



Risicoanalisten & Adviseurs
externe veiligheid + risicobeleid

Adviesgroep AVIV BV

Langestraat 11

7511 HA Enschede

info@aviv.nl

BLEVE-scenario bij verdiepte ligging en overkluizing - een literatuurverkenning

Project : 163055
Datum : 18 juli 2016
Auteur : R. Scheres
Review : J. Heitink
Status : Definitief

Opdrachtgever:

Omgevingsdienst Haaglanden
t.a.v. F. van der Meijden
Postbus 14060
2501 GB Den Haag

Pagina niet beschreven

Inhoudsopgave

Begrippenlijst	3
1 Inleiding.....	4
1.1 Vraagstelling	4
1.2 Leeswijzer	4
2 Typering Utrechtsebaan.....	6
3 BLEVE in de standaard risicoberekening	7
3.1 Rekenwijze in QRA transport.....	7
3.2 BLEVE: warmtestralingseffect	8
3.3 Schade bij een BLEVE.....	9
4 BLEVE aandachtsgebied	10
4.1 Criterium voor het bepalen van schillen (aandachtsgebieden).....	10
4.2 Het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl).....	10
4.2.1 Het groepsrisico	11
4.3 Aandachtsgebied BLEVE - warmtestraling.....	11
5 BLEVE in SAFETI-NL versie 8.1	12
6 Literatuurverkenning drukeffecten BLEVE	14
6.1 Inleiding	14
6.2 Vertrekpunt: TNO 1997	14
6.3 Literatuurverkenning	15
7 Conclusies en aanbevelingen	20
7.1 Drukschade	20
7.2 Schade door warmtestraling	22
7.2.1 Schaduwwerking eerstelijns bebouwing.....	23
7.3 BLEVE aandachtsgebied.....	25
7.4 Aanbevelingen	26
Referenties.....	27
Bijlage 1 Literatuurverkenning.....	30
Bijlage 2 Typering Utrechtsebaan	37
Bijlage 3 Gevelkenmerken per hectometer	45

Begrippenlijst

Begrip	Omschrijving
Adiabatisch	Zonder warmte uitwisseling met de omgeving
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion. Instantaan bezwijken van een drukvat gevuld met een tot vloeistof verdicht gas (dat zich derhalve boven het kookpunt bevindt).
Dampexpansie	Uitzetting van damp van de druk in het vat tot atmosferische druk.
Ductiele breuk	Materiaalbreuk waarbij energie wordt opgenomen in vervormen en vloeien van het materiaal. In tegenstelling tot brosse breuk.
Flashverdamping	Verdamping van een vloeistof bij een begintemperatuur boven het kookpunt, waarbij de voor de verdamping benodigde warmte wordt onttrokken aan de vloeistof zelf, zodat de temperatuur van de vloeistof daalt tot het kookpunt. Wanneer helemaal geen warmte uit de omgeving wordt gebruikt heet het proces adiabatisch.
Homogene nucleatietemperatuur	Metastabiele toestand van de vloeistof. De vloeistof is hierbij niet in evenwicht, maar oververhit: de vloeistoftemperatuur is hoger dan het kookpunt, maar dampbellen zijn er nog niet. Deze toestand kan ontstaan door het plotseling wegvallen van de druk, zoals bij het snel bezwijken van een drukvat. Een kleine verstoring, bv. vaste deeltjes of dampkerntjes in de vloeistof, leidt tot explosief koken om het vloeistof-gas evenwicht te herstellen. De homogene nucleatie temperatuur is de minimale temperatuur waarbij verdeeld over de gehele vloeistoffase zoveel kernen van dampbellen aanwezig zijn (m.a.w. de afwijking van het thermodynamisch evenwicht zo groot is), dat de verdamping explosief verloopt.
Isentropische expansie	Reversibel thermodynamisch proces waarbij de entropie niet toeneemt. Dit is een theoretisch proces waarbij de maximale arbeid door de uitzettende damp beschikbaar is om de omgevingslucht weg te drukken. Deze energie is ten hoogste beschikbaar voor een drukgolf door explosieve verdamping.
Kernkoken	Lokaal koken van de vloeistof rondom vaste deeltjes of niet condenseerbare gassen. Wanneer het temperatuurverschil tussen een oppervlak en de vloeistof groot genoeg is groeien de dampbellen aaneen en ontstaat filmkoken. Daarbij is er een damp laag tussen vloeistof en heet oppervlak.
Near field	Afstand tot waar de benadering van een dampexplosie door een equivalente hoeveelheid TNT een overschatting van de piekoverdruk geeft.
Overkapping	Lichte constructie die de weg overwelft
Overkluizing	Weg waarboven zich bouwwerken bevinden
Tunnel	Gesloten constructie met inwendige infrastructuur, langer dan 250 m
Verdiepte ligging	Weg onder maaiveld in open bak
Vloeistof entrainment	Meesleuring van vloeistof in een dampstroom

1 Inleiding

De Omgevingsdienst Haaglanden wenst de mogelijkheid te onderzoeken van een geconcretiseerd schillenmodel voor de Utrechtsebaan, met zijn specifieke omgevingskenmerken. Het eerste deel van het onderzoek betreft een literatuurverkenning naar de drukeffecten op bebouwing als gevolg van een BLEVE vanwege het bezwijken van een LPG-tankwagen op de Utrechtsebaan. Hierbij gaat het om gebouwen voor het langdurig verblijf van personen langs en over de weg (dus geen loodsen of bedrijfshallen, maar om draagconstructies uit staal of beton) alsmede om overkluizingen.

Het literatuuronderzoek richt zich op de effecten van de drukgolf van de BLEVE op de bebouwde omgeving. Voor de uitwerking van een BLEVE op de bestaande bebouwde omgeving langs de Utrechtsebaan maakt het uit op welk punt van deze weg het ongeval gebeurt. Dit vanwege de viaducten, overkluizingen en hoogbouw langs de weg. Ook het soort van hoge gebouwen is in principe verschillend kwetsbaar voor de drukgolf. Bouweisen in de huidige bouwnormen houden alleen rekening met drukbelasting door explosies die in gebouwen kunnen ontstaan (bv. door gaslekkages), zie Breedveld 2016.

Het literatuuronderzoek wordt afgerond met een zelfstandig leesbaar rapport. Een belangrijk resultaat van het onderzoek zijn de te onderbouwen conclusies die van belang zijn voor de uitwerking van het schillenmodel van de Utrechtsebaan.

Bij het literatuuronderzoek zal ook worden nagegaan hoe de schade door warmtestralingseffecten van de BLEVE zich verhouden tot de schade door de drukgolfeffecten. De uitwerking van deze effecten op de omgeving zal afhankelijk zijn van de omgevingskenmerken ter plaatse van de explosie van de LPG-tankwagen (overkluizing, viaduct, verdiepte ligging weg, gebouwen direct langs de weg). Nagegaan zal worden welke kennis in de literatuur hierover beschikbaar is. Modellen die de voortplanting van de drukgolven (en vuurzee) bij een BLEVE in een (lange) tunnel beschrijven zijn uit de literatuur bekend. Echter, uit de literatuurstudie moet naar voren komen in hoeverre die zich laten vertalen naar de situaties die bij de Utrechtsebaan aangetroffen worden.

De aanpak van de literatuurstudie vindt gestructureerd plaats. Begonnen wordt met een typering van de Utrechtsebaan in enkele duidelijk te onderscheiden omgevingen op grond van de kenmerken die op voorhand van belang lijken voor verschillen in de optredende effecten van een BLEVE-scenario.

1.1 Vraagstelling

De hoofdvraag van deze literatuurverkenning is:

Welke schade ontstaat door de drukeffecten als gevolg van een BLEVE van een tankwagen met vloeibaar gas aan de bebouwing langs en boven de Utrechtsebaan?

Om bovenstaande vraag goed te kunnen beantwoorden zijn de volgende subvragen relevant.

- a. Is er een wezenlijk verschil van drukeffecten op gebouwen langs een open weg, een verdiepte weg en een overkluizing?
- b. Hebben gebouwen dichtbij het ongeval (eerstelijnsbebouwing) een mitigerend effect op dodelijke slachtoffers als gevolg van een drukeffect in gebouwen daarachter (tweedelijnsbebouwing)?
- c. Hoe verhouden de warmtestralingseffecten van een BLEVE zich tot de drukeffecten?

1.2 Leeswijzer

De literatuurstudie richt zich op het fenomeen BLEVE en de effecten die een BLEVE kan hebben op de omgeving. We proberen met behulp van literatuur te zoeken naar antwoorden op de vraag welke

fysische effecten een BLEVE kan hebben en welke schade die te weeg kunnen brengen aan verdiept liggende wegen en overkluizingen, specifiek de Utrechtsebaan in Den Haag.

Deze studie is opgebouwd in 4 onderdelen:

1. BLEVE in de standaard risicoberekening
2. Het BLEVE aandachtsgebied (modernisering omgevingsveiligheidsbeleid)
3. BLEVE in SAFETI-NL versie 8.1 (nieuwe inzichten)
4. BLEVE drukeffecten in de literatuur.

Tot slot geven we zo volledig mogelijk antwoord op de vraagstelling.

2 Typering Utrechtsebaan

De Utrechtsebaan is een onderdeel van de A12 gelegen in Den Haag. Het is het westelijkste deel van de autosnelweg en omvat 4,7 kilometer vanaf de S101 in Den Haag tot aan het knooppunt Prins Clausplein. De grotendeels verdiept gelegen snelweg wordt gekenmerkt door het grote aantal overkluizingen; diverse gebouwen zijn op of over de weg gebouwd [wegenwiki.nl]. Prominente gebouwen zijn de Malietoren en de Haagse Poort. Het gedeelte van de Utrechtsebaan dat verdiept en overkluist is beslaat een lengte van ongeveer 1,2 km, zie figuur 1. In bijlage 2 kunt u een uitgebreide beschrijving van de Utrechtsebaan lezen.

Nr	Open/dicht/straat/gebouw	Lengte (m)
1	Von Geusaustraat (RDM: 83028: 454710)	10
2	Open	12
3	Spoor	45
4	Open	45
5	Haagse Poort	15
6	Open	53
7a	Rotonde Schenkkade	27
7b	Opening in rotonde	27
7c	Rotonde schenkkade	24
8	Open	175
9	Regus gebouw	65
10	Open	240
11	Prins Bernhard Viaduct	70
12	Open	105
13	Gebouw ('Gispen')	48
14	Open	180
15	Malietoren (RDM: 82263: 455662)	110
	TOTAAL DICT	414
	TOTAAL OPEN	837
	Totale lengte wegdeel	1251



Figuur 1. Utrechtsebaan vanaf Von Geusaustraat (1) tot en met de Malietoren (15)

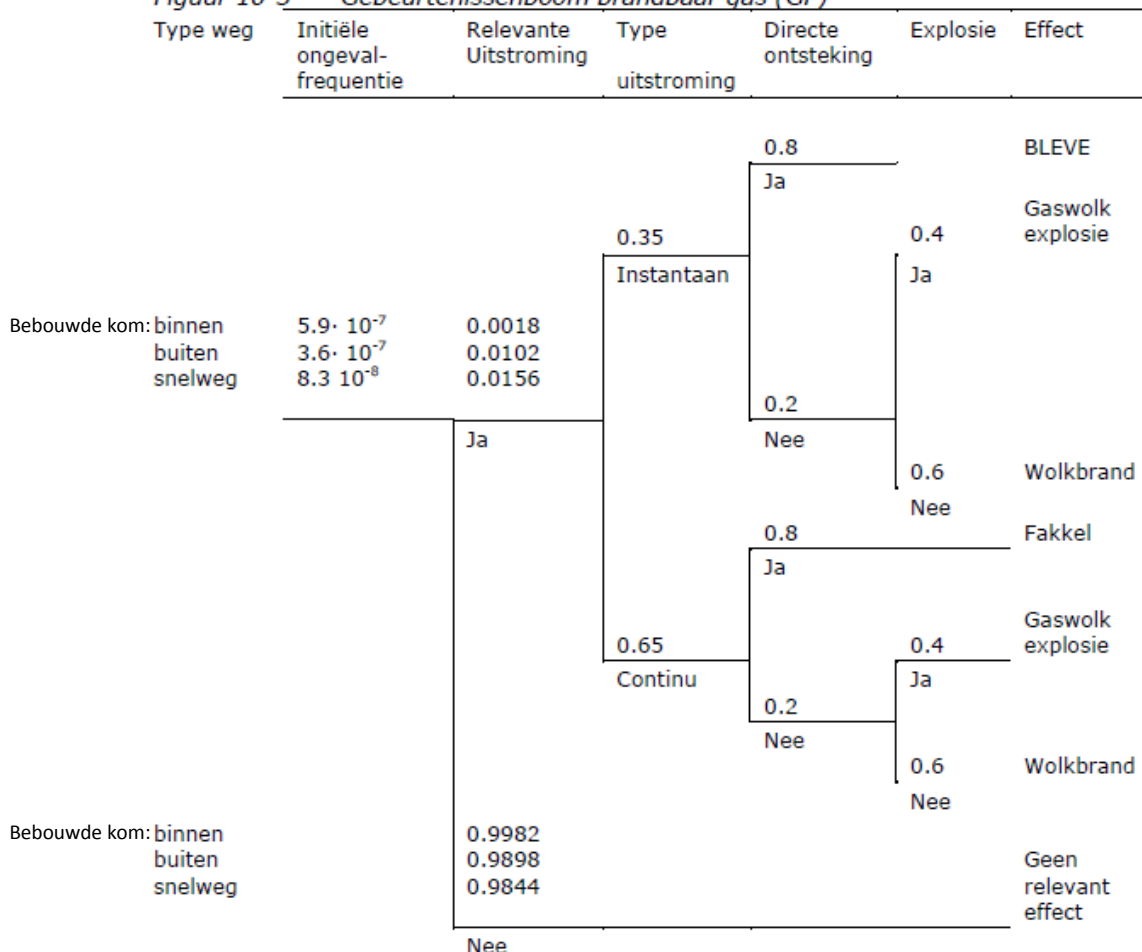
3 BLEVE in de standaard risicoberekening

3.1 Rekenwijze in QRA transport

De rekenwijze die moet worden gevolgd voor een risicoanalyse van het transport van gevaarlijke stoffen over de weg is vastgelegd in de Regeling Basisnet. De rekenmethodiek transportrisico's bestaat uit het softwareprogramma RBM II (AVIV 2011) en de Handleiding Risicoanalyse Transport (HART) versie 1 (Rijkswaterstaat 2015).

Het BLEVE-scenario is een ontwikkeling in het scenario instantaan vrijkomen van de inhoud van een tankwagen met een tot vloeistof verdicht brandbaar gas. De gebeurtenissenboom wordt hieronder getoond (figuur 2). Door een verkeersongeval scheurt de tank open en komt de inhoud instantaan vrij. Het risico bij directe ontsteking wordt berekend door de warmtestraling van een vuurbal als functie van de afstand te berekenen. Bij vertraagde ontsteking kan een afdrijvende wolk ontstaan die bij ontsteking alsnog tot een explosieve verbranding kan leiden. Deze laatste ontwikkeling is hier echter geen onderwerp van onderzoek.

Figuur 10-3 Gebeurtenissenboom brandbaar gas (GF)



Figuur 2. Gebeurtenissenboom tankwagen tot vloeistof verdicht brandbaar gas (HART)

Het is van belang om op te merken dat het beschouwde faalmechanisme in een QRA het instantaan bezwijken van de tank is in de toestand zoals tijdens het transport het geval is. Voor LPG betekent dit een tankwagen gevuld met 25 ton propaan bij een druk van 6.1 bara. Hiervan draagt 17928 kg (2.7 maal de flashfractie) bij aan de vuurbal. Opwarming van de tank door een (voertuig)brand die de druk bij bezwijken zou kunnen verhogen, wordt in de voorgeschreven rekenwijze niet beschouwd. De

massa LPG in de tankwagen is een vaste waarde in het rekenmodel. In de praktijk vindt zowel transport van LPG als propaan plaats. Tankwagens met propaan hebben veelal een kleinere inhoud. RBM II is toepasbaar voor normale wegconstructies. Specifieke wegconstructies zoals tunnels, verdiepte ligging, overkappingen en geluidsbeschermende voorzieningen kunnen aanleiding geven tot een ander risicobeeld en zijn niet te modelleren in RBM II. HART geeft voor deze situaties een praktische workaroud (HART par. 5.2.7). De tekst hiervan luidt:

“Een gesloten tunnel is een bijzondere situatie omdat de tunnel een afschermende werking heeft en de effecten van sommige uitstromingen in de tunnel zich door de tunnel zullen verplaatsen en bij de tunnelmonden naar buiten zullen komen. De risico's zullen daardoor ter hoogte van (naast) de tunnel lager kunnen zijn en bij/in verlengde van de tunnelmonden hoger.

Onder tunnels worden in dit hoofdstuk verstaan: constructies, zoals gedefinieerd in de Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels (Warvw, 2013), en de vergelijkbare constructies voor spoor, beiden met de minimale lengte van 250 meter. Dit geldt alleen voor geheel gesloten constructies langer dan 250 meter (dus zonder bij voorbeeld ventilatieopeningen en dergelijke). Voor de constructies, die niet voldoen aan de bovengenoemde beschrijving is de hieronder voorgestelde werkwijze niet van toepassing.

Door TNO is onderzoek uitgevoerd naar de effecten van ongevallen van gevaarlijke stoffen in tunnels op de omgeving [17]. Vervolgens is door AVIV in een consequentieonderzoek de bijdrage aan de EV-risico's onderzocht [18]. Uit deze analyse blijkt dat de extra risico's ten gevolge brandbare gassen (en brandbare vloeistoffen) ter hoogte van de tunnel en bij de tunnelmonden te verwaarlozen zijn.

In deze handleiding wordt de volgende werkwijze voorgesteld voor de tunnels, die voldoen aan de bovengenoemde beschrijving:

- 1. Zet in de berekening het aantal transporten in het tunneldeel op 0.*
- 2. Voor de brandbare vloeistoffen en gassen kunnen effecten bij de tunnelmonden worden verwaarloosd.*
- 3. Bij vervoer van de grote hoeveelheden van toxische stoffen is maatwerk noodzakelijk. Op dit moment voorziet HART en ook het RBMII-pakket niet in, omdat het inzicht daarvoor thans ontbreekt. In overleg met het RIVM zal onderzocht worden in hoeverre een kwantitatieve benadering nodig c.q. mogelijk is.*

Voor de lichtere constructies, zoals overkappingen bij spoor, of andere constructies en tunnels, die niet voldoen aan de bovengenoemde definitie van een tunnel zijn de effecten voor de omgeving niet te verwaarlozen. Daarom moeten deze worden berekend als open weg.”

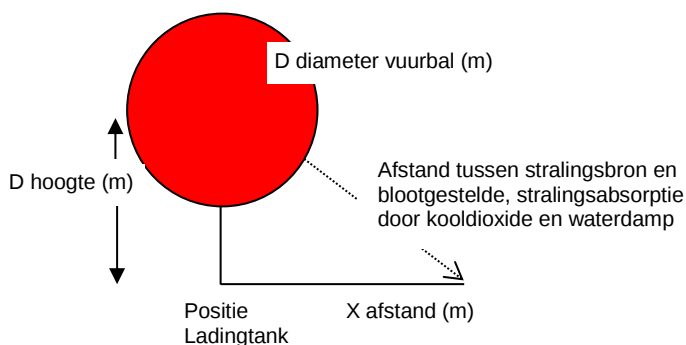
Kortom: overkluizingen en wegen die verdiept liggen, zoals het beschouwde deel van de Utrechtsebaan, kunnen in het kader van de voorgeschreven risicoberekening met RBM II doorgerekend worden als ware het een open weg. De gesloten wegdelen zijn alle korter dan 250 m (zie figuur 1).

3.2 BLEVE: warmtestralingseffect

Een BLEVE treedt op wanneer een vat, met onder druk tot vloeistof verdicht gas, in één keer volledig bezwijkt. Er ontstaat dan een snel expanderende wolk van damp en vloeistofdruppeltjes. De dampexpansie en explosieve verdamping kunnen een schokgolf veroorzaken. Bij onmiddellijke ontsteking ontstaat een vuurbal.

In RBM II wordt alleen het risicobepalende warmtestralingseffect beschouwd. Hiertoe wordt een vuurbalmodel gebruikt. Andere effecten van een BLEVE als overdruk, gevaarlijke fragmenten, rook en giftige bijproducten worden door RBM II niet gemodelleerd. RBM II richt zich op de warmtestraling omdat het gebied waar mensen mogelijk overlijden door dit effect groter is dan het gebied waar mensen mogelijk overlijden door het overdrukeffect. Bij de berekening van de warmtestraling van de

vuurbal wordt een bolvormige warmtestraler met constante straal R verondersteld die gedurende een effectieve brandduur warmte uitstraalt. Het centrum van de vuurbal bevindt zich op een hoogte gelijk aan de vuurbaldiameter ($h=D=2R$) [AVIV 2011]. Voor de standaard propaan tankwagen is de diameter van de vuurbal ca. 160 m, de brandtijd 10.9 seconden, de stralingssterkte (Surface Emissive Power (SEP) gelijk aan 212.2 kW/m^2 . Het centrum van de vuurbal bevindt zich derhalve op een hoogte van 160 m. Het model is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3. Schematische weergave vuurbalmodel RBM II

3.3 Schade bij een BLEVE

Voor de schade door warmtestraling geldt dat 100% van de aanwezigen binnen de directe brand (de vuurbal op grondniveau) of binnen de contour van 35 kW/m^2 zal overlijden. Dit geldt zowel voor aanwezigen in de buitenlucht als binnen gebouwen. Buiten de vuurbalstraal of de contour van 35 kW/m^2 vallen er alleen slachtoffers onder personen die zich buiten gebouwen bevinden. Voor de berekening van het groepsrisico wordt de overlijdenskans vermenigvuldigd met een factor 0.14 om de beschermende werking van kleding tot uiting te brengen. Bij een BLEVE wordt de blootstellingstijd gelijk gesteld aan de brandtijd van de vuurbal met een maximum van 20 seconden (Rijkswaterstaat 2015).

De argumentatie om in de risicoberekening het schade-effect van een BLEVE te beperken tot de warmtestraling is al opgenomen in PGS 3 1999 (Ministerie SZW 1999).

- De warmtestralingscontour van 35 kW/m^2 is groter of van vergelijkbare omvang als die voor 0.1 bar overdruk van de invallende schokgolf ten gevolge van de explosie van het drukvat. Bij een warmtestraling groter dan 35 kW/m^2 wordt verondersteld dat geveldelen of gevelbekleding vlam vatten en het gebouw afbrandt. Binnen die contour overlijden alle aanwezigen, binnen zowel als buiten.
- Door het drukeffect vallen buiten 0.1 bar overdruk geen dodelijke slachtoffers. Binnen die contour, tussen 0.3 bar en 0.1 bar overdruk wordt gerekend met een overlijdenskans van 2.5% voor personen die binnen verblijven ten gevolge van glasfragmenten. Binnen 0.3 bar wordt instorten van een gebouw en overlijden van alle aanwezigen verondersteld.
- De schade door warmtestraling omvat derhalve ruim de schade door drukeffecten.

4 BLEVE aandachtsgebied

Het afgelopen jaar en de komende jaren wordt het omgevingsveiligheidsbeleid gemoderniseerd. Deze modernisering kan enkele belangrijke veranderingen met zich meebrengen. Eén van de belangrijkste veranderingen lijkt de introductie van het schillenmodel. In dit model worden voor verschillende ongevalsscenario's verschillende schillen rond een risicobron (gerelateerd aan de effecten van de scenario's) aangewezen als aandachtsgebieden. De drie hoofdschillen zijn:

- Brand
- Explosie
- Toxisch

Binnen deze aandachtsgebieden zijn voorschriften van toepassing op verschillende typen bebouwing. De structuur van de wet is: een verbod op een bepaald bebouwingstype, tenzij door maatregelen letale effecten niet mogelijk zijn of de kans erop verwaarloosbaar klein is.

4.1 Criterium voor het bepalen van schillen (aandachtsgebieden)

Het belangrijkste criterium voor de keuze van de schillen (ook wel aandachtsgebieden) is of een scenario kan leiden tot het in brand zetten of laten instorten van huizen en andere gebouwen. Als een scenario bijvoorbeeld niet een brandend huis tot gevolg heeft, zijn mensen binnenshuis veilig. Elke schil geeft aan of een gebouw voldoende bescherming biedt aan de mensen.

De aandachtsgebieden bij de weg worden geprojecteerd als parallel aan de weg gelegen lijnen die overeenkomen met effecten van ongevalsscenario's (brand, explosie of toxisch) op de weg.

4.2 Het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)

In het Ontwerpbesluit Kwaliteit Leefomgeving (1 juli 2016) zijn in artikel 5.11 de aandachtsgebieden gedefinieerd en afstandseisen met afwijkingsmogelijkheid geformuleerd voor zeer kwetsbare objecten. Dit zijn kort gezegd objecten waarin minder zelfredzame personen verblijven.

Artikel 5.11 (aandachtsgebieden voor veiligheidsrisico's: categorieën)

1. Een brandaandachtsgebied wordt begrensd door de afstand waar de warmtestraling ten hoogste 10 kW/m² is als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval met een plasbrand, een fakkelbrand of een wolkbrand.....

3. Een explosieaandachtsgebied wordt begrensd door de afstand waar als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval met:

- a. een Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) de warmtebelasting ten hoogste 35 kW/m² is, en*
- b. een explosie, anders dan onder a, de overdruk ten hoogste 10 kPa is.*

4. Een gifwolkaandachtsgebied wordt begrensd door de afstand waar ten hoogste 10% van de personen in een gebouw door blootstelling van ten hoogste 30 minuten overlijdt als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval met:

- a. een stof die is ingedeeld in gevarenklasse 6.1 van het ADR, her RID of de ADN, of*
- b. een stof die in de gevarencategorie acute toxiciteit, categorieën 1, 2, 3, 4, of als bedoeld in bijlage I, deel 3, bij de CLP-verordening*

Artikel 5.13 (aandachtsgebieden voor veiligheidsrisico's: bouwvoorschriftengebieden)

11. In een omgevingsplan wordt:

- a. een brandaandachtsgebied aangewezen als brandvoorschriftengebied, en
- b. een explosieaandachtsgebied aangewezen als explosievoorschriftengebied.

2. In afwijking van het eerste lid kan in een omgevingsplan een kleiner of geen voorschriftengebied worden aangewezen. De eerste zin is niet van toepassing op brandaandachtsgebieden om het basisnet.

4.2.1 Het groepsrisico

In artikel 5.15 wordt omschreven hoe de wetgever deze aandachtsgebieden gekoppeld aan specifieke voorschriften voor de vestiging of uitvoering van gebouwen wil inzetten voor de beheersing van het groepsrisico.

Artikel 5.15 (aandachtsgebieden voor veiligheidsrisico's: (beperkt) kwetsbare gebouwen en locaties)

1. In een omgevingsplan wordt voor beperkt kwetsbare gebouwen en locaties binnen een brandaandachtsgebied, een explosieaandachtsgebied en een gifwolkaandachtsgebied rekening gehouden met de kans op het overlijden van tien of meer personen per jaar als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval veroorzaakt door een activiteit met externe veiligheidsrisico's of complexe externe veiligheidsrisico's.

2. Aan het eerste lid wordt in ieder geval voldaan als binnen het aandachtsgebied:

- a. geen beperkt kwetsbare en kwetsbare gebouwen of locaties worden toegelaten,
- b. de kans per jaar op een ongewoon voorval of op het overlijden van een persoon in beperkt kwetsbare en kwetsbare gebouwen als rechtstreek gevolg van een ongewoon voorval verwaarloosbaar is, of
- c. op de locatie waar beperkt kwetsbare of kwetsbare gebouwen of locaties worden toegelaten het gemiddelde aantal aanwezige personen wordt beperkt.

4.3 Aandachtsgebied BLEVE - warmtestraling

In deze verkenning staat het scenario 'BLEVE' centraal. Het aandachtsgebied dat volgens het Bkl hierbij hoort is het explosieaandachtsgebied. Dit gebied wordt begrensd door de *warmtestralingscontour* van 35 kW/m². Overdruk ten gevolge van de BLEVE speelt hierbij geen bepalende rol.

In deze benadering van de wetgever is het dus de vraag in welke mate een verdiepte ligging en/of een overkluizing invloed heeft op de nadelige effecten van warmtestraling ten gevolge van een BLEVE. Een eventuele reductie van de effectafstand heeft dan invloed op de vestigingsmogelijkheden van zeer kwetsbare objecten en het type en de uitvoering van gebouwen in verband met het groepsrisico.

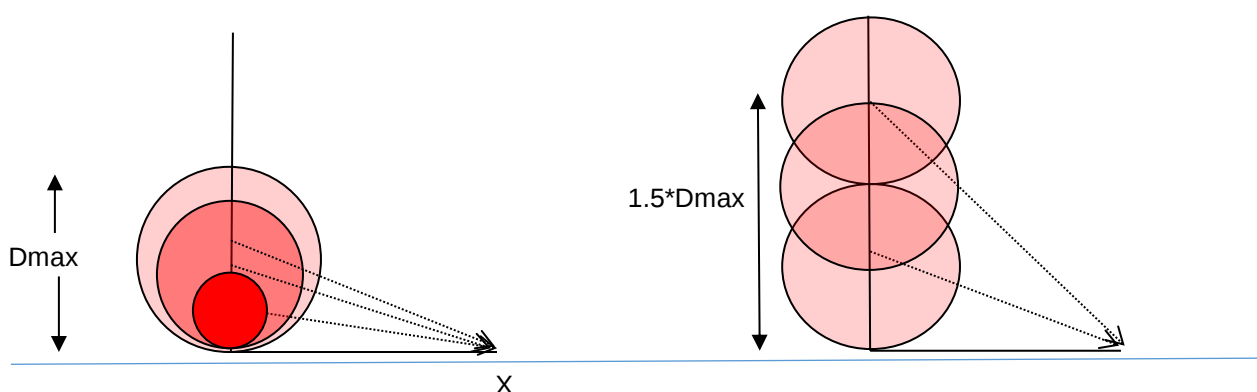
Afmeting van het BLEVE-aandachtsgebied

In bijlage VIIa van het Ontwerpbesluit Kwaliteit Leefomgeving is voor het explosieaandachtsgebied (BLEVE) een afstand van 200 meter bepaald.

5 BLEVE in SAFETI-NL versie 8.1

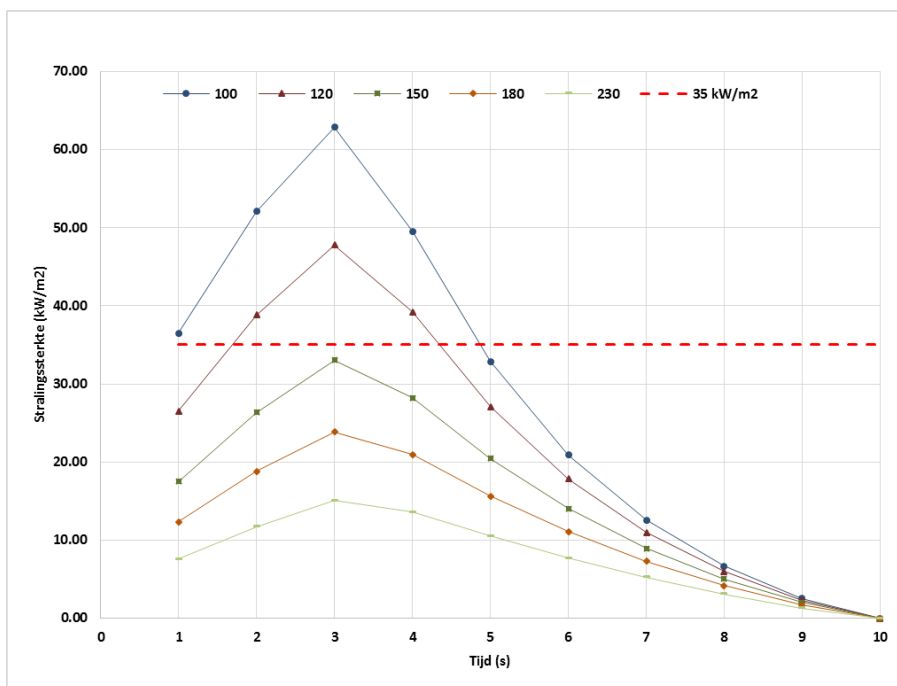
In de loop van 2017 is voorzien dat een nieuwe versie van Safeti-nl in de regelgeving zal worden opgenomen (waarschijnlijk versie 8.1). In die nieuwe versie zal een ander vuurbalmodel voor een BLEVE worden gebruikt, het model van Martinsen en Marx (M&M). Hoewel dit in eerste instantie geen betrekking heeft op de risico's van wegtransport (die immers met RBM II worden berekend), wordt het model hier toch kort toegelicht.

Het model van M&M houdt rekening met de variatie van de grootte en de stralingssterkte van de vuurbal gedurende de brandtijd. In de eerste periode, de eerste 33% van de brandtijd, ligt de vuurbal op de grond en groeit in diameter. Na 33% van de brandtijd stijgt de vuurbal met gelijkblijvende diameter op en neemt de stralingssterkte lineair af naar 0. Figuur 4 geeft het model schematisch weer.

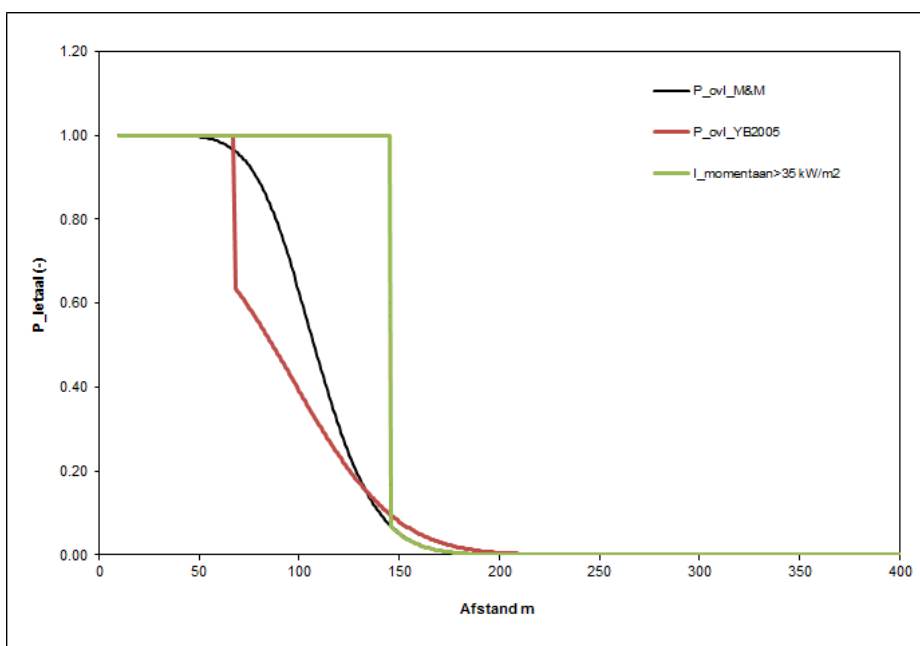


Figuur 4 Schematische weergave vuurbalmodel M&M, eerste 33% brandtijd (links), overige tijd (rechts)

Omdat de beschrijving van de vuurbal dynamisch is, is ook de warmtestraling op een bepaalde plaats in de tijd variabel. Figuur 5 geeft wat voorbeelden voor verschillende afstanden bij een BLEVE gedurende transport van een standaard LPG tankwagen. Te zien is dat tot op zekere afstand de warmtestraling een deel van de brandtijd groter is dan 35 kW/m^2 en een deel van de brandtijd kleiner. In de handleiding risicoberekeningen Bevi (RIVM 2015) is nu voorgeschreven dat elke stralingsbelasting groter dan 35 kW/m^2 100% overlijden impliceert, ongeacht de blootstellingsduur. Figuur 6 laat zien dat het ongewijzigd laten van het schadecriterium zou leiden tot een fors grotere afstand voor 100% overlijden (de afstand tot waarop de warmtestralingsintensiteit op enig moment groter is dan 35 kW/m^2). Het is nog niet bekend of en hoe het schade criterium voor warmtestraling zal worden geherformuleerd. Wel is te zien dat de schade-afstanden voor warmtestraling naar verwachting niet kleiner zullen worden.



Figuur 5. Verloop stralingsintensiteit op verschillende afstanden in de tijd, M&M model



Figuur 6. Kans op overlijden als functie van de afstand bij een BLEVE van een propaan tankwagen, huidig model, M&M model en 35 kW/m² momentaan

6 Literatuurverkenning drukeffecten BLEVE

6.1 Inleiding

Een BLEVE doet schade in de omgeving op een aantal manieren:

- Door druk-effecten ontstaat schade aan constructies, gevels, daken. Met name glasoppervlakken zijn kwetsbaar hiervoor en veroorzaken door scherfwerking gewonden.
- Door drukeffecten kan op relatief korte afstand lichamelijk letsel ontstaan van meesleuring (vallen), longschade tot trommelvliesbreuk.
- Door de uitworp van fragmenten (delen van tank en voertuig) ontstaat op potentieel grote afstand zeer lokaal schade door inslag van de fragmenten.
- Bij ontsteking ontstaat schade door de warmtestraling van een vuurbal aan gevels en daken. Glasoppervlakken zijn kwetsbaar. Direct achter het glas kan brand ontstaan, ook als het glas zelf intact blijft. Een vuistregel is dat tweederde van de invallende stralingssterkte wordt doorgelaten (IPO 2010).
- Door de straling van de vuurbal overlijden personen.

In het voorgaande is al duidelijk geworden dat voor het overlijden van personen de afstanden voor het effect warmtestraling groter zijn dan voor de drukeffecten. Omdat dat zo is, hebben de drukeffecten tot nu toe relatief weinig aandacht gekregen in het kader van risicoberekening externe veiligheid. Voor de schade aan constructies kan de conclusie anders zijn.

Dit deel geeft een samenvatting van een beknopte literatuurverkenning naar de stand van de kennis over de drukeffecten van een BLEVE. Getalsvoorbeelden zijn zoveel mogelijk betrokken op het scenario dat is voorgeschreven in een QRA voor wegtransport. Dat wil zeggen: een propaan tank, gevuld met 25 ton propaan bij een druk van 6.1 bar.

6.2 Vertrekpunt: TNO 1997

Het vertrekpunt van de literatuurverkenning is het model dat is beschreven in hoofdstuk 7 van het gele boek 2005 (Bosch 2005). Dit model is in Nederland het meest gebruikte. Het wordt in het vervolg aangeduid als TNO 1997. Voor het model gelden de volgende kernaannames.

- Voor een explosief verlopen van het verdampingsproces is het noodzakelijk dat overal in de vloeistof kernkoken optreedt. Daarvoor is een bepaalde temperatuur nodig. Deze wordt aangeduid als de “superheat limit temperature” ofwel de “homogene nucleatie temperatuur”. Een vuistregel is dat deze gelijk is aan 0.89 maal de kritieke temperatuur. Voor propaan is deze T_{sl} gelijk aan 326 K. De bijbehorende verzadigingsdruk van propaan is 18 bar. Dit betekent dat onder deze temperatuur of in een deels met vloeistof gevuld vat onder deze faaldruk een instantaan falen niet wordt aangeduid als “BLEVE”. Met andere woorden: de verdamping van de vloeistof geeft geen aanleiding tot een schokgolf. Dit impliceert overigens dat in een QRA voor wegtransport de verdamping van de vloeistof geen aanleiding geeft tot een schokgolf. De veronderstelde vervoerstemperatuur is immers 282 K (rijkswaterstaat 2015). Ook op basis van de experimenten van Birk (Birk 2007) wordt gerapporteerd dat alleen de dampexpansie bijdraagt aan de schokgolf. (zie bijlage 1).
- De energie die voor de explosie d.w.z. de generatie van een schokgolf beschikbaar is wordt berekend door uit te gaan van een isentropisch expansieproces. De bijdragen van dampexpansie en de vloeistofverdamper worden gesommeerd. Dit is een conservatieve aanname. Ten eerste wordt een irreversibel gebeuren hier benaderd met een reversibel proces (dit levert de maximale arbeid die de uitzettende damp kan verrichten) en ten tweede wordt alle energie beschikbaar geacht voor de schokgolf. In werkelijkheid wordt energie gedissipeerd door het vervormen en scheuren van het vat, verplaatsing van het vat en de uitworp van fragmenten.

- De piekoverdruk van de eerste piek van de schokgolf en de positieve faseduur worden bepaald door de afstand te schalen met de explosie-energie volgens een TNT-equivalentiemodel. Dat wil zeggen dat de effecten van het bezwijken van het drukvat gelijk worden gesteld aan de effecten van de explosie van een hoeveelheid TNT met een zelfde explosie-energie.
- Dit geeft relatief dicht bij de bron ('near field') een overschatting van de piekoverdruk. Alleen voor volledig gasgevulde tanks wordt een near field correctie toegepast. Van 'near field' wordt gesproken voor afstanden die voldoen aan:

$$x \leq 2 * \left(\frac{E_{ex}}{p_a} \right)^{\frac{1}{3}}$$

waarbij x de afstand in meters is, E_{ex} de explosie energie in J en p_a de atmosferische druk in Pa.

De near field correctie bestaat uit het toepassen van een TNT-equivalentiecurve met een aangepast verloop (gekozen uit een set van 11 curves, afhankelijk van een berekende startwaarde voor de overdruk en afstand), zie Bosch 2005. Voor het in een QRA beschouwde scenario BLEVE van een tankwagen gevuld met 25 ton propaan betekent dit een near field afstand van 45 m. Voor gasgevulde vaten wordt de overschatting van de overdruk op afstanden kleiner dan 45 m gecorrigeerd.

6.3 Literatuurverkenning

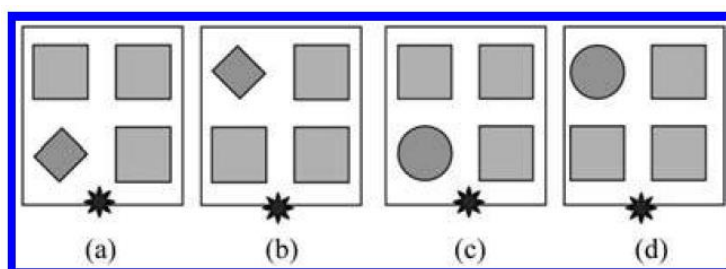
Het literatuuronderzoek richt zich enerzijds op het expansieproces bij het instantaan falen van een drukvat met een tot vloeistof verdicht gas, anderzijds op de schade aan constructies door de schok- en drukgolf. Een aantal sleutelartikelen is samengevat in bijlage 1.

De belangrijkste bevindingen omtrent de stand van de kennis op dit moment uit de beknopte literatuurverkenning zijn:

- Voor een BLEVE met een significant drukeffect dient de vloeistofverdamper explosief te verlopen. Dit vereist een temperatuur boven de super heat limit temperature. De laagste waarde van de Tsl voor propaan die in de literatuur is aangetroffen is 313.5 K. Dit betekent dat bij het in een QRA beschouwde BLEVE scenario van een propaan tankwagen geen explosieve verdamping optreedt.
- Sommige auteurs suggereren andere mechanismes waardoor bij een lagere temperatuur homogene nucleatie op zou kunnen treden (o.a. snelle open-dicht cycli van de veerveiligheid), maar deze missen experimentele en theoretische onderbouwing. Van den Berg 2008 geeft in zijn BLEVE Blast charts een ondergrens van 300 K.
- Experimenteel onderzoek naar de drukeffecten van een BLEVE is schaars en niet altijd goed gedocumenteerd. Op de schaal van een tankwagen/tankcontainer zijn slechts enkele experimenten gedaan.
- Het mechanisme voor het ontstaan van een BLEVE is niet volledig bekend. Tot nu toe worden BLEVE's onderscheiden in 1 stap (volledig vat falen en dampexpansie/vloeistofverdamper gelijktijdig) en in 2 stappen (scheurpropagatie langzamer zodat vloeistof in het vat kan "pre-verdampen"). Dit heeft gevolgen voor de sterkte van de schokgolf. Welk van de mechanismes optreedt is niet te voorspellen.
- De energie die beschikbaar is voor de generatie van een schok-/druk-golf is onzeker. Bovengrens is de isentropische expansie waarbij dampexpansie en vloeistofverdamper worden gesommeerd. De experimenten duiden er echter op dat veel minder energie beschikbaar is voor schokgolfvorming door a) een sterk irreversibel verloopend proces b) energie dissipatie in vervorming en breuk van de wand van het vat c) de lancering van tankfragmenten en eventueel secundaire fragmenten en d) de verplaatsing van de tank.

- Mede ten gevolge van het voorgaande kan de overschatting van de piekoverdruk tot een factor ca. 3 bedragen ten opzichte van de experimentele resultaten. .
- Explosieve verdamping vereist instantaan desintegreren van het vat. Als het open scheuren langer duurt dan zeg 0.1 seconde is er geen sprake meer van een significant drukeffect.
- In de praktijk zijn de faalwijze van de tank en de bijdragen van de verschillende dissiperende mechanismen niet te voorspellen. Voor een cilindrisch drukvat is er een duidelijk richting-effect afhankelijk van waar de tank openscheurt. Bij openscheuren van de lange zijde is de piekoverdruk in de dwarsrichting ca. twee maal zo hoog als de piekoverdruk in de lengterichting.
- Bij een BLEVE onder een overkapping is bezwijken van de overkapping en uitworp van fragmenten mogelijk. Een indicatieve afstand voor letaliteit van personen is 30 m.
- Open ruimtes (50-150 m) in een lange tunnel reduceren de primaire blast golf in de tunnel. Wel ontstaat een secundaire drukgolf in de richting van de tunnelbuis die in het daarop volgende gesloten gedeelte schade kan aanrichten o.a. gewonden kan opleveren door brekende autoruiten. Bij langere open delen geldt deze conclusie niet.
- Alleen de twee publicaties van Suddle et al. (2008) leggen de link tussen de definitie van de bron voor de schokgolf (BLEVE van een propaan tankwagen bij 326 K in overkluizing), de belasting van het gebouw en de schade aan gevel, ramen en draagconstructie. Hun conclusie is dat ten gevolge van het drukeffect van een BLEVE de vloerpanelen van de onderste verdieping zullen bezwijken, van de verdieping daarboven mogelijk ook. De draagconstructie zal naar verwachting in stand blijven. De ramen in de gevel zullen eveneens bezwijken.
- Veel literatuur is beschikbaar over onderzoek naar 'blast resistant building', meest in het kader van security en aanslagen op gebouwen met explosieven. Het verband met ongevallen van industriële oorsprong wordt daarin ook gelegd (zie o.a. Liskay 2014, Kocaz 2008, Dick 2012, Lange 2013, Atkinson 2011). In het kader van deze verkenning is deze richting (nog) niet diepgaand verkend. Wel kunnen aan de literatuur algemene aanbevelingen worden ontleend over gebouwconstructies die minder kwetsbaar zijn tegen overdrukken van explosies, zoals (vertaald naar de Utrechtsebaan situatie): plaats de nuts voorzieningen (energie, water, lucht) niet direct boven de weg i.e. op de onderste verdieping, idem voor verblijfruimtes, ontwerp de verbindingen tussen de staande kolommen en dwarsbalken van de draagconstructie ook op horizontale belastingen en met taaiere materialen/componenten, ontwerp vloerpanelen ook op negatieve drukbelastingen die door een schokgolf worden veroorzaakt, gebruik gelamineerd glas, ductieler vezelversterkt beton (Linz 2015, Yang 2010) enz.

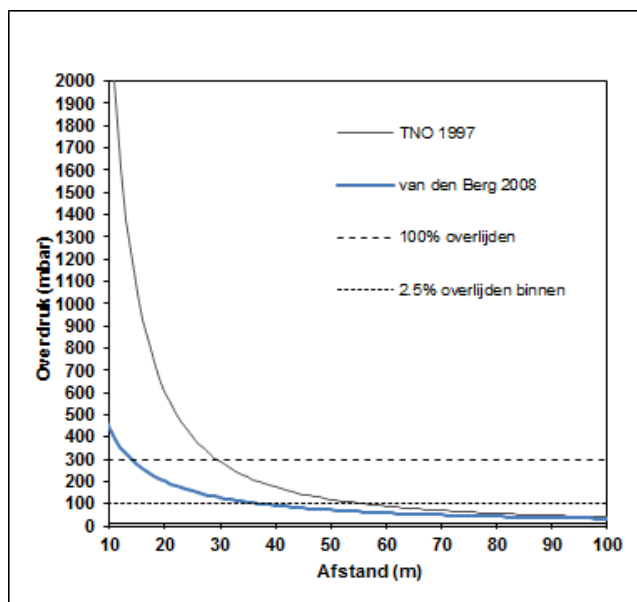
Ook de vorm van de gebouwgevel bepaalt mede de belasting die door de constructie wordt ondervonden. De vorm van gebouwen en de locatie ten opzichte van elkaar beïnvloeden de schade door de drukgolfreflecties (Remennikov 2005, Pérez Jiménez 2010). Een voorbeeld is gegeven in figuur 7 (Pérez Jiménez 2010). Gebouwen in de eerste lijn van afwijkende vorm en grootte kunnen door reflecties leiden tot een verhoogde drukbelasting van de gevels, ook in de dwarsstraten (situaties a en c), Variatie in de tweede lijn leidt tot een verminderde drukbelasting (situatie b en d).



Figuur 7. Verschillende gebouw lay-out t.o.v. explosiecentrum (Pérez Jiménez 2010)

De kans op bezwijken van de draagconstructie wordt sterk beïnvloed door de stijfheid en sterkte van de geveldelen. Deze dragen immers de energie over op de kolommen/balken. Hoe sterker de gevel hoe beter personen achter de gevel beschermd zijn tegen fragmenten, maar ook hoger de belasting van de draagconstructie. Mediavilla 2010 benadrukt dan ook het constructieve belang van de verbinding tussen glaspanelen en de gevel/draagconstructie. Deze kan een deel van de energie opnemen als daar in het ontwerp rekening mee gehouden wordt.

De bevindingen samen genomen leiden tot de resultaten van figuur 8 en tabel 1. Berekend is de piekoverdruk van een BLEVE van een propaan tankwagen zoals voorgeschreven in een QRA voor transport over de weg. De faaldruk is 6.1 bar, de inhoud is 25 ton propaan. De piekoverdruk is berekend met TNO 1997 en van den Berg 2008 (waarbij de chart voor 300K is gehanteerd). De afstanden tot de relevante schadecriteria zijn vermeld in Tabel 1. Vergelijking met het schadecriterium voor warmtestraling in tabel 2 laat zien dat de bijdrage van de drukschade aan het overlijden van personen geheel wordt omvat door die van de warmtestraling. Glasschade door de drukbelasting kan tot op grotere afstanden optreden.



Figuur 8. Invallende piekoverdruk BLEVE propaan en schadecriteria

Model	0.3 bar 100% overlijden Bezwijken gebouw	0.1 bar 2.5% overlijden binnen gevelschade	100% glasschade	50% glasschade
TNO 1997	29 m	55 m	60 m	200 m
Van den Berg 2008	14 m	37 m	40 m	200 m

Tabel 1. Afstanden in meters tot schadecriterium overdruk BLEVE propaan tankwagen transportcondities

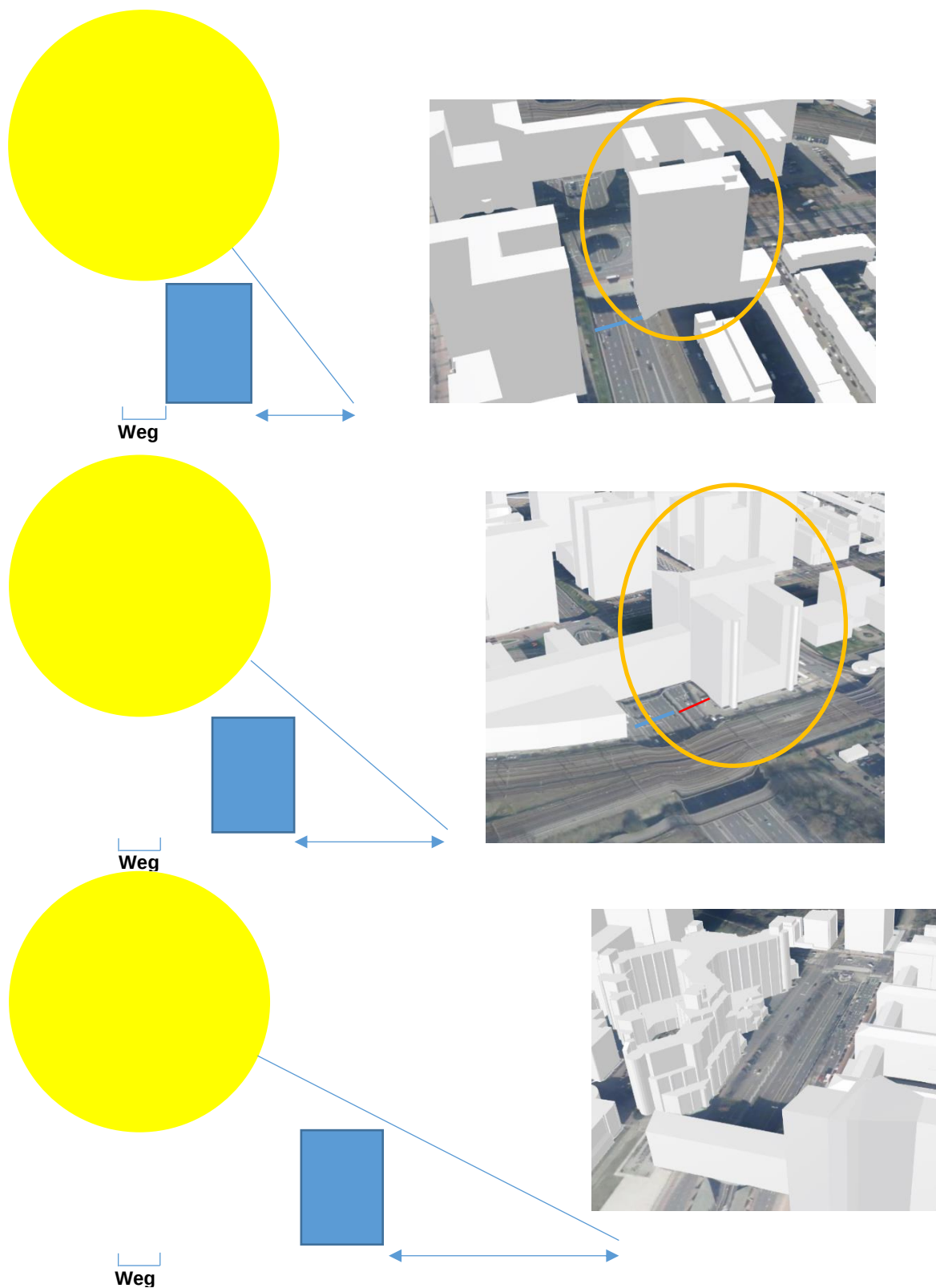
Model	Straal vuurbal 100% overlijden Bezwijken gebouw	35 kW/m ² 100% overlijden Bezwijken gebouw
Huidig	78 m	68 m
M&M	76 m	145 m*

Tabel 2. Afstanden in meters tot schadecriterium warmtestraling

* Dit is de momentane waarde op enig tijdstip. Wanneer wordt uitgegaan van de over de brandtijd gemiddelde waarde is de uitkomst 90 m.

Levensbedreigende schade door een BLEVE bij een ongeval met een tankwagen op de weg door warmtestraling reikt derhalve verder dan die door overdruk. In die zin is het voorstel uit het concept besluit kwaliteitseisen leefomgeving om het explosie-aandachtsgebied van een BLEVE te baseren op een warmtestralingscriterium adequaat. De vraag of aanwezige eerstelijnsbebouwing extra bescherming biedt voor tweedelijnsbebouwing langs de Utrechtsebaan kan dan ook worden beantwoord met een beschouwing over de hoogte van de vuurbal, schaduwwerking, de afstand van de eerste lijns bebouwing tot de Utrechtse Baan, en de hoogte en diepte van die bebouwing. Dit wordt geïllustreerd in figuur 9.

Bij een vuurbalstraal van 80 m berekenen de rekenmodellen een maximale hoogte van het centrum van de vuurbal van 160 m (huidige model), respectievelijk 228 m (model Martinsen&Marx). Gezien de hoogte van de gebouwen langs de Utrechtsebaan (maximaal 75 m), de korte afstand van de eerste lijns bebouwing tot de weg en de kadastrale oppervlakken van de panden, is het duidelijk dat in de meeste situaties van afscherming van straling voor de tweede lijns bebouwing geen sprake is. Wel leidt het model van Martinsen&Marx tot meer afscherming, omdat de stralingsintensiteit maximaal is, terwijl de vuurbal op de grond ligt. De tweede lijns bebouwing “ziet” dan nog circa de helft van de straling. Paragraaf 7.2.1 gaat nader in op de relevantie hiervan voor het groepsrisico.



Figuur 9. Illustratie van het effect van afstand tot de weg en hoogte van de eerste lijns bebouwing op de daarachter ontvangen straling van een vuurbal

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Drukschade

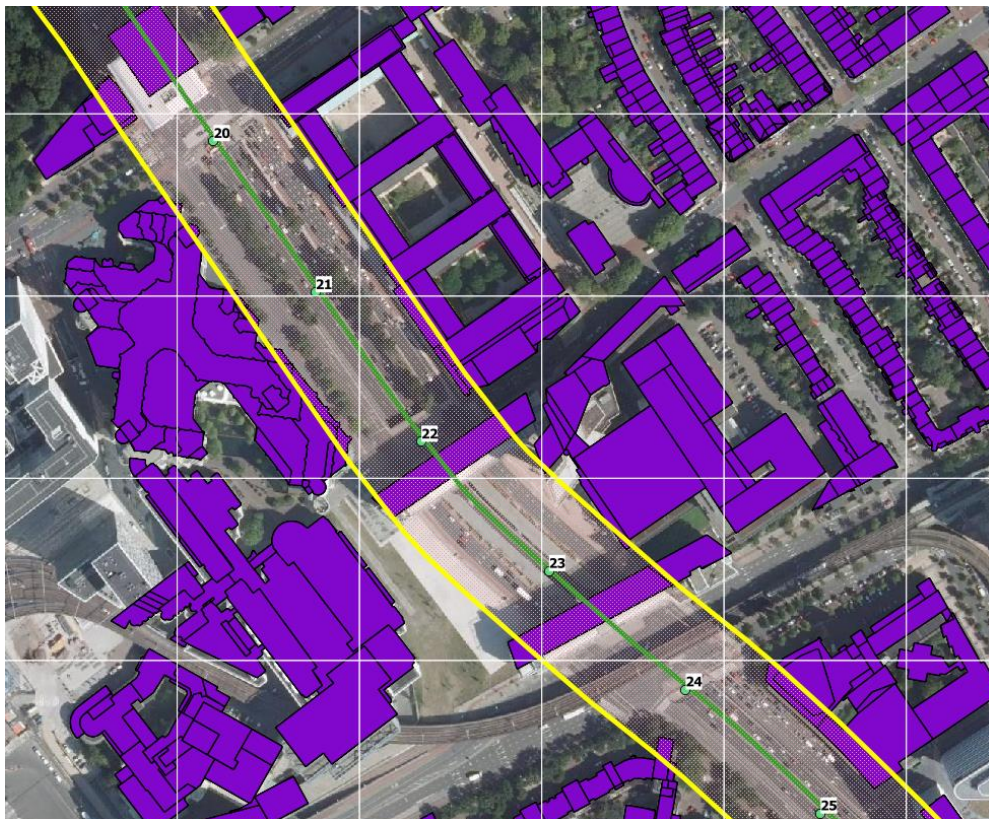
Bij een BLEVE van een tankwagen met brandbaar tot vloeistof verdicht gas door een incident tijdens transport op de Utrechtsebaan is het niet waarschijnlijk dat de draagconstructie van gebouwen boven en langs de weg volledig zal bezwijken door de drukbelasting van de explosie. Wel zullen delen van de constructie, vloeren en gevels van verdiepingen direct grenzend aan de weg en de ramen van het gebouw kunnen bezwijken. Een conservatieve schatting is dat tot op ca. 30 m vanaf het ongevalspunt zware schade kan ontstaan aan gevels, vloeren en glas. De figuren 10 en 11 geven indicatief aan binnen welke zone en voor welke gebouwen dat het geval is. Getekend is een afstand van 40 m ten opzichte van het centrum van de weg om rekening te houden met de positie van de tankwagen op de rijstrook het dichtst bij de bebouwing.

Glasschade zal tot op veel grotere afstand kunnen optreden. Tot op ca. 60 m zal 100% van de ruiten kunnen bezwijken, tot op ca. 200 m 50% van de ruiten. Het patroon is echter zeer locatie specifiek door de reflecties van de schokgolf.

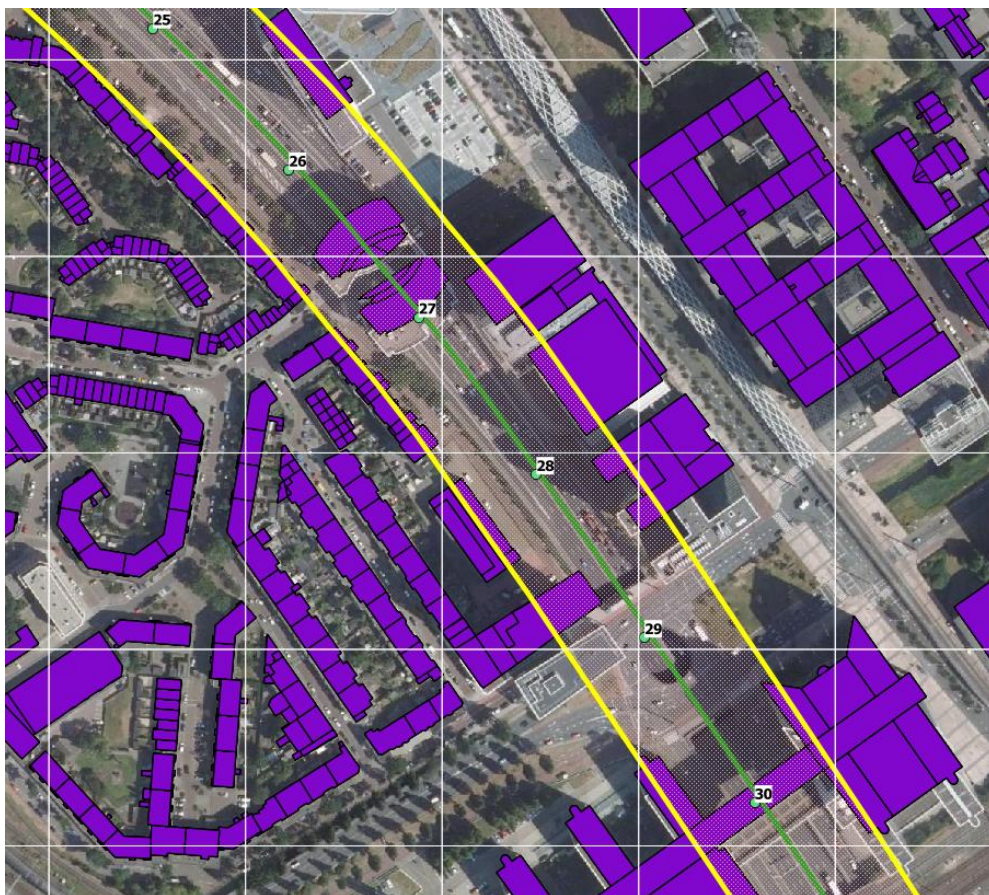
Bijlage 3 beschrijft in meer detail de hoogte van de gevels langs de Utrechtsebaan, de afstand tot de weg en het aandeel glas in de gevel. Bij veel gebouwen direct langs de weg is dat aandeel groter dan 50%. Over het soort glas en de verbinding van de glaspanelen met de sponning/gevel is echter geen detailinformatie bekend, zodat een onderbouwde uitspraak over de omvang van de glasschade niet mogelijk is.

De gesloten weggedeelten zijn meestal enkele tientallen meters lang (spoor, Regusgebouw, Bernhardviaduct en gebouw Gispen). Het langste gesloten gedeelte is dat onder de Malietoren (110 m, waarvan 40 m voor de toren zelf, de rest is wegdek). Bij een BLEVE scenario in de gesloten gedeelten zal de drukgolf in de lengte van de weg door reflecties worden versterkt, maar de gesloten lengtes zijn niet zodanig lang dat bij ontsteking vlamversnellingen ontstaan vergelijkbaar met een explosie in een lange tunnel.

De invloed van de verdiepte ligging van de weg (circa -5 m) op de drukgolf is beperkt. De druktank ligt slechts enkele meters onder maaiveld ter plaatse van de bebouwing. De overkapping over het gedeelte langs de Prins Clauslaan (hm 22, zie bijlage 3) zal bij een BLEVE scenario bezwijken en fragmenteren.



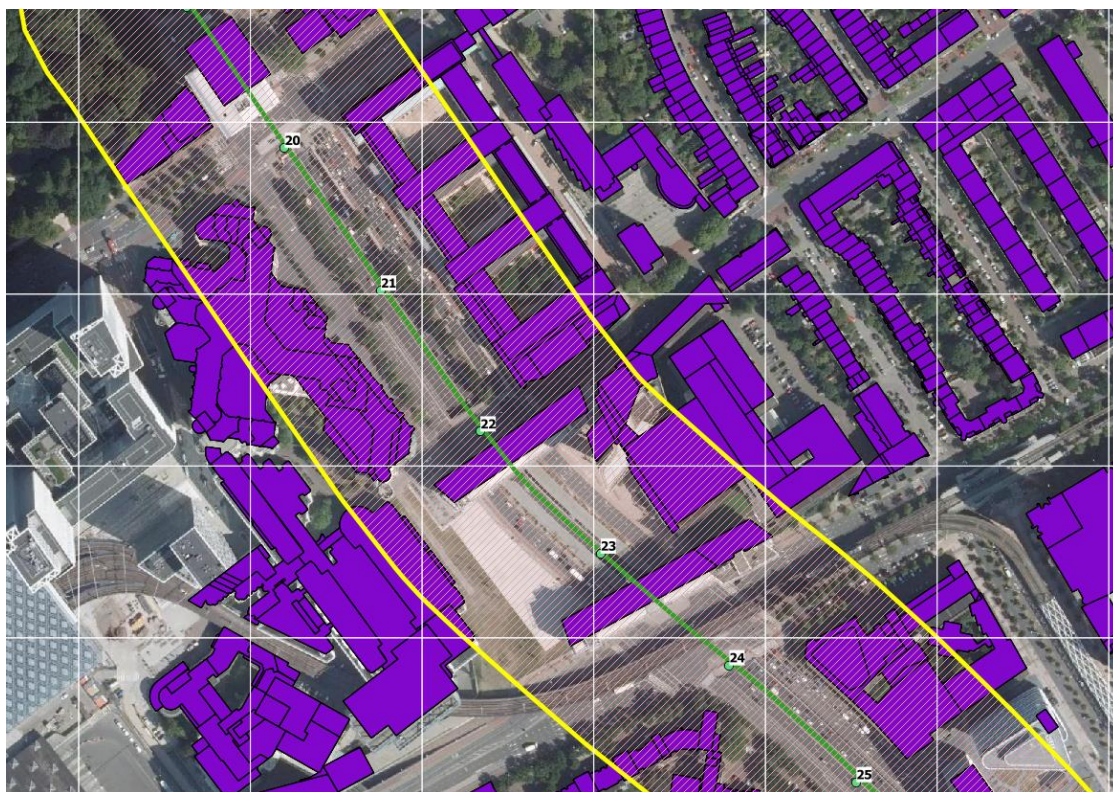
Figuur 10. Indicatie van gebied met zware drukschade aan gevels, noordelijk gedeelte (grid 100 m)



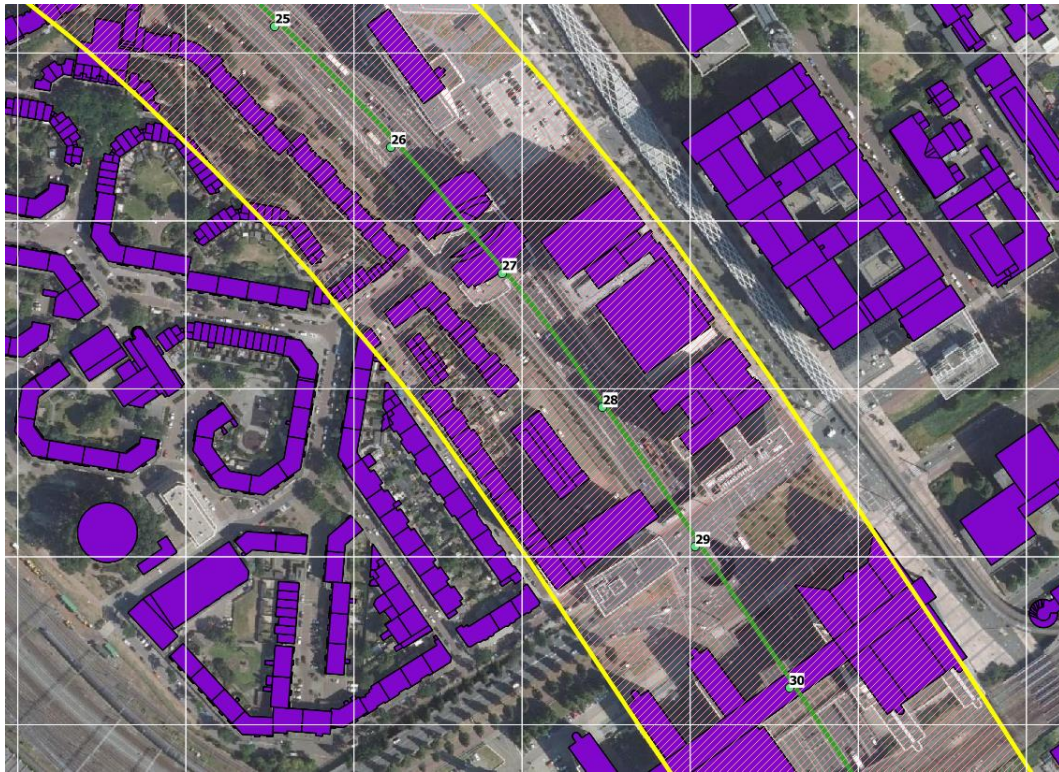
Figuur 11. Indicatie van gebied met zware drukschade aan gevels, zuidelijk gedeelte (grid 100 m)

7.2 Schade door warmtestraling

Volgens de vigerende modellering van de schade effecten van een BLEVE van een tankwagen met brandbaar tot vloeistof verdicht gas door een incident tijdens transport op de Utrechtsebaan zijn personen in gebouwen tot 80 m van de weg onvoldoende beschermd. Verondersteld is dat gebouwen binnen die afstand in brand raken. Dit scenario is verantwoordelijk voor een groot gedeelte van het groepsrisico, omdat verondersteld wordt dat alle personen binnen die gebouwen overlijden. De figuren 12 en 13 geven indicatief aan binnen welke zone en voor welke gebouwen dat het geval is. Getekend is een afstand van 90 m ten opzichte van het centrum van de weg om rekening te houden met de positie van de tankwagen op de rijstrook het dichtst bij de bebouwing.



Figuur 12. Indicatie van gebied met zware brandschade aan gebouwen, noordelijk gedeelte (grid 100 m)



Figuur 13. Indicatie van gebied met zware brandschade aan gebouwen, zuidelijk gedeelte (grid 100 m)

7.2.1 Schaduwwerking eerstelijns bebouwing

Om de vraag te beantwoorden of de eerstelijns bebouwing de warmtebelasting op de tweedelijns bebouwing vermindert moeten we binnen de 35 kW/m^2 zone (alle gebouwen in brand, alle personen overlijden) kijken of er

- Meer dan één lijn bebouwing is en of
- De eerste lijn bebouwing hoog genoeg is om de warmtebelasting van de tweede lijn te beïnvloeden.

De gebouwhoogtes zijn door de opdrachtgever aangeleverd. De figuren 16 en 17 laten zien dat binnen de 35 kW/m^2 zone nauwelijks sprake is van situaties waar afscherming van straling een rol speelt. Daarbuiten wel op enige trajectdelen, maar daar is de relevantie voor het groepsrisico nauwelijks meer aanwezig (in het gebied tussen 80 m en 150 m overlijdt gemiddeld nog zo'n 4% van de personen die buiten verblijven).

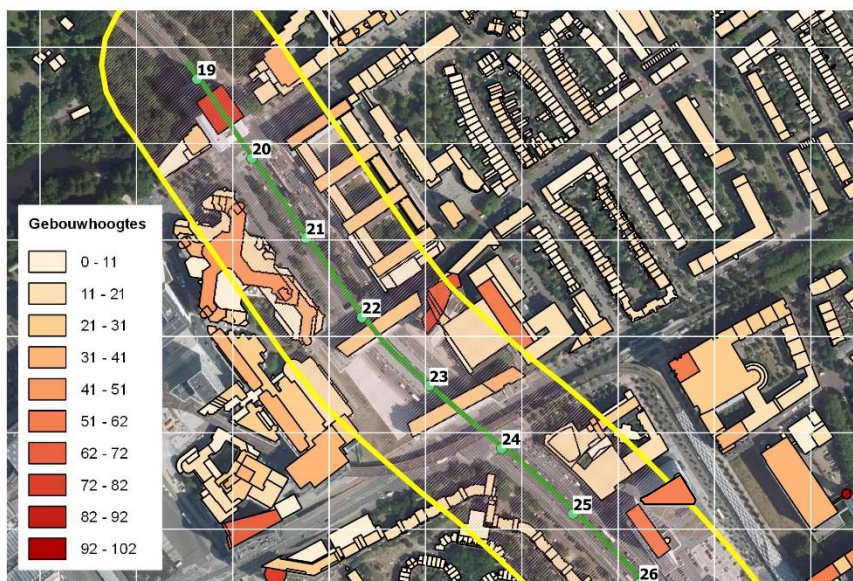
Een voorbeeld waar wel enige mate van afscherming optreedt is bij het gebouw Monarch II (Beatrixlaan 3-5). Zowel de vorm van het gebouw, de oriëntatie ten opzichte van de weg en de locatie tussen de andere bebouwing maken de kans op blootstelling aan hoge druk- en warmtestralingsniveaus door een BLEVE scenario op de weg kleiner dan voor aangrenzende bebouwing. Figuur 14 en figuur 15 laten de situatie zien.



Figuur 14. Gebouw Monarch I gezien vanaf de weg



Figuur 15. Gebouwen Monarch I (rechts) en Monarch II (midden) inmiddels aangeduid als Monarch Tower



Figuur 16. Gebouwhoogtes in m binnen gebied 100% overlijden noordelijk gedeelte (grid 100 m)



Figuur 17. Gebouwhoogtes in m binnen gebied 100% overlijden zuidelijk gedeelte (grid 100 m)

7.3 BLEVE aandachtsgebied

In het op 1 juli 2016 ter consultatie gepubliceerde Ontwerpbesluit Kwaliteitseisen Leefomgeving wordt langs basisnetroutes een voorlopig explosieaandachtsgebied aangewezen van 200 m. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen wegen en spoorwegen. Binnen dat aandachtsgebied kunnen bij nieuwbouw voorschriften gelden voor de brandwerendheid van de scheidingsconstructie, de brandklasse van gevels, dak en vloeren, vluchtroutes, sterkte bij brand, scherfwerking door beglazing (ontwerp besluit bouwwerken leefomgeving).

De bovenstaande analyse van de druk- en brandschade door een BLEVE laat zien dat voor het transport over de weg de 200 m te ruim bemeten is. Om het groepsrisico te beheersen volstaat 80 m,

uitgaande van de huidige modellering. Alleen bij projecteren van bestemmingen met openlucht recreatie/evenementen kan een grotere afstand nodig zijn om het groepsrisico te beheersen door middel van voorwaarden aan de ruimtelijke invulling.

7.4 Aanbevelingen

Onderstaand zijn twee aanbevelingen geformuleerd gebaseerd op de in de literatuur aangetroffen inzichten en onderzoeksresultaten. De formulering is uiteraard op een algemeen niveau. Bij een concreet bouwproject dienen specifieke berekeningen te worden uitgevoerd.

1. Bij nieuwbouw langs de Utrechtsebaan binnen 30 meter van de rijweg kan door ruimtelijke en bouwkundige maatregelen de kans op en grootte van schade aan gevel, ramen en gebouw door een BLEVE van een tankwagen met vloeibaar gas worden verminderd. Te denken valt onder meer aan:
 - Oriëntatie van het gebouw ten opzichte van de weg
 - Oriëntatie en vorm van het gebouw ten opzichte van belendende panden
 - Vorm van de gevel ten opzichte van de weg
 - Kwaliteit van het glas, verankering glas in sponning
 - Draagconstructie van het gebouw ook ontwerpen op horizontale belastingen door explosies (verbindingen kolommen-balken, verbinding gevel-draagconstructie)
 - Vloerpanelen ook ontwerpen op negatieve belasting door explosie
 - Kwaliteit van het beton
 - Nutsvoorzieningen niet aan wegzijde
 - Verblijfsruimtes niet direct boven de weg (bij overkluizing)
2. Bij nieuwbouw langs de Utrechtsebaan binnen 60 meter van de rijweg kan het gebruik van gelamineerd glas, in combinatie met de andere bovengenoemde aanbevelingen, de kans op gewonden door gelanceerde glasfragmenten door een BLEVE van een tankwagen met vloeibaar gas sterk verminderen. Probleem hierbij is dat de praktische kennis over geschikt glas, de eigenschappen ervan en de integratie van het glas in de gevel nog in ontwikkeling is (Miltenburg 2016).

Referenties

- Atkinson G., Blast damage to storage tanks and steel clad buildings, symposium series 156, Hazards XXII, Health and Safety Laboratory, 2011
- AVIV, Achtergronddocument RBM II, versie 2.0, november 2011
- Berg, A.C. van den., Voort, M.M. van der., Weerheijm, J. & Versloot, N.H.A. (2004). *Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 17. Pp. 397 – 405.
- Berg, A.C. van den & Weerheijm, J. (2006). Blast phenomena in urban tunnel systems, Journal of Loss Prevention in de Process Industries, nr. 19. Pp. 598 – 603.
- Berg A.C. van den, Blast charts for explosive evaporation of superheated liquids, Process Safety progress 27 (2008) no. 3 p. 219-224
- Birk, A.M., Davison, C. & Cunningham, M. (2007). *Blast overpressures from medium scale BLEVE tests*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 20. Pp. 194 – 206.
- Birk, A.M., Dusserre, G. & Heymes, F. (2013). *Analysis of a Propane Sphere BLEVE*, Chemical Engineering Transactions, Vol. 31, 2013. Pp. 481 – 486.
- Bosch, C.J.H. van den, Weterings R.A.P.M., Methods for the calculation of physical effects, “Yellow Book”, CPR14E, 3e ed. 2005, Publikatiereeks gevaarlijke stoffen 2
- Breedveld J.J., Constructieve veiligheid gebouwen in relatie tot explosies, Omgevingsdienst Zuid-Holland Zuid, 27 januari 2016
- Casal J., Arnaldos J., Montiel H., Planas-Cuchi E., Vichez J.A., Modeling and understanding BLEVEs, Chapter 22 , 19...
- Ciambelli P., Bucciero A., Maremonti M., Salzano E., Masellis M., The risk of transportation of dangerous goods: BLEVE in a tunnel, Annals of burns and fire disasters, vol X. no. 4, 1997
- Davison N., Edwards M.R., Effects of fire on small commercial gas cilinders, Engineering failure analysis, 15 (2008) 1000-1008
- Dick R., Blast design and analysis, National Business Park-Building 300, senior thesis 2012, Penn State faculty structural option
- DNV GL, 2015, Safeti-explosion extension (add-on aan Safeti-package to allow for differences in building types on explosion protection to people)
- Hemmatian, B., Planas-Cuchi, E., & Casal, J. (2014). *Analysis of Methodologies and Uncertainties in de Prediction of BLEVE Blast*, Chemical Engineering Transactions, Vol. 36, 2014. Pp. 541 – 546.
- IPO, Bouwkundige maatregelen externe veiligheid, een eerste aanzet voor een catalogus, revisie 5.3, januari 2010
- Keddy C.P., Methodology for assessing a boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) blast potential, Composite conference 2012
- Koccaz Z., Sutcu F., Torunbalci N., Architectural and structural design for blast resistant buildings, 14th world conference on earthquake engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
- Laboureur, D., Aprin, L., Heymes, F. & Rambaud, P. (2012). *BLEVE Overpressure: Small Scale Experiments and Multi-Scale Comparison with Literature Survey of Blast Wave Modelling*, Conference paper, Global Congress on Process Safety, Houston, Texas, April 1-4, 2012.
- Laboureur D., Birk A.M., Buchlin J.M., Rambaud P., Aprin L., Heymes F., Osmont A., A closer look at BLEVE overpressure, Process safety and environmental protection 95 (2015) 159-171
- Lange D., A review of blast loading and explosions in the context of multifunctional buildings, SP technical Research Institute Sweden, 2013

- Linz P. del, Hooper P.A., Arora H., Smith D., Pascoe L., Cormie D., Blackman B.R.K., Dear J.P., Reaction forces of laminated glass windows subject to blast loads, *Composite structures*, 131 (2015) 193-206
- Liskay Z., Rugg S., Thompson C., Blast resistant building design: Building behavior and key elements, Lehigh University 2014
- Makhviladze G.M., Yakush S.E., Blast waves and fireballs from bursts of vessels with pressure-liquefied hydrocarbons, *Proceedings of the combustion Institute*, 29, (2002) p. 313-320
- Mediavilla J., Soetens F., Brekelmans J.W.P.M., Damage and blast response of a steel frame building, in: Mazzolani (ed.), *Urban habitat Constructions under catastrophic events (proceedings)*, Taylor&Francis Group, London 2010, ISBN 978-0-415-60685-1.
- Miltenburg R.T.J. van, *Handreiking bouwen binnen een invloedsgebied Deel2: de mogelijkheden van glas als beschermingsmiddel*, Laboratorium externe veiligheid, januari 2016
- Guidelines for quantitative Risk Assessment, CPR 18E (Purple Book)
- Nazari S., Karami N., Moghadam H., Nasiri P., Consequence analysis of BLEVE scenario in the propane tank: a case study at Bandar Abbas gas Condensate Refinery of Iran, *International journal of scientific Engineering and Technology*, 4, (2015), no. 9, pp. 472-475
- Pérez Jiménez C., Minguez Fica M., Quintana J. de la, Identification of geometrical design criteria for reducing the vulnerability of urban area configurations to blast effects, in: Mazzolani (ed.), *Urban habitat Constructions under catastrophic events (proceedings)*, Taylor&Francis Group, London 2010, ISBN 978-0-415-60685-1.
- Planas-Cuchi, E., Salla, J.M. & Casal, J. (2004). *Calculating overpressure from BLEVE explosions*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 17. Pp. 431 – 436.
- Reinders, J.A.E., Molag, M., Weerheim, J., Luppi, M. & Berg, A.C. van den. (2011). *Rekenmethodiek externe veiligheid tunnels*. TNO-060-UT-2011-01055.
- Remennikov A., Rose T.A., Modelling blast loads on buildings in complex city geometries, *Computers and structures*, 2005, 83((27) 2197-2205
- Rijkswaterstaat, *Handleiding Risico-analyse transport versie 1.1*, 1 april 2015
- Handleiding risicoberekeningen Bevi versie 3.3*, 1 juli 2015
- Roberts, M.W. (??). *Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Events at DOE Sites*.
- Salla, J.M., Demichela, M. & Casal, J. (2006). *BLEVE: A new approach to the superheat limit temperature*, *Journal of Loss Prevention in de Process Industries*, nr. 19. Pp. 690 – 700.
- Stawczyk J., Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards, *Journal of hazardous materials*, B96 (2003) 189-200
- Suddle S.I., Weerheijm J., Berg A.C. van den, The cost effectiveness of a steel tube or a buffer zone for mitigating blast effects on a building spanning an underpass with transport of LPG, 2008
- Suddle, S.I., Weerheijm, J., Berg, A.C. van den., & Vambersky, J.N.J.A. (2008). *Modelling the effects of BLEVE blast on a building spanning an underpass*.
- Voort M.M. van der, Berg A.C. van den, Roekaerts D.J.E.M., Xie M., Bruijn P.C.J. de, Blast from explosive evaporation of carbon dioxide: experiment, modeling and physics, *Shock waves* (2012) 22 129-140
- Voort M.M. van der, Wees R.M.M. van, Ham J.M., Spruijt M.P.N., Berg A.C. van den, Bruijn P.C.J. de, Ierschoot P.G.A. van, An experimental study on the temperature dependence of CO2 explosive evaporation, *Journal of Loss prevention in the process Industries*, 26 (2013) 830-838
- Xie M., *Thermodynamic and gas dynamic aspects of a BLEVE*, TUDelft 2007

Yang E-H, Li, V.C., Damage characteristics and micromechanics of impact resistant engineered cementitious composites,

Bijlage 1 Literatuurverkenning

Een aantal artikelen met directe relevantie zijn hieronder samengevat met steekwoorden.

1. Berg, A.C. van den., Voort, M.M. van der., Weerheijm, J. & Versloot, N.H.A. (2004). Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 17. Pp. 397 – 405.
2. Birk, A.M., Davison, C. & Cunningham, M. (2007). Blast overpressures from medium scale BLEVE tests, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 20. Pp. 194 – 206.
3. Birk, A.M., Dusserre, G. & Heymes, F. (2013). Analysis of a Propane Sphere BLEVE, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 31, 2013. Pp. 481 – 486.
4. Hemmatian, B., Planas-Cuchi, E., & Casal, J. (2014). Analysis of Methodologies and Uncertainties in the Prediction of BLEVE Blast, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 36, 2014. Pp. 541 – 546.
5. Laboureur, D., Aprin, L., Heymes, F. & Rambaud, P. (2012). BLEVE Overpressure: Small Scale Experiments and Multi-Scale Comparison with Literature Survey of Blast Wave Modelling, Conference paper, Global Congress on Process Safety, Houston, Texas, April 1-4, 2012.
6. Planas-Cuchi, E., Salla, J.M. & Casal, J. (2004). Calculating overpressure from BLEVE explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 17. Pp. 431 – 436.
7. Reinders, J.A.E., Molag, M., Weerheim, J., Luppi, M. & Berg, A.C. van den. (2011). Rekenmethodiek externe veiligheid tunnels. TNO-060-UT-2011-01055.
8. Salla, J.M., Demichela, M. & Casal, J. (2006). BLEVE: A new approach to the superheat limit temperature, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 19. Pp. 690 – 700.
9. Suddle, S.I., Weerheijm, J., Berg, A.C. van den., & Vambersky, J.N.J.A. (2008). Modelling the effects of BLEVE blast on a building spanning an underpass.
10. Berg, A.C. van den & Weerheijm, J. (2006). Blast phenomena in urban tunnel systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, nr. 19. Pp. 598 – 603.
11. Laboureur D., Birk A.M., Buchlin J.M., Rambaud P., Aprin L., Heymes F., Osmont A., A closer look at BLEVE overpressure, *Process safety and environmental protection* 95 (2015) 159-171
12. Berg A.C. van den, Blast charts for explosive evaporation of superheated liquids, *Process Safety progress* 27 (2008) no. 3 p. 219-224

1. Berg, A.C. van den., Voort, M.M. van der., Weerheijm, J. & Versloot, N.H.A. (2004). Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 17. Pp. 397 – 405.
 - De voorwaarden waaronder de flashverdamping explosief verloopt en de verdampingssnelheid zijn niet bekend.
 - Een blast-effect ontstaat alleen als een drukvat vrijwel instantaan desintegreert. Als de propagatie van de scheur een korte (zelfs al is het een fractie van een seconde) tijd duurt, zijn de blast-effecten klein.
 - Een oplossing van de stromingsvergelijkingen met als randvoorwaarde de dampdruk van de oververhitte vloeistof geeft een conservatieve benadering. Het model is gefit op een experiment met 452 kg propaan (Giesbrecht 1981). Een universele BLEVE-blast grafiek voor propaan is opgenomen voor overdruk en positieve faseduur als functie van de afstand voor 300 resp. 326 K.
2. Birk, A.M., Davison, C. & Cunningham, M. (2007). Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 20. Pp. 194 – 206.
 - Evaluatie van experimenten met propaan tanks tussen 400 liter en 2 m³ (20 cases van catastrofaal falen) wijzen erop dat de flashverdamping van de vloeistof niet bijdraagt aan de piekoverdruk van een schokgolf. De dampexpansie verklaarde de piekoverdrukken op grotere afstand.
 - Op kortere afstanden ontstaat de schade vooral door fragmenten, vuurballen en door de dynamische belasting (tot ca. 40 m). Dynamische belasting is de drukbelasting van wanden door de 'explosiewind', i.e. de snelheid en dichtheid van de lucht. Dit is een ander mechanisme dan de piekoverdruk van de schokgolf. Hier is de bijdrage van de flashverdamping wel groot.
 - De resultaten wijzen erop dat dit ook geldt boven de super heat limit temperatuur.
 - BLEVE's ontstaan in licht verschillende mechanismen: een 1-staps of een 2-staps proces.
 - In een 1-staps BLEVE gebeurt het openscheuren van de tank in een tijdsorde van 10 ms. De tijd is hier te kort om de flashverdamping te laten bijdragen.
 - In een 2-staps BLEVE stopt de aanvankelijke scheur op een lengte van 5 à 10 cm. De heftige flashverdamping in de tank in combinatie met een temperatuur-effect ter plaatse van de uiteinden van de scheur maken de scheur alsnog onstabiel, waarna de tank volledig openscheurt in een tijdsbestek van enkele seconden. De flashverdamping vult de dampruimte op en die damp draagt bij aan de schokgolf. Het 2-staps mechanisme geeft dus een sterkere schokgolf.
 - De factoren die bepalen volgens welk van de twee mechanisme een BLEVE optreedt zijn niet duidelijk. Een voorspelling in een concreet geval is niet mogelijk.
 - Verbranding gaf in experimenten tussen enkele kilogrammen en 800 kg geen blast, maar is niet verder onderzocht.
 - Overdrukken in de lengterichting van een cilindrische tank zijn ongeveer twee maal zo klein als de overdrukken in zijwaartse richting.

3. Birk, A.M., Dusserre, G. & Heymes, F. (2013). Analysis of a Propane Sphere BLEVE. In: Chemical Engineering Transactions, Vol. 31, 2013. Pp. 481 – 486.
 - Analyse van tijdsduur tot falen van een 2000 m³ propaan bol, Japan 2011, voor twee vlamtemperaturen (871 en 1100 °C).
 - De afstand tot 300 mbar overdruk (berekend cf. lit. ref 2 hierboven) is ongeveer een factor 2.5 kleiner dan de straal van de vuurbal (respectievelijk 110 en 270 m).
 - Er bestaan voor tanks van deze schaal geen experimentele data die de geldigheid van de gebruikte correlaties tussen vuurbal diameter, brandtijd en inhoud van de tank aantonen.

4. Hemmatian, B., Planas-Cuchi, E., & Casal, J. (2014). Analysis of Methodologies and Uncertainties in the Prediction of BLEVE Blast. In: Chemical Engineering Transactions, Vol. 36, 2014. Pp. 541 – 546.
 - Een analyse van de belangrijkste onzekerheden in modelleren van een BLEVE blast effect.
 - Geen enkele methode voor het berekenen van de overdrukken door een BLEVE beschrijft een discontinuïteit bij de 'super heat limit temperature'.
 - De faaldruk kan uiteenlopende waarden hebben afhankelijk van het scenario (BLEVE door impact, warmte-input aan de dampzijde of vloeistofzijde, veiligheid geblokkeerd of niet) en hij bepaalt de omvang van het effectgebied. De insteldruk van de veerveiligheid is in het algemeen een goed uitgangspunt.
 - Duur tot falen is zeer variabel, tussen 1 minuut en oneindig. Afhankelijk van plaats van vlamcontact, warmte-input door jet (50-300 kW/m²).
 - Explosie-energie bestaat uit bijdrage van dampexpansie en flash verdamping. Nieuwer onderzoek wijst erop dat de dampexpansie bepalend is voor de scholggolf. De flasheexpansie draagt vooral bij aan de dynamische belasting (explosiewind) op korte afstand.
 - Drie methoden om de beschikbare energie voor de explosie te berekenen worden benoemd, maar de verschillen in uitkomst worden niet geadresseerd.
 - Een deel van de energie is slechts beschikbaar voor de overdruk. De rest verdwijnt in het bezwijken van het drukvat en het lanceren van fragmenten. In geval van een ductiele breuk is 50% een in de literatuur genoemd getal.
 - Overdrukresultaten kunnen tussen verschillende modellen zeker een factor 3 verschillen. Het model voor isentropische expansie levert conservatieve resultaten.
 - Obstakels (tanks, pijpen, gebouwen) veroorzaken lokaal hogere en lagere drukken dan berekend. Drukken in de lengterichting van een liggende cilindrische tank zijn ca. twee maal zo klein als dwars op de tank.
 - De voornaamste onzekerheden zijn de hoeveelheid energie die vrijkomt, de fractie die bijdraagt aan het blast effect, de relatieve bijdrages van damp en flashverdamping en de invloed van richtingseffecten. Meer en gedetailleerdere analyse van grootschalige ongevallen is nodig.

5. Laboureur, D., Aprin, L., Heymes, F. & Rambaud, P. (2012). BLEVE Overpressure: Small Scale Experiments and Multi-Scale Comparison with Literature Survey of Blast Wave Modelling. Conference paper, Global Congress on Process Safety, Houston, Texas, April 1-4, 2012.
 - Verbranding van een vuurbal uit een 2 ton propaan tank geeft een vergelijkbare overdruk als de eerste piek, maar ca. een seconde later (geciteerd uit Johnson 1991). Wordt niet verder geanalyseerd.
 - In experimenten met kleine vaatjes (95 ml(!)) kan de vloeistof superkritisch worden voordat het vaatje faalt.
 - Overdrukmodellen worden vergeleken voor large scale, mid scale en small scale.
 - Large scale: Op grond van twee experimenten (Johnson 1991 met 2 ton propaan, faaldruk 15 bar en BAM 1997 met 5 ton propaan, faaldruk 25 bar) is TNO 1997 aan de conservatieve kant; ook Birk 2007 (dwz. Alleen de dampexpansie draagt bij aan de schokgolf) is nog conservatief, d.w.z. overdrukken worden tot een factor 3 overschat.
 - Mid scale: Op grond van 9 BLEVE's van 2m³ propaan tanks met faaldrukken tussen 15 en 20 bar na afblazen van 40-85% vande inhoud door het veiligheidsventiel: min of meer hetzelfde beeld. TNO 1997 overschat overdrukken tot een factor 3 à 4.
 - Small scale: op grond van 2 experimenten (Stawczyk 2003 5 resp 11 kg propaan flessen, Laboureur 2011, faaldrukken tussen 150 en 400 bar, vloeistof superkritisch. Het Birk 2007-model is conservatief tot een factor ca. 3.
 - De beste fit op de experimenten wordt verkregen met het model van Casal 2006. Nadeel van het model is dat het deel van de expansie-energie dat in de schokgolf wordt meegenomen een empirische factor is (afhankelijk van ductiele of brosse breuk van het drukvat) en dat het in sommige gevallen de overdruk onderschat. TNO 1997 is overall een conservatieve benadering.
6. Planas-Cuchi, E., Salla, J.M. & Casal, J. (2004). Calculating overpressure from BLEVE explosions. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 17. Pp. 431 – 436.
 - Meeste gangbare modellen gebruiken isentropische expansie om maximale energie beschikbaar voor de explosie te berekenen. Dat is een theoretische (reversibele) benadering. Expansie-energie is beter vast te stellen met verondersteld irreversibel adiabatisch gedrag.
 - De verandering in de vrije energie van vloeistof en damp wordt gelijkgesteld aan de arbeid die de volume verandering van vloeistof en damp op de omgeving verricht. Door itereren met de dampfractie wordt het snijpunt gevonden. Dit model geeft een betere fit op experimenten dan TNO 1997 (zie hiervoor nr. 5), maar is niet altijd conservatief.
7. Reinders, J.A.E., Molag, M., Weerheim, J., Luppi, M. & Berg, A.C. van den. (2011). Rekenmethodiek externe veiligheid tunnels. TNO-060-UT-2011-01055.
 - Analyse van effecten van scenario's voor het vrijkomen van gevaarlijke stoffen in een representatieve wegtunnel. Lengte 1500 m, breedte 12 m, hoogte 6 m.
 - Condities voor het optreden van een BLEVE dienen nader onderzocht te worden. Vooralsnog lijkt een temperatuur hoger dan de Tsl een noodzakelijke voorwaarde.

- Bij een BLEVE in een tunnel zijn in het verlengde van een tunnel de blasteffecten maximaal. De dynamische druk heeft een grote bijdrage. Het 0.3 bar niveau ligt op ca. 50-100 m van de tunnelmond.
 - Bij een BLEVE onder een overkapping is opbreken van de overkapping en uitworp van brokstukken niet uit te sluiten. 30 meter is in dat geval een indicatieve afstand voor overlijden van personen.
 - In een lange wegtunnel (hier 1500 m als voorwerp van studie gebruikt) zijn de QRA scenario's geen worst case. Kleinere lekdebieten, opvullen van de tunnel met een ontsteekbaar mengsel leidt tot een langere explosieve wolk en dientengevolge hogere piekoverdrukken. Langs de Utrechtsebaan is dit niet van toepassing. Het langste gesloten gedeelte is ca. 110 m lang (ter hoogte van de Malietoren).
8. Salla J.M., Demichela M., Casal J., BLEVE: a new approach to the superheat limit temperature, *Journal of Loss prevention in the process industries*, 19 (2006) 690-700
- Verschillende methoden om de 'superheat limit temperature' te bepalen. Dit is de minimale temperatuur die nodig is om van een BLEVE te spreken, hoewel sommige auteurs deze voorwaarde weglaten. Boven de Tsl ontstaat bij instantaan wegvallen van de druk een metastabiele toestand van waaruit de verdamping explosief kan verlopen.
 - Methoden gebaseerd op de toestandsvergelijking leiden tot een variatie van een graad of 30 K. Voor propaan bijvoorbeeld tussen 313.5 en 332 K.
 - Nieuwe benadering is gebaseerd op de energiebalans tussen de aan de vloeistof onttrokken warmte en de aan de damp toegevoegde warmte (zoeken naar het maximum van de energieoverdracht). Dit is de waarde bij een flashpercentage van 50%. Voor propaan is dit 315.3 K. Het verschil met voorgaande methoden is beperkt (3-6 K), maar neemt toe voor complexere moleculen.
9. Suddle, S.I., Weerheijm, J., Berg, A.C. van den., & Vambersky, J.N.J.A. (2008). Modelling the effects of BLEVE blast on a building spanning an underpass.
- Analyse van mogelijke schade aan gebouwen boven een weg door explosies ten gevolge van een LPG-incident.
 - Lekkage gevolgd door opvullen van de ruimte onder het gebouw met een ontsteekbaar mengsel leidt bij een lengte van de confined space van 30 m niet tot overdrukken die schade doen aan de constructie, de structurele integriteit van het gebouw blijft in stand (TNO rapportage 2001). Langs de Utrechtsebaan zijn de overkappingen tussen 10 en 110 m lang (zie figuur 1).
 - Overdrukken door een BLEVE zijn gemodelleerd met een gasdynamische berekening volgens van den Berg (zie o.a. van den Berg 2008). Schade door warmtebelasting en fragmenten zijn niet beschouwd.
 - Verschillende draagconstructies voor overspanningen van de weg worden onderscheiden (4 typen). Een netwerkconstructie met staalprofielen wordt doorgerekend op de explosiebelasting door een BLEVE van een propaan reservoir van 50 m³ bij 326 K. De vulgraad wordt niet vermeld.
 - De blast belasting leidt zeker tot structurele schade aan de vloerpanelen boven de weg (max 1700 kPa). Ook de liftschacht op grondniveau wordt beschadigd en de ramen in de gevel zullen breken (max 30 kPa).

- Om het gebouw te behouden dienen de elementen die de belasting doorgeven aan de draagconstructie eerder te bezwijken. Bijvoorbeeld een vloer ontworpen op 6kPa ontwerpbelasting zal bezwijken en de overdracht naar de draagconstructie zal klein zijn. De vloerpanelen worden in de eerste verdieping geworpen en ook de tweede vloer zal gedeeltelijk kunnen bezwijken.
 - Drie maatregelen worden geopperd om de gevolgen te beperken:
 - Ramen ontwerpen op 15 kPa drukbelasting.
 - De verdieping direct boven de weg niet gebruiken voor kantoor, maar voor opslag e.d. met een lage bezettingsgraad.
 - Een constructief ontwerp waarbij de sterkte van de eerste twee verdiepingen boven de weg wordt afgestemd op die van de hele draagconstructie.
10. Berg, A.C. van den & Weerheijm, J. (2006). Blast phenomena in urban tunnel systems. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries, nr. 19. Pp. 598 – 603.
- Onderzocht is de blast van een 50 m³ propaan reservoir (tankwagen) dat instantaan bezwijkt bij 326 K op een afstand van 50 m van de opening van een tunnel.
 - Onderbreken van een tunnelbuis door een open bakconstructie splitst de blast golf in twee delen. De overdruk van de primaire blast golf neemt bij toenemende lengte van de opening snel af. Er ontstaat een jetflow in de richting van de tunnelbuis die het tweede tunnelgedeelte binnendringt. Deze jet veroorzaakt een tweede statische drukgolf die door het breken van autoruiten zeker nog slachtoffers kan veroorzaken. De overdruk van deze geïnduceerde jet is niet afhankelijk van de lengte van de opening (tussen 50 en 150 m) in de tunnel. Bij lengtes groter dan 150 m verliest dit model zijn geldigheid. Langs de Utrechtsebaan zijn een aantal open delen langer dan 150 m.
11. Laboureur D., Birk A.M., Buchlin J.M., Rambaud P., Aprin L., Heymes F., Osmont A., A closer look at BLEVE overpressure, Process safety and environmental protection 95 (2015) 159-171
- Onderscheid moet gemaakt worden tussen de near field en de far field.
 - Voor de far field komen de modellen neer op de berekening van de expansie energie waarmee de afstand wordt geschaald (voor een berekening zie). Daarmee wordt de overdruk van de eerste piek geschat met behulp van standaard curves: TNT-equivalentie curves zoals in TNO 1997 of blast curves op basis van gasdynamische modellen (uitzettende damp moet de lucht verdringen, Van den Berg 2008).
 - De meeste modellen overschatten de overdruk (van de eerste piek) en bevatten een experimentele reductiefactor voor de verdeling van de energie tussen de schokgolf, het barsten van het vat en het lanceren van fragmenten.
 - Voor de near field ontbreekt nog een goed begrip van de fysica van het fysisch fenomeen van de schokgolf. Experimenten die de overdruk en impuls meten zijn daarvoor nog te weinig beschikbaar.
 - Hier wordt een model beschreven om de initiële overdruk van de schokgolf te berekenen. De afname met de afstand is dan ontleend aan de blast curves van Van den Berg 2008. Het resultaat wordt vergeleken met 5 experimenten: Laboureur 2012 (V=95 ml, Pfaal=450 bar), Giesbrecht 1981 (V=1 m³, Pfaal=60 bar), BAM 1999 (V=45 m³, Pfaal=25 bar), BG 1991 (V=10.8

m³, Pfaal=15.1 bar), Birk 2006 (V=1.9 m³, Pfaal=19 bar). De validatie is echter gebrekkig door te weinig data.

- Een bron van onzekerheid is dat de initiële druk rond een cilindrisch drukvat niet in alle richtingen hetzelfde is. De druk hangt af van de wijze waarop het vat openscheurt (top, zijkant) en of het vat vast ligt of kan verplaatsen.

12. Berg A.C. van den, Blast charts for explosive evaporation of superheated liquids, Process Safety progress 27 (2008) no. 3 pp. 219-224

- Meeste modellen gebaseerd op TNT equivalentie, maar dat is fysisch een geheel ander proces. Door de hoge explosiedrukken wordt bij een TNT explosie een groot deel van de mechanische energie gedissipeerd in temperatuurstijging.
- Hier wordt een model ontwikkeld op basis van gasdynamica: de uitzettende damp drukt de lucht weg als ware het een zuiger en moet dus die lucht versnellen. Dit bepaalt de verdampingssnelheid.
- Met deze randvoorwaarde worden de vergelijkingen voor behoud van massa, impuls en energie opgelost. Voor de eenvoud worden de massa's van vloeistof en damp opgeteld (verwaarlozen vloeistof-entrainment).
- De resultaten van een eindige elementen berekening worden gepresenteerd in blast charts voor butaan, propaan, CO₂ en LNG.
- Dit is een bovengrens. Zodra het bezwijken van het vat enige tijd in beslag neemt is er geen sprake meer van een blast effect (zie ook nr. 1 hierboven). In de praktijk is van instantaan bezwijken meestal geen sprake.
- Voor temperaturen boven de Tsl fit het model goed op de resultaten (vergelijk met experiment Birk 2006).

Bijlage 2 Typering Utrechtsebaan



Figuur 18. Utrechtsebaan [bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Harry van Reeken]

De Utrechtsebaan is een onderdeel van de A12 gelegen in Den Haag. Het is het westelijkste deel van de autosnelweg en omvat 4,7 kilometer vanaf de S101 in Den Haag tot aan het knooppunt Prins Clausplein. De grotendeels verdiepte gelegen snelweg wordt gekenmerkt door het grote aantal overkluizingen; diverse gebouwen zijn op of over de weg gebouwd [wegenwiki.nl]. Prominente gebouwen zijn de Malietoren en de Haagse Poort.



Figuur 19. Malietoren [bron: Wikipedia]



Figuur 20. Haagse Poort [bron: Wikipedia]

De Utrechtsebaan begint bij het Malieveld in Den Haag, feitelijk als zijweg van de Zuid-Hollandlaan en Benoordenhoutseweg. Deze in elkaar verlengde liggende wegen zijn genummerd als de S101. In de richting Wassenaar loopt de S101 over in de N44. De Utrechtsebaan telt 2x2 rijstroken, kent een

maximumsnelheid van 70 km/h en heeft direct een toe- en afrit naar het Centraal Station. Deze niet genummerde aansluiting is feitelijk afrit 1. Hierna ligt de weg verdiept en rijdt men onder vijf kantoorgebouwen door. Na de overkluizingen volgt een breed spoorviaduct van de spoorlijn Amsterdam - Rotterdam. Het verdiepte deel kent twee halve aansluitingen, met alleen een oprit richting en een afrit vanuit Utrecht.



Figuur 21. verdiepte ligging Utrechtsebaan

Na de verdieping eindigt de bebouwde kom van Den Haag en begint de autosnelweg-status met een maximumsnelheid van 100 km/h stad-uit. Voor de andere rijrichting geldt 80 km/u. De Utrechtsebaan komt hier weer op maaiveld en verloopt met 2x3 rijstroken direct naast de spoorlijn Den Haag - Utrecht. Vervolgens doorkruist de weg Voorburg met een viaduct waarbij men ook het Rijn-Schiekanaal (of Vliet) oversteekt. Hierna liggen kortstondig 2x4 rijstroken die het weefvak vormen van het Prins Clausplein, waarna de weg weer naar maaiveld zakt en met 2x2 rijstroken verder gaat onder het knooppunt door richting Zoetermeer, Gouda en Utrecht [wegenwiki.nl].

De Utrechtsebaan is onder te verdelen in drie soorten kenmerken

- Open weg
- Verdiepte ligging
- Verdiepte en overkluide weg

Het eerste kenmerk 'open weg' is niet uitzonderlijk in vergelijking met andere wegen in Nederland.

Effecten van ongevallen met gevaarlijke stoffen uit zich hier zoals we in de modellen berekenen.

Het tweede kenmerk 'verdiepte weg' komt minder vaak voor in Nederland. Een ongeval met gevaarlijke stoffen kan zich hier anders manifesteren dan bij een 'open weg'.

Bij een verdiepte én overkluide weg is redelijk uniek in Nederland. Hier zal zowel het ongeval anders verlopen als de effecten van het ongeval op de omgeving, zeker in relatie tot de overkluizing.

Verdiepte ligging

Algemene eigenschappen verdiepte ligging: Een verdiepte weg is een weg die onder het maaiveld ligt. Bebouwing en begroeiing naast de weg ligt dus hoger dan de weg.



Verdiepte ligging mét overkluizing

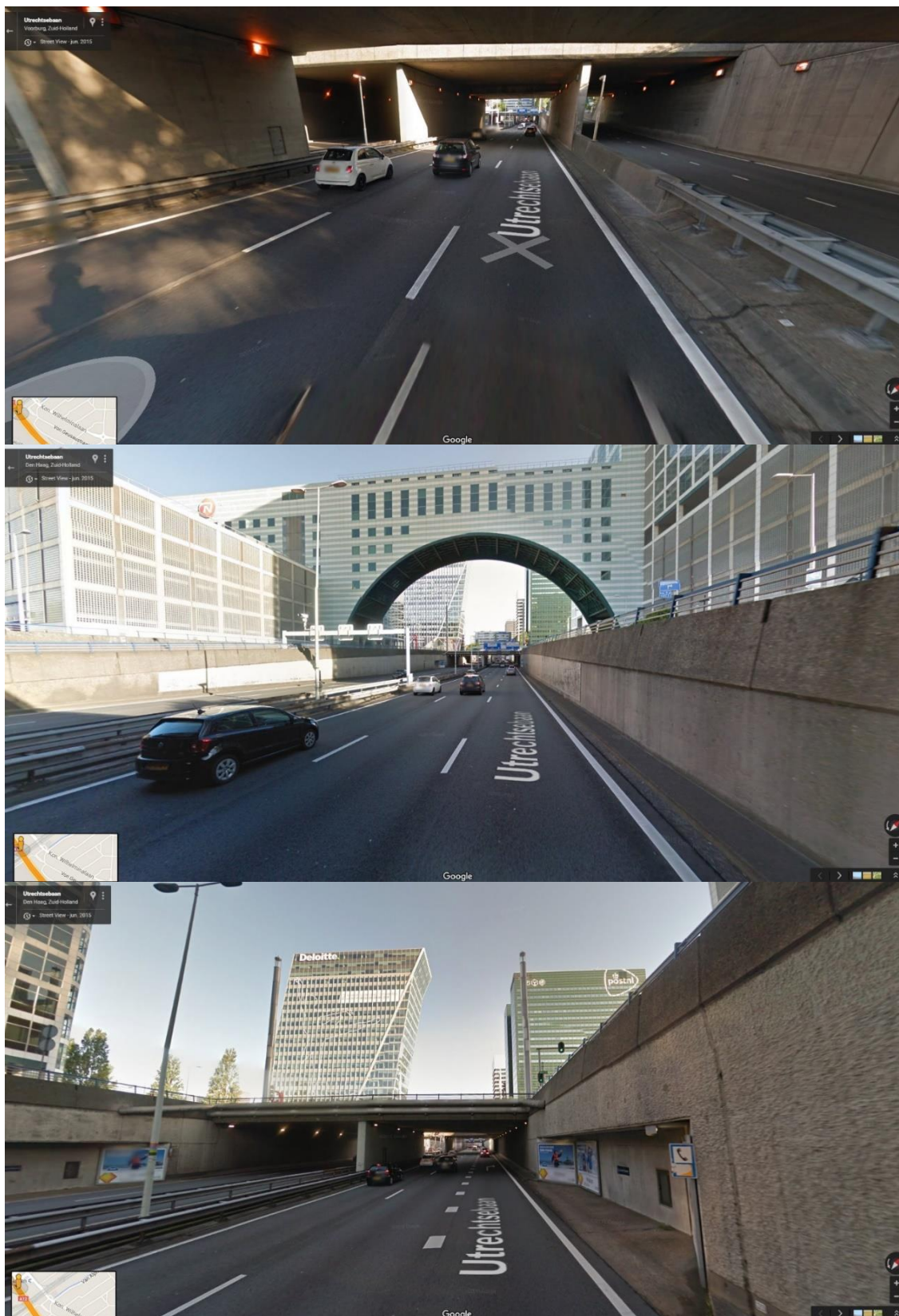
De eigenschappen zijn gelijk aan die van verdiepte ligging met die toevoeging dat er op bepaalde plekken ook bebouwing direct boven de weg is.



Utrechtsebaan in 14 afbeeldingen (Google Streetview)

Deze foto's zijn opgebouwd vanaf de A12 (Voorburg) naar het Malieveld (Den Haag).



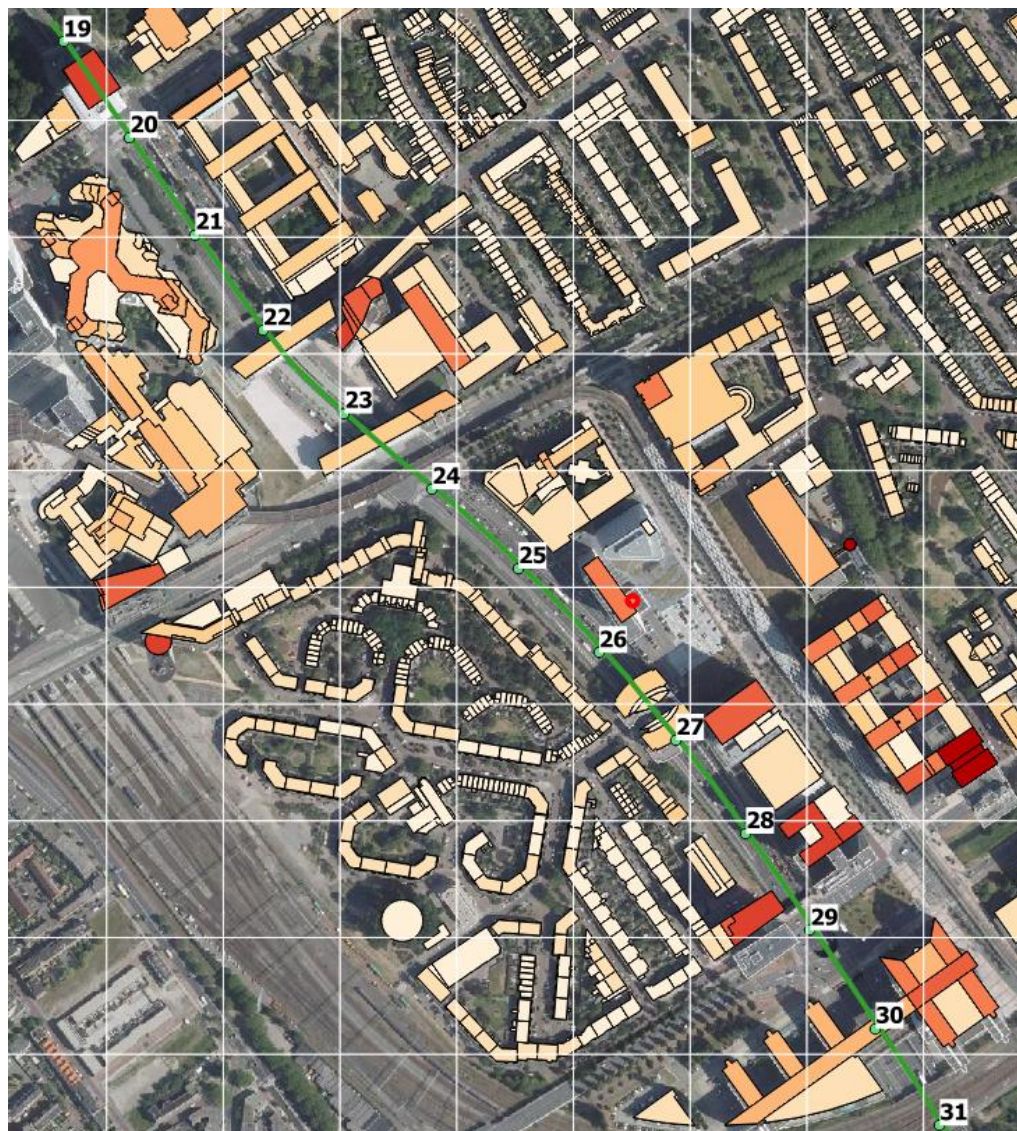






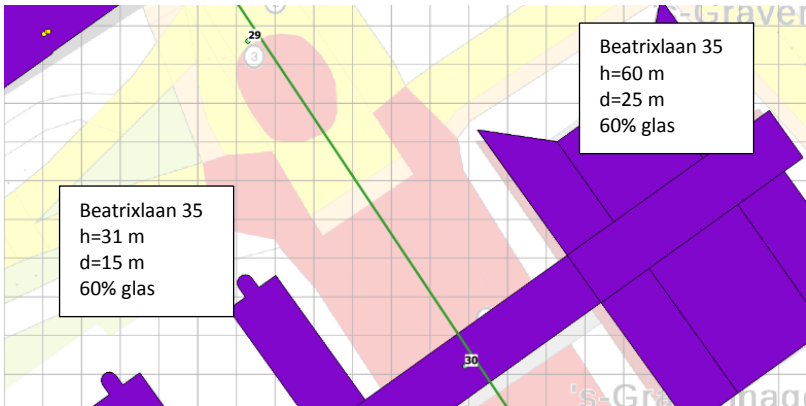
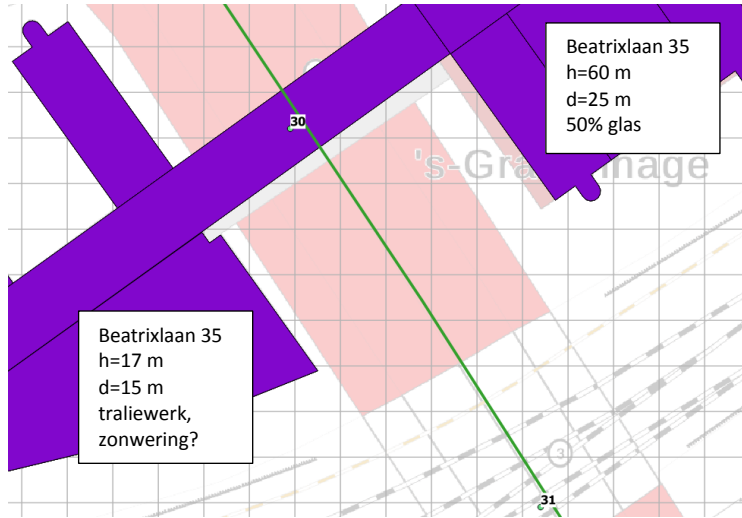
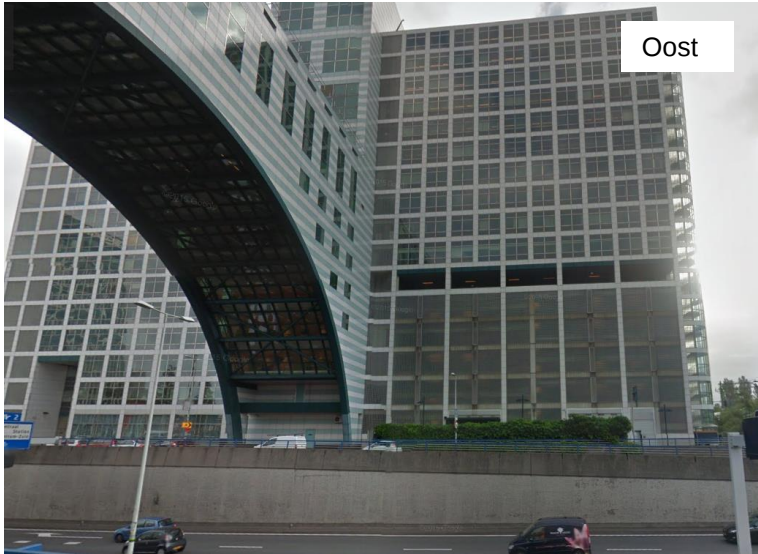
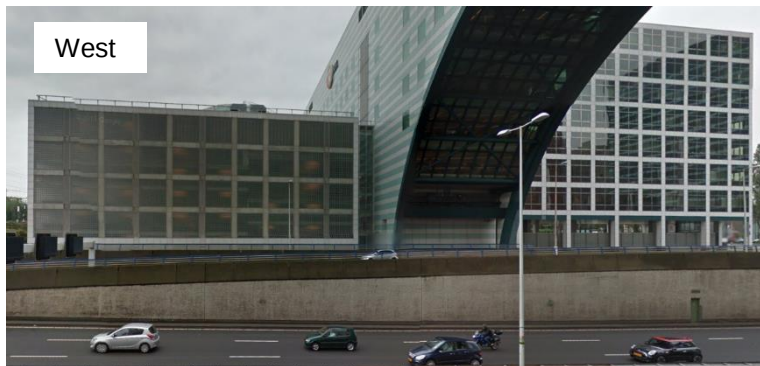


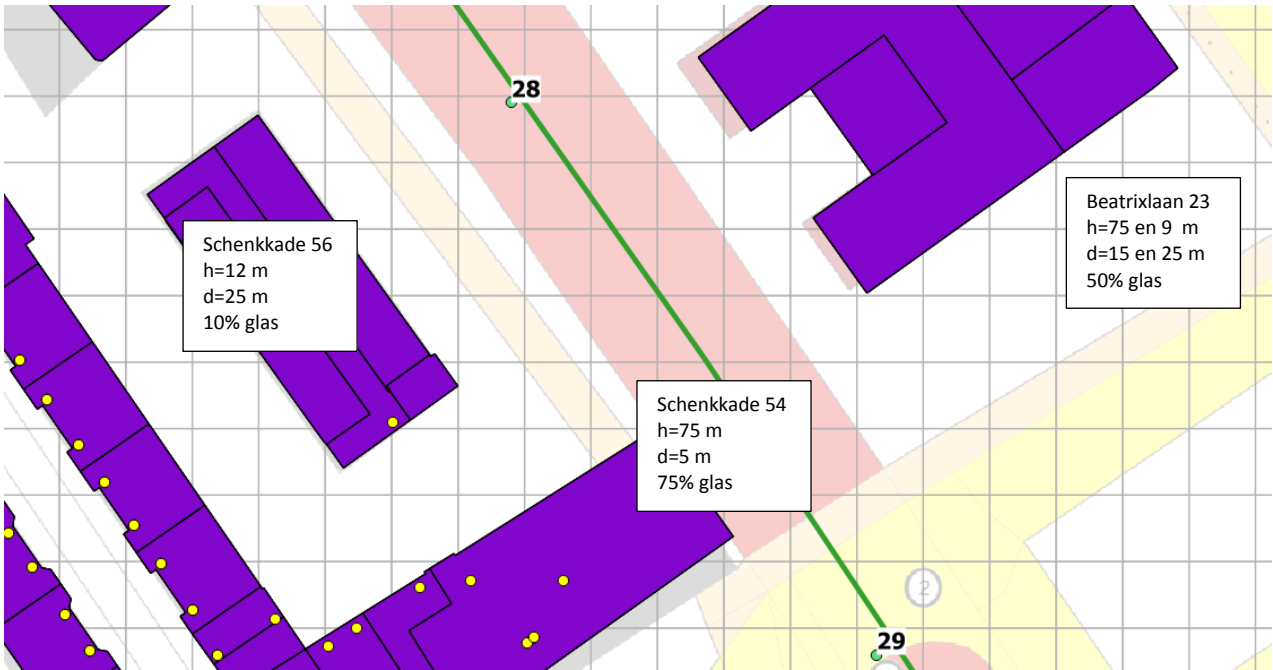
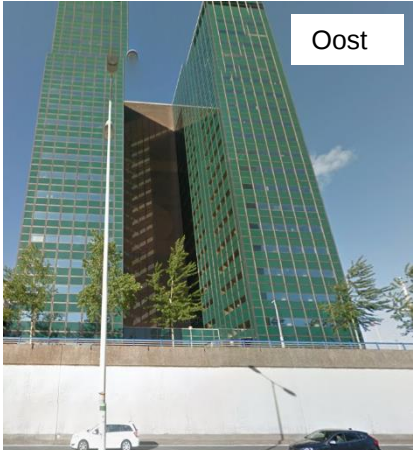
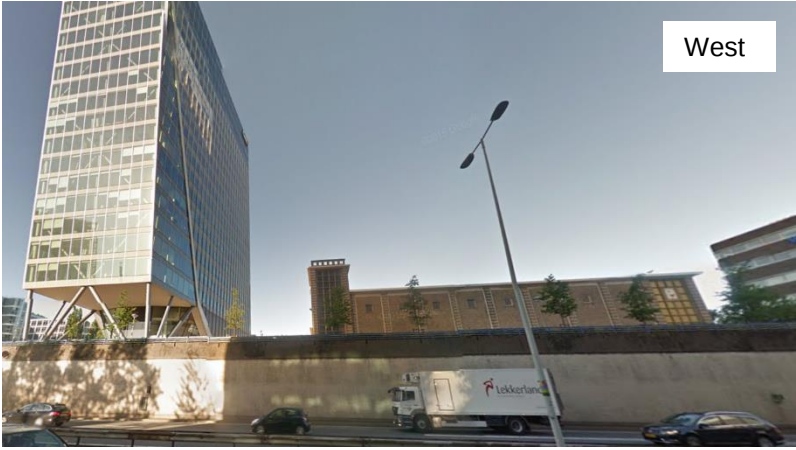
Bijlage 3 Gevelkenmerken per hectometer

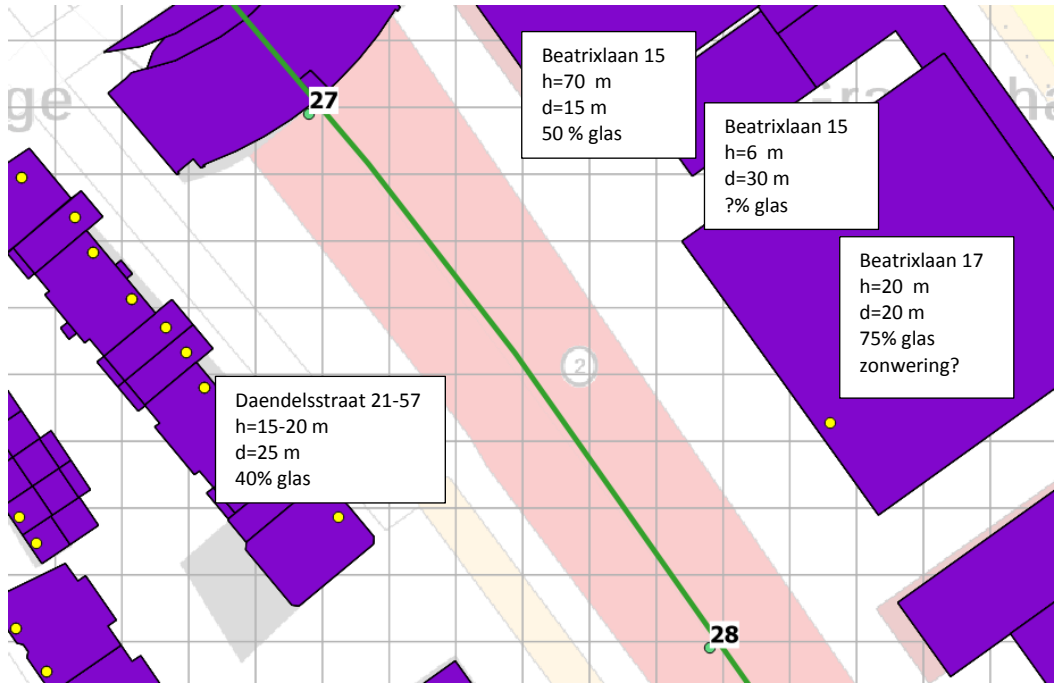


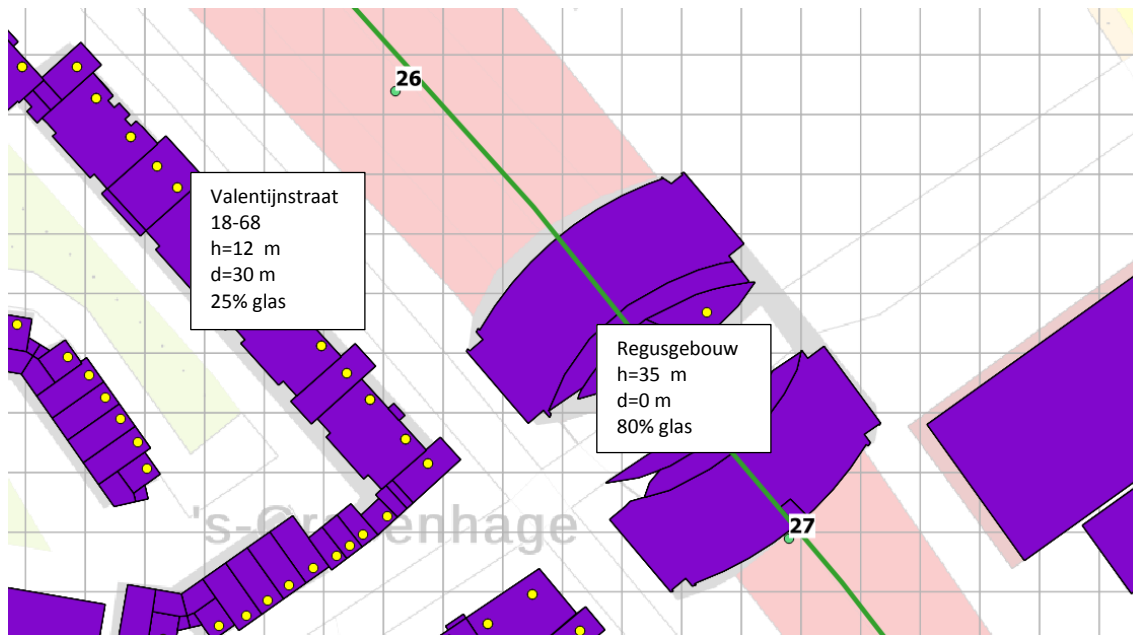
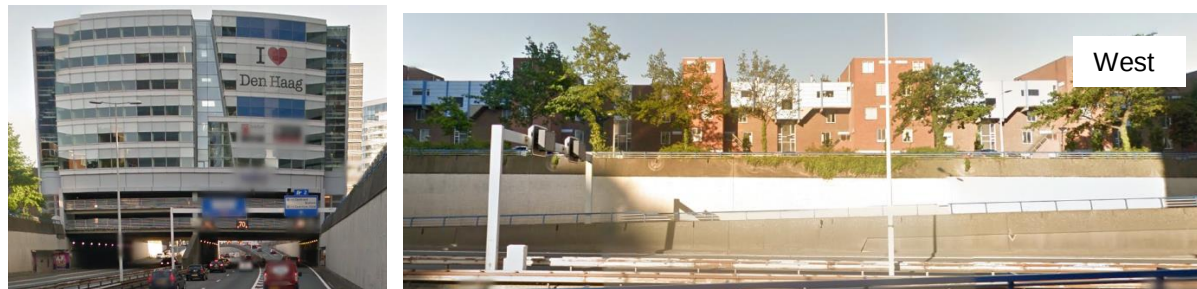
Het traject is in hectometers ingedeeld zoals hiernaast weergegeven (hm 19 tot en met 30).

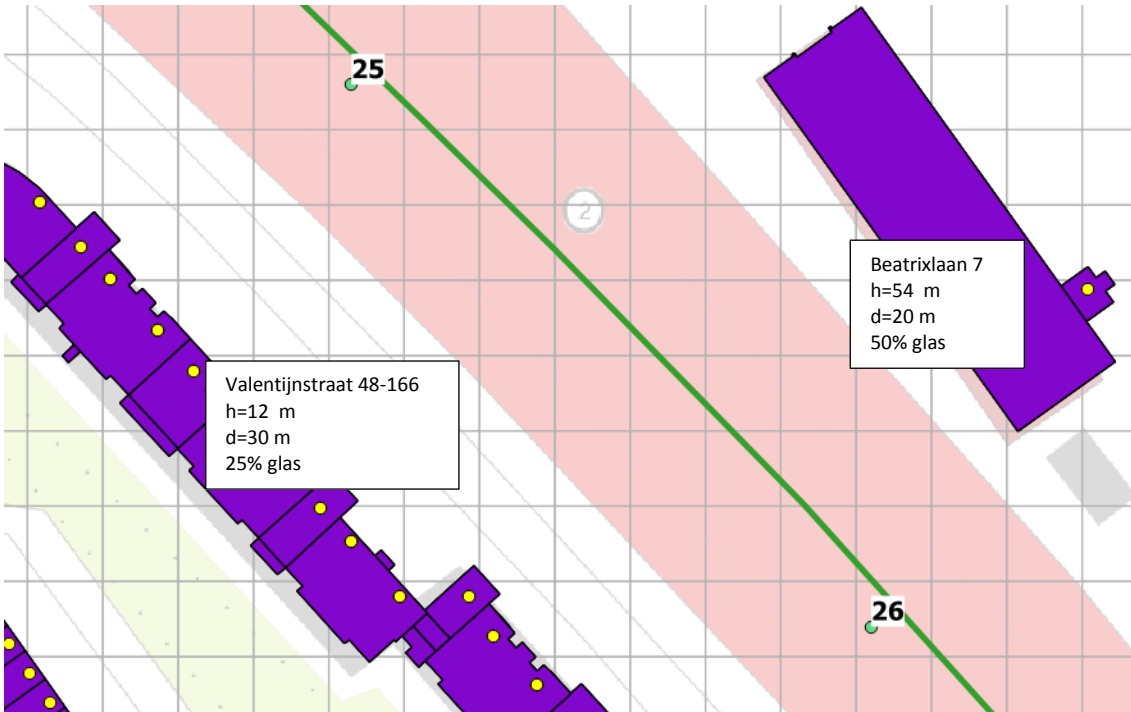
Hierna volgt per hectometer een beschrijving van de gevels langs de Utrechtsebaan. Benoemd worden: gebouwhoogte (h), afstand gevel tot rijbaan (d) en geschat percentage glas. De gevelaanzichten zijn ontleend aan Google Streetview, geraadpleegd juni 2016.

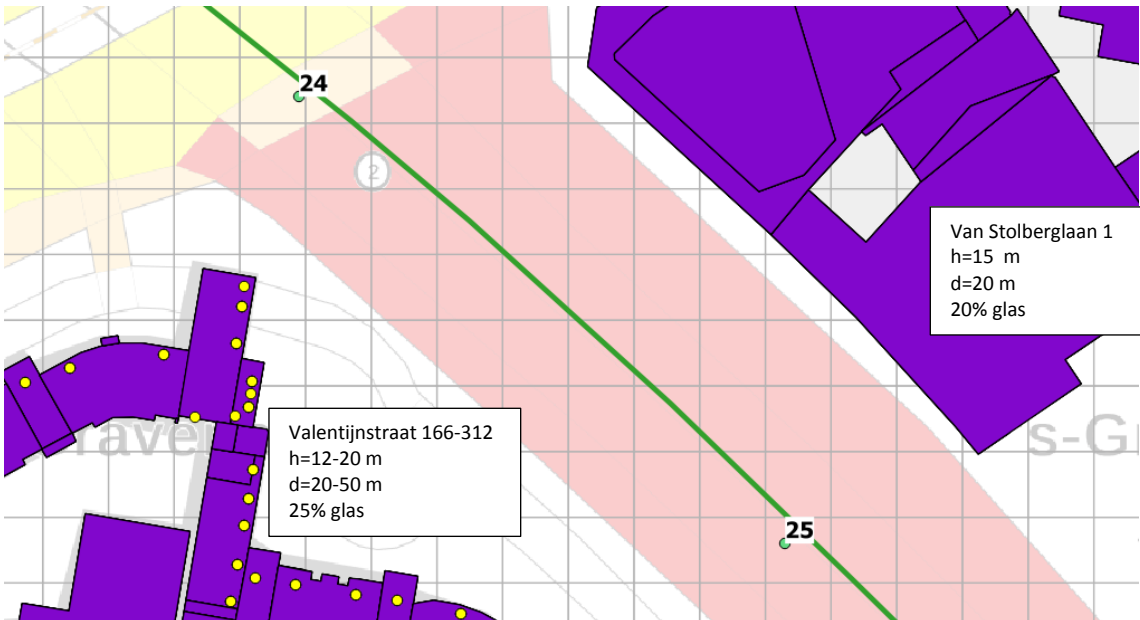
Hm	Situatie
29-30	   

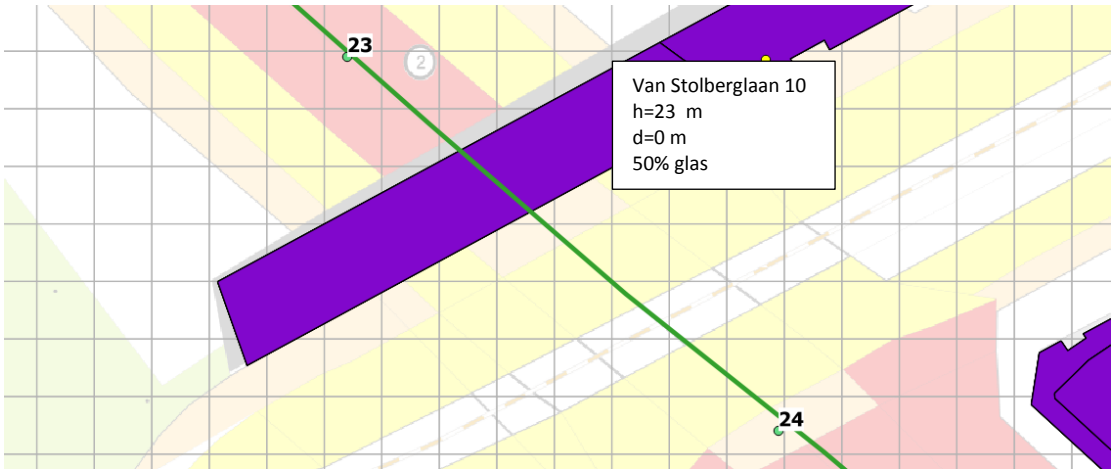
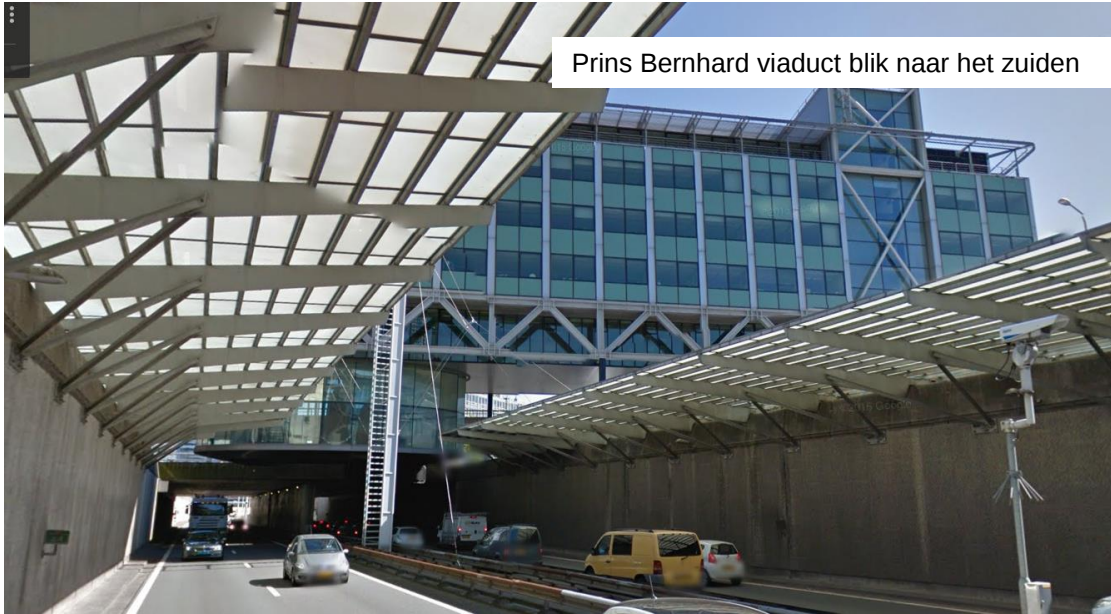
Hm	Situatie
28	 Schenkade 56 h=12 m d=25 m 10% glas Schenkade 54 h=75 m d=5 m 75% glas Beatrixlaan 23 h=75 en 9 m d=15 en 25 m 50% glas 29  Oost  West

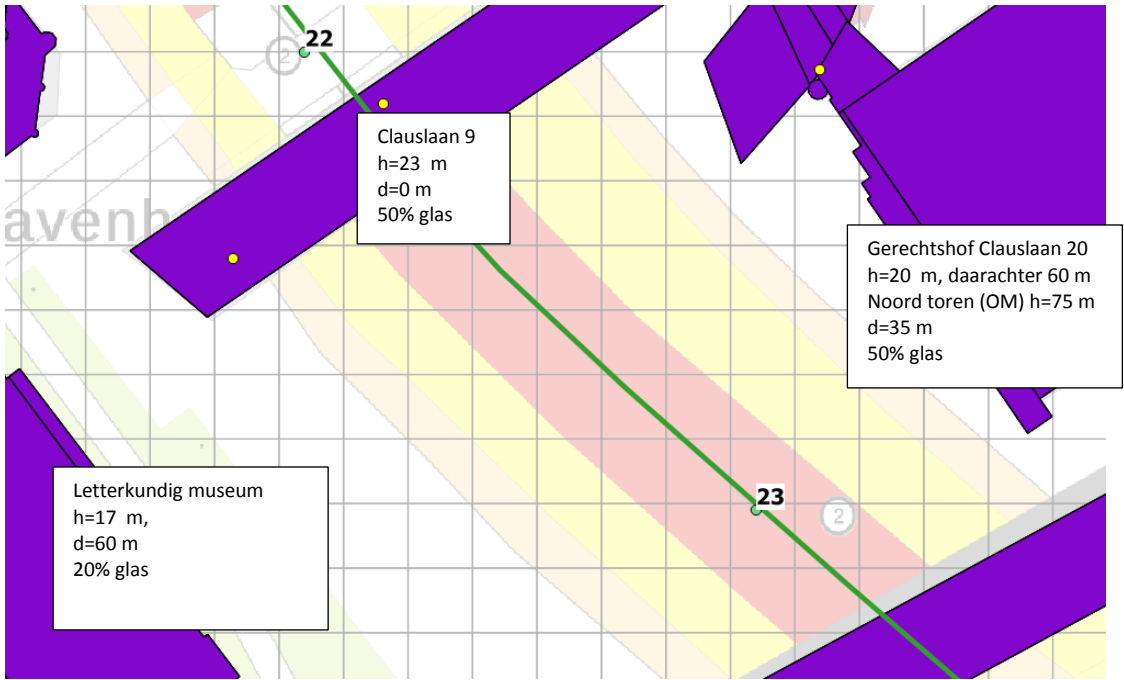
Hm	Situatie
27	  Oost  West

Hm	Situatie
26	 Valentijnstraat 18-68 h=12 m d=30 m 25% glas Regusgebouw h=35 m d=0 m 80% glas West 

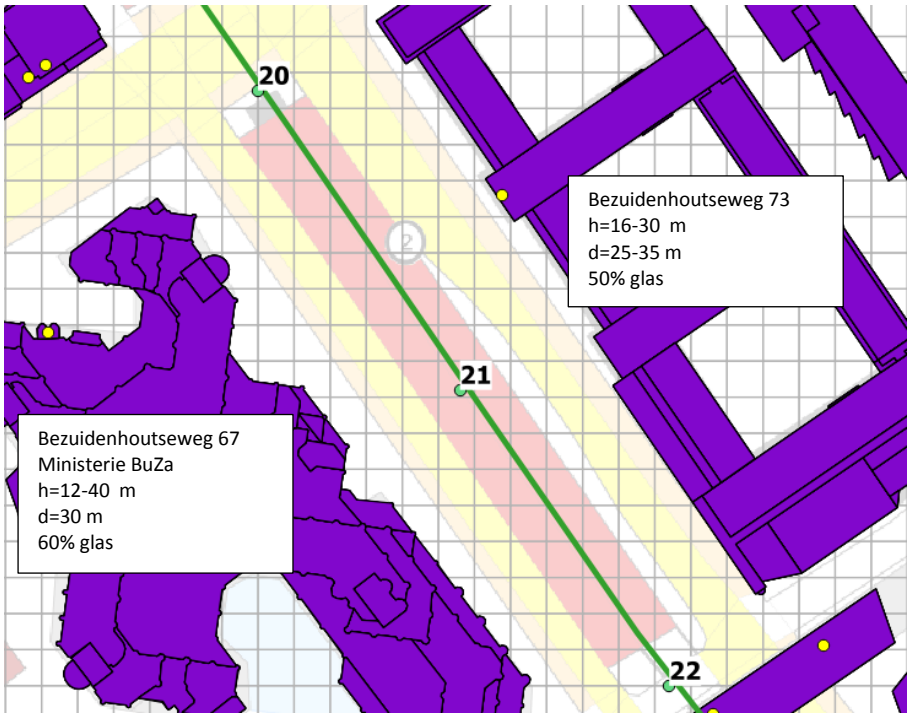
Hm	Situatie
25	 Valentijnstraat 48-166 h=12 m d=30 m 25% glas Beatrixlaan 7 h=54 m d=20 m 50% glas Oost West

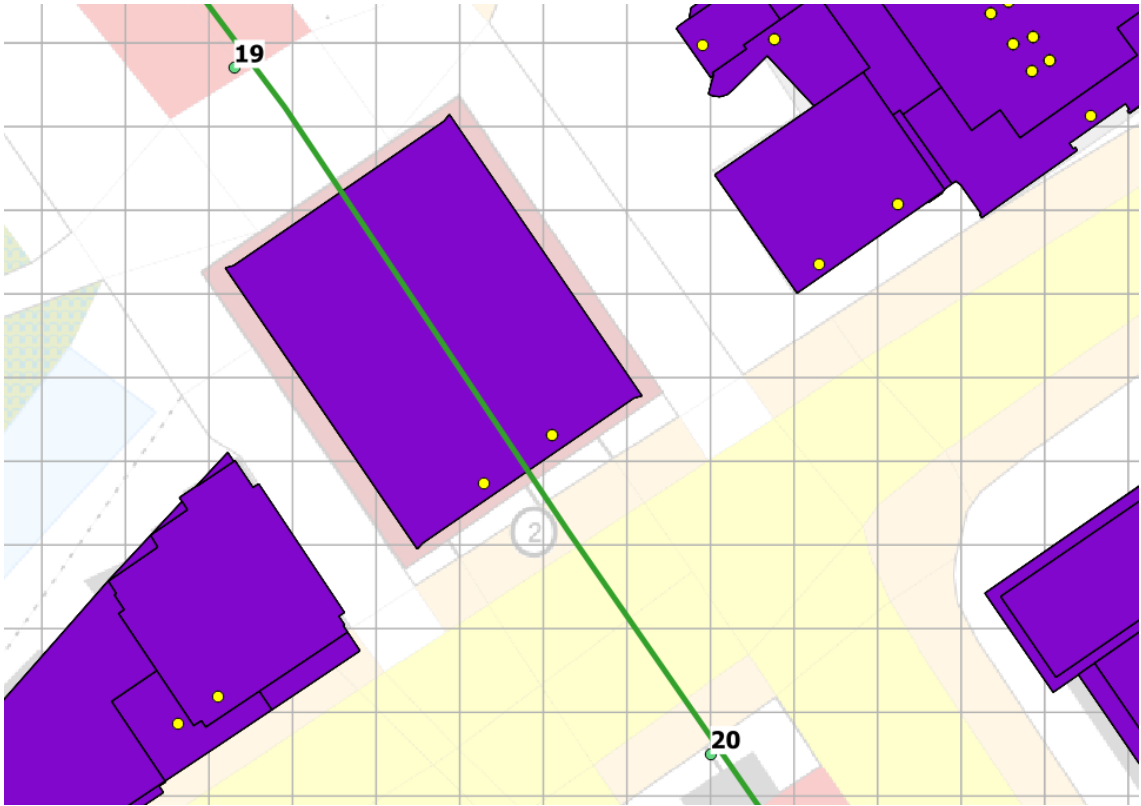
Hm	Situatie
24	 Van Stolberglaan 1 h=15 m d=20 m 20% glas Valentijnstraat 166-312 h=12-20 m d=20-50 m 25% glas 24 25 Oost West

Hm	Situatie
23	 

Hm	Situatie
22	  Oost  Prinses Irenepad blik naar het noorden

Hm	Situatie
22	

Hm	Situatie
20-21	 Bezuidenhoutseweg 73 h=16-30 m d=25-35 m 50% glas Bezuidenhoutseweg 67 Ministerie BuZa h=12-40 m d=30 m 60% glas  Oost  West

Hm	Situatie
19	 The map illustrates a BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) scenario. A green line connects point 19 (top left) to point 20 (bottom right). The line passes through a yellow shaded area, which likely represents a hazard zone. Several purple buildings are shown, with yellow dots indicating potential impact points or fire locations. A circular marker with the number 2 is also visible near the center of the map.

Hm	Situatie
19	 Malietoren blik richting vanuit zuiden  Oost zie hm 20-21