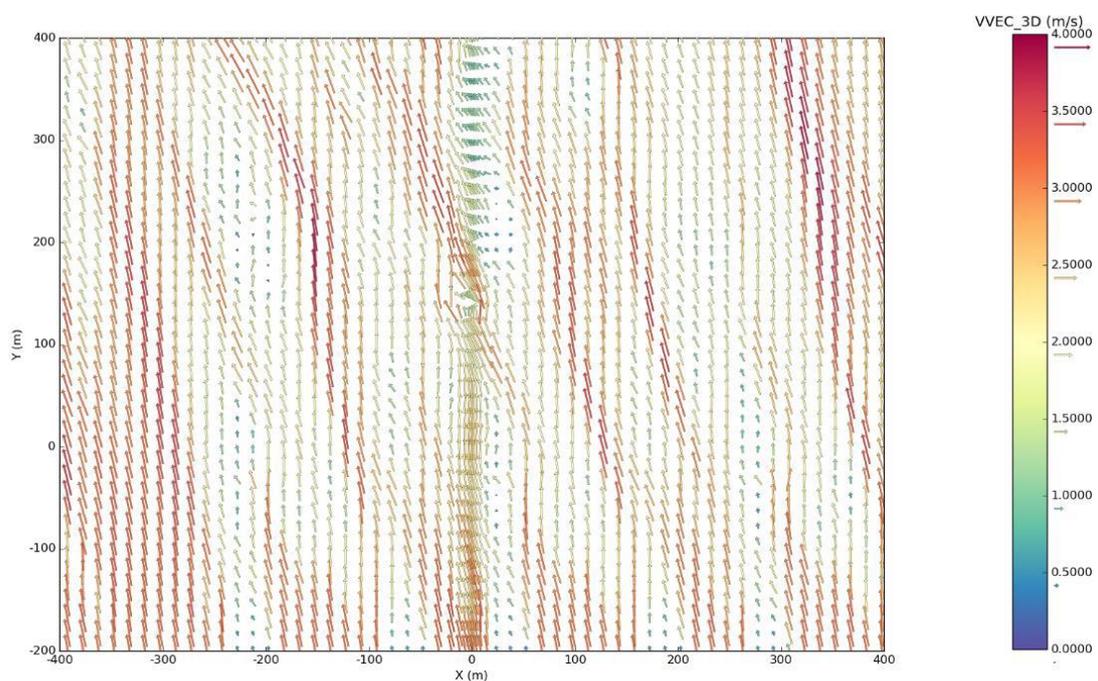


Abb. 101 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken"

Windfeld 180 s nach Beginn der Freisetzung, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 6.1.5 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Kap. B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

B 6.2 EFFECTS

Siehe Kap. B 4.2, gleiche Rechenläufe wie bei Szenario 2 "Wohnblocks"

Es wurde keine EFFECTS-Berechnung eigens für das Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" durchgeführt, da die Unterschiede zwischen der Geometrie in Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" mit EFFECTS nicht abgebildet werden können.

B 6.3 Vergleiche und Analysen

Für das Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" wurde vereinfacht gesagt die Bebauungsdichte von Szenario 2 "Wohnblocks" reduziert und der in Szenario 2 "Wohnblocks" stattfindende Aufprall des Chlorgasstrahls kurz nach der Freisetzung auf eine Fassade vermieden. Deshalb ist vor allem der Vergleich von Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 2 "Wohnblocks" interessant.

B 6.3.1 Chlorkonzentration

B 6.3.1.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Die maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ sind beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" sowohl in 1.5 m Höhe als auch in 30.5 m Höhe grösser als beim Szenario 2 "Wohnblocks". Die Differenzen zwischen Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" fallen bei den tiefen Konzentrationen höher aus als bei den hohen Konzentrationen. Der Grund dafür liegt darin, dass sich bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" aufgrund der geringeren Bebauungsdichte und dem linearen Korridor eine Gasfahne ausbilden konnte, in der das Chlorgas beim Transport durch den Wind sukzessive verdünnt wurde. Dies war bei Szenario 2 "Wohnblocks" nur ansatzweise der Fall. Die grösseren Reichweiten bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" waren aufgrund der gegenüber Szenario 2 "Wohnblocks" reduzierten Bebauungsdichte und des wegfallenden Aufpralls des Chlorgasstrahls kurz nach der Freisetzung zu erwarten.

Auch die Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der obengenannten Schwellenwerte fallen bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" sowohl in 1.5 m Höhe als auch in 30.5 m Höhe grösser aus als beim Szenario 2 "Wohnblocks" mit Ausnahme der Fläche mit Konzentration über 6'061 mg/m³ in 1.5 m über Boden.

Die maximalen Höhen über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ fallen beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" ebenfalls höher aus als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Bei den Schwellenwerten 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ ergeben sich bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" die grössten Höhen

aller simulierten Szenarien. Diese grossen Maximalhöhen entstehen in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" dort, wo der Gasstrahl nach der Freisetzung zum ersten Mal auf ein Gebäude auftrifft und zum Teil nach oben abgelenkt wird. Der Gasstrahl trifft bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" in grösserer Entfernung als in Szenario 2 "Wohnblocks" auf das erste Hindernis. Der Impuls ist deshalb bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" beim Auftreffen auf das Hindernis geringer als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Hingegen ist der Durchmesser des Gasstrahls bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" aufgrund Einmischen von Luft beim Aufprall deutlich grösser. Zusammen mit den unterschiedlichen Strömungsverhältnissen aufgrund der reduzierten Bebauungsdichte in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" führt dies zu den grösseren Maximalhöhen in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken".

B 6.3.1.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.1.2

B 6.3.1.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Die Unterschiede bei den maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ 1.5 m über Boden beim FLACS und EFFECTS-Rechenlauf für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" sind kleiner als bei Szenario 2 "Wohnblocks", betragen aber immer noch bis ca. einen Faktor 3. Beim höchsten Schwellenwert von 6'061 mg/m³ ergibt sich im Gegensatz zu Szenario 2 "Wohnblocks" bei FLACS eine etwas höhere Reichweite als bei EFFECTS.

Die Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der Schwellenwerte 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ fallen bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" in 1.5 m bei EFFECTS grösser aus als FLACS. Im Gegensatz zu Szenario 2 "Wohnblocks" ist beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" auch beim höchsten Schwellenwert die Fläche bei EFFECTS klar grösser als bei FLACS. Dies ist eine Folge der etwas offeneren Geometrie in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken", die zu einer rascheren Verdünnung führt, so dass die Bereiche, in denen über längere Zeit sehr hohe Chlorkonzentrationen vorhanden sind, kleiner ausfallen.

In 30.5 m Höhe ergibt der Vergleich der Konzentrationen von FLACS und EFFECTS dasselbe Bild wie bei Szenario 2 "Wohnblocks": eine ähnlich grosse Fläche mit Chlorkonzentrationen über 205.6 mg/m³ wie in Bodennähe bei FLACS, während bei EFFECTS diese Konzentration in 30.5m Höhe gar nicht mehr vorkommt.

Die Unterschiede bei der maximalen Höhe über Boden für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ fallen bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" noch grösser aus als bei Szenario 2 "Wohnblocks". FLACS liefert auch bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" systematisch höhere Werte als EFFECTS, mit bis ca. einem Faktor 4 Unterschied.

B 6.3.2 Letalität

B 6.3.2.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Die maximalen Reichweiten fallen beim 1 %-Letalitätsbereich beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" deutlich grösser aus als beim Szenario 2 "Wohnblocks", während sie bei 50 % Letalität nur wenig grösser und bei 99 % Letalität praktisch gleich gross sind. Der Grund dafür liegt darin, dass sich bei Szenario 2 "Wohnblocks" aufgrund der blockierenden Wirkung der dichten Wohnblockgeometrie kaum eine Chlorgasfahne ausbilden kann, in der das Chlorgas beim Transport in der Windströmung über eine grössere Distanz verdünnt werden kann.

Die Fläche im Bereich mit mind. 1 % Letalität ist bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" etwas grösser als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Der Unterschied ist aber aufgrund des im Vergleich zu Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" deutlich breiteren Letalitätsbereichs bei Szenario 2 "Wohnblocks" kleiner als bei der maximalen Reichweite des 1 %-Letalitätsbereichs. Die Verteilung der letalitätsbetroffenen Flächenanteile auf die verschiedenen Letalitätsstufen ist bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 2 "Wohnblocks" jedoch sehr unterschiedlich. Der Flächenanteil mit Letalität >99 % ist bei Szenario 2 "Wohnblocks" deutlich grösser als bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken", der Flächenanteil im Letalitätsbereich 1 % bis 50 % und 50 % bis 99 % hingegen ist bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" grösser. Der Grund für den hohen Anteil mit Letalität >99 % bei Szenario 2 "Wohnblocks" dürfte bei der durch die dichte Wohnblockgeometrie stark behinderten Ausbreitung des Chlorgases liegen.

Die Lage und Form der von der Letalität betroffenen Flächen unterscheiden sich bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 2 "Wohnblocks" deutlich. Offenbar können bereits moderate Unterschiede bei der Geometrie zu sehr verschiedenen Letalitätsergebnissen führen.

An der unterschiedlichen Lage und Form der von der Letalität betroffenen Flächen bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 2 "Wohnblocks" sind verschiedene Elemente der Geometrie beteiligt:

Da in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" der Gasstrahl erst später nach der Freisetzung als bei Szenario 2 "Wohnblocks" auf ein Hindernis trifft, ist der Querschnitt des Gasstrahls beim Auftreffen auf das Hindernis bereits deutlich grösser als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Dadurch wird in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" nicht mehr der gesamte Gasstrahl durch das Hindernis zur Seite abgelenkt, sondern ein Teil des Gasstrahls strömt am Hindernis vorbei.

Zusätzlich wird die Strömung in Szenario 2 "Wohnblocks" durch die Gebäudereihen auf beiden Seiten der Geleise quer zur Austrittsrichtung kanalisiert, während in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" anfänglich eine leichte Kanalisierung in Austrittsrichtung durch zwei beidseitig parallel zur Achse des Gasstrahls stehende Gebäude stattfindet.

Dies zeigt, dass bereits örtlich begrenzte Unterschiede bei der Geometrie im Nahbereich der Freisetzung die Lage der betroffenen Flächen stark beeinflussen können. Es ist davon auszugehen, dass auch kleinere Verschiebungen beim Freisetzungsort und/oder der Freisetzungsrichtung bei gleichbleibender Geometrie zu grösseren Unterschieden bei den

betroffenen Flächen führen können (z.B. Freisetzung in Richtung einer Fassade vs. Freisetzung gerade an dem Gebäude vorbei).

Weiter führen die reduzierte Bebauungsdichte und der lineare Kanal in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" zu einem im Vergleich zu Szenario 2 "Wohnblocks" stärkeren Transport des Chlorgases in Windrichtung. Es findet hingegen in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" keine Ausbreitung gegen die Windrichtung mehr statt, im Gegensatz zu Szenario 2 "Wohnblocks".

In 30.5 m Höhe ergeben sich beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" etwas kleinere maximale Reichweiten des 1 %-Letalitätsbereichs und etwas kleinere Flächen mit mindestens 1 % Letalität als in 1.5 m Höhe desselben Szenarios. Bei den höheren Letalitäten hingegen nehmen die Reichweiten und betroffenen Flächen in 30.5 m Höhe im Vergleich zu 1.5 m Höhe deutlich stärker ab. Der Grund dafür liegt im Schweregasverhalten des freigesetzten Chlors und darin, dass das Chor nach dem Austritt in Bodennähe auf dem Weg nach oben verdünnt wird.

In 30.5 m Höhe ergeben sich bei der maximalen Reichweite des 1 %-Letalitätsbereichs und den Flächen mit mindestens 1 % Letalität ähnliche Differenzen zwischen Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 2 "Wohnblocks" wie in 1.5 m Höhe. Bei den höheren Letalitäten ergeben sich, im Gegensatz zur Situation in 1.5 m Höhe, in 30.5 m Höhe beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" durchweg die höheren Werte als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Hier zeigt sich der bereits in B 6.3.1.1 beschriebene Effekt, dass sich in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" im Vergleich zu den anderen FLACS-Rechenläufen in der Höhe relativ hohe Chlorkonzentrationen ergeben.

B 6.3.2.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.2.2

B 6.3.2.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

In 1.5 m über Boden ergibt der Vergleich FLACS-EFFECTS bei den maximalen Reichweiten der Letalitätsbereiche 1 %, 50 % und 99 % bei dem Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" ein sehr ähnliches Bild wie bei Szenario 2 "Wohnblocks": Deutlich grössere Reichweiten bei EFFECTS bei 1 % und 50 % Letalität, etwas grössere Reichweite bei FLACS bei 99 % Letalität. Der Unterschied fällt bei 1 % Letalität bei dem Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" allerdings geringer aus als bei Szenario 2 "Wohnblocks".

Bei den betroffenen Flächen ergeben sich bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" bei allen Letalitätsbereichen bei FLACS tiefere Werte als bei EFFECTS, im Gegensatz zu Szenario 2 "Wohnblocks" auch bei den Letalitäten >99 %.

Die letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen liegen ebenfalls bei FLACS bei allen Letalitätsbereichen tiefer als bei EFFECTS, insgesamt etwa ein Faktor 4, wobei die Unterschiede bei den tieferen Letalitäten grösser sind als bei den höheren Letalitäten.

Bei den betroffenen Arealen ergibt sich beim 99 %-Letalitätsbereich eine relativ gute Übereinstimmung von FLACS und EFFECTS. Auch bei den Letalitäten 1 % und 50 % sind

Ausrichtung und Form grob betrachtet ähnlich, die betroffenen Areale sind bei EFFECTS jedoch viel grösser.

Während bei FLACS in 30.5 m Höhe verbreitet Letalitäten zwischen 1 und 99 % auftreten, wird in dieser Höhe bei EFFECTS nirgends eine Letalität von 1 % erreicht.

B 6.3.3 Zeitlicher Verlauf

B 6.3.3.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

In Absprache mit dem BAV wurde der zeitliche Konzentrationsverlauf für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" nur in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Dosis- und Letalitätswerte von EFFECTS und FLACS analysiert. Bei FLACS fehlt eine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit, so dass die Dosis- und Letalitätswerte in FLACS und EFFECTS mit unterschiedlichen Expositionszeiten zustande kommen (siehe Anhang B 1.1).

B 6.3.3.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.3.2

B 6.3.3.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

In Absprache mit dem BAV wurde der zeitliche Konzentrationsverlauf für Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" nur in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Dosis- und Letalitätswerte von EFFECTS und FLACS analysiert. Bei FLACS fehlt eine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit, so dass die Dosis- und Letalitätswerte in FLACS und EFFECTS mit unterschiedlichen Expositionszeiten zustande kommen (siehe Anhang B 1.1).

B 6.3.4 Ergebnis

Wie bei Szenario 2 "Wohnblocks" treten auch beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" bei den maximalen Reichweiten für Konzentration und Letalität, bei den letalitätsbetroffenen Flächen und bei den letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen 1.5 m über Boden vor allem bei den tieferen und mittleren Letalitäten sehr grosse Differenzen zwischen den FLACS- und EFFECTS-Ergebnissen auf. Die Differenzen zu EFFECTS sind bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" bei den meisten Werten etwas kleiner als bei Szenario 2 "Wohnblocks". Die Gründe dafür sind der in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" wegfallende Aufprall des Chlorgasstrahls auf eine Gebäudefront kurz nach der Freisetzung, die reduzierte Bebauungsdichte und der lineare Korridor in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken". Dies führte zu einer etwas weniger starken Beeinflussung der Strömungsverhältnisse durch die Geometrie in Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken", die EFFECTS naturgemäss nicht berücksichtigen kann. Trotzdem sind die Differenzen erheblich, so dass sie bei einer konkreten Anwendung in Störfall-Risikobetrachtungen zu entscheidenden Unterschieden führen können.

Ebenfalls treten wie bei den anderen Szenarien auch grössere Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden auf. Hier ergeben die Ergebnisse der beiden Tools FLACS und EFFECTS ein völlig widersprüchliches Bild, so dass Vorsicht beim Umgang mit Berechnungsergebnissen geboten ist. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Der Vergleich von Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken zeigt, dass bereits örtlich begrenzte Unterschiede bei der Geometrie im Nahbereich der Freisetzung die Lage der betroffenen Flächen stark beeinflussen können. Es ist davon auszugehen, dass auch kleinere Verschiebungen beim Freisetzungsort und/oder der Freisetzungsrichtung bei gleichbleibender Geometrie zu grösseren Unterschieden bei den betroffenen Flächen führen können (z.B. Freisetzung in Richtung einer Fassade vs. Freisetzung knapp an dem Gebäude vorbei).

EFFECTS kann diese Effekte naturgemäss nicht abbilden.

B 7 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

B 7.1 FLACS

B 7.1.1 Übersicht

B 7.1.1.1 Chlorkonzentration

Tab. 54 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 1.5 m über Boden
(Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 14.8.2020)

Chlorkonzentration 1.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1506 m	680 m	637'686 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	579 m	628 m	190'156 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	506 m	537 m	120'388 m ²

Tab. 55 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration 30.5 m über Boden
 (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 14.8.2020)

Chlorkonzentration 30.5 m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind	Fläche mit Konzen- tration $\geq x$ mg/m³
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	1354 m	575 m	484'662 m ²
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	381 m	309 m	40'177 m ²
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	0 m	0 m	0 m ²

Tab. 56 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Chlor-Konzentration maximale Höhe über
 Boden (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

Chlorkonzentration	Maximale Höhe über Boden
205.6 mg/m ³ (entspricht 1 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	70 m
1'116 mg/m ³ (entspricht 50 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	40 m
6'061 mg/m ³ (entspricht 99 % Letalität bei 1'800 s Expositionszeit)	22 m

B 7.1.1.2 Letalität

Tab. 57 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen Dosis 1.5 m über Boden (Quelle/Datengrundlage: Gexcon AS, 14.8.2020, 16.10.2020, Rasterdaten vom 2.2.2021)

Letalität 1.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind²	Fläche mit Letalität ≥ x%¹
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 6.9×10^7 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	1'366 m	632 m	490'925 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.2×10^9 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	510 m	574 m	157'125 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.6×10^{11} min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	360 m	448 m	84'075 m ²

¹ Berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m

² Berechnet mit Letalitätskonturen

Tab. 58 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen potentielles Schadensausmass 1.5 m über Boden (Datengrundlage: Rasterdaten vom 2.2.2021)

Letalitätsbereich 1.5 m über Boden	Fläche¹	Mittlere Letalität¹	Letalitätsgewichtete Äquivalenzfläche 100 % Letalität¹
1 bis 50 %	333'800m ²	10 %	33'588 m ²
50 bis 99 %	73'050 m ²	82 %	59'832 m ²
>99 %	84'075 m ²	100 %	83'960 m ²
Total (>1 %)	490'925 m ²	36 %	177'380 m ²

¹ Berechnet mit Rasterdaten Auflösung 5 m

Tab. 59 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Ergebnisse FLACS Berechnungen Letalität in Abhängigkeit von der toxischen
 Dosis 30.5 m über Boden (Quelle/Grundlage: Gexcon AS, 14.8.2020)

Letalität 30.5m über Boden	Maximale Reichweite	Maximale Breite quer zum Wind¹	Fläche mit Letalität $\geq x$ %¹
1 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 6.9×10^7 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	1140 m	421 m	364'359 m ²
50 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.2×10^9 min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	94 m	8 m	81 m ²
99 % Letalität (entspricht einer toxischen Dosis von 7.6×10^{11} min $(\text{mg}/\text{m}^3)^{2.75}$)	0 m	0 m	0 m ²

¹ Berechnet mit Letalitätskonturen

B 7.1.1.3 Austritt, Phasenübergang und Expansion Gasstrahl

Tab. 60 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
 Übersicht Zwischenergebnisse der FLACS Berechnungen zum Austritt, Phasenübergang
 und Expansion des Gasstrahls (Quelle: Gexcon AS 14.8.2020)

Parameter	Wert
Konstante Austrittsrate	171 kg/s
Austrittsdauer	217
Temperatur Jet	-62.9°C
Durchmesser Jet	2.26 m
Massenanteil Rainout (Zufluss Lache)	0.746
Dauer bis zum vollständigen Verdampfen der Lache	Ca. 25 min
Maximale Masse Chlor in der Lache	Ca. 24'000 kg
Maximale Ausdehnung der Lache	Ca. 3750 m ²

B 7.1.2 Chlorkonzentration

B 7.1.2.1 Chlorkonzentration 1.5 m über Boden

Abb. 102 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

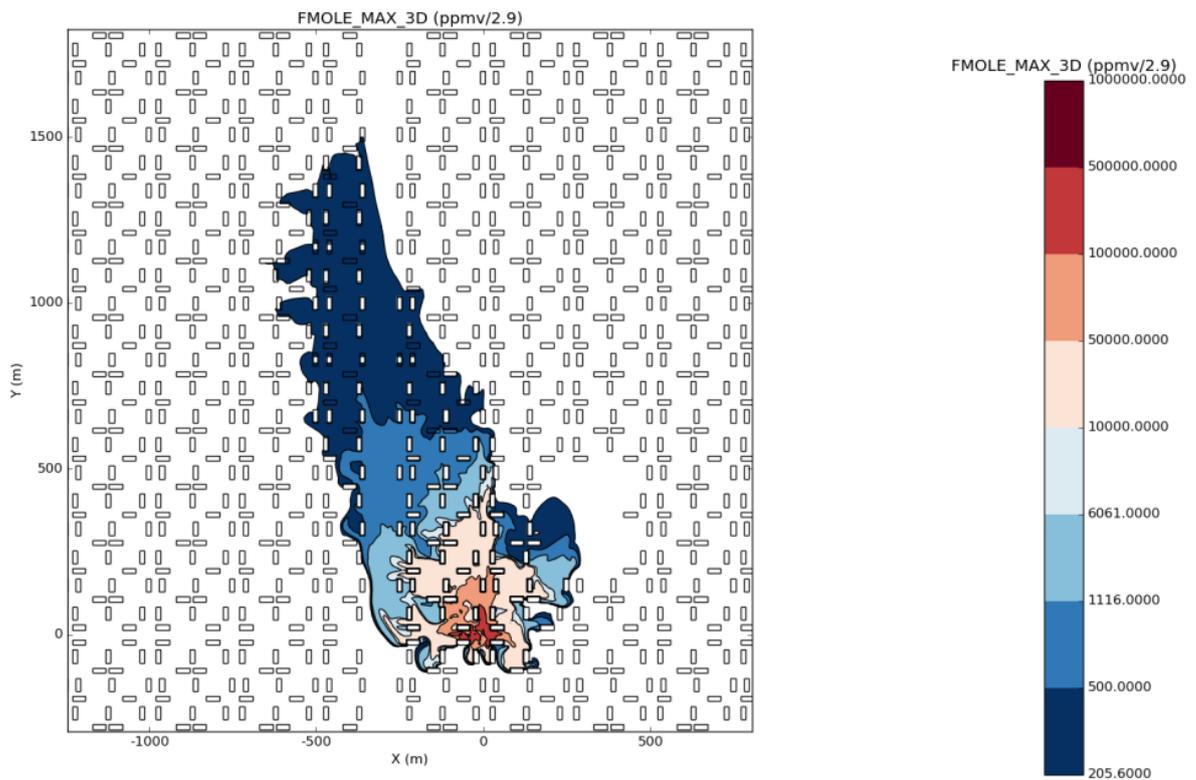


Abb. 103 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m, 40 m, 100 m, 200 m, 400 m, 1'000 m und 2'000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden (x-Achse: Zeit in s)

Oben: gesamte Skala auf der y-Achse

Unten: Skala auf der y-Achse bei 100'000 mg/m³ gekappt

Die Freisetzung startet bei t=300 s (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

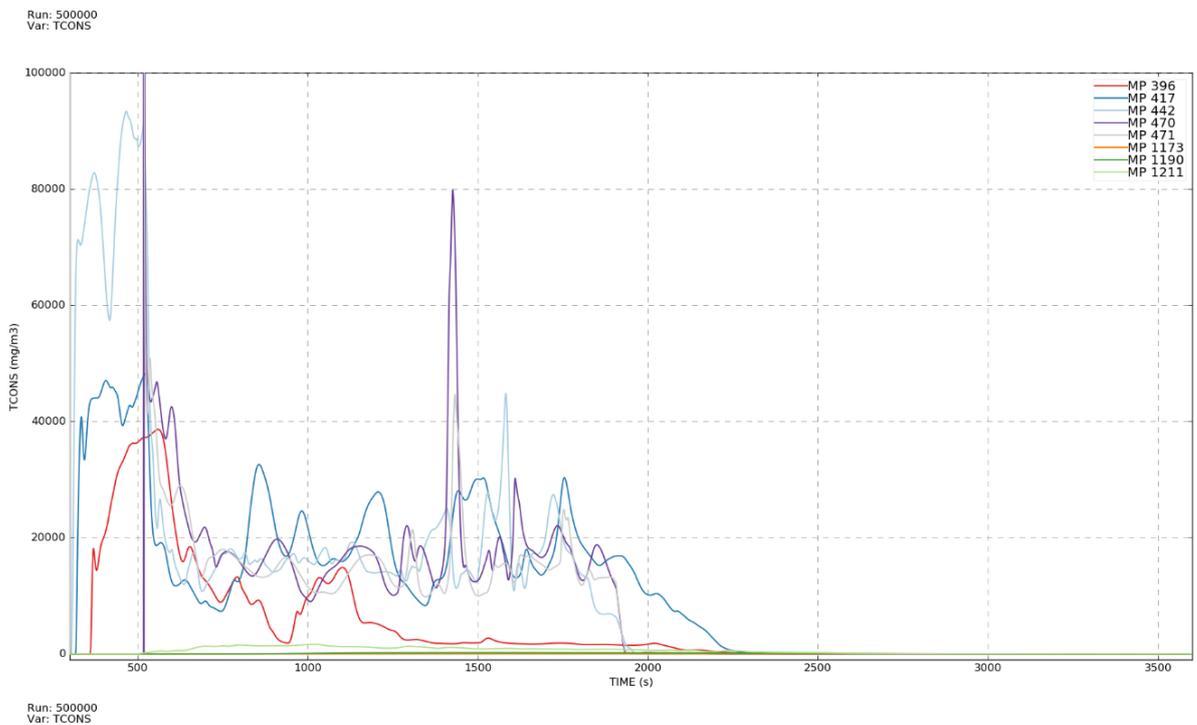
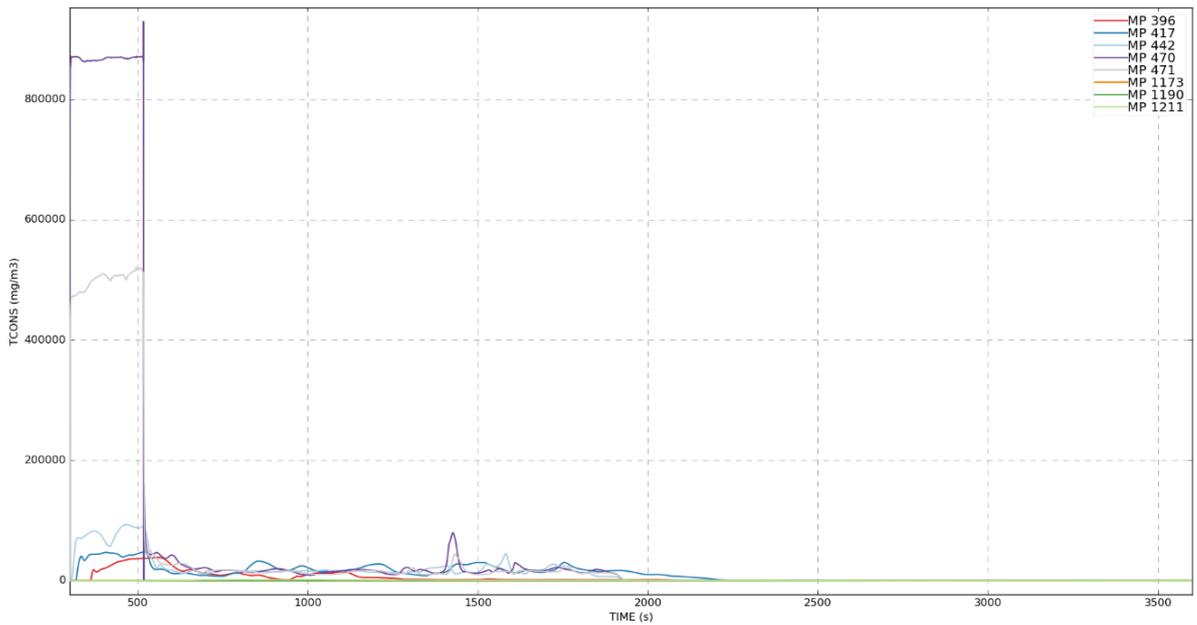
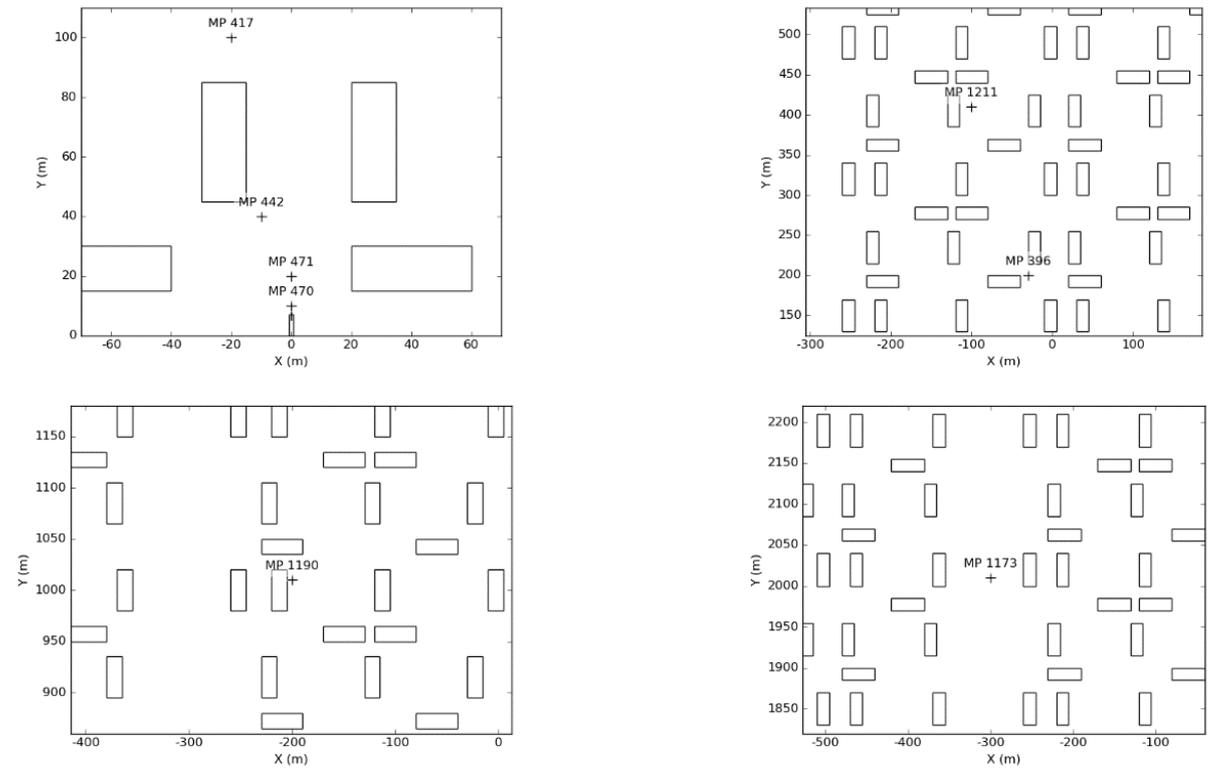


Abb. 104 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Lage der Messpunkte für Abb. 103 (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.2.2 Chlorkonzentration 30.5 m über Boden

Abb. 105 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Isolinien in der Horizontalen für eine maximale Chlorkonzentration von u.a. 205.6 mg/m³ (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), 1'116 mg/m³ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und 6'061 mg/m³ (99 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit) 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

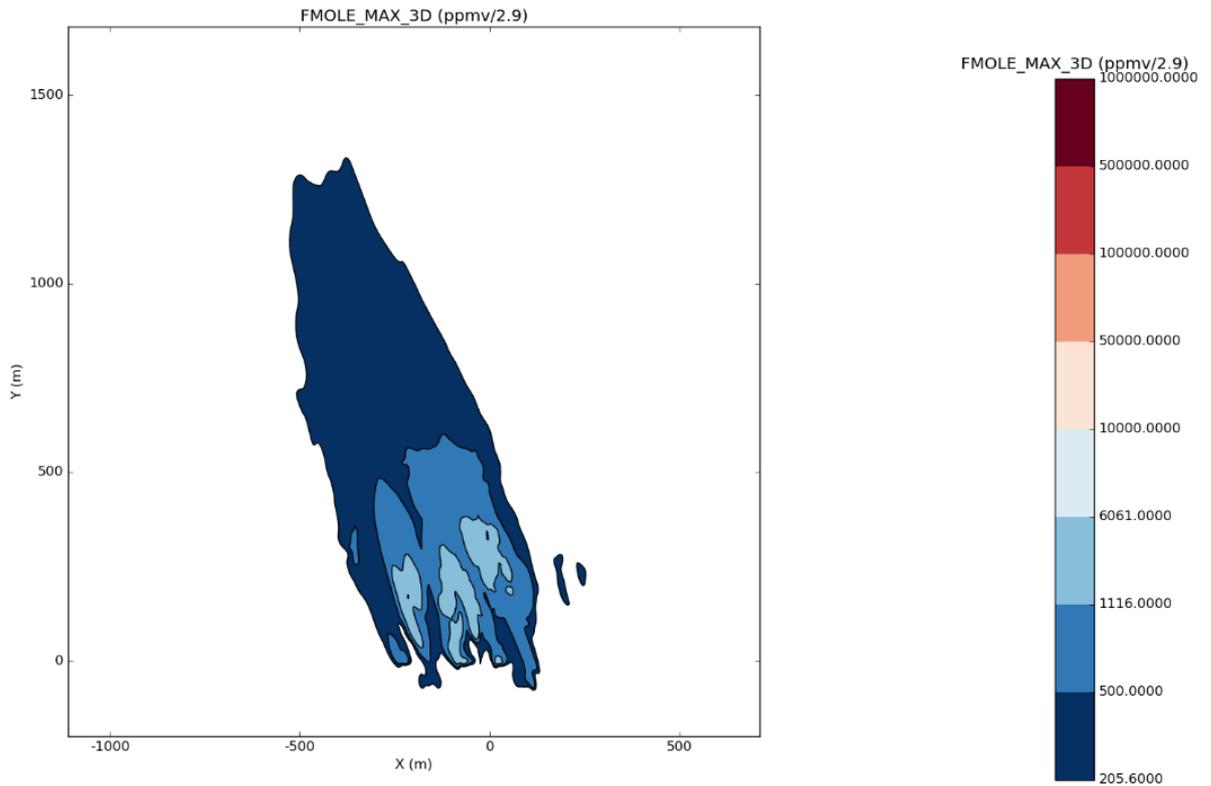


Abb. 106 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 70 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1000 m und 2000 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 30.5 m über Boden
Die Messpunkte wurden jeweils auf die nächsten Gebäude im jeweiligen Abstandsbereich gesetzt, d.h. der effektive Abstand des Messpunkts zur Freisetzung kann von den obigen Angaben abweichen.

(x-Achse: Zeit in s)

Die Freisetzung startet bei $t=300$ s (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

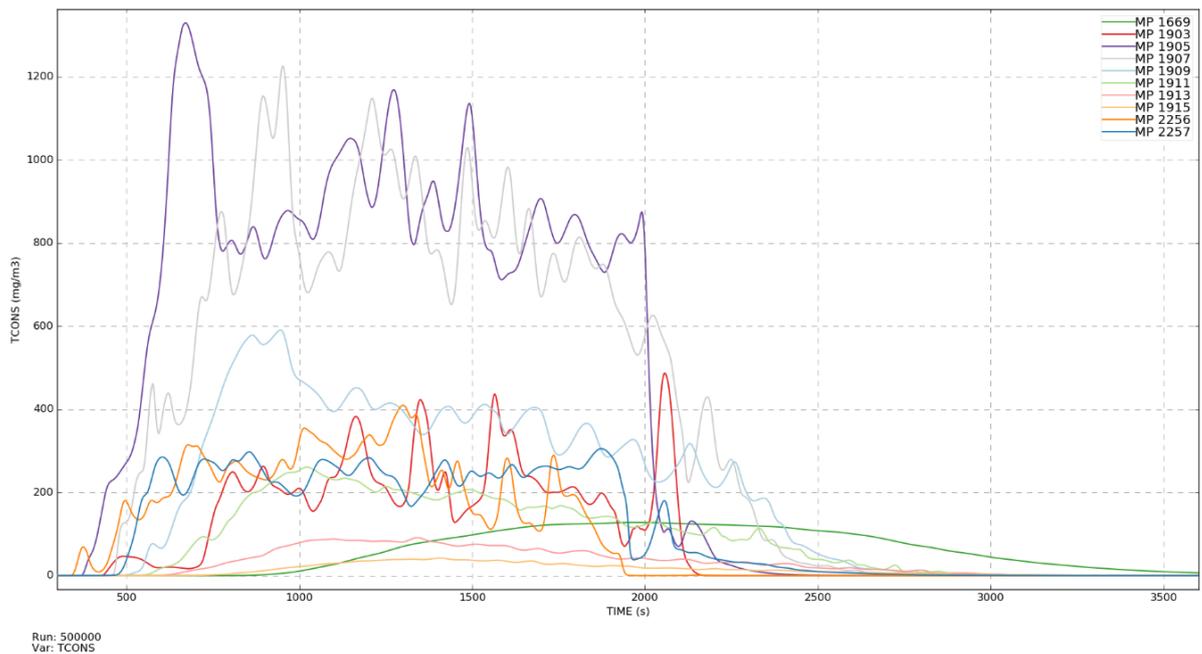
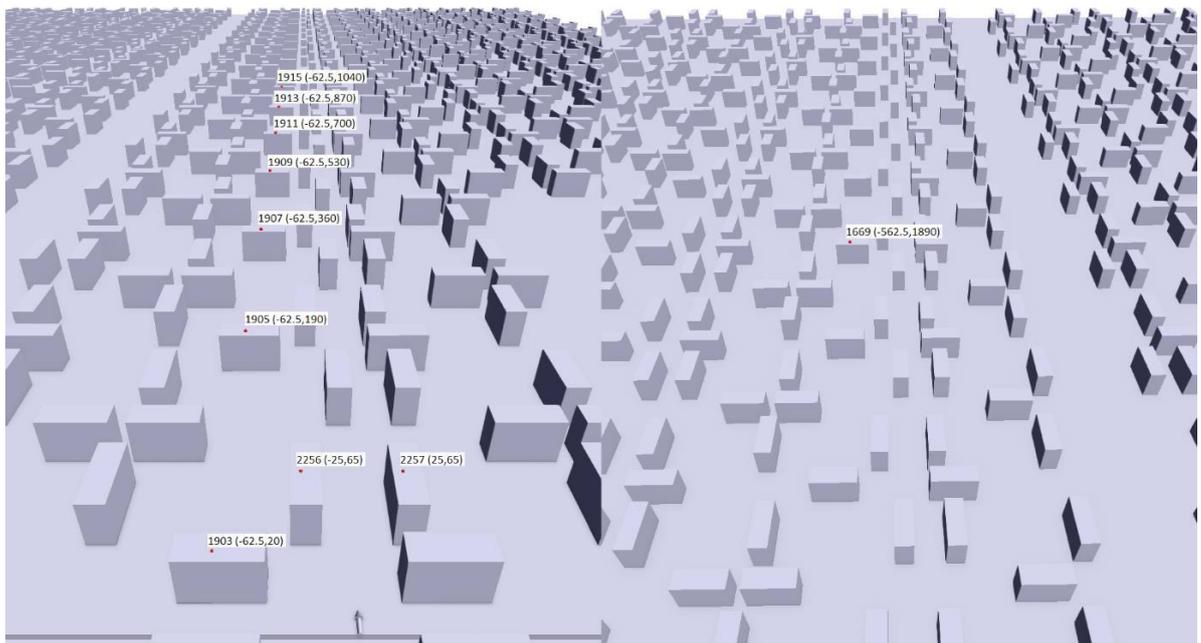


Abb. 107 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

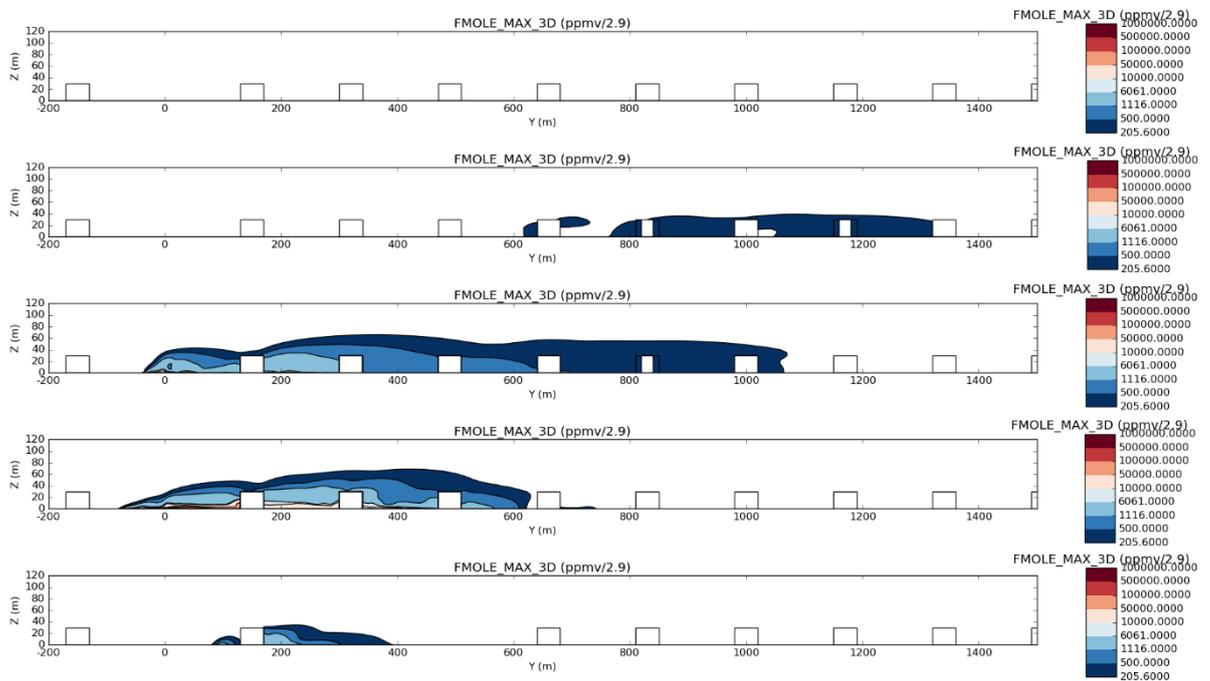
Lage der Messpunkte für Abb. 106 (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.2.3 Chlorkonzentration vertikal

Abb. 108 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

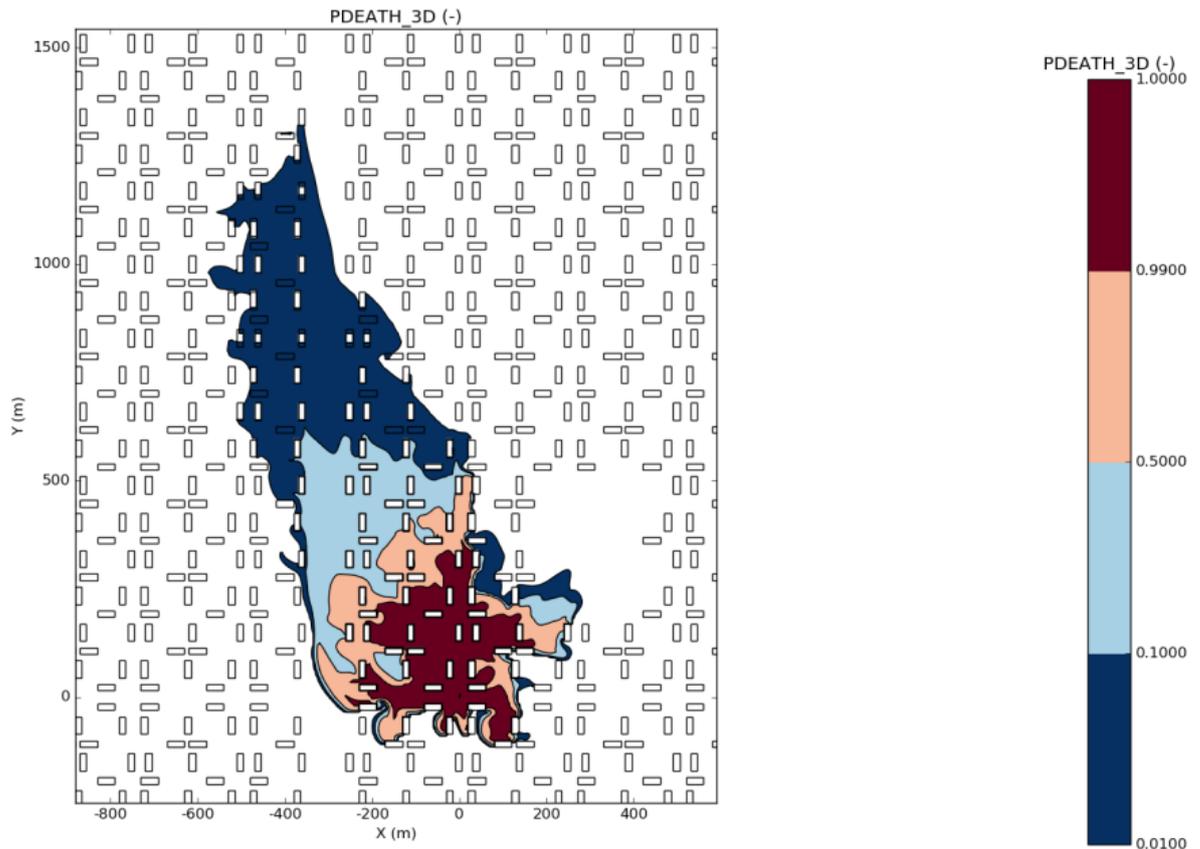
Isolinien in der Vertikalen entlang der y-Achse bei (von oben nach unten) $x=-750$ m, $x=-500$ m, $x=-250$ m, $x=0$ m (x -Position der Austrittsstelle) und $x=250$ m u.a. für eine maximale Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800s Expositionszeit), $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit) und $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x =Distanz auf der x -Achse (ungefähr quer zum Wind) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, y =Distanz auf der y -Achse (ungefähr in Windrichtung) vom Ort der Freisetzung aus gemessen, z = Höhe über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.3 Letalität

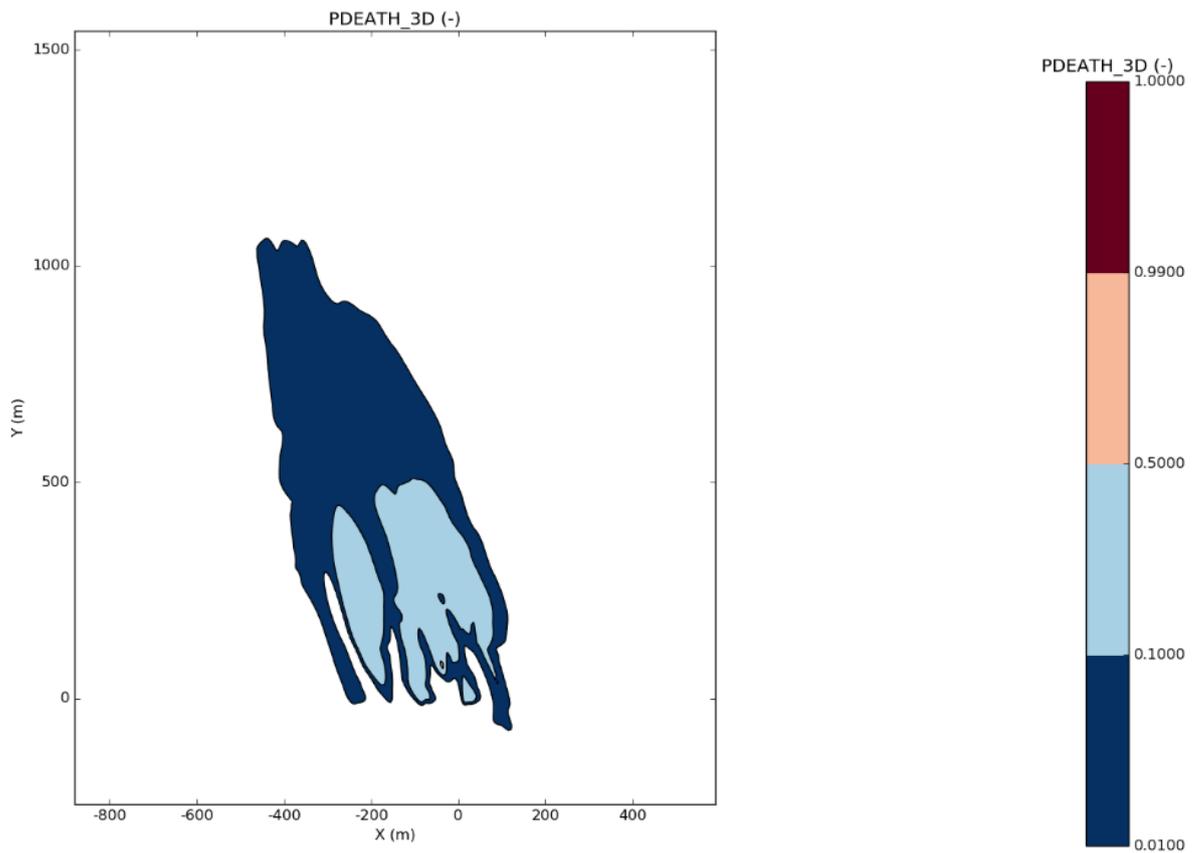
B 7.1.3.1 Letalität 1.5 m über Boden

Abb. 109 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.3.2 Letalität 30.5 m über Boden

Abb. 110 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Isolinien 1 %, 10 %, 50 % und 99 % Letalität basierend auf toxischer Dosis, 30.5 m
über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.4 Windfeld

B 7.1.4.1 Windfeld 1.5 m über Boden

Abb. 111 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Windfeld vor Beginn der Freisetzung, 1.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)

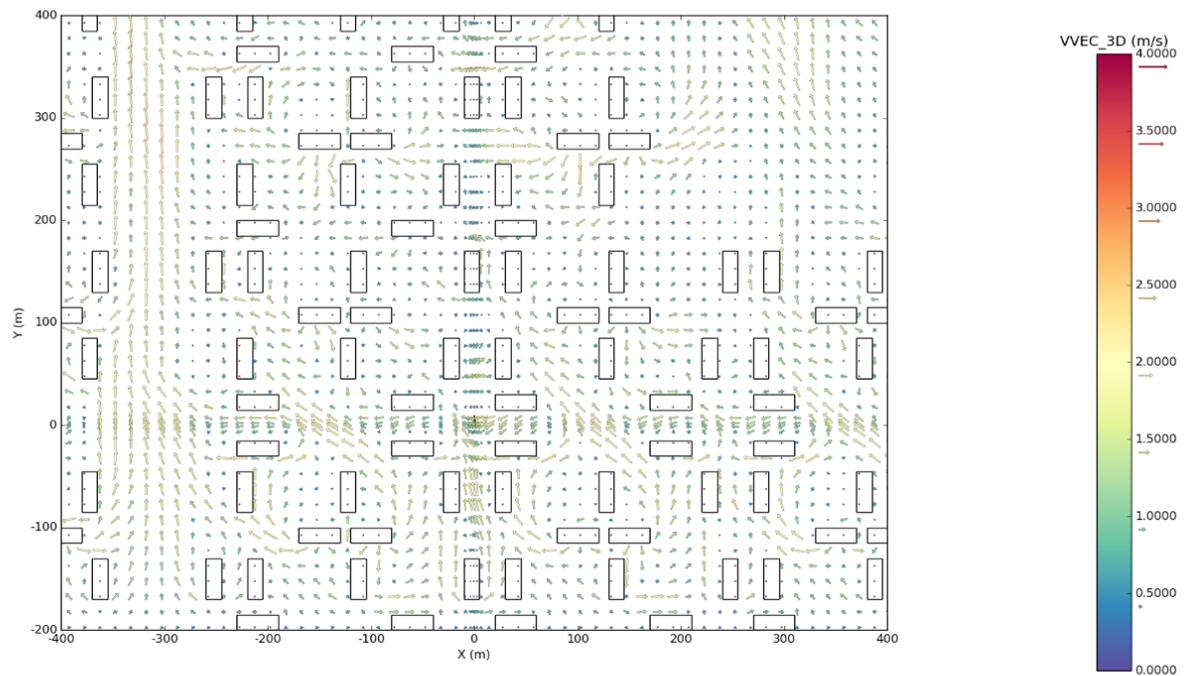
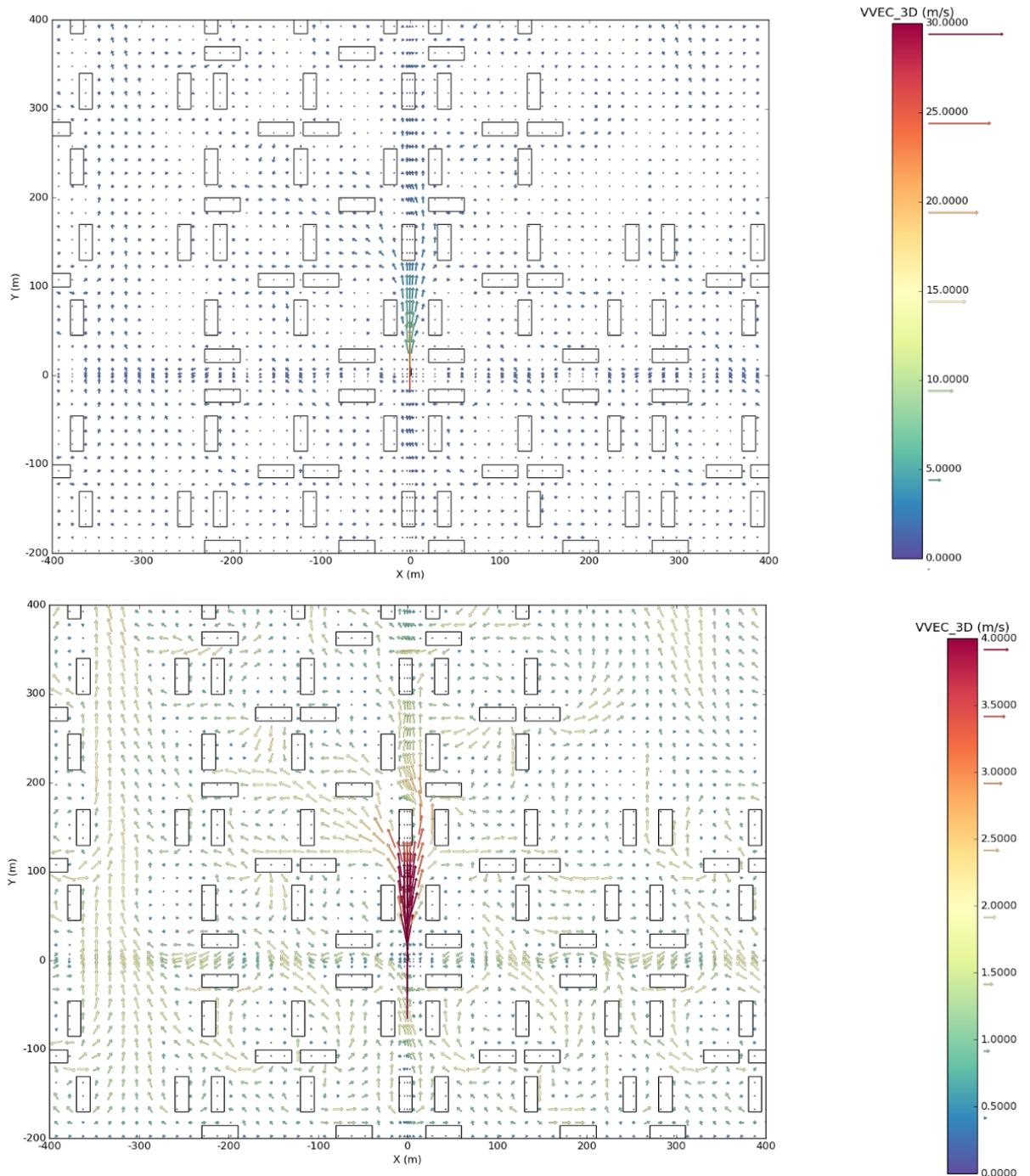


Abb. 112 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Windfeld 180 s nach Beginn der Freisetzung, 1.5 m über Boden
oben: Skalierung 0 bis 30 m/s Windgeschwindigkeit
unten: Skalierung 0 bis 4 m/s Windgeschwindigkeit
(Quelle: Gexcon AS, 14.8.2020)



B 7.1.4.2 Windfeld 30.5 m über Boden

Abb. 113 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Windfeld vor Beginn der Freisetzung, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS,
14.8.2020)

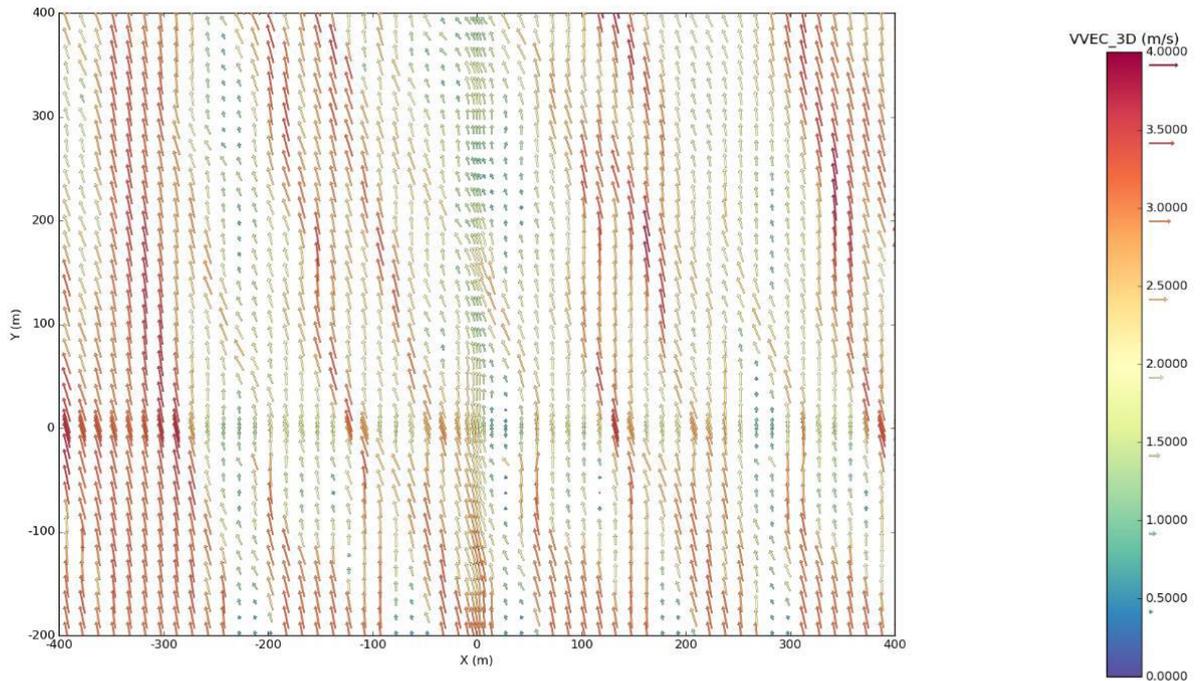
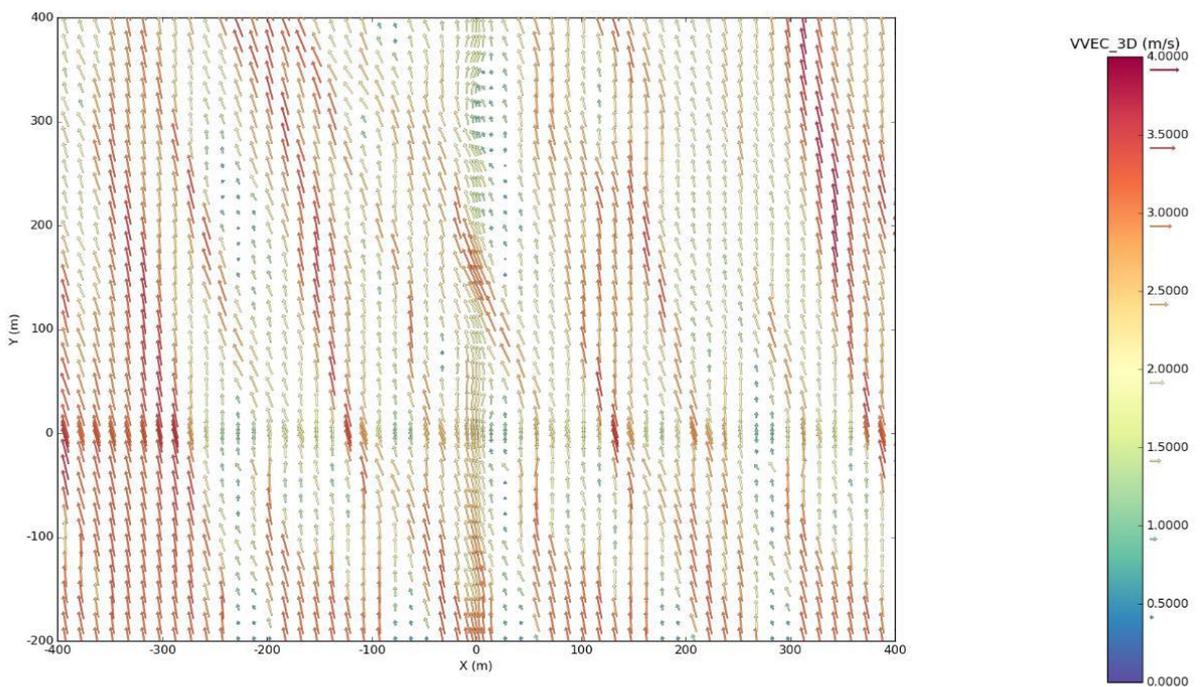


Abb. 114 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Windfeld 180 s nach Beginn der Freisetzung, 30.5 m über Boden (Quelle: Gexcon AS,
14.8.2020)



B 7.1.5 Lache

Abb. 115 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Masse Chlor im Pool im zeitlichen Verlauf (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)

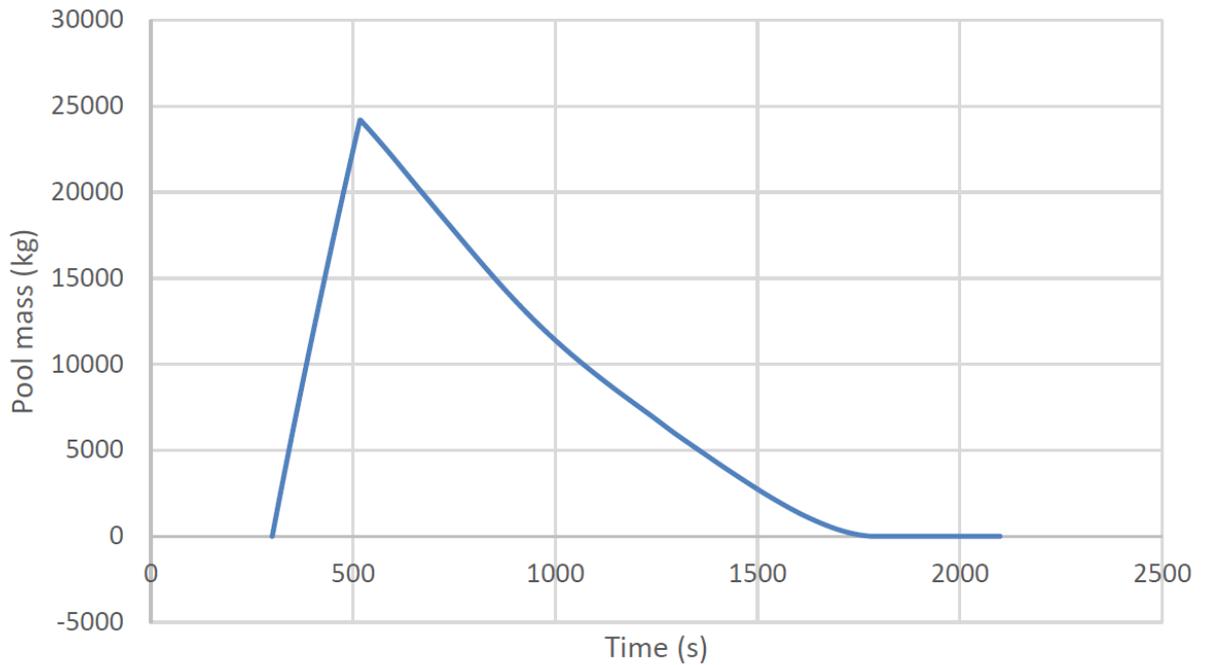
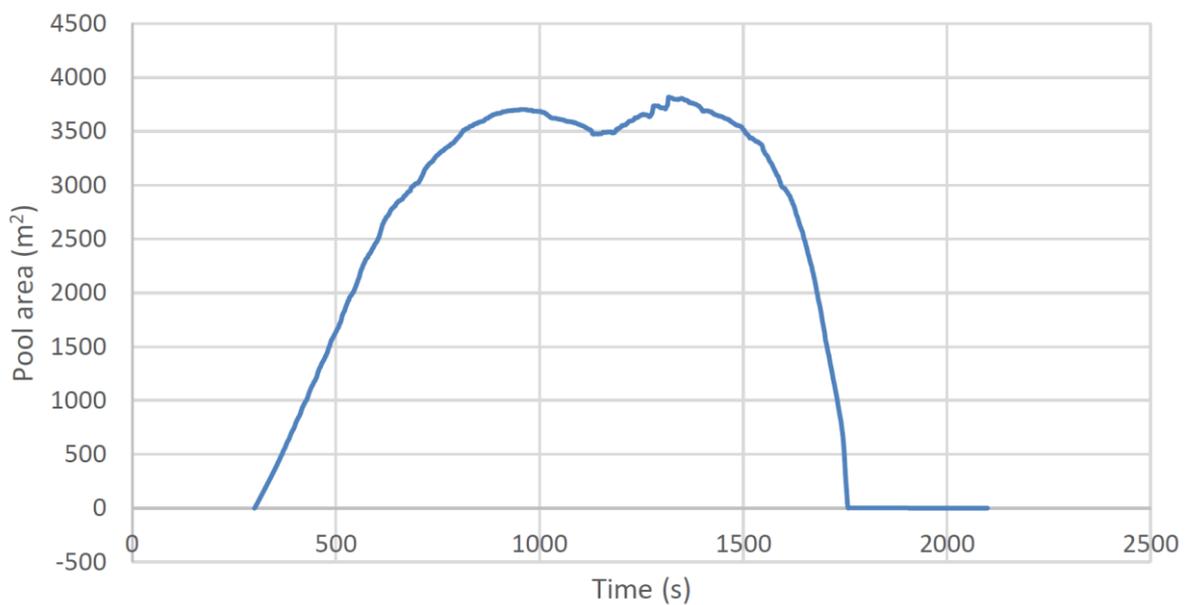


Abb. 116 Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"
Fläche Pool im zeitlichen Verlauf (Quelle: Gexcon AS, 16.10.2020)



B 7.1.6 Bemerkungen zu den FLACS-Ergebnissen

Zu den Isolinien in der Vertikalen für eine maximale Chlorkonzentration siehe Kap. B 1.3.

Zur Expositionszeit und Vergleichbarkeit der EFFECTS- und FLACS-Ergebnisse für die Toxische Dosis und die Letalität siehe Anhang B 1.1.

B 7.2 EFFECTS

Siehe Kap. B 4.2, gleiche Rechenläufe wie bei Szenario 2 "Wohnblocks"

Es wurde keine EFFECTS-Berechnung eigens für das Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" durchgeführt, da in EFFECTS keine FLACS Freisetzungsmodellierung möglich ist. In erster Linie ist der Vergleich der FLACS Berechnungen für das Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" mit den EFFECTS-Berechnungen von Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" (identisch mit den EFFECTS Berechnungen für Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung") von Interesse.

B 7.3 Vergleiche und Analysen

B 7.3.1 Austrittsmodellierung

Tab. 61 Vergleich ausgewählter Parameter Freisetzungsmodellierung mit FLACS und mit EFFECTS

Parameter	Wert FLACS ¹	Wert EFFECTS
Konstante Austrittsrate	171 kg/s	164.74kg/s
Austrittsdauer	217 s	225 s
Temperatur Jet	-62.9°C	-34.03°C
Durchmesser Jet	2.26 m	0.54673 m
Massenanteil Rainout (Zufluss Lache)	0.746	0
Dauer bis zum vollständigen Verdampfen der Lache	ca. 25 min	Keine Lachenbildung
Maximale Masse Chlor in der Lache	Ca. 24'000 kg	Keine Lachenbildung
Maximale Ausdehnung der Lache	Ca. 3750 m ²	Keine Lachenbildung

¹ Quelle: Gexcon AS 16.10.2020

Die Austrittsmodellierungen von EFFECTS und FLACS unterscheiden sich stark. Besonders auffallend sind die Ergebnisse bei Rainout und Lache: Während sich in EFFECTS keine Lache bildet, regnen bei der Austrittsmodellierung von FLACS knapp 75 % des freigesetzten Chlors in die Lache aus und verdampfen dort während ca. 25 min.

Der nach dem Rainout verbleibende Gasstrahl hat bei der FLACS-Austrittsmodellierung einen deutlich grösseren Durchmesser als bei EFFECTS, trotz kleinerer in der Gasphase

verbleibenden Gasmenge bei der FLACS-Austrittsmodellierung. Dadurch ergibt sich eine geringere Strömungsgeschwindigkeit des Gasstrahls bei der FLACS-Austrittsmodellierung.

Diese Unterschiede bei der Austrittsmodellierung führen zu einem deutlich kleineren Anfangsimpuls des freigesetzten Chlorgases bei der FLACS-Austrittsmodellierung aufgrund der impulslosen Verdampfung aus der Lache und der kleineren Strömungsgeschwindigkeit des verbleibenden Gasstrahls. Zudem führt die Lachenbildung zu einer starken Verzögerung der Freisetzung des Chlorgases in die Luft. Da so im Vergleich zur EFFECTS-Austrittsmodellierung die gleiche Chlorgasmenge über eine längere Zeitdauer in die Atmosphäre freigesetzt wird, kommt bei der FLACS-Austrittsmodellierung die Verdünnung durch die Luft stärker zum Tragen.

B 7.3.2 Chlorkonzentration

Das Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" wurde simuliert, um den Einfluss der unterschiedlichen Austrittsmodellierung von FLACS und EFFECTS zu untersuchen. Das Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" ist bis auf die Austrittsmodellierung mit dem Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" (FLACS-Rechenlauf mit Verwendung der EFFECTS-Austrittsmodellierung) identisch. Deshalb steht ein Vergleich von Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" im Vordergrund.

B 7.3.2.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Die maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m^3 , $1'116 \text{ mg/m}^3$ und $6'061 \text{ mg/m}^3$ sind beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" sowohl in 1.5 m Höhe als auch in 30.5 m Höhe deutlich kleiner als beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken".

Gleich verhält es sich mit den Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb der obengenannten Schwellenwerte in 1.5 m Höhe und in 30.5 m Höhe sowie den maximalen Höhen über Boden für die drei obengenannten Chlorkonzentrationen.

Diese Unterschiede zwischen den Chlorkonzentrationen von Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" (FLACS-Rechenlauf mit Verwendung der EFFECTS-Austrittsmodellierung) und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" (FLACS-Rechenlauf mit Verwendung der FLACS-Austrittsmodellierung) sind mit den grossen Unterschieden bei der Austrittsmodellierung von FLACS und EFFECTS gut erklärbar. Die Verzögerung der Freisetzung durch die Lache sowie der geringere bzw. bei der Lache fehlende Anfangsimpuls des freigesetzten Chlorgases führen zu einer stärkeren Verdünnung ausserhalb des Nahbereichs der Freisetzung und somit zu kleineren Reichweiten sowie zu einer etwas weniger stark in Impulsrichtung orientierter Ausbreitung des Chlorgases bei der Variante mit FLACS-Austrittsmodellierung.

Die gegenüber Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" verzögerte Ausbreitung des Chlorgases im Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" ist in den Diagrammen zum zeitlichen Verlauf der Chlorkonzentration (Abb. 103 und Abb. 106 bzw. Abb. 90 und Abb. 93) gut sichtbar.

Ebenfalls ist in den Diagrammen zum Windfeld die im Vergleich zu Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" tiefere Strömungsgeschwindigkeit direkt nach der Freisetzung bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" (Abb. 112 und Abb. 99) gut sichtbar.

B 7.3.2.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.1.2

B 7.3.2.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

Die maximalen Reichweiten für die drei Chlorkonzentrationen 205.6 mg/m³, 1'116 mg/m³ und 6'061 mg/m³ 1.5 m über Boden sowie die Flächen mit Chlorkonzentrationen oberhalb dieser Schwellenwerte sind bei EFFECTS deutlich grösser als bei FLACS, wobei die Unterschiede bei den tiefen Konzentration grösser ausfallen.

In 30.5 m Höhe ist die Situation gerade umgekehrt: Während bei FLACS die Chlorkonzentration 205.6 mg/m³ bis in grössere Distanz auftritt und in einer grösseren Fläche überschritten wird, werden die 205.6 mg/m³ bei EFFECTS nirgends erreicht.

Auch hier bestätigt sich das bereits bei den anderen Szenarien festgestellte Bild: Deutlich höhere Reichweiten und betroffene Flächen bei EFFECTS in Bodennähe und viel tiefere Konzentrationen bei EFFECTS oberhalb des bodennahen Bereichs.

B 7.3.3 Letalität

B 7.3.3.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Bei den maximalen Reichweiten und den Flächen mit mindestens 1 %, 50 % und 90 % Letalität ergibt der Vergleich zwischen Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" dasselbe Bild wie bei den Chlorkonzentrationen im Kapitel B 7.3.2.1: Die maximalen Reichweiten und Flächen mit Letalitäten oberhalb der obengenannten Schwellenwerte sind beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" deutlich kleiner als beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken". Gleich verhält es sich mit den letalitätsgewichteten Äquivalenzflächen. Offenbar vermag die bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" längere Einwirkungsdauer des Chlorgases die höheren Konzentrationen bei Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" nicht zu kompensieren. Einzig die Fläche mit mindestens 99 % Letalität ist bei beiden Szenarien ähnlich gross. Der Grund dafür liegt darin, dass im Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" durch das kontinuierliche impulsfreie Verdampfen aus der Lache im Umfeld der Lache über längere Zeit höhere Chlorkonzentrationen vorhanden sind, so dass sich im näheren Bereich der Freisetzung auch in Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" hohe toxische Dosen und Letalitäten ergeben. Ev. spielt auch die tiefere Austrittstemperatur bei der FLACS-Freisetzungsmodellierung im Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" eine Rolle, so dass im Nahbereich der Freisetzung der Schweregaseneffekt verstärkt wird.

Die Lage und Form der von der Letalität betroffenen Flächen sind beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS

Freisetzungsmodellierung" ähnlich. Beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" breitet sich das Chlorgas im Gegensatz zu Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" auch gegen den Wind aus. Der Grund dafür liegt beim geringeren bzw. fehlenden Anfangsimpuls im Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung". Die Freisetzung erfolgt bei beiden Szenarien nahezu in Windrichtung, beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" allerdings mit deutlich stärkerem Impuls als bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung".

Auch in 30.5 m Höhe sind die maximalen Reichweiten und Flächen mit über 1 %, 50 % und 90 % beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" deutlich kleiner als beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken". Die Lage und Form der von der Letalität betroffenen Flächen sind auch in 30.5 m beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" ähnlich, allerdings sind die Letalitäten bei Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" tiefer. Auch in 30.5 m Höhe sind die Letalitätsbereiche beim Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" im Vergleich zum Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" etwas in Wind- und Austrittsrichtung verschoben.

B 7.3.3.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.2.2

B 7.3.3.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

In 1.5 m über Boden ergibt der Vergleich FLACS-EFFECTS bei den maximalen Reichweiten der Letalitätsbereiche 1 %, 50 % und 99 %, den betroffenen Flächen und beim potentiellen Schadensausmass beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" durchwegs erheblich grössere Werte bei EFFECTS, wobei die Unterschiede bei den hohen Letalitäten kleiner ausfallen als bei den tiefen Letalitäten.

Bei den betroffenen Arealen ergibt sich beim 99 %-Letalitätsbereich eine gewisse Übereinstimmung von FLACS und EFFECTS. Die Bereiche mit einer Letalität über 99 % entgegen der Wind- und Austrittsrichtung sind bei EFFECTS allerdings nicht vorhanden. Bei den Letalitäten 1 % und 50 % gibt es bei der Ausrichtung und Form grob betrachtet teilweise Ähnlichkeiten, die betroffenen Areale sind bei EFFECTS jedoch viel grösser.

Während bei FLACS in 30.5 m Höhe verbreitet Letalitäten zwischen 1 und 50 % auftreten, wird in dieser Höhe bei EFFECTS nirgends eine Letalität von 1 % erreicht.

B 7.3.4 Zeitlicher Verlauf

B 7.3.4.1 Vergleich der FLACS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

In Absprache mit dem BAV wurde der zeitliche Konzentrationsverlauf für Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" nur in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Dosis- und Letalitätswerte von EFFECTS und FLACS analysiert. Bei FLACS fehlt eine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit, so dass die Dosis- und Letalitätswerte in FLACS und EFFECTS mit unterschiedlichen Expositionszeiten zustande kommen (siehe Anhang B 1.1).

B 7.3.4.2 Vergleich der EFFECTS-Berechnungen für die verschiedenen Szenarien

Gleiche Rechenläufe wie beim Szenario 2 "Wohnblocks", siehe Anhang B 4.3.3.2

B 7.3.4.3 Vergleich FLACS-EFFECTS

In Absprache mit dem BAV wurde der zeitliche Konzentrationsverlauf für Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" nur in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Dosis- und Letalitätswerte von EFFECTS und FLACS analysiert. Bei FLACS fehlt eine Funktion zur Begrenzung der Expositionszeit, so dass die Dosis- und Letalitätswerte in FLACS und EFFECTS mit unterschiedlichen Expositionszeiten zustande kommen (siehe Anhang B 1.1).

B 7.3.5 Ergebnis

Mit der FLACS-Freisetzungsmodellierung im Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" verstärken sich die im Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" bereits erheblichen Differenzen zwischen FLACS und EFFECTS noch mehr. Die Differenzen zwischen FLACS und EFFECTS werden beim Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung" zusätzlich zur unterschiedlichen Modellarchitektur (CFD bzw. Integralmodell) durch grosse Unterschiede bei der Freisetzungsmodellierung verursacht.

Die Differenzen haben eine Grössenordnung, dass bei einer konkreten Anwendung in Störfall-Risikobetrachtungen je nachdem, ob FLACS oder EFFECTS eingesetzt würde, das Ergebnis entscheidend anders ausfallen könnte.

Ebenfalls treten wie bei den anderen Szenarien auch grössere Differenzen zwischen EFFECTS und FLACS bei den Ergebnissen oberhalb der ersten Meter über Boden auf. Hier ergeben die Ergebnisse der beiden Tools FLACS und EFFECTS ein völlig widersprüchliches Bild, so dass Vorsicht beim Umgang mit Berechnungsergebnissen geboten ist. Es ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen ist bereits der Bereich oberhalb von ca. 2 m betroffen ist.

Die grossen Unterschiede zwischen FLACS und EFFECTS bei der Modellierung des Austritts- und Verdampfungsvorgangs zeigen, dass bei der Abbildung dieser Vorgänge in den Modellen in der Fachwelt keine Einigkeit besteht. Diese Unterschiede können sich deutlich auf das Ergebnis auswirken.

C Vergleichsrechnungen Meteosituation mit EFFECTS

Mit EFFECTS wurden Vergleichsrechnungen mit den Parametern von Szenario 2 "Wohnblocks" für folgende Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Stabilitätsklasse bei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten und Expositionszeiten durchgeführt:

Tab. 62 EFFECTS Vergleichsrechnungen für verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Stabilitätsklasse

Windgeschwindigkeit	Stabilitätsklasse	Oberflächenrauigkeit	Expositionszeit
0.5 m/s	F	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
1.5. m/s	E	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
1.5 m/s	F	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
2.5 m/s	F	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
4 m/s	D	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
4 m/s	E	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s
6 m/s	D	1 m und 3 m	1'800 s und 8'000 s

Dabei hat es sich gezeigt, dass die grössten Letalitätsflächen und die grösste Reichweite der Letalitätsbereiche 1.5 m über Boden bei der höchsten Stabilitätsklasse F auftreten. Die grössten Reichweiten ergaben sich bei Windgeschwindigkeit 2.5 m/s (und Stabilitätsklasse F). Die grössten Letalitätsflächen traten bei Windgeschwindigkeit 0.5 m/s (und Stabilitätsklasse F) auf. Tiefere Windgeschwindigkeiten als 0.5 m/s wurden nicht getestet. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass tiefere Windgeschwindigkeiten zu noch grösseren Letalitätsflächen führen können.

D Konzentrations-Letalitätsberechnungen (EFFECTS)

D 1 1 % Letalität

Mortality/probit calculator

Inputs

Chemical name: CHLORINE Probits base s^*kg/m^3 : a 10.599

Molecular mass of chemical: 70.906 kg/kmol Is toxic chemical b 0.5

Concentration: 205.6 mg/m³ Exposure duration: 1800 s n 2.75

Results

Probit	Mortality	Dose
2.6738	0.010003	1.3064E-07 $s^*(kg/m^3)^n$
		6.8855E07 $min^*(mg/m^3)^n$
		3.5207E06 min^*ppm^n

D 2 50 % Letalität

Mortality/probit calculator

Inputs

Chemical name: CHLORINE Probits base s^*kg/m^3 : a 10.599

Molecular mass of chemical: 70.906 kg/kmol Is toxic chemical b 0.5

Concentration: 1116 mg/m³ Exposure duration: 1800 s n 2.75

Results

Probit	Mortality	Dose
4.9997	0.49987	1.3688E-05 $s^*(kg/m^3)^n$
		7.2144E09 $min^*(mg/m^3)^n$
		3.6888E08 min^*ppm^n

D 3 99 % Letalität

Mortality/probit calculator ✕

Inputs

Chemical name	CHLORINE	Probits base $s \cdot \text{kg}/\text{m}^3$
	<input type="text" value="..."/>	a <input type="text" value="10.599"/>
Molecular mass of chemical	<input type="text" value="70.906"/> kg/kmol	<input checked="" type="checkbox"/> Is toxic chemical
		b <input type="text" value="0.5"/>
Concentration	<input type="text" value="6061"/> mg/m ³	Exposure duration
		<input type="text" value="1800"/> s
		n <input type="text" value="2.75"/>

Results

Probit	Mortality	Dose
<input type="text" value="7.3263"/>	<input type="text" value="0.99"/>	<input type="text" value="0.0014364"/> $s \cdot (\text{kg}/\text{m}^3)^n$
		<input type="text" value="7.5704E11"/> $\text{min} \cdot (\text{mg}/\text{m}^3)^n$
		<input type="text" value="3.8708E10"/> $\text{min} \cdot \text{ppm}^n$

E EFFECTS Dispersionsberechnungen Reports und Vergleiche

E 1 Report Szenario 0 "Baseline" 1800 s und 2250 s Expositionszeit

baseline report

Seite 1 von 5

Comparison Set: baseline

Model: Liquefied gas LOC scenario Leak (G3)

version: v2019.03.9702694 (18.03.2019)
Reference: EFFECTS User manual "Combined models"

Parameters

Inputs

Chemical name

Use which representative rate

Outcome / phenomena

Type of vessel outflow

Fixed Mass flow rate of the source (kg/s)

Pipeline length (km)

Pipeline diameter (mm)

Pipeline roughness (mm)

Hole diameter (mm)

Hole rounding

Discharge coefficient (-)

Height difference between pipe entrance and exit (m)

Height leak above tank bottom (m)

Initial temperature in vessel (°C)

Vessel volume (m³)

Vessel type

Length cylinder (m)

Filling degree (%)

Expansion type

n value

Pressure inside vessel determination

Initial (absolute) pressure in vessel (bar)

Type of calculation

Maximum release duration (s)

Ambient pressure (bar)

Type of Spray calculation

Height leak above ground level (m)

Ambient temperature (°C)

Ambient relative humidity (%)

No of samples (accuracy)

Evaporation from land or water

Type of pool growth on Land

Type of pool growth on Water

Maximum pool surface area (m²)

Temperature of the subsoil (°C)

Temperature of the water (°C)

Max temperature difference between pool and water (K)

Wind speed at 10 m height (m/s)

Solar radiation flux

Solar heat radiation flux (W/m²)

Cloud cover (%)

Date: day number

Date: month number

North/South latitude of the location (deg)

Type of subsoil (evaporation)

Subsoil roughness description (pool)

Maximum evaluation time for evaporation (s)

Type of pool fire calculation

Type of pool (poolfire)

Diameter of the rim (m)

Width of rim (m)

Width of rectangle (m)

	Baseline 1800	Baseline 2250
Chemical name	CHLORINE (DIPPR)	CHLORINE (DIPPR)
Use which representative rate	Second 20% average (toxic)	Second 20% average (toxic)
Outcome / phenomena	Toxic dispersion	Toxic dispersion
Type of vessel outflow	Release through hole in vessel	Release through hole in vessel
<i>Fixed Mass flow rate of the source (kg/s)</i>		
<i>Pipeline length (km)</i>		
<i>Pipeline diameter (mm)</i>		
<i>Pipeline roughness (mm)</i>		
Hole diameter (mm)	75	75
Hole rounding	Rounded edges	Rounded edges
<i>Discharge coefficient (-)</i>	1	1
<i>Height difference between pipe entrance and exit (m)</i>		
Height leak above tank bottom (m)	0.85	0.85
Initial temperature in vessel (°C)	15	15
Vessel volume (m ³)	54	54
Vessel type	Horizontal cylinder	Horizontal cylinder
Length cylinder (m)	11.215	11.215
Filling degree (%)	76	76
Expansion type	Adiabatic	Adiabatic
<i>n value</i>		
Pressure inside vessel determination	Use vapour pressure	Use vapour pressure
<i>Initial (absolute) pressure in vessel (bar)</i>	5.888	5.888
Type of calculation	Calculate until device is empty	Calculate until device is empty
<i>Maximum release duration (s)</i>		
Ambient pressure (bar)	0.952	0.952
Type of Spray calculation	Spray release model (Yellow Book)	Spray release model (Yellow Book)
Height leak above ground level (m)	1.85	1.85
Ambient temperature (°C)	15	15
Ambient relative humidity (%)	83	83
<i>No of samples (accuracy)</i>		
Evaporation from land or water	Land Spreading	Land Spreading
Type of pool growth on Land		
<i>Type of pool growth on Water</i>		
<i>Maximum pool surface area (m²)</i>		
Temperature of the subsoil (°C)	15	15
<i>Temperature of the water (°C)</i>		
<i>Max temperature difference between pool and water (K)</i>		
Wind speed at 10 m height (m/s)	1.5	1.5
Solar radiation flux	User defined	User defined
Solar heat radiation flux (W/m ²)	120	120
<i>Cloud cover (%)</i>		
<i>Date: day number</i>		
<i>Date: month number</i>		
North/South latitude of the location (deg)	47	47
Type of subsoil (evaporation)	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard
Subsoil roughness description (pool)	1800	1800
Maximum evaluation time for evaporation (s)	Two Zone model	Two Zone model
Type of pool fire calculation	Rew & Hulbert Circular	Rew & Hulbert Circular
Type of pool (poolfire)		
<i>Diameter of the rim (m)</i>		
<i>Width of rim (m)</i>		
<i>Width of rectangle (m)</i>		

baseline report

Seite 2 von 5

<i>Length of rectangle (m)</i>		
<i>Rotation rectangle (North = 0 degrees) (deg)</i>		
<i>Height of the receiver (m)</i>	1.5	1.5
<i>Height of the confined pool above ground level (m)</i>		
<i>Fraction combustion heat radiated (-)</i>	0.35	0.35
<i>Soot Fraction</i>	Calculate/Default	Calculate/Default
<i>Fraction of the flame covered by soot (-)</i>	0.8	0.8
<i>Amount of CO2 in atmosphere (-)</i>	0.0003	0.0003
<i>Reporting distance (Xd) (m)</i>	1000	200
<i>Maximum heat exposure duration (s)</i>	20	20
<i>Predefined wind direction</i>	User defined	User defined
<i>Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)</i>	170	170
<i>Accuracy</i>	High	High
<i>Take protective effects of clothing into account</i>	No	No
<i>Correction lethality protection clothing (-)</i>		
<i>Heat radiation lethal damage Probit A ((sec*(W/m2)^n))</i>	-36.38	-36.38
<i>Heat radiation lethal damage Probit B</i>	2.56	2.56
<i>Heat radiation damage Probit N</i>	1.3333	1.3333
<i>Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)</i>	0	0
<i>Meteorological data</i>	Pasquill	Pasquill
<i>Pasquill stability class</i>	F (Very Stable)	F (Very Stable)
<i>Inverse Monin-Obukhov length (1/L) (1/m)</i>		
<i>Roughness length description</i>	Open flat terrain; grass, few isolated objects.	Open flat terrain; grass, few isolated objects.
<i>Roughness length Z0 (m)</i>	0.03	0.03
<i>Reporting time flammable cloud</i>	Time maximum area cloud	Time maximum area cloud
<i>Time t after start release (s)</i>		
<i>Use 50% LFL for cloud contour</i>	No	No
<i>Use mass between LFL and UFL</i>	No	No
<i>Use dynamic concentration presentation</i>	Yes	Yes
<i>User defined dose contour</i>	No	No
<i>Threshold toxic dose (s*(kg/m3)^n)</i>		
<i>Toxic exposure duration based on</i>	Time limit for cloud exposure	Time limit for cloud exposure
<i>Start of exposure (after moment of release) (s)</i>		
<i>Max duration cloud exposure (s)</i>	1800	2250
<i>Perform Toxic indoors calculation</i>	No	No
<i>Indoor ventilation rate (/hour)</i>		
<i>Mixing height (m)</i>		
<i>Fraction of flammable cloud confined (-)</i>	0.08	0.08
<i>Use GAME overpressure method</i>	No	No
<i>Curve number</i>	10 (Detonation)	10 (Detonation)
<i>Game expansion type</i>		
<i>Volume Blockage Ratio (%)</i>		
<i>Flame path length (m)</i>		
<i>Typical obstacle diameter (m)</i>		
<i>Pressure lethality based on</i>	Pressure vs Lethality relation	Pressure vs Lethality relation
<i>Peak pressure total destruction (Indoors) (mbar)</i>	400	400
<i>Lethality total destruction (Indoors) (-)</i>	0.4	0.4
<i>Peak pressure indoors (glass) lethality (mbar)</i>		
<i>Lethality indoors (glass) (-)</i>		
<i>Pressure damage Probit A (((Pa)^n))</i>		
<i>Pressure damage Probit B</i>		
<i>Pressure damage Probit N</i>		
Results	Baseline 1800	Baseline 2250
<i>Initial mass in vessel (kg)</i>	58678	58678
<i>Initial (vapour) pressure in vessel (bar)</i>	5.888	5.888
<i>Time needed to empty vessel (s)</i>	1157	1157
<i>Pressure in vessel at end outflow (bar)</i>	0.952	0.952
<i>Temperature in vessel at end outflow (°C)</i>	-35.539	-35.539
<i>VapourMass fraction at end outflow (-)</i>	1	1
<i>Liquid mass in vessel at end outflow (kg)</i>	21412	21412
<i>Vapour mass in vessel at end outflow (kg)</i>	139.52	139.52
<i>Exit pressure at end outflow (bar)</i>	0.952	0.952
<i>Exit temperature at end outflow (°C)</i>	-35.539	-35.539
<i>Maximum mass flow rate (kg/s)</i>	167.62	167.62
<i>Representative release rate (kg/s)</i>	164.74	164.74
<i>Representative outflow duration (s)</i>	225	225

baseline report

Seite 3 von 5

Representative temperature (°C)	14.179	14.179
Corresponding pressure (bar)	5.8315	5.8315
Representative vapour mass fraction (-)	0	0
Adiabatic vapour flash fraction (-)	0.15528	0.15528
AFTER FLASHING AND RAINOUT: liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	164.74	164.74
Temperature jet/cloud (°C)	-34.03	-34.03
Diameter jet/cloud (m)	0.54673	0.54673
Nett mass flow rained out (kg/s)	0	0
Temperature of the pool (°C)	-34.03	-34.03
Density of the airborne mass (kg/m3)	17.544	17.544
Used Sauter Mean Diameter (micron)		
Heat flux from solar radiation (kW/m2)		
Time pool spreading ends (s)		
Time until pool has totally evaporated (s)		
Purple book representative evaporation rate (kg/s)		
Purple book representative evaporation duration (s)		
Representative temperature (°C)		
Representative pool diameter (m)		
Density after mixing with air (kg/m3)		
Total evaporated mass (kg)		
... duration evaporation time (s)		
Corresponding representative pool surface area (m2)		
Schmidt number used		
Equivalent diameter poolfire (m)		
Max Diameter top flame (length ellipse) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Calculated pool surface area (m2)		
Combustion rate (kg/s)		
Duration of the pool fire (s)		
Surface emissive power flame (kW/m2)		
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)		
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)		
Flame tilt (deg)		
Flame temperature (°C)		
Length of the flame (m)		
Height of clear fraction Flame (m)		
Weight ratio of HCL/chemical (%)		
Weight ratio of NO2/chemical (%)		
Weight ratio of SO2/chemical (%)		
Weight ratio of CO2/chemical (%)		
Weight ratio of H2O/chemical (%)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		
Atmospheric Transmissivity at Xd (%)		
Viewfactor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Type of flow of the jet		
Wind speed at avg. jet height (m/s)		
Exit velocity of expanding jet (m/s)		
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)		
Frustum lift off height (b) (m)		
Width of frustum base (W1) (m)		
Width of frustum tip (W2) (m)		
Length of frustum (flame) (R1) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Surface area of frustum (m2)		
Surface emissive power (max) (kW/m2)		
Surface emissive power (actual) (kW/m2)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		
Atmospheric transmissivity at Xd (%)		
View factor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Representative release rate (kg/s)	164.74	164.74
Representative outflow duration (s)	225	225
Density after mixing with air (kg/m3)		

baseline report

Seite 4 von 5

	17.544	17.544
Temperature after release (°C)	-34.03	-34.03
Initial liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Flammability threshold concentration (mg/m3)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m2)		
Time t reported (s)		
Flammable mass at time t (kg)		
Area flammable cloud at time t (m2)		
Height to LFL at time t (m)		
Length of flammable cloud at time t (m)		
Width of flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)		
Effective release height (m)		
Threshold concentration used (mg/m3)	205.6	189.58
Dose at (Xd, Yd, Zd) (min*(mg/m3)^n)	4.4042E11	2.4993E14
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)	0.98008	1
LC50 Human 30 min (mg/m3)	1115.6	1115.6
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)	0.070248	0.070248
Effective release height (m)	1.85	1.85
Flammability threshold concentration (mg/m3)		
Mixing height used (m)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m2)		
Time T reported (s)		
Area flammable cloud at time t (m2)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Threshold concentration used (mg/m3)		
Mixing height used (m)		
Dose at (Xd, Yd, Zd) (min*(mg/m3)^n)		
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)		
LC50 Human 30 min (mg/m3)		
Confined mass in explosive range (kg)		
Total combustion energy (MJ)		
Maximum peak overpressure (bar)		
Game equivalent Curve nr (-)		
Laminar Burning Velocity used (m/s)		
Peak overpressure at Xd (mbar)		
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)		
Pressure impulse at Xd (Pa*s)		
Positive phase duration at Xd (ms)		
Blast-wave shape at Xd		
Damage (general description) at Xd		
Damage to brick houses at Xd		
Damage to typical American-style houses at Xd		
Damage to structures (empirical) at Xd		
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)		
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)		
Concentration contours distance [m]	Baseline 1800	Baseline 2250
1% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	8549	9049
50% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	3111	3241
99% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	1022	1072
Lethality Contours distance [m]	Baseline 1800	Baseline 2250
1 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	8365	8563
50 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	2862	2917
99 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	852	853
Sub model information		
Sub model LiqGasRel (1)		Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) (Uninitialized)
Sub model SprayRel (2)		Liquefied Gas Spray Release (Uninitialized)
Sub model PoolEvap (3)		Pool evaporation model

baseline report

Seite 5 von 5

	(Uninitialized)
Sub model PoolFire (4)	Pool fire (Uninitialized)
Sub model JetFire (5)	Jet Fire (Chamberlain model) (Uninitialized)
Sub model Cumulate sources (6)	Cumulate Spray release and Poolevaporation source rates (Uninitialized)
Sub model HGDE Outflow (7)	Dense Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)
Sub model HGDT Outflow (8)	Dense gas release; toxic (Uninitialized)
Sub model NGDE Outflow (9)	Neutral Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)
Sub model NGDT Outflow (10)	Neutral Gas Dispersion: Toxic dose (Uninitialized)
Sub model Expl ME (11)	Explosion (Multi Energy model) (Uninitialized)

E 2 Report Szenario 1 "Einfamilienhäuser" bzw. 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit und 1800 s und 8000 s Expositionszeit

comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 1 von 5

Comparison Set: comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5

Model: Liquefied gas LOC scenario Leak (G3)

version: v2019.03.9702694 (12.03.2019)
Reference: EFFECTS User manual "Combined models"

Parameters

Inputs	Szen 1 bzw 2 EFH bzw Wohnblocks 1m OR 1800 1.5m	Szen 1 bzw 2 EFH bzw Wohnblocks 1m OR 8000 1.5m
Chemical name	CHLORINE (DIPPR)	CHLORINE (DIPPR)
Use which representative rate	Second 20% average (toxic)	Second 20% average (toxic)
Outcome / phenomena	Toxic dispersion	Toxic dispersion
Type of vessel outflow	Release through hole in vessel	Release through hole in vessel
<i>Fixed Mass flow rate of the source (kg/s)</i>		
<i>Pipeline length (km)</i>		
<i>Pipeline diameter (mm)</i>		
<i>Pipeline roughness (mm)</i>		
Hole diameter (mm)	75	75
Hole rounding	Rounded edges	Rounded edges
<i>Discharge coefficient (-)</i>	1	1
<i>Height difference between pipe entrance and exit (m)</i>		
Height leak above tank bottom (m)	0.85	0.85
Initial temperature in vessel (°C)	15	15
Vessel volume (m3)	54	54
Vessel type	Horizontal cylinder	Horizontal cylinder
Length cylinder (m)	11.215	11.215
Filling degree (%)	76	76
Expansion type	Adiabatic	Adiabatic
<i>n value</i>		
Pressure inside vessel determination	Use vapour pressure	Use vapour pressure
<i>Initial (absolute) pressure in vessel (bar)</i>	5.888	5.888
Type of calculation	Calculate until device is empty	Calculate until device is empty
<i>Maximum release duration (s)</i>		
Ambient pressure (bar)	0.952	0.952
Type of Spray calculation	Spray release model (Yellow Book)	Spray release model (Yellow Book)
Height leak above ground level (m)	1.85	1.85
Ambient temperature (°C)	15	15
Ambient relative humidity (%)	83	83
<i>No of samples (accuracy)</i>		
Evaporation from land or water	Land	Land
Type of pool growth on Land	Spreading	Spreading
<i>Type of pool growth on Water</i>		
<i>Maximum pool surface area (m2)</i>		
Temperature of the subsoil (°C)	15	15
<i>Temperature of the water (°C)</i>		
<i>Max temperature difference between pool and water (K)</i>		
Wind speed at 10 m height (m/s)	1.5	1.5
Solar radiation flux	User defined	User defined
Solar heat radiation flux (W/m2)	120	120
<i>Cloud cover (%)</i>		
<i>Date: day number</i>		
<i>Date: month number</i>		
North/South latitude of the location (deg)	47	47
Type of subsoil (evaporation)	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard
Subsoil roughness description (pool)	1800	1800
Maximum evaluation time for evaporation (s)	Two Zone model	Two Zone model
Type of pool fire calculation	Rew & Hulbert	Rew & Hulbert

comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 2 von 5

Type of pool (poolfire)	Circular	Circular
<i>Diameter of the rim (m)</i>		
<i>Width of rim (m)</i>		
<i>Width of rectangle (m)</i>		
<i>Length of rectangle (m)</i>		
<i>Rotation rectangle (North = 0 degrees) (deg)</i>		
Height of the receiver (m)	1.5	1.5
<i>Height of the confined pool above ground level (m)</i>		
Fraction combustion heat radiated (-)	0.35	0.35
Soot Fraction	Calculate/Default	Calculate/Default
<i>Fraction of the flame covered by soot (-)</i>	0.8	0.8
Amount of CO2 in atmosphere (-)	0.0003	0.0003
Reporting distance (Xd) (m)	200	200
Maximum heat exposure duration (s)	20	20
Predefined wind direction	User defined	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	170	170
Accuracy	High	High
Take protective effects of clothing into account	No	No
<i>Correction lethality protection clothing (-)</i>		
Heat radiation lethal damage Probit A ((sec*(W/m2)^n))	-36.38	-36.38
Heat radiation lethal damage Probit B	2.56	2.56
Heat radiation damage Probit N	1.3333	1.3333
Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)	0	0
Meteorological data	Pasquill	Pasquill
Pasquill stability class	F (Very Stable)	F (Very Stable)
<i>Inverse Monin-Obukhov length (1/L) (1/m)</i>		
Roughness length description	Regular large obstacle coverage (suburb or forest).	Regular large obstacle coverage (suburb or forest).
<i>Roughness length Z0 (m)</i>	1	1
Reporting time flammable cloud	Time maximum area cloud	Time maximum area cloud
<i>Time t after start release (s)</i>		
Use 50% LFL for cloud contour	No	No
Use mass between LFL and UFL	No	No
Use dynamic concentration presentation	Yes	Yes
User defined dose contour	No	No
<i>Threshold toxic dose (s*(kg/m3)^n)</i>		
Toxic exposure duration based on	Time limit for cloud exposure	Time limit for cloud exposure
<i>Start of exposure (after moment of release) (s)</i>		
Max duration cloud exposure (s)	1800	8000
Perform Toxic indoors calculation	No	No
<i>Indoor ventilation rate (/hour)</i>		
<i>Mixing height (m)</i>		
Fraction of flammable cloud confined (-)	0.08	0.08
Use GAME overpressure method	No	No
Curve number	10 (Detonation)	10 (Detonation)
<i>Game expansion type</i>		
<i>Volume Blockage Ratio (%)</i>		
<i>Flame path length (m)</i>		
<i>Typical obstacle diameter (m)</i>		
Pressure lethality based on	Pressure vs Lethality relation	Pressure vs Lethality relation
Peak pressure total destruction (Indoors) (mbar)	400	400
Lethality total destruction (Indoors) (-)	0.4	0.4
<i>Peak pressure indoors (glass) lethality (mbar)</i>		
<i>Lethality indoors (glass) (-)</i>		
<i>Pressure damage Probit A (((Pa)^n))</i>		
<i>Pressure damage Probit B</i>		
<i>Pressure damage Probit N</i>		
Results	Szen 1 bzw 2 EFH bzw Wohnblocks 1m OR 1800	Szen 1 bzw 2 EFH bzw Wohnblocks 1m OR 8000
Initial mass in vessel (kg)	1.5m	1.5m
Initial (vapour) pressure in vessel (bar)	58678	58678
Time needed to empty vessel (s)	5.888	5.888
	1157	1157

comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 3 von 5

<i>Pressure in vessel at end outflow (bar)</i>	0.952	0.952
<i>Temperature in vessel at end outflow (°C)</i>	-35.539	-35.539
<i>VapourMass fraction at end outflow (-)</i>	1	1
<i>Liquid mass in vessel at end outflow (kg)</i>	21412	21412
<i>Vapour mass in vessel at end outflow (kg)</i>	139.52	139.52
<i>Exit pressure at end outflow (bar)</i>	0.952	0.952
<i>Exit temperature at end outflow (°C)</i>	-35.539	-35.539
Maximum mass flow rate (kg/s)	167.62	167.62
Representative release rate (kg/s)	164.74	164.74
Representative outflow duration (s)	225	225
Representative temperature (°C)	14.179	14.179
Corresponding pressure (bar)	5.8315	5.8315
Representative vapour mass fraction (-)	0	0
Adiabatic vapour flash fraction (-)	0.15528	0.15528
AFTER FLASHING AND RAINOUT: liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	164.74	164.74
Temperature jet/cloud (°C)	-34.03	-34.03
Diameter jet/cloud (m)	0.54673	0.54673
Nett mass flow rained out (kg/s)	0	0
Temperature of the pool (°C)	-34.03	-34.03
Density of the airborne mass (kg/m3)	17.544	17.544
<i>Used Sauter Mean Diameter (micron)</i>		
Heat flux from solar radiation (kW/m2)		
Time pool spreading ends (s)		
Time until pool has totally evaporated (s)		
Purple book representative evaporation rate (kg/s)		
Purple book representative evaporation duration (s)		
Representative temperature (°C)		
Representative pool diameter (m)		
Density after mixing with air (kg/m3)		
Total evaporated mass (kg)		
... duration evaporation time (s)		
Corresponding representative pool surface area (m2)		
Schmidt number used		
Equivalent diameter poolfire (m)		
Max Diameter top flame (length ellipse) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Calculated pool surface area (m2)		
Combustion rate (kg/s)		
Duration of the pool fire (s)		
<i>Surface emissive power flame (kW/m2)</i>		
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)		
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)		
Flame tilt (deg)		
Flame temperature (°C)		
Length of the flame (m)		
Height of clear fraction Flame (m)		
Weight ratio of HCL/chemical (%)		
Weight ratio of NO2/chemical (%)		
Weight ratio of SO2/chemical (%)		
Weight ratio of CO2/chemical (%)		
Weight ratio of H2O/chemical (%)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		
Atmospheric Transmissivity at Xd (%)		
Viewfactor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Type of flow of the jet		
Wind speed at avg. jet height (m/s)		
Exit velocity of expanding jet (m/s)		
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)		
Frustum lift off height (b) (m)		
Width of frustum base (W1) (m)		
Width of frustum tip (W2) (m)		
Length of frustum (flame) (R1) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Surface area of frustum (m2)		
Surface emissive power (max) (kW/m2)		
Surface emissive power (actual) (kW/m2)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		

comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 4 von 5

Atmospheric transmissivity at Xd (%)		
View factor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd ($s \cdot (kW/m^2)^{4/3}$)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Representative release rate (kg/s)	164.74	164.74
Representative outflow duration (s)	225	225
Density after mixing with air (kg/m ³)	17.544	17.544
Temperature after release (°C)	-34.03	-34.03
Initial liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Flammability threshold concentration (mg/m ³)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m ²)		
Time t reported (s)		
Flammable mass at time t (kg)		
Area flammable cloud at time t (m ²)		
Height to LFL at time t (m)		
Length of flammable cloud at time t (m)		
Width of flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)		
Effective release height (m)		
Threshold concentration used (mg/m ³)	205.6	119.52
Dose at (Xd, Yd, Zd) ($\min \cdot (mg/m^3)^n$)	1.3453E13	1.3454E13
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)	1	1
LC50 Human 30 min (mg/m ³)	1115.6	1115.6
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)	0.0385	0.0385
Effective release height (m)	1.85	1.85
Flammability threshold concentration (mg/m ³)		
Mixing height used (m)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m ²)		
Time T reported (s)		
Area flammable cloud at time t (m ²)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Threshold concentration used (mg/m ³)		
Mixing height used (m)		
Dose at (Xd, Yd, Zd) ($\min \cdot (mg/m^3)^n$)		
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)		
LC50 Human 30 min (mg/m ³)		
Confined mass in explosive range (kg)		
Total combustion energy (MJ)		
Maximum peak overpressure (bar)		
<i>Game equivalent Curve nr (-)</i>		
<i>Laminar Burning Velocity used (m/s)</i>		
Peak overpressure at Xd (mbar)		
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)		
Pressure impulse at Xd (Pa*s)		
Positive phase duration at Xd (ms)		
Blast-wave shape at Xd		
Damage (general description) at Xd		
Damage to brick houses at Xd		
Damage to typical American-style houses at Xd		
Damage to structures (empirical) at Xd		
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)		
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)		
	Szen 1 bzw 2	Szen 1 bzw 2
	EFH bzw	EFH bzw
Concentration contours distance [m]	Wohnblocks	Wohnblocks
	1m OR 1800	1m OR 8000
	1.5m	1.5m
1% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	6302	8860
50% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	2006	2957
99% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	583	860

comp 1 und 2 1m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 5 von 5

Lethality Contours distance [m]	Szen 1 bzw 2	Szen 1 bzw 2
	EFH bzw	EFH bzw
	Wohnblocks	Wohnblocks
	1m OR 1800	1m OR 8000
1 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	1.5m	1.5m
50 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	5799	6055
99 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	1697	1698
Sub model information	407	407
Sub model LiqGasRel (1)	Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) (Uninitialized)	
Sub model SprayRel (2)	Liquefied Gas Spray Release (Uninitialized)	
Sub model PoolEvap (3)	Pool evaporation model (Uninitialized)	
Sub model PoolFire (4)	Pool fire (Uninitialized)	
Sub model JetFire (5)	Jet Fire (Chamberlain model) (Uninitialized)	
Sub model Cumulate sources (6)	Cumulate Spray release and Poolevaporation source rates (Uninitialized)	
Sub model HGDE Outflow (7)	Dense Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)	
Sub model HGDT Outflow (8)	Dense gas release; toxic (Uninitialized)	
Sub model NGDE Outflow (9)	Neutral Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)	
Sub model NGDT Outflow (10)	Neutral Gas Dispersion: Toxic dose (Uninitialized)	
Sub model Expl ME (11)	Explosion (Multi Energy model) (Uninitialized)	

E 3 Report Szenario 2 "Wohnblocks" mit 3 m Oberflächenrauigkeit und 1800 s und 8000 s Expositionszeit

comp 3m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 1 von 5

Comparison Set: comp 3m OR 1800 und 8000 1.5

Model: Liquefied gas LOC scenario Leak (G3)

version: v2019.04.9702694 (01.04.2019)
Reference: EFFECTS User manual "Combined models"

Parameters

Inputs

Chemical name
Use which representative rate
Outcome / phenomena
Type of vessel outflow
Fixed Mass flow rate of the source (kg/s)
Pipeline length (km)
Pipeline diameter (mm)
Pipeline roughness (mm)
Hole diameter (mm)
Hole rounding
Discharge coefficient (-)
Height difference between pipe entrance and exit (m)
Height leak above tank bottom (m)
Initial temperature in vessel (°C)
Vessel volume (m3)
Vessel type
Length cylinder (m)
Filling degree (%)
Expansion type
n value
Pressure inside vessel determination
Initial (absolute) pressure in vessel (bar)
Type of calculation
Maximum release duration (s)
Ambient pressure (bar)
Type of Spray calculation
Height leak above ground level (m)
Ambient temperature (°C)
Ambient relative humidity (%)
No of samples (accuracy)
Evaporation from land or water
Type of pool growth on Land
Type of pool growth on Water
Maximum pool surface area (m2)
Temperature of the subsoil (°C)
Temperature of the water (°C)
Max temperature difference between pool and water (K)
Wind speed at 10 m height (m/s)
Solar radiation flux
Solar heat radiation flux (W/m2)
Cloud cover (%)
Date: day number
Date: month number
North/South latitude of the location (deg)
Type of subsoil (evaporation)
Subsoil roughness description (pool)
Maximum evaluation time for evaporation (s)
Type of pool fire calculation
Type of pool (poolfire)

	Szen 2 Wohnblocks 3m OR 1800 1.5m	Szen 2 Wohnblocks 3m OR 8000 1.5m
	CHLORINE (DIPPR)	CHLORINE (DIPPR)
	Second 20% average (toxic)	Second 20% average (toxic)
	Toxic dispersion Release through hole in vessel	Toxic dispersion Release through hole in vessel
	75	75
	Rounded edges	Rounded edges
	1	1
	0.85	0.85
	15	15
	54	54
	Horizontal cylinder	Horizontal cylinder
	11.215	11.215
	76	76
	Adiabatic	Adiabatic
	Use vapour pressure	Use vapour pressure
	5.888	5.888
	Calculate until device is empty	Calculate until device is empty
	0.952	0.952
	Spray release model (Yellow Book)	Spray release model (Yellow Book)
	1.85	1.85
	15	15
	83	83
	Land Spreading	Land Spreading
	15	15
	1.5	1.5
	User defined	User defined
	120	120
	47	47
	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard	Average subsoil flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard
	1800	1800
	Two Zone model Rew & Hulbert Circular	Two Zone model Rew & Hulbert Circular

comp 3m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 2 von 5

<i>Diameter of the rim (m)</i>		
<i>Width of rim (m)</i>		
<i>Width of rectangle (m)</i>		
<i>Length of rectangle (m)</i>		
<i>Rotation rectangle (North = 0 degrees) (deg)</i>		
<i>Height of the receiver (m)</i>	1.5	1.5
<i>Height of the confined pool above ground level (m)</i>		
<i>Fraction combustion heat radiated (-)</i>	0.35	0.35
<i>Soot Fraction</i>	Calculate/Default	Calculate/Default
<i>Fraction of the flame covered by soot (-)</i>	0.8	0.8
<i>Amount of CO2 in atmosphere (-)</i>	0.0003	0.0003
<i>Reporting distance (Xd) (m)</i>	200	200
<i>Maximum heat exposure duration (s)</i>	20	20
<i>Predefined wind direction</i>	User defined	User defined
<i>Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)</i>	170	170
<i>Accuracy</i>	High	High
<i>Take protective effects of clothing into account</i>	No	No
<i>Correction lethality protection clothing (-)</i>		
<i>Heat radiation lethal damage Probit A ((sec*(W/m2)^n))</i>	-36.38	-36.38
<i>Heat radiation lethal damage Probit B</i>	2.56	2.56
<i>Heat radiation damage Probit N</i>	1.3333	1.3333
<i>Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)</i>	0	0
<i>Meteorological data</i>	Pasquill	Pasquill
<i>Pasquill stability class</i>	F (Very Stable)	F (Very Stable)
<i>Inverse Monin-Obukhov length (1/L) (1/m)</i>		
<i>Roughness length description</i>	City centre with high and low rise buildings.	City centre with high and low rise buildings.
<i>Roughness length Z0 (m)</i>	3	3
<i>Reporting time flammable cloud</i>	Time maximum area cloud	Time maximum area cloud
<i>Time t after start release (s)</i>		
<i>Use 50% LFL for cloud contour</i>	No	No
<i>Use mass between LFL and UFL</i>	No	No
<i>Use dynamic concentration presentation</i>	Yes	Yes
<i>User defined dose contour</i>	No	No
<i>Threshold toxic dose (s*(kg/m3)^n)</i>		
<i>Toxic exposure duration based on</i>	Time limit for cloud exposure	Time limit for cloud exposure
<i>Start of exposure (after moment of release) (s)</i>		
<i>Max duration cloud exposure (s)</i>	1800	8000
<i>Perform Toxic indoors calculation</i>	No	No
<i>Indoor ventilation rate (/hour)</i>		
<i>Mixing height (m)</i>		
<i>Fraction of flammable cloud confined (-)</i>	0.08	0.08
<i>Use GAME overpressure method</i>	No	No
<i>Curve number</i>	10 (Detonation)	10 (Detonation)
<i>Game expansion type</i>		
<i>Volume Blockage Ratio (%)</i>		
<i>Flame path length (m)</i>		
<i>Typical obstacle diameter (m)</i>		
<i>Pressure lethality based on</i>	Pressure vs Lethality relation	Pressure vs Lethality relation
<i>Peak pressure total destruction (Indoors) (mbar)</i>	400	400
<i>Lethality total destruction (Indoors) (-)</i>	0.4	0.4
<i>Peak pressure indoors (glass) lethality (mbar)</i>		
<i>Lethality indoors (glass) (-)</i>		
<i>Pressure damage Probit A (((Pa)^n))</i>		
<i>Pressure damage Probit B</i>		
<i>Pressure damage Probit N</i>		
Results	Szen 2 Wohnblocks 3m OR 1800 1.5m	Szen 2 Wohnblocks 3m OR 8000 1.5m
<i>Initial mass in vessel (kg)</i>	58678	58678
<i>Initial (vapour) pressure in vessel (bar)</i>	5.888	5.888
<i>Time needed to empty vessel (s)</i>	1157	1157
<i>Pressure in vessel at end outflow (bar)</i>	0.952	0.952
<i>Temperature in vessel at end outflow (°C)</i>	-35.539	-35.539
<i>VapourMass fraction at end outflow (-)</i>	1	1
<i>Liquid mass in vessel at end outflow (kg)</i>	21412	21412

comp 3m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 3 von 5

Vapour mass in vessel at end outflow (kg)	139.52	139.52
Exit pressure at end outflow (bar)	0.952	0.952
Exit temperature at end outflow (°C)	-35.539	-35.539
Maximum mass flow rate (kg/s)	167.62	167.62
Representative release rate (kg/s)	164.74	164.74
Representative outflow duration (s)	225	225
Representative temperature (°C)	14.179	14.179
Corresponding pressure (bar)	5.8315	5.8315
Representative vapour mass fraction (-)	0	0
Adiabatic vapour flash fraction (-)	0.15528	0.15528
AFTER FLASHING AND RAINOUT: liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	164.74	164.74
Temperature jet/cloud (°C)	-34.03	-34.03
Diameter jet/cloud (m)	0.54673	0.54673
Nett mass flow rained out (kg/s)	0	0
Temperature of the pool (°C)	-34.03	-34.03
Density of the airborne mass (kg/m3)	17.544	17.544
Used Sauter Mean Diameter (micron)		
Heat flux from solar radiation (kW/m2)		
Time pool spreading ends (s)		
Time until pool has totally evaporated (s)		
Purple book representative evaporation rate (kg/s)		
Purple book representative evaporation duration (s)		
Representative temperature (°C)		
Representative pool diameter (m)		
Density after mixing with air (kg/m3)		
Total evaporated mass (kg)		
... duration evaporation time (s)		
Corresponding representative pool surface area (m2)		
Schmidt number used		
Equivalent diameter poolfire (m)		
Max Diameter top flame (length ellipse) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Calculated pool surface area (m2)		
Combustion rate (kg/s)		
Duration of the pool fire (s)		
Surface emissive power flame (kW/m2)		
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)		
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)		
Flame tilt (deg)		
Flame temperature (°C)		
Length of the flame (m)		
Height of clear fraction Flame (m)		
Weight ratio of HCL/chemical (%)		
Weight ratio of NO2/chemical (%)		
Weight ratio of SO2/chemical (%)		
Weight ratio of CO2/chemical (%)		
Weight ratio of H2O/chemical (%)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		
Atmospheric Transmissivity at Xd (%)		
Viewfactor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		
Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Type of flow of the jet		
Wind speed at avg. jet height (m/s)		
Exit velocity of expanding jet (m/s)		
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)		
Frustum lift off height (b) (m)		
Width of frustum base (W1) (m)		
Width of frustum tip (W2) (m)		
Length of frustum (flame) (Rl) (m)		
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW		
Surface area of frustum (m2)		
Surface emissive power (max) (kW/m2)		
Surface emissive power (actual) (kW/m2)		
Heat radiation at Xd (kW/m2)		
Atmospheric transmissivity at Xd (%)		
View factor at Xd (-)		
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)		
Percentage first degree burns at Xd (%)		

comp 3m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 4 von 5

Percentage second degree burns at Xd (%)		
Percentage third degree burns at Xd (%)		
Distance to clothing burning dose (m)		
Representative release rate (kg/s)	164.74	164.74
Representative outflow duration (s)	225	225
Density after mixing with air (kg/m3)	17.544	17.544
Temperature after release (°C)	-34.03	-34.03
Initial liquid mass fraction (-)	0.80823	0.80823
Flammability threshold concentration (mg/m3)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m2)		
Time t reported (s)		
Flammable mass at time t (kg)		
Area flammable cloud at time t (m2)		
Height to LFL at time t (m)		
Length of flammable cloud at time t (m)		
Width of flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and flammable cloud at time t (m)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)		
Effective release height (m)		
Threshold concentration used (mg/m3)	205.6	119.52
Dose at (Xd, Yd, Zd) (min*(mg/m3)^n)	7.5576E12	7.5796E12
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)	0.99975	0.99975
LC50 Human 30 min (mg/m3)	1115.6	1115.6
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)	0.031889	0.031889
Effective release height (m)	1.85	1.85
Flammability threshold concentration (mg/m3)		
Mixing height used (m)		
Maximum distance to flammable concentration (m)		
Maximum flammable mass (kg)		
Maximum area of flammable cloud (m2)		
Time T reported (s)		
Area flammable cloud at time t (m2)		
Offset between release and cloud centre at time t (m)		
Threshold concentration used (mg/m3)		
Mixing height used (m)		
Dose at (Xd, Yd, Zd) (min*(mg/m3)^n)		
Fraction of lethality at (Xd, Yd, Zd) (-)		
LC50 Human 30 min (mg/m3)		
Confined mass in explosive range (kg)		
Total combustion energy (MJ)		
Maximum peak overpressure (bar)		
<i>Game equivalent Curve nr (-)</i>		
<i>Laminar Burning Velocity used (m/s)</i>		
Peak overpressure at Xd (mbar)		
Peak dynamic pressure at Xd (mbar)		
Pressure impulse at Xd (Pa*s)		
Positive phase duration at Xd (ms)		
Blast-wave shape at Xd		
Damage (general description) at Xd		
Damage to brick houses at Xd		
Damage to typical American-style houses at Xd		
Damage to structures (empirical) at Xd		
Damage to windows (houses before 1975) at Xd (%)		
Damage to windows (houses after 1975) at Xd (%)		

	Szen 2	Szen 2
	Wohnblocks	Wohnblocks
	3m OR 1800	3m OR 8000
Concentration contours distance [m]		
1% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	1.5m	1.5m
50% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	6110	8643
99% Lethality Concentration outer contour (HGDT Outflow 8)	1941	2830
	560	849

	Szen 2	Szen 2
	Wohnblocks	Wohnblocks
	3m OR 1800	3m OR 8000
Lethality Contours distance [m]		
1 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	1.5m	1.5m
	5499	5677

comp 3m OR 1800 und 8000 1.5 report

Seite 5 von 5

50 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	1548	1549
99 % lethality contour (HGDT Outflow 8)	402	402
Sub model information		
Sub model LiqGasRel (1)	Liquefied Gas Bottom Discharge (TPDIS model) (Uninitialized)	
Sub model SprayRel (2)	Liquefied Gas Spray Release (Uninitialized)	
Sub model PoolEvap (3)	Pool evaporation model (Uninitialized)	
Sub model PoolFire (4)	Pool fire (Uninitialized)	
Sub model JetFire (5)	Jet Fire (Chamberlain model) (Uninitialized)	
Sub model Cumulate sources (6)	Cumulate Spray release and Poolevaporation source rates (Uninitialized)	
Sub model HGDE Outflow (7)	Dense Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)	
Sub model HGDT Outflow (8)	Dense gas release; toxic (Uninitialized)	
Sub model NGDE Outflow (9)	Neutral Gas Dispersion: Flammable Cloud (Uninitialized)	
Sub model NGDT Outflow (10)	Neutral Gas Dispersion: Toxic dose (Uninitialized)	
Sub model Expl ME (11)	Explosion (Multi Energy model) (Uninitialized)	

E 4 Vergleiche Chlorkonzentration

Abb. 117 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m Oberflächenrauigkeit

Vergleich Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von 205.6 mg/m^3 (1 % Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x=Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y= Höhe über Boden

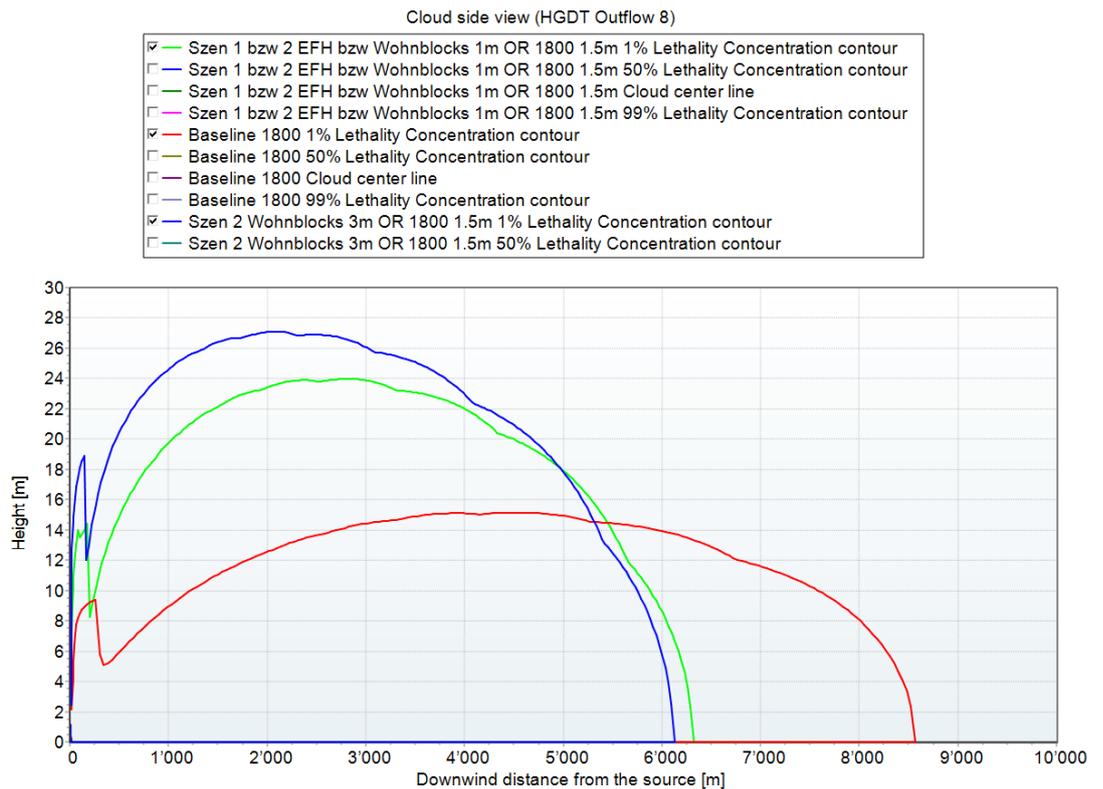


Abb. 118 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m
Oberflächenrauigkeit

Vergleich Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von $1'116 \text{ mg/m}^3$ (50 %
Letalität @ 1'800 s Expositionszeit), x =Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y =
Höhe über Boden

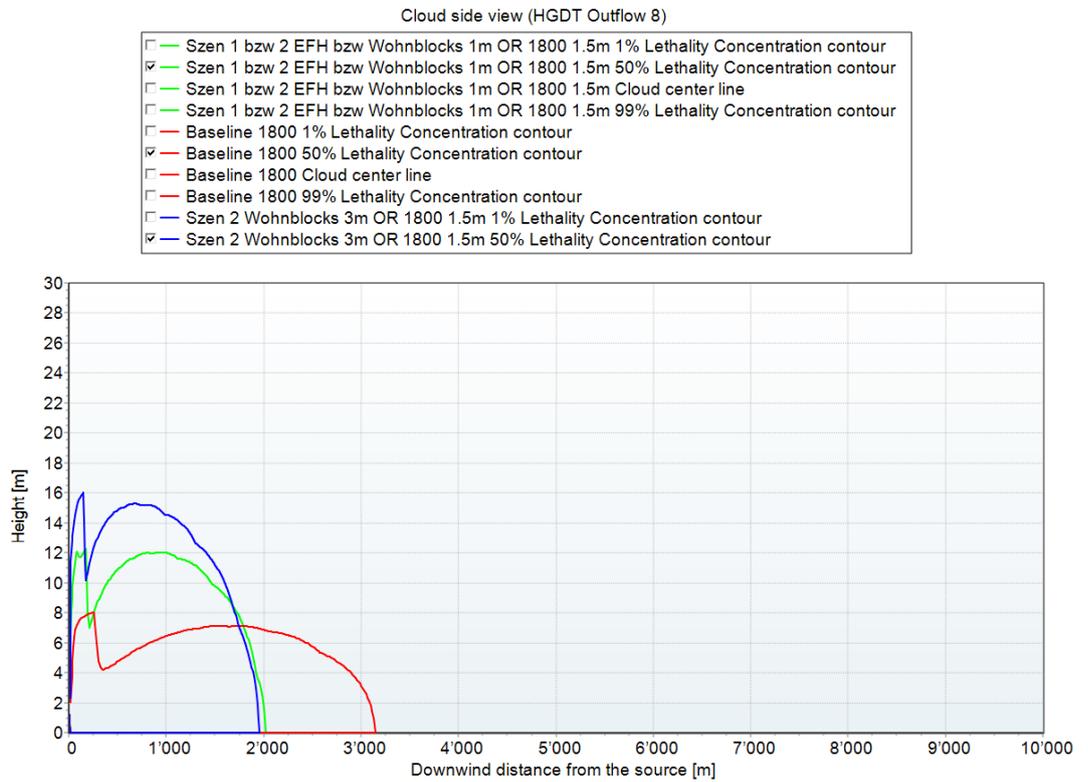


Abb. 119 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m
Oberflächenrauigkeit

Vergleich Isolinien in der Vertikalen für eine Chlorkonzentration von $6'061 \text{ mg/m}^3$ (99 %
Letalität @ 1800 s Expositionszeit), x=Distanz in Windrichtung von der Freisetzung, y=
Höhe über Boden

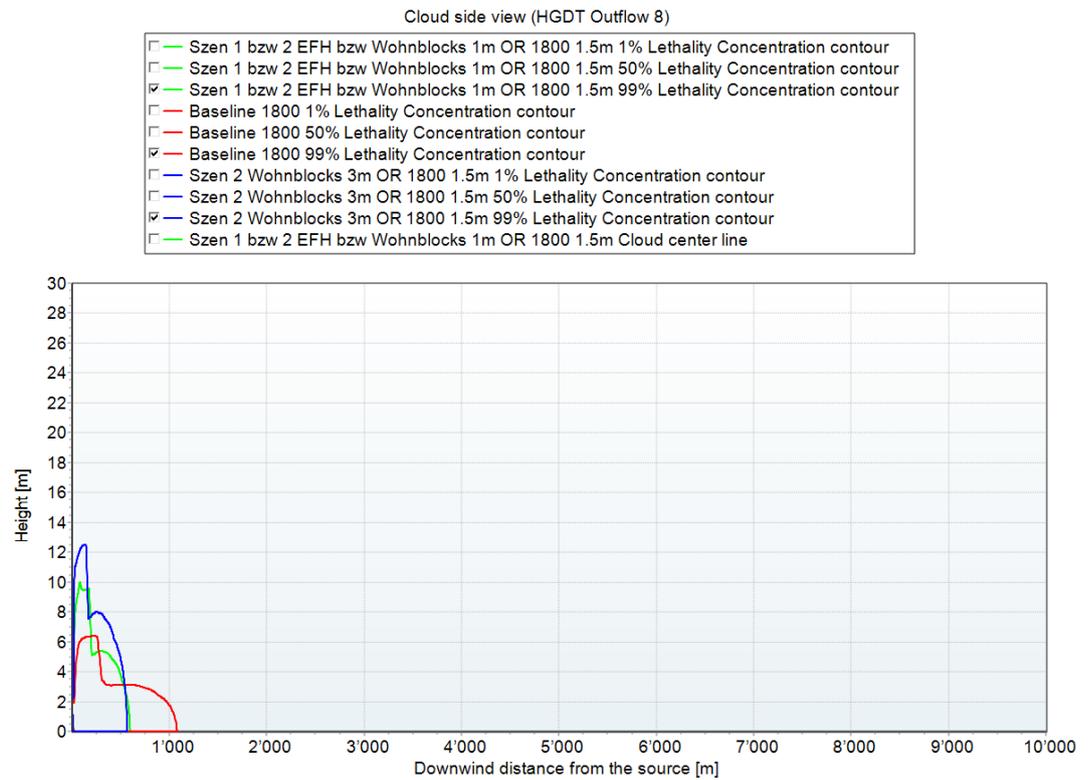


Abb. 120 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m
Oberflächenrauigkeit
Vergleich maximale Chlorkonzentration in Windrichtung 1.5 m über Boden

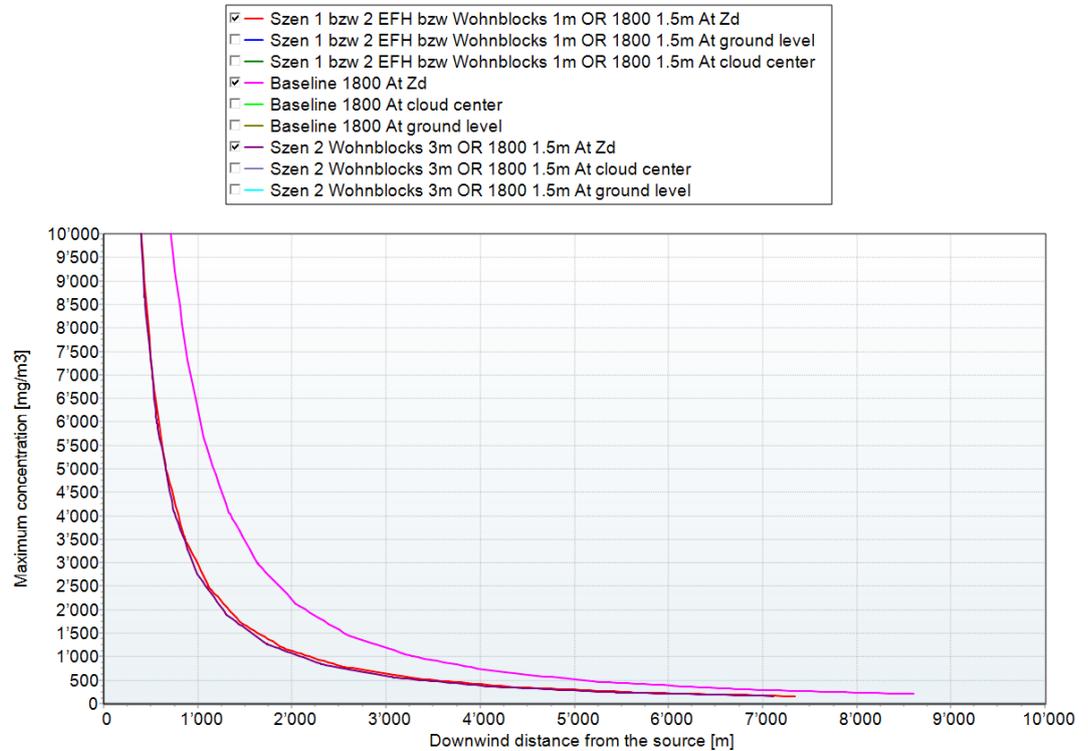


Abb. 121 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit
Vergleich zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 10 m, 20 m und
40 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden

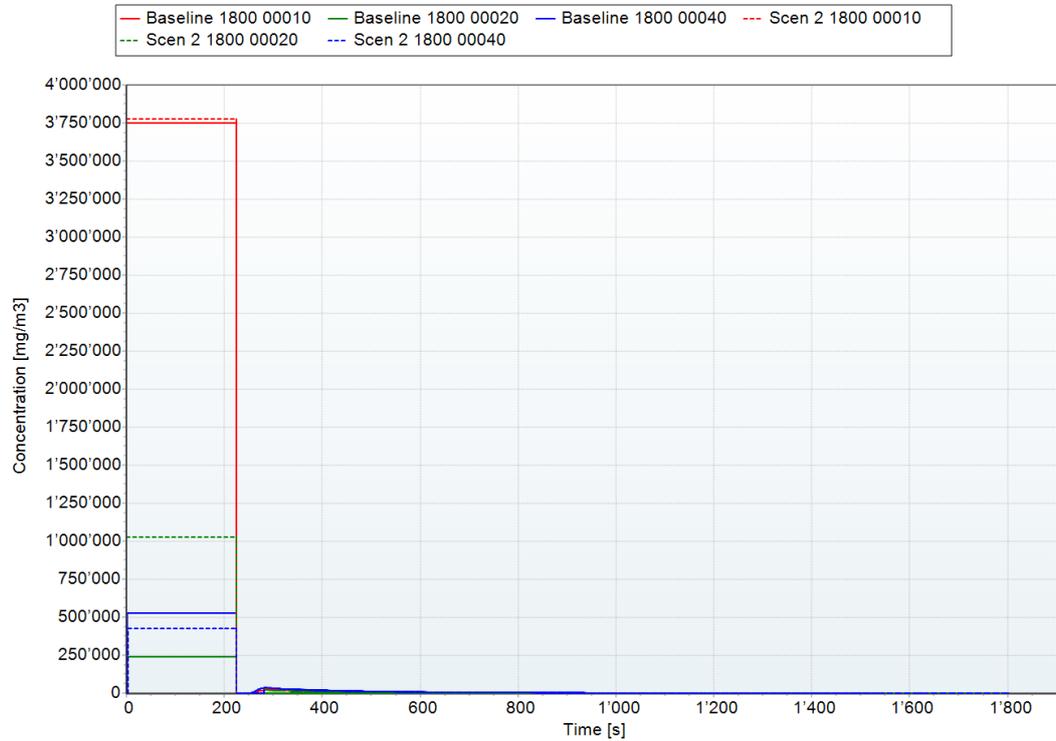
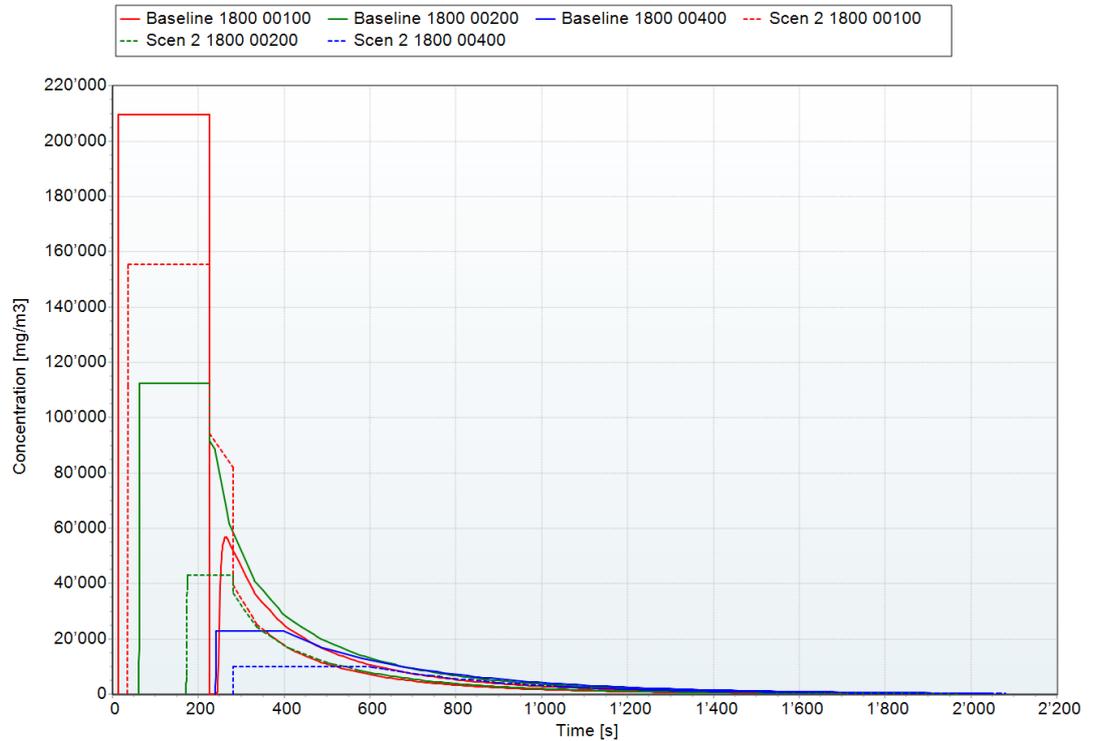
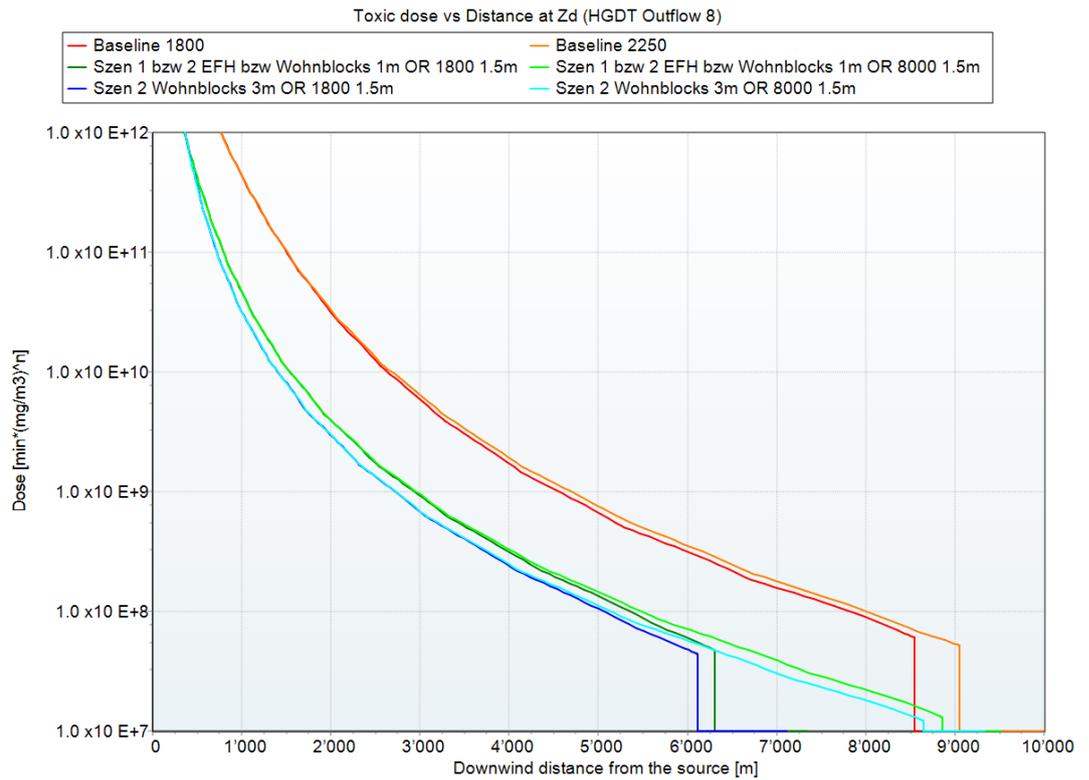


Abb. 122 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m Oberflächenrauigkeit
Vergleich zeitlicher Verlauf der Chlorkonzentration an einem Punkt in 100 m, 200 m und
400 m Abstand zur Freisetzung in Windrichtung 1.5 m über Boden



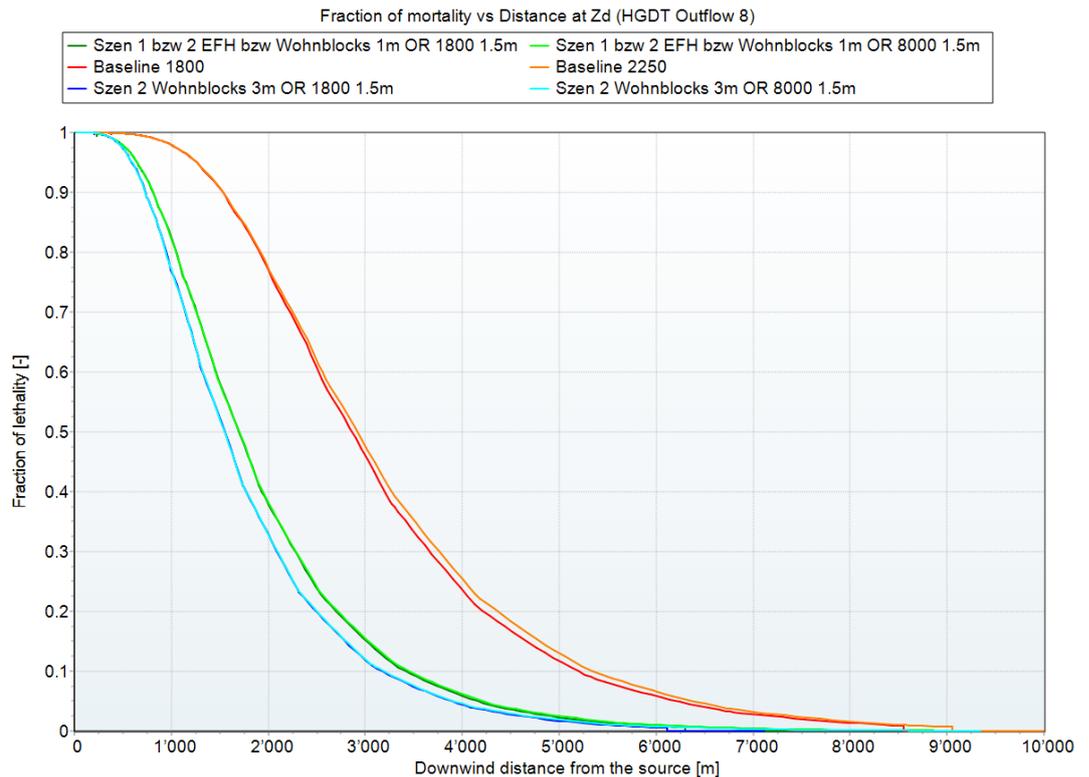
E 5 Vergleiche Toxische Dosis

Abb. 124 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m Oberflächenrauigkeit
Vergleich toxische Dosis in Windrichtung bei 1'800 s und 2'250 s bzw. 8'000 s
Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden



E 6 Vergleiche Letalität

Abb. 125 Szenario 0 "Baseline" und Szenario 2 "Wohnblocks" mit 1 m und 3 m Oberflächenrauigkeit
Vergleich Letalität in Windrichtung bei 1'800 s und 2'250 s bzw. 8'000 s Expositionszeit ab Ankunft der Gaswolke, 1.5 m über Boden



F Herleitung Bevölkerungsdichten zur Berechnung der Todesopferzahlen

F 1 Szenario 0 "Baseline"

In der Geometrie für Szenario 0 "Baseline" sind in den FLACS Rechnungen keine Gebäude vorhanden. Für die EFFECTS-Berechnungen wurde im Szenario 0 "Baseline" eine Oberflächenrauigkeit von 0.03 m verwendet. Dieser Wert entspricht z.B. offenem, flachem Grasland. In beiden Fällen ist somit keine Wohn- oder Arbeitsbevölkerung vorhanden. Um trotzdem einen Vergleich auf Basis einer Personenzahl zu ermöglichen, wird eine Wohnbevölkerungsdichte von ca. 0.02 Personen/ha verwendet, wie sie z.B. gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017, des Bundesamtes für Statistik stellenweise in der Plaine de l'Orbe im offenen, flachen Gelände südwestlich von Yverdon auftritt.

F 2 Szenario 1 "Einfamilienhäuser"

Die Bevölkerungsdichte wird auf Basis der FLACS-Geometrie geschätzt. Gemäss der Methodik für die Belegungsannahmen im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen wird pro Einfamilienhaus eine Wohnbevölkerung von 3 Personen angenommen. Arbeitsbevölkerung wird keine angenommen. Somit ergibt sich eine Wohnbevölkerungsdichte von ca. 40 Personen/ha.

Dieser Wert stimmt im Mittel gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017 etwa mit der Wohnbevölkerungsdichte des Einfamilienhausquartiers Bernastrasse in Wettingen überein.

F 3 Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung"

Die Bevölkerungsdichte wird auf Basis der FLACS-Geometrie geschätzt. Es wird bei den Wohnblocks von 6000 m² Bruttogeschossfläche ausgegangen (600 m² Grundfläche und 10 Stockwerke). Bei einem Wohnflächenbedarf von ca. 45 m² Nettogeschossfläche pro Person in städtischem Gebiet gemäss Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen ergibt sich eine Personenbelegung von ca. 120 Personen pro Wohnblock. Somit ergibt sich eine Wohnbevölkerungsdichte von ca. 450 Personen/ha.

Dieser Wert liegt gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017 deutlich über der Bevölkerungsdichte des Quartiers Wettingen Hardstrasse in Abb. 15, auch deutlich über derjenigen des Bereichs mit den zehnstöckigen Hochhäusern nördlich der Hardstrasse.

Hingegen entsprechen die ca. 450 Personen/ha im Mittel gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017 grob der Wohnbevölkerungsdichte dicht bebauter Gebiete z.B. entlang der Rue des Charmilles oder der Avenue Wendt in der Stadt Genf. Bei diesen Gebieten in der Stadt Genf handelt es sich oft um längere zusammenhängende Gebäudeformen als in der für die FLACS-Rechnung verwendeten Geometrie, oder um Blockrandbebauungen. Dies könnte in der Realität zu einem anderen Ausbreitungsverhalten als im Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" führen.

Gemäss Hektardaten der Statistik der Unternehmensstruktur (STATENT), Vollzeitäquivalente, Stand 2016, des Bundesamtes für Statistik kommen bei den Gebieten entlang der Rue des Charmilles oder der Avenue Wendt in der Stadt Genf noch im Mittel etwa 50, in Ausnahmefällen über 200 Arbeitsplätze pro Hektare hinzu. Der Einfachheit halber wird jedoch mit einer reinen Wohnbevölkerung mit 450 Personen/ha gerechnet.

F 4 Szenario 4 "Wohnblocks mit Lücken" und Szenario 5 "Wohnblocks mit Lücken und FLACS Freisetzungsmodellierung"

Die Abmessungen der Wohnblocks sind in der FLACS Geometrie bei den Szenarien 4 und 5 dieselben wie bei den Szenarien 2 und 3. Aufgrund der reduzierten Gebäudedichte ergibt sich ohne Berücksichtigung des Korridors und der grossen rechteckigen Freifläche eine Wohnbevölkerungsdichte von ca. 280 Personen/ha.

Dieser Wert beträgt gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017 etwa das Doppelte der Bevölkerungsdichte des Quartiers Wettingen Hardstrasse südlich der Hardstrasse in Abb. 15. Die Bevölkerungsdichte im Bereich nördlich der Hardstrasse mit den zehnstöckigen Hochhäusern liegt ebenfalls etwas unter den 280 Personen/ha.

Hingegen entsprechen die ca. 280 Personen/ha im Mittel gemäss Hektardaten der Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP), Stand 2017 grob der Wohnbevölkerungsdichte ebenfalls dicht bebauter Gebiete z.B. entlang der westlichen Rue de Saint-Jean in Genf oder entlang der östlichen Avenue de la Praille in Carouge. Auch bei diesen Gebieten in der Stadt Genf handelt es sich oft um längere zusammenhängende Gebäudekörper als in der für die FLACS-Rechnung verwendeten Geometrie. Dies könnte in der Realität zu einem anderen Ausbreitungsverhalten als im Szenario 2 "Wohnblocks" und Szenario 3 "Wohnblocks 10° Neigung" führen.

Auch hier kämen gemäss Hektardaten der Statistik der Unternehmensstruktur (STATENT), Vollzeitäquivalente, Stand 2016, des Bundesamtes für Statistik noch Arbeitsplätze, Schulen etc. hinzu. Der Einfachheit halber wird jedoch mit einer reinen Wohnbevölkerung mit 280 Personen/ha gerechnet.

G Import Swisstopo Daten

G 1 Technical Note Import of Topological Data Gexcon AS



TECHNICAL NOTE

Import of Topological Data

Date: 28.09.2020
Author: Helge Hestetraet
Project No.: 100586
Technical Note No.: 1

Checked by: Lillian Kråkmo

Approved by: Geirmund Vislie

The Swiss Federal Office of Transportation FOT is currently revising the Swiss standardized Risk-Screening and Risk-Assessment Method for rail transport of dangerous goods. Amongst others, Chlorine and Gasoline are used as reference substances in the risk assessments according to the Swiss standardized method. In the course of the revision, also the consequence models for these two substances should be updated. In addition to consequence calculations with standard integral models like those implemented in TNO EFFECTS, the FOT wishes that CFD calculations for more special cases be performed.

Suisseplan Ingenieure have approached Gexcon to prepare CFD dispersion simulations for a Chlorine release and optionally another example CFD dispersion and explosion simulation for a gasoline release from a rail tank

As a part of this project Gexcon have also tested the viability of importing 3D geometries from the Swiss Mapping Service. A number of different source formats for the data were tested, and the recommendation is to use;

Buildings from;
<https://shop.swisstopo.admin.ch/en/products/landscape/build3D2> in DXF format

Terrain from;
swissALTI3D https://shop.swisstopo.admin.ch/en/products/height_models/alti3D in the ESRI ASCII Grid format or Geotiff file format.

The building and terrain file must use the same coordinate system, such as UTM or LV95/LV03 coordinate systems.

Based on information from the technical trials, we do have some knowledge on the time needed for adaptation of data sets, so they become suitable for simulation. This will be priced on a case-to-case basis.

In august 2019 Gexcon was requested to test the data found in swissSURFACE3D. The conclusion is that we are not able to use this data.

G 2 Übersicht Swisstopo Daten

Variante CAD					
Produkt	Format	Stand	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
Terrain: DHM25-Basismodell	<ul style="list-style-type: none"> DXF ArcView Shapefiles <i>(Matrix Model:</i> <ul style="list-style-type: none"> ArcInfo ASCII Grid Format coordinate list with X, Y, Z DXF POLYFACE) 		Basismodell: vektorierte Höhenkurven Z-Werte scheinen korrekt gesetzt zu sein <i>(Matrix Modell: Höhenmatrix mit Maschenweite 25m, abgeleitet vom Basismodell)</i>	in CAD Format verfügbar	DHM25 enthält nur Terrain, keine Gebäude etc. D.h. zwei verschiedene Datensätze für Terrain und Gebäude, DHM25 und swissBUILDINGS3D 2.0, müssen kombiniert werden. Das DHM25 ist nicht das genaueste Terrainmodell, könnte im schlechtesten Fall dazu führen, dass "fliegende" Gebäude entstehen
Gebäude: swissBUILDINGS3D 2.0	<ul style="list-style-type: none"> ESRI File Geodatabase (MultiPatch Features) ESRI Shapefile (MultiPatch Features) DXF CityGML KML 	ganze CH		in CAD Format verfügbar	swissBUILDINGS3D 2.0 enthält nur Gebäude, kein Terrain etc. D.h. zwei verschiedene Datensätze für Terrain und Gebäude, DHM25 und swissBUILDINGS3D 2.0, müssen kombiniert werden.

Variante Höhenmatrix / Punktwolken etc.					
Produkt	Format	Stand	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
swissSURFACE3D	<ul style="list-style-type: none"> LAS 1.2 (Kachelgrösse = 1 km²) CSV 	noch nicht ganze CH, erst Waadt, Neuenburg und gesamte Nordostschweiz erhältlich Genf ist noch nicht erhältlich, aber spätestens für 2020 geplant	Punktwolken sehr genau enthält Boden, Gebäude, Bauten, Vegetation	sehr genau Gebäude und Vegetation klassifiziert und darum ausblendbar. Ev. unterschiedliche Behandlung von "porösen" Objekten wie Vegetation möglich	Daten erst ab 2023 CH-weit verfügbar
DOM	ROH: <ul style="list-style-type: none"> ASCII X,Y,Z single space GRID 2 m: <ul style="list-style-type: none"> ASCII X,Y,Z single space ESRI ASCII Grid 	ganze CH, Jahre 2000-2002	enthält Boden, Gebäude, Vegetation Basismodell ROH: Punktwolken GRID 2: vom ROH interpoliert, Maschenweite 2 m	sehr genau enthält Gebäude, Vegetation etc	Gebäude und Vegetation nicht klassifiziert und darum nicht ausblendbar
swissALTI3D	<ul style="list-style-type: none"> Geotiff ESRI ASCII Grid ESRI File Geodatabase 10.1 ASCII X,Y,Z single space Raster 2 m, 5 m oder 10 m		digitales Höhenmodell, enthält nur Terrain	sehr genau	enthält keine Daten zu Gebäuden oder Vegetation, darum kombinieren mit swissBUILDINGS3D 2.0 (3D-Objekte mit Gebäudehöhe)
DHM25 Matrix Model	Matrix Model: <ul style="list-style-type: none"> ArcInfo ASCII Grid Format coordinate list with X, Y, Z DXF POLYFACE 		Matrix Model: Höhenmatrix mit Maschenweite 25m, abgeleitet vom Basismodell		weniger genau als die anderen Modelle enthält keine Daten zu Gebäuden oder Vegetation, darum kombinieren mit swissBUILDINGS3D 2.0 (3D-Objekte mit Gebäudehöhe)

Ferner: topographisches Landschaftsmodell					
Produkt	Format	Stand	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
swissTLM3D	<ul style="list-style-type: none"> ESRI File Geodatabase 10.0 ESRI Shapefile (3D) DXF Interlis 1 / Interlis 2 		Datensatz mit Objekten, inkl. Gebäudefootprint, Einzelbäume, Baumreihen, Buschreihen, Fläche mit dichtem und Flächen mit lockerem Wald als Punkt-, Linien- und Flächenobjekte	ev. für Ergänzungen, z.B. Bäume, Baumreihen etc. verwendbar	

H Grundlagen und Literatur

BAV: Parameterliste für Simulation der Störfallszenarien, erhalten am 12.6.2018

EBP Schweiz AG (2018-04-26): Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen schweren Gasen, Studie im Auftrag des BAV, Zollikon

Emch +Berger AG (2017-07-13): Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten, Studie im Auftrag des BAV und des BAFU, Bern

Gexcon AS (2019-09-13): Dispersion analysis of chlorine release, Ref. No: Gexcon-19-F100586-RA-1 Rev. 02, Trondheim

Gexcon AS (2020-08-14): Dispersion analysis of chlorine release, Ref. No: Gexcon-20-F100586-RA-1 Rev. 03, Trondheim

Gexcon AS (2020-10-16): Dispersion analysis of chlorine release, Ref. No: Gexcon-20-F100586-RA-1 Rev. 04, Trondheim

Gexcon AS (2020-04-03): SUISSEPLAN Chlorine dispersion simulations, Results for Scenario 4

Gexcon AS (2020-04-08): SUISSEPLAN Chlorine dispersion simulations, Hazardous distances

Gexcon AS (2021-2-2): Scenario5-pdeath Rasterdaten Letalität Szenario 5

Gexcon AS (2021-2-19): Rasterdaten Letalität Szenarien 0, 1, 4 und 5

Gexcon AS (2016-05-27): FLACS v10.5 User's Manual

Irvings M. H. et al (2016): Evaluating vapor dispersion models for safety analysis of LNG facilities, Health&Safety Laboratory, NFPA Research Foundation

Kohout, Anrew Joseph (2011): Evaluation of Fire Dynamics Simulator for liquefied natural Gas Vapor Dispersion Hazards, University of Maryland

Koopman et al. (2012): Jack Rabbit Source Characterization Report, Final Report

Lettau, H. (Dept. of Meteorology, University of Wisconsin, Madison; 1969): Note on Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description, Journal of applied meteorology Vol. 8

Schweizerische Erdgaswirtschaft und suisseplan Ingenieure AG (2010): Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseseinschätzung und Risikoermittlung, 1.12.2010

suisseplan Ingenieure AG (2018-01-15): Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von brennbaren schweren Gasen, Studie im Auftrag des BAV, Zürich

U.S. Department of Transportation, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Final Decision petition for approval of FLACS (Version 9.1 Release 2) under 49 C.F.R. §§ 190.9 and 193.2059(a), PHMSA Docket No. 2011-0101 7.10.2011