

DE ONTPLOFFING VAN HET KRUITMAGAZIJN VAN HOLLAND TE DELFT OP 12 OKTOBER 1654

Ir. W.P.M. Mercx, ir. J. Weerheijm, dr. ir. H.J. Pasman

1. Inleiding

Sinds plm. 1570 werd het oude Clarissenklooster op de plaats van de huidige Paardenmarkt door de Staten van Holland gebruikt als opslagplaats van vuurmonden, kruitbestanddelen en zwart buskruit zelf. Het laatste lag in de kelders die het 'Pulver ofte Buskruyt-magazijn' vormden¹. Dit kruitmagazijn kan evenwel ook betrekking hebben op een opslagplaats die daar in de directe omgeving moet hebben gelegen, het 'Secreet van Hollandt'. De bovenkant stak nauwelijks een voet (ongeveer 30 cm) boven het maaiveld uit, reden waarom het bij vele inwoners van de stad onbekend was².

Of het 'Secreet van Hollandt' nu betrekking heeft op de opslagkelders van het voormalig klooster dan wel op het afgezonderde magazijn is moeilijk te achterhalen. Feit is dat het kruit op 12 oktober 1654 om 10.30 uur is ontploft. Details over het ongeluk en de beschrijving van de schade zijn te vinden in de bijdrage van G.G. Kunz.

In dit hoofdstuk worden de gevolgen besproken die een dergelijke ontploffing thans voor de stad Delft zou inhouden. Gebruik zal worden gemaakt van schadecriteria die tegenwoordig worden gehanteerd; deze worden vergeleken met de schade die in 1654 is opgetreden.

2. Beschrijving van het ongeluk

Korte tijd nadat op maandag 12 oktober 1654 om half elf in de morgen een commies bij de Staten van Holland en West-Friesland

1. W.A. Feitsma, Delft en haar Krijgsgeschiedenis, Rijswijk 1987.
2. Dirck van Bleyswijck, Beschrijvinge der stadt Delft, Delft 1667.

met een metgezel een monster kruit was gaan trekken, ontplofte om onbekende reden het magazijn, waarin naar zeggen 80 tot 90.000 (oude) ponden buskruit lagen opgeslagen, overeenkomend met ongeveer 75 tot 84.000 ponden van nu.

De klap moet op Texel zijn gehoord. De schade was enorm. Geen huis in Delft was zonder schade. Tot op enige honderden "roeden in 't rond" (1 roede is ongeveer 4 m) was alles verwoest alsof er een aardbeving was geweest: de Grote en Kleine Doelenstraat, de Lakengracht waar pas nieuwe houten huizen stonden, de Geerweg en de Verwersdijk. Van 200 huizen werd niets terug gevonden. De daken en ramen van de beide kerken en het stadhuis waren beschadigd, de muren gescheurd. Na de explosie bevond zich op de plaats van de kruitopslag alleen nog maar een met water gevuld gat van zo'n 15 tot 16 voet (4,5 m) diepte.

Over het aantal slachtoffers wordt niet gesproken, hoewel de ellende groot moet zijn geweest zoals op te maken valt uit een beschrijving daags na het ongeluk.

3. Schadecriteria

De schade aan bebouwing ten gevolge van een explosie wordt veroorzaakt door een aantal effecten. Vindt de explosie in of op het aardoppervlak plaats dan zal een grondschok optreden. Vlak bij de explosie zal de druk in de grond zo hoog worden dat de grond wordt weggegooid en er een krater ontstaat. Ook zal in de onmiddellijke omgeving van de explosie grondverweking optreden; de draagkracht van de grond gaat verloren waardoor gebouwen kunnen wegzakken. Tot op grote afstand zal de grondschok gebouwen doen trillen waardoor er schade kan ontstaan (bijvoorbeeld scheuren).

Een explosie boven of op het aardoppervlak zal echter vooral effecten in de lucht veroorzaken. Deze effecten zijn de schokgolf, ook wel blast genoemd, brokstukken en hittestraling. Deze schokgolf is een plotselinge drukverhoging die zich met een snelheid groter dan de geluidssnelheid in alle richtingen bolvormig vanuit het explosiepunt uitbreidt. De druk in een dergelijke schok is dicht bij de explosie zeer hoog, in de orde van honderden atmosfeer. Deze druk neemt echter af naarmate de afstand tot de plaats van de explosie toeneemt. Eerst zal de schokgolf het gebouw verwoesten waarin het kruit is opgeslagen. De brokstukken van het gebouw

zullen met hoge snelheid wegvliegen en elders schade veroorzaken. In de onmiddellijke nabijheid zal tengevolge van de hittestraling brand uitbreken. Ook zal de schokgolf bij omringende gebouwen nog zware schade toebrengen en stukken kunnen afrukken, die daarna over aanzienlijke afstand worden verplaatst.

Afhankelijk van de mate van drukverhoging zal een bepaalde schade optreden. Met grotere afstand neemt de overdruk in de schokgolf namelijk snel af. Is de overdruk 40 kPa ($1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa} = 1000 \text{ N/m}^2 = 0.01 \text{ bar} \approx 0.01 \text{ atm}$) dan zullen woonhuizen instorten zodat geen reparatie mogelijk is. Is de overdruk 20 kPa dan is sprake van structurele schade: enkele muren zijn ingestort, ook dragende muren, waardoor bijvoorbeeld huizen tijdelijk niet bewoonbaar zijn.

Bij 5 kPa zal naast ruitbreuk (ongeveer de helft) kleine schade aan gebouwen optreden; deze bestaat uit lichte scheurvorming in muren, ontzette deuren en kozijnen, van het dak gewaaide pannen. De schade die nog bij 1 kPa optreedt zal bestaan uit een aantal gebroken ruiten.

De schade door de groundbeweging wordt gerelateerd aan de snelheid die de gronddeeltjes langs het oppervlak krijgen. Uitgaande van stenen woonhuizen uit de 20e eeuw zal schade ontstaan indien deze snelheid groter wordt dan 50 mm/s. De grenzen voor matige en zware schade liggen bij 140 en 190 mm/s. Op grotere afstand van het explosiepunt kan de grondtrilling worden vergeleken met die tengevolge van een aardbeving.

Bij aardbevingen zal een snelheid van de gronddeeltjes van 5 mm/s in gebouwen gevoeld worden. Deze snelheid kan worden vergeleken met het voorbijrijden van een zware vrachtwagen. Een snelheid van 20 mm/s betekent dat ruiten springen, pleisterwerk scheurt, voorwerpen omvallen, de bewegingen van bomen en palen waarneembaar zijn en taluds onstabiel worden.

4. Schadecirkels

De grootte van de overdruk in de schokgolf is onder meer afhankelijk van de afstand tot de plaats van de explosie, de zwaarte van de explosie en de soort explosie. De zwaarte van de explosie wordt over het algemeen uitgedrukt in de zogenaamde Trotyl- of TNT-equivalentie. Niet alleen springstoffen kunnen detoneren, ook

een aantal andere stoffen waaronder kruit. Er zijn springstoffen die een felle uitwerking hebben dan TNT maar er zijn er ook, bijvoorbeeld kruit, met een minder sterke uitwerking. De toepassing van een explosieve stof als een kruit om een projectiel voort te stuwten of als een springstof om een schade bij een doel te verkrijgen, volgt dan ook uit dit verschil in eigenschappen.

In feite moet onderscheid gemaakt worden tussen twee vormen van explosie: detonatie en deflagratie of explosieve verbranding. Bij detonatie wordt de stof doorlopen door een schokfront. De schok comprimeert en verhit de stof, waardoor een zeer snelle ontleding plaatsvindt en de energie vrijkomt die de schok in stand houdt. Bij een explosieve verbranding zijn, zoals de benaming ook aangeeft, ontsteking en reactiezone thermisch van aard en dus veel langzamer. In het algemeen neemt bij een deflagratie de voortplantingssnelheid van de zone wel toe bij hoger wordende druk en hierop berust de werking van kruit in de kamer van een wapen.

De gewone manier om een stof tot detonatie te brengen is door middel van een schokgolf opgewekt met een slagpijpje. Vooral korrelvormige stoffen zoals zwart buskruit kunnen echter, wanneer een voldoende grote hoeveelheid aanwezig is, bij ontsteking met een vlam zelf zo'n schokgolf opbouwen. Dit gebeurt dan door een vlam-versnellingsmechanisme waarbij steeds sneller meer explosieve stof in het omzettingsgebeuren betrokken wordt. Er gaan dan drukfronten ontstaan die aan de voorzijde van de versnellende vlam de stof samenpersen. Op een gegeven moment leidt dit tot een detonatiefront dat in een tijdsbestek van microsecondes de rest van de explosieve stof omzet. Dit moet tot de "Delftse Donderslag" geleid hebben.

De TNT-equivalentie is nu de hoeveelheid Trotyl die eenzelfde effect zou hebben als 1 kg van de beschouwde detonerende stof. Voor wat betreft de soort explosie dient onderscheid te worden gemaakt in een vrije-lucht, een oppervlakte of een ondergrondse explosie. Zijn deze gegevens bekend dan kan de druk op een bepaalde afstand van de plaats van de explosie worden bepaald.

Uit de historische beschrijving van de explosie in Delft blijkt dat er 80.000 tot 90.000 oude ponden zwart buskruit opgeslagen lagen, dus ruwweg 45 ton. Op energie-basis kan worden bepaald dat zwart buskruit een TNT-equivalentie heeft van 0,5. Voor het bepalen van de druk zal dus worden uitgegaan van 20 ton TNT.

Het kruit lag opgeslagen in een magazijn dat zich waarschijnlijk net onder de oppervlakte bevond en de explosie is eigenlijk geen echte oppervlakte of ondergrondse explosie. Bij een oppervlakte explosie gaat het merendeel van de explosie-energie over in de schokgolf in de lucht, terwijl bij een ondergrondse explosie het merendeel van de energie aan de grond wordt overgedragen.

Voor het bepalen van de druk in de schokgolf door de lucht zal worden uitgegaan van een oppervlakte explosie. Voor de schok door de grond is de situatie ingewikkelder omdat toch ook bij de oppervlakte explosie een sterke grondschok kan optreden. Daarom zal bij het bepalen van de druk in de grondschok van een oppervlakte explosie worden uitgegaan waarbij alle aanwezige energie aan de grond wordt overgedragen.

Op basis van eerdergenoemde hypothesen kunnen nu de afstanden worden berekend waarop de drukniveaus en grondsnelheden zullen heersen waarvoor in de vorige paragraaf de bijbehorende schade is beschreven. De tabellen 1 en 2 geven een overzicht.

Tabel 1

Schade afstanden voor de LUCHTSCHOK voor 20.000 kg TNT

<i>schade</i>	<i>druk (kPa)</i>	<i>afstand (m)</i>
ruitbreuk	1	2200
lichte schade	5	580
structurele schade	20	205
instorting	40	140

Worden de schade-afstanden vergeleken met de opgetreden schade zoals die wordt beschreven in de historische beschrijvingen van het ongeluk, dan lijken met name de 20 en de 40 kPa afstand aan de lage kant, m.a.w. de schade-cirkels in de stad waren groter. Opgemerkt moet worden dat de gegeven criteria voor stenen bebouwing gelden en niet voor de houten huizen uit de 17e eeuw. Wordt de huidige Paardenmarkt als explosiecentrum aangehouden dan blijken de

Tabel 2

Schade afstanden voor de GRONDSCHOK voor 20.000 kg TNT

<i>schade</i>	<i>grondsnelheid mm/s</i>	<i>afstand (m)</i>
trillingen voelbaar	5	400
scheuren, ruitbreuk	20	100
lichte schade	50	70
matige schade	140	46
zwarte schade	190	39

Tabel 3

Schade afstanden voor de LUCHTSCHOK voor 40.000 kg TNT

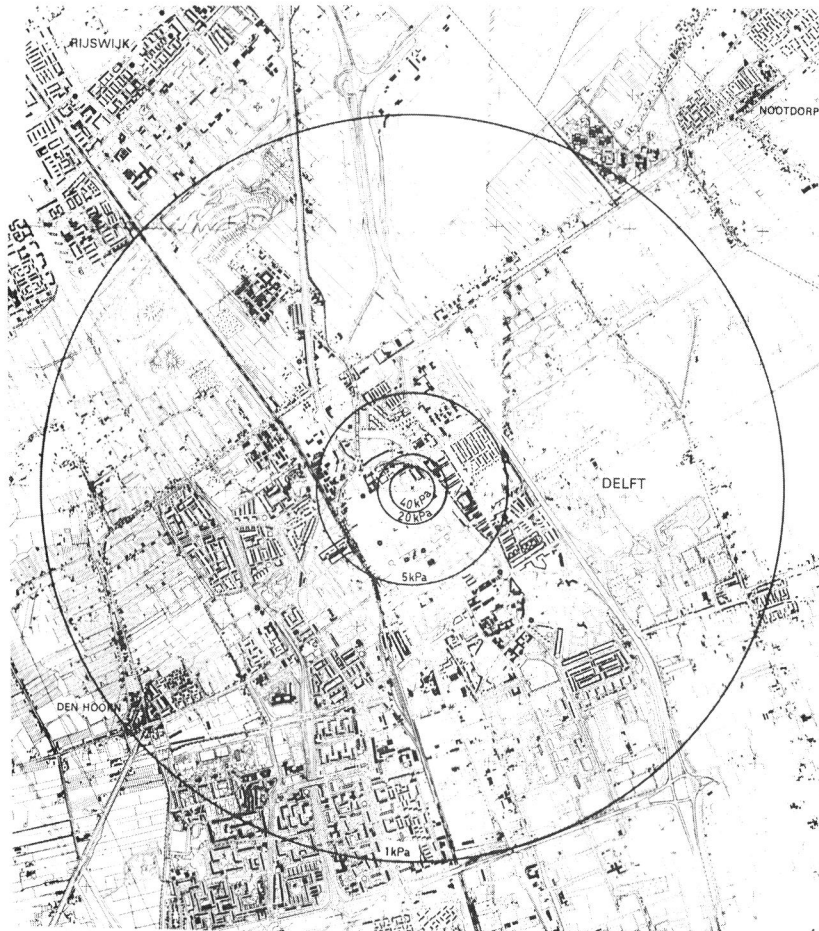
<i>schade</i>	<i>druk (kPa)</i>	<i>afstand (m)</i>
ruitbreuk	1	2800
lichte schade	5	735
structurele schade	20	260
instorting	40	170

Tabel 4

Schade afstanden voor de GRONDSCHOK voor 40.000 kg TNT

<i>schade</i>	<i>grondsnelheid (mm/s)</i>	<i>afstand (m)</i>
trillingen voelbaar	5	630
scheuren, ruitbreuk	20	160
lichte schade	50	90
matige schade	140	60
zwarte schade	190	50

- beide stenen kerken en het stenen stadhuis binnen de 5 kPa cirkel te vallen. Dat deze gebouwen schade opliepen als scheuren in de muren zoals in de historie vermeld, is dan ook voorstelbaar. Echter, dat ieder huis van de stad beschadigd moet zijn geweest lijkt op grond van de gegevens uit de tabellen 1 en 2 niet helemaal afleidbaar. Het vermoeden rijst dat er meer dan de beschreven 80.000 pond buskruit aanwezig moet zijn geweest. Om een indruk te krijgen zijn in de tabellen 3 en 4 de schade afstanden vermeld voor



Plattegrond van Delft en naaste omgeving, met ingetekende schadecirkels voor de schokgolf door de lucht.

een explosie van 40 ton TNT, dus tweemaal zoveel buskruit.

In dit geval beslaat de 5 kPa cirkel bijna de hele plattegrond van het oude gedeelte van de stad. Dit lijkt meer in overeenstemming met de historische beschrijving dat ieder huis in Delft zou zijn beschadigd.

Dat het "gansche Delfland met al zijn schoone dorpen daarvan beefde en sidderde" is ook voorspelbaar: tot in Den Hoorn, Delfgauw en waarschijnlijk Nootdorp moeten de ruiten zijn gebroken.

Wat een dergelijke explosie voor de huidige stad Delft zou betekenen kan nagegaan worden met behulp van de bijgevoegde plattegrond van Delft waarop de schadecirkels voor de schokgolf door de lucht zijn ingetekend voor een oppervlakte explosie van 40.000 kg TNT.

Ook, zo blijkt uit de beschrijving, zou "tot enige honderden roeden in het rond" alles verwoest zijn als was het door een aardbeving getroffen. Uit de tabellen 2 en 4 blijkt echter dat een dergelijke afstand niet door de grondschok gehaald wordt. Door de wijze van bouwen van die tijd plus de invloed van de met water verzadigde grond die de reikwijdte van de grondschok vergroten, zal de schadestraal wel groter zijn geweest, doch honderden roeden zullen niet worden gehaald ook niet als van een dubbele hoeveelheid buskruit wordt uitgegaan.

5. Letselcriteria

Bij letsel aan personen tengevolge van een explosie wordt onderscheid gemaakt tussen:

- primair letsel als gevolg van de overdruk.
- secundair letsel als gevolg van het meegesleurd worden door de explosiewind en het botsen tegen voorwerpen.
- tertiair letsel als gevolg van het getroffen worden door brokstukken.

Primair letsel waaraan mensen kunnen overlijden bestaat voornamelijk uit het optreden van longschade, die ontstaat doordat de druk in en buiten de borstkas niet gelijk is. In vergelijking met drukken waarbij gebouwschade optreedt is de druk voor longschade erg hoog. Een kans van 50 pct op overlijden ten gevolge van

longschade is te verwachten bij een overdruk van 4 bar. Een kans van 1 pct bestaat bij een overdruk van 2,8 bar.

Voor het hier beschouwde ongeval betekent dit, dat tot een afstand van ongeveer 50 m tot het explosiepunt overlijden ten gevolge van primair letsel zal voorkomen. Een andere vorm van primair letsel is trommel- of oorvliesbreuk. Dit zal niet tot overlijden leiden doch zal al bij lagere drukken voorkomen. Bij een overdruk van 40 kPa bestaat een kans van 8 pct op trommelvliesbreuk.

Het secundaire en tertiaire letsel is veel moeilijker te bepalen. Afhankelijk van de druk kan de maximale snelheid van meesleuren worden bepaald. Indien met deze snelheid een voorwerp wordt getroffen kan de overlevingskans worden bepaald. Brokstukken en fragmenten kunnen tot op grote afstand van het explosiecentrum terechtkomen. In de nabije omgeving zullen mensen worden getroffen door instortende gebouwen. Tot op enkele honderden meters afstand kunnen mensen worden getroffen door weggeslingerde brokstukken afkomstig van het exploderende opslagmagazijn. Ook glasscherven vormen een potentieel gevaar, zodat in het onderhavige ongeval tot 3 km afstand doden en gewonden zullen zijn gevallen.

Waarschijnlijk zijn de meeste slachtoffers gevallen door rondvliegend puin zoals ook het ooggetuigenverslag vermeldt: "..... en wierden door een hagelbui van steen en puin en kalk en stukken van balken d'armen en benen afgesmeten; de hoofden wierden van de lichamen der menschen afgeknost, en vele wierden 'er onder de puinhopen begraven,....."

6. Krater

Bij een explosie van explosieven op of in de grond zal in het algemeen een krater ontstaan. De straal en diepte van de krater kan worden bepaald afhankelijk van de hoeveelheid explosieven en de grondsoort. Voor met water verzadigde klei zal bij een oppervlakte explosie van 40.000 kg TNT een krater ontstaan met een straal van 27 m en een diepte van 17 m. Deze getallen zijn zeer globaal en kunnen gemakkelijk een factor 2 verschillen. Zeker de diepte-bepaling is zeer discutabel. Onverwachte effecten kunnen optreden: door grondverweking kan het weggedrukte water terugstromen met

meeneming van de grond. In het centrum van de krater kan dan zelfs een heuveltje ontstaan.

Bij de explosie in Delft werd een krater vol water geconstateerd met een diepte van 16 voet (4,5 m). De straal werd niet vermeld. De diepte lijkt wel erg gering, zeker gezien het feit dat het kruit ondergronds was opgeslagen tot waarschijnlijk 2 m diepte. De verklaring voor de ondiepe, met water gevulde krater is waarschijnlijk dat er grondverweking is opgetreden waardoor de bodem is opgestuwd. Het optreden van verweking brengt ook met zich mee dat de opgewekte grondschok groter is. (Verweking tot op 150-200 m zoals in zand zou optreden is in de klei/veengrond van Delft niet waarschijnlijk.)

7. Effect op grote afstand

Volgens de geschiedschrijving werd het geluid van de explosie tot op Texel gehoord "en verders aan de Noordzee en in de Provincien buiten Holland". De afstand Delft-Texel bedraagt ruim 100 km. Ondanks de grote explosie lijkt deze afstand wel erg groot om daar nog de klap gehoord te kunnen hebben. Toch is het te verklaren.

De grafieken waarmee de druk als functie van de afstand wordt gegeven gelden tot op niet te grote afstand vanaf het explosiecentrum (voor 40 ton TNT tot 20 à 25 km). Is de afstand groter, dan is de overdruk in de schokgolf erg laag en de bolvormige uitbreiding wordt gemakkelijk door de wind verstoord. Wordt de grafiek uit de studie van Baker³ echter geëxtrapoleerd dan zou de overdruk op een afstand van 100 km nog 10 à 20 Pa bedragen. Dit niveau komt globaal overeen met een geluidsdruk van 110 à 120 dB, hetgeen als een flink hard geluid, gelijk aan de donder van onweer wordt ervaren.

Naast verspreiding van de schokgolf, reflecties tegen allerlei objecten en door de wind, kan de laatste er ook de oorzaak van zijn dat er een concentratie van de overdruk ontstaat, zogenaamde focussing, ook wel Snellius-effekt genoemd. Deze focussing zal optreden wanneer de windsnelheid toeneemt met de hoogte boven

3. W.E. Baker et al, Explosion hazard and evaluation, Elsevier Publishing Company, 1983.

het aardoppervlak. Zeker wanneer op een bepaalde hoogte een luchtlaag aanwezig is waar de lichtsnelheid weer afneemt zal de schokgolf tegen deze laag reflektoren, terug naar het aardoppervlak. Ook een temperatuur-inversielaag kan een dergelijk effect tot stand brengen.

In Amerika waar veel proeven worden gedaan met zeer grote hoeveelheden springstof is onderzoek naar dit effect gedaan; immers, op plaatsen waar focusering optreedt zal meer schade (ruitbreuk) optreden. Men is in staat afhankelijk van de weersomstandigheden deze gebieden aan te geven zodat al dan niet tot uitvoering van de experimenten op die dag kan worden besloten.

Uit de literatuurgegevens kan worden afgeleid dat, gegeven ongunstige weersomstandigheden, de druk op 100 km afstand ongeveer tien maal hoger kan zijn geweest dan normaal. Op grond van dit focuserings-effect kan ook worden verklaard waarom explosiegeluid tot op onverwacht grote afstand kan worden gehoord, terwijl op kleinere afstanden niets wordt waargenomen.

8. Veiligheidsafstanden

De NAVO-groep AC/258 geeft aanbevelingen voor de aan te houden veiligheidsafstanden bij opslag van explosieve stoffen. In het geval van opslag van 40.000 kg TNT bedraagt de afstand tot bebouwing en wegen (externe veiligheid) ongeveer 760 m. Bij deze afstand behoort een drukniveau van 5 kPa. Enige schade wordt nog acceptabel geacht.

Naast dit drukcriterium bestaat er ook nog een brokstukcriterium. Voor afstanden tot dichtbevolkte bebouwing staat een vaste waarde van 400 m. Voor wegen waar het persoonlijk risico lager is, een afstand van 270 m. Overigens wordt erkend dat brokstukken tot op grotere afstanden dan 400 m terecht kunnen komen.

Wat waren de afstanden in de 17e eeuw? Wijs geworden door de explosie wil de gemeenteraad onder leiding van burgemeester Meerman het nieuwe Kruithuis voor de Generaliteit zo ver mogelijk buiten de stad hebben, liefst bij Rijswijk of Overschie. De Raad van State wil niet verder buiten de stad gaan dan 60 tot 100 roeden (240 tot 400 m). Als compromis wordt in 1660 het Kruithuis op ongeveer 1500 m van de stadswallen gebouwd. Hoeveel kruit daarin werd

opgeslagen is niet bekend. Alleen met de bebouwing van Delft rekening houdende leveren de huidige richtlijnen een toegestane hoeveelheid van 300.000 kg TNT equivalent!

9. Conclusie

Uit een beschrijving van de schade tengevolge van de explosie in het kruitmagazijn in Delft en een vergelijking met huidige inzichten over schadecriteria kan worden afgeleid dat er naar alle waarschijnlijkheid meer kruit opgeslagen moet zijn geweest dan de 80.000 à 90.000 (oude) ponden volgens de geschiedschrijving. Gezien de globalisatie van de schadecriteria die eigenlijk niet van toepassing zijn op de situatie uit die tijd en de globale schadebeschrijving kan echter geen duidelijke uitspraak worden gedaan over de werkelijke hoeveelheid. Een twee keer zo hoge hoeveelheid lijkt evenwel aanemelijk.