

TC211

Bijzondere belastingen
in tunnels

Auteur

Dirk-Jan Molenaar (TNO Bouw en Ondergrond)

Jaap Weerheijm (TNO Defensie en Veiligheid)

Adri Vervuurt (TNO Bouw en Ondergrond)

Henco Burggraaf (TNO Bouw en Ondergrond)

Dirk Roekaerts (TU Delft)

Piet Meijers (Deltares)

Fotografie omslag

???????

Vormgeving

Sirene Ontwerpers

Druk

Europoint

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de COB. Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken, mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. 'Bijzondere belastingen in tunnels', 2010, Stichting COB, Gouda."

Aansprakelijkheid

COB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en COB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die voortvloeit uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade voortvloeit uit opzet of grove schuld zijdens COB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

ISBNnummer

???

Samenvatting

Verkeerstunnels en overkapte wegen (landtunnels) komen de milieukundige en stedenbouwkundige inpassing ten goede en maken meervoudig ruimtegebruik in de stad mogelijk. Het aantal tunnels en overkappingen groeit dan ook. Dit maakt het vervoer van explosiegevaarlijke stoffen en onder hoge druk vervoerde gassen steeds moeilijker, want tankwagens met deze stoffen mogen als regel niet door tunnels. Met dit verbod sluit de overheid de risico's van een explosie in een tunnel uit. Maar het verbod is er voor de zekerheid, want over de exacte gevolgen van een explosie in een tunnel is onvoldoende bekend. Om nadere uitspraken te kunnen doen over hoe gerechtvaardigd dit verbod is, is meer kennis vereist over een explosie in een tunnel. Welke belastingen treden op? Hoe reageert de tunnel als deze dynamisch wordt belast? Bezwijkt de tunnel door de explosie? En hoe reageert de grond onder de dynamische belastingen die de tunnel doorgeeft?

De onderhavige studie richt zich in het bijzonder op de effecten van het optreden van een BLEVE¹ in een tunnel. De motivering voor deze keuze is gegeven in de voorstudie van het onderzoek.

In het onderzoek komt kennis van verdamping, explosies en de dynamica van constructie en grond samen. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van bestaande modellen, waar nodig zijn die aangepast aan nieuwe behoeften en inzichten. Soms bleek het nodig nieuwe modellen te ontwikkelen.

Voor de berekening van de krachten die op de constructie werken, waren bij het begin van het onderzoek alleen conservatieve modellen beschikbaar. Berekeningen die hiermee in het onderzoek zijn uitgevoerd leidden tot de verwachting dat een tunnel als gevolg van een BLEVE over een grote lengte bezwijkt. Gedurende het onderzoek werden modellen verfijnd en verbeterd. Met die nieuwe modellen zijn berekeningen gemaakt, waarbij de belasting varieert in zwaarte. De conclusie van die berekeningen aan een tunnelgeometrie die in de praktijk vaak wordt gebruikt, is dat een BLEVE over een lengte van ongeveer veertig meter grote schade aan de tunnelconstructie zal veroorzaken. Op grotere afstand bedraagt de explosiekracht nog ongeveer 100 kPa (1 bar). Sommige (afgezonken) tunnels zijn hier al tegen bestand en zullen die druk dus overleven. De meeste landtunnels zijn hier (nog) niet tegen bestand. Het verbeterde model voor de BLEVE belasting is nog in ontwikkeling: een promovendus van de TU Delft is daar tot eind 2010 mee bezig. Dan zal blijken of de belasting van de tunnel meer overeenkomt met de hoogst gebruikte waarde (in de conservatieve schatting) of meer met de lage waarde. Tussen de hoogste en de laagste waarde zit lokaal een factor 3. Uit dit promotieonderzoek zou dus kunnen blijken dat de belasting gereduceerd wordt tot een niveau waarop geconstrueerd kan worden.

Voor berekeningen van de interactie tussen de constructie en de grond is het eindige-elementenpakket LS-DYNA gebruikt. De constructie is hierin geavanceerd gemodelleerd, de bodem eenvoudig. Voor voorspellingen over het tunnelgedrag tijdens de explosie blijkt dit voldoende.

1. Een Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) betreft het zeer snel verdampen van tot vloeistof verdicht gas dat optreedt na het scheuren van een tank. Dit kan brandbare en niet brandbare gassen betreffen.

Berekeningen om de stabiliteit van de grond tijdens een grondschok te bepalen vergen geavanceerde grondmodellering. Twee nieuwe modellen zijn ontwikkeld en in PLAXIS geïmplementeerd. Hoogfrequente schokpropagatie kan nu met grote elementen worden gemodelleerd. Grond kan als een tweefasen materiaal (water en grond) worden beschreven, wat belangrijk is voor de Nederlandse condities. De implementatie in PLAXIS borgt de ontwikkelde kennis en houdt deze beschikbaar voor berekening van praktijktoepassingen.

Het onderzoek heeft hiermee bruikbare inzichten en gereedschappen opgeleverd om de consequenties van explosies te kwantificeren. De commissie Bijzondere belastingen stelde ermee vast dat het voor het gedrag van de tunnel niet veel uitmaakt hoe stijf de grond is waarin de tunnel zich bevindt. Welke invloed de stijfheid van de grond heeft op het gedrag van de grond zelf en daarmee op de bebouwing boven de tunnel en in de buurt van de tunnel, is nu niet onderzocht. Voor een eventueel besluit om bebouwing toe te laten boven een tunnel zal dit aspect ook onderzocht moeten worden. De basis daarvoor is gelegd.

Het project heeft bouwstenen opgeleverd voor het oplossen van de problemen rond het transport van explosiegevaarlijke stoffen door tunnels, en daarmee aan een vraagstuk van maatschappelijk belang. Immers: er komen steeds meer verkeerstunnels en overkapte wegen, omdat die de milieukundige en stedenbouwkundige inpassing verbeteren en meervoudig ruimtegebruik in de stad mogelijk maken. Als ook explosiegevaarlijke stoffen veilig en verantwoord gebruik kunnen maken van tunnels, verlicht dit de druk op andere routes en reduceert het de kosten voor de transportsector. Ook wordt het mogelijk tunnels te bouwen op plekken waar dit anders niet zou kunnen, juist omdat er gevaarlijke stoffen over deze routes getransporteerd moeten worden.

Met de resultaten van dit onderzoek kan verder gebouwd worden aan een veilig en bereikbaar Nederland. De resultaten van het onderzoek kunnen worden gebruikt in de risicomodellen van Rijkswaterstaat. Nader onderzoek moet uitwijzen hoe dit het best kan. Ook moet nader onderzoek volgen naar de gevolgen van explosies en naar de kans op optreden van een explosie. De onderzoeksinstellingen zetten hier graag de schouders onder, samen met het ministerie van Verkeer en Waterstaat en Rijkswaterstaat.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	7
1.1 De explosie en de tunnel	7
1.2 Kiezen voor de BLEVE	7
1.3 Aan de slag met bijzondere belastingen	8
1.4 Commissie “Bijzondere belastingen”	8
1.5 Opbouw rapport	8
2 Thermodynamische en gasdynamische eigenschappen van een BLEVE	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Bestaande kennis	11
2.3 Nieuwe kennis	12
2.4 Conclusies	17
3 Modelling dynamische grondresponse	19
3.1 Inleiding	19
3.2 Bestaande kennis	20
3.3 Nieuwe kennis	21
3.4 Conclusies en aanbevelingen	26
4 Dynamische grond-tunnelresponse	27
4.1 Inleiding	27
4.2 Bestaande kennis	27
4.3 Nieuwe kennis tunnelresponse (resultaten berekeningen met LS-DYNA)	28
4.4 Nieuwe kennis grondresponse (resultaten berekeningen met PLAXIS)	34
4.5 Vergelijking tunnelresponsie in LS-Dyna en in Plaxis	35
4.6 Conclusies	37
5 Conceptwerkwijze beoordeling explosiebestendigheid tunnels	39
6 Conclusies	41
7 Referenties	43

1 Inleiding

1.1 De explosie en de tunnel

De druk op de ruimte in Nederland is groot. Pas na langdurig passen en meten vinden we voor alle functies een plek. Door ook de derde dimensie, de ondergrond, intensief te benutten kunnen we deze druk verlichten. We kunnen planologische problemen oplossen en de ruimtelijke kwaliteit verhogen. Verkeerstunnels en overkapte wegen zijn hiervan uitstekende voorbeelden. Ze verbeteren de doorstroming en maken meervoudig ruimtegebruik in de stad mogelijk. Het aantal tunnels groeit dan ook gestaag.

Helaas kan nog niet alle transport via dit groeiend aantal tunnels plaatsvinden. Met name voor het transport van explosiegevaarlijke stoffen en onder hoge druk vervoerde gassen zijn de meeste tunnels verboden terrein. Deze stoffen moeten nu via alternatieve, vaak langere, routes en kleinere wegen worden vervoerd. Dit komt de integrale veiligheid niet per definitie ten goede. Naarmate het aantal tunnels toeneemt, wordt het bovendien steeds lastiger om nog goede alternatieve routes te vinden.

Is het terecht om explosiegevaarlijke stoffen uit tunnels te weren? Die vraag kan nog niet voldoende gefundeerd beantwoord worden: we weten nog te weinig over de gevolgen van een explosie in een tunnel. De actuele situatie met steeds meer tunnels maakt een onderbouwd antwoord op deze vraag echter wel noodzakelijk. Ook de ontwikkelingen rond het Basisnet, waarbij gezocht wordt naar een duurzaam evenwicht tussen het vervoer van gevaarlijke stoffen, ruimtelijke ontwikkelingen en veiligheid, maken nader onderzoek gewenst.

Wat gebeurt er precies bij een gasexplosie of een BLEVE in een tunnel? Wat gebeurt er met de tunnel? Hoe reageert de grond? En: wat zijn de gevolgen voor de omgeving? Pas als we goed inzicht hebben in het explosiegevaar en de gevolgen daarvan voor de tunnel en de stedelijke omgeving, zijn we in staat de juiste afweging te maken. Daarom bracht het consortium DC-COB samen met Rijkswaterstaat de gevolgen van een BLEVE in een tunnel in kaart.

1.2 Kiezen voor de BLEVE

Aan deze studie ging een voorstudie vooraf. Het doel van de voorstudie was om te bepalen hoe het beschikbare onderzoeksbudget het best kon worden ingezet. De voorstudie ging bijvoorbeeld in op de vraag of een gasexplosie een relevant aandeel heeft in het risicoprofiel van een tunnel. Ook beoordeelde de onderzoekscommissie hoe goed de bestaande dispersiemodellen zijn en of de huidige modellen voor het bepalen van het gedrag van de grond bij een explosie goed genoeg zijn.

Uit de voorstudie bleek dat de BLEVE en de gasexplosie een vergelijkbare kans van optreden hebben. Ook werd duidelijk dat de risico's beslist niet bij voorbaat verwaarloosbaar zijn. Gegeven het budget moest een keuze gemaakt worden voor onderzoek naar een BLEVE of een gasexplosie. De keuze viel op de BLEVE, omdat hier de kans op een bevredigend onderzoeksresultaat het grootst was. Een gasexplosie brengt namelijk meer onzekerheden met zich mee. Wel legt dit BLEVE-onderzoek de randvoorwaarden voor later gasexplosieonderzoek vast.

1.3 Aan de slag met bijzondere belastingen

De onderzoekscommissie formuleerde ter beantwoording van de hoofdvraag een aantal onderzoeksvragen:

1. Welke belastingen treden op bij een BLEVE in een tunnel?
2. Hoe reageert de tunnel als deze dynamisch tot bezwijken wordt gebracht?
3. Hoe reageert de grond onder de dynamische belastingen die de tunnel doorgeeft?

Om de vragen te beantwoorden is waar mogelijk gebruik gemaakt van bestaande modellen en conservatieve aannames, die naarmate de detailkennis groeide konden worden verfijnd. Voor het gedrag van de grond bleek een nieuw model nodig, dat geïmplementeerd is in het eindig-elementenpakket PLAXIS. De interactie tussen tunnelconstructie en de omringende grond bleek een complex vraagstuk, waarvoor in modelleeromgeving LS-DYNA een eenvoudig model voor het grondgedrag gecombineerd is met een gedetailleerd model van de tunnelconstructie. Ook werd in PLAXIS een gedetailleerd grondmodel gecombineerd met een eenvoudig constructiemodel.

Het onderzoek was multidisciplinair van aard. De vraagstelling vereiste integratie van kennis op het gebied van explosies en verdamping en van de dynamica van constructie en grond. De onderzoekscommissie is geslaagd in deze niet eenvoudige integratieopgave. Het resultaat van de inspanningen mag er zijn. Het onderzoek leverde inzicht en gereedschappen op die het mogelijk maken de consequenties van explosies te kwantificeren. Deze gereedschappen maken het vervolgens mogelijk om, indien nodig, de explosiebestendigheid van bestaande tunnels nauwkeuriger vast te stellen en nieuwe tunnels explosiebestendiger te ontwerpen.

1.4 Commissie "Bijzondere belastingen"

De commissie "Bijzondere belastingen" bestaat uit de volgende deelnemers:

Ferry de Graaf (RWS, voorzitter)
 Jolanda van Deursen (TNO, secretaris)
 Paul Holscher (Deltares)
 Piet Meijers (Deltares)
 Marius Naaktgeboren (RWS)
 Gerrit Wolsink (RWS)
 Henco Burggraaf (TNO)
 Dirk-Jan Molenaar (TNO)
 Adri Vervuurt (TNO)
 Jaap Weerheijm (TNO/TU Delft)
 Rafid al Khoury (TU Delft)
 Jos Wessels (TNO)
 Xie Mengmeng (TU Delft)
 Dirk Roekaerts (TU Delft)

1.5 Opbouw rapport

In hoofdstuk 2 wordt antwoord gegeven op de vraag welke belasting optreedt bij een BLEVE in een tunnel. In hoofdstuk 3 wordt antwoord gegeven op de vraag hoe de tunnel reageert als deze dynamisch tot bezwijken wordt gebracht (3.1) en hoe de grond

reageert onder de dynamische belastingen die de tunnel doorgeeft (3.2). In hoofdstuk 4 volgen de conclusies.

Dit rapport is een samenvatting van eerdere rapporten (zie [6], [8] tot en met [12]), die bij elkaar het totale onderzoek "Bijzondere belastingen" beschrijven.

2 Thermodynamische en gasdynamische eigenschappen van een BLEVE

2.1 Inleiding

Eén van de doelen van het DC-project is om een model te ontwikkelen waarmee de belasting op de tunnelwand tengevolge van een BLEVE in de tunnel, kan worden gekwantificeerd.

De kracht van een BLEVE wordt bepaald door de hoeveelheid gas die kan verdampen en vooral de snelheid waarmee dit gebeurt. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de thermodynamische eigenschappen van de snel verdampende vloeistof samen met de wetten van de gasdynamica in een model werden gevat om de eigenschappen van de drukpuls van de BLEVE te voorspellen. TNO heeft in het verleden een 2D-basismodel ontwikkeld met conservatieve aannamen voor het verdampingsproces. De Delft Cluster-COB commissie "Bijzondere belastingen" heeft een meer gedetailleerd, en minder conservatief model ontwikkeld (1D). Beide modellen zijn toegepast op een LPG BLEVE in een tunnel. Naast de snelheid van het verdampingsproces is de hoeveelheid vloeibaar gas en de snelheid waarmee dat vrijkomt, bepalend voor de kracht van de BLEVE. Om dit te kwantificeren is het openscheuren en bezwijken van een representatieve LPG tank onderzocht. De resultaten zijn verwerkt in het TNO model.

2.2 Bestaande kennis

De standaard theorie over wat een BLEVE is, is als volgt. Onder normale condities zijn de vloeistof en de damp die zich in een vat bevinden met elkaar in thermodynamisch evenwicht. Wanneer het vat breekt, daalt de druk plotseling tot de omgevingsdruk. Bij lagere druk hoort in evenwicht een grotere fractie gas en het systeem zal daar naartoe evolueren door verdamping. Vooraleer de verdamping op gang komt bevindt de vloeistof zich in een metastabiele toestand. De temperatuur is dan boven het kookpunt bij omgevingsdruk. Naarmate de verdamping sneller op gang komt, zal het volume van het systeem sneller toenemen en de omgevingslucht sneller opzij geduwd worden, met mogelijk een explosieve schok tot gevolg. Bij geringe oververhitting zal verdamping slechts op gang komen vanaf nucleatiekernen bij wanden en onzuiverheden in de vloeistof. Bij grote mate van oververhitting kan het anders lopen. De mate waarin een vloeistof oververhit kan zijn, kan niet groter zijn dan een bepaalde limietwaarde. Bij het bereiken van deze limietwaarde zal verdamping vrijwel tegelijkertijd overal in de vloeistof optreden met een maximaal explosief effect tot gevolg. In een dergelijke situatie zal, gegeven de hoeveelheid vloeistof die verdampt, de beperkende factor voor de verspreiding van het explosieve effect gelegen zijn in de noodzaak de omringende lucht opzij te duwen. Uitgaande van deze observatie heeft TNO een rekenmodel ontwikkeld [van den Berg et al.]. Dit model berekent wat er gebeurt in de omringende lucht uitgaande van de volgende veronderstellingen:

- het rekendomein strekt zich uit van de rand van de vloeistof bij het begin van de explosie tot zover in de omgeving als nodig is.
- de materie die vanuit de exploderende vloeistofmassa het rekendomein binnestroomt gedraagt zich als een gas met hoge dichtheid. De dichtheid is hoger dan die

van lucht, om in rekening te brengen dat het in feite een mengsel is van vloeistof druppels en damp. Door te veronderstellen dat het mengsel kan behandeld worden als een gas, worden oppervlaktespanning en andere twee-fase-effecten verwaarloosd.

- de massastroom die over de rand van het rekendomein binnenstroomt volgt uit de lokale condities, met name het lokale drukverschil. Lokale waarden van druk en snelheid, zijn gekoppeld zijn aan de condities in de omgeving, zoals beschreven door de Eulervergelijkingen.
- De druk die heerst aan de rand van het rekendomein wordt bepaald door de veronderstelling dat de warmte die aan het exploderend systeem is onttrokken door het wegstromende mengsel heeft geleid tot een simultane daling van temperatuur en druk van de vloeistof. De temperatuuurdaling wordt bepaald uit een globale warmtebalans en de druk uit de thermodynamische evenwichtsvoorwaarde.

Dit model gaat ervan uit dat de verdamping altijd maximaal is. Verdampingssnelheid wordt niet in rekening gebracht als mogelijke factor die de kracht van de explosie kan beperken. Ook is het model een globaal model voor wat betreft het warmtetransport door de vloeistof heen. De totale vloeistofmassa wordt geacht dezelfde temperatuur en druk te hebben, die evolueert als functie van de tijd.

Bovendien is het uitgangspunt dat de hoeveelheid vloeibaar gas instantaan vrijkomt, de aanname is dat de tank instantaan bezwijkt.

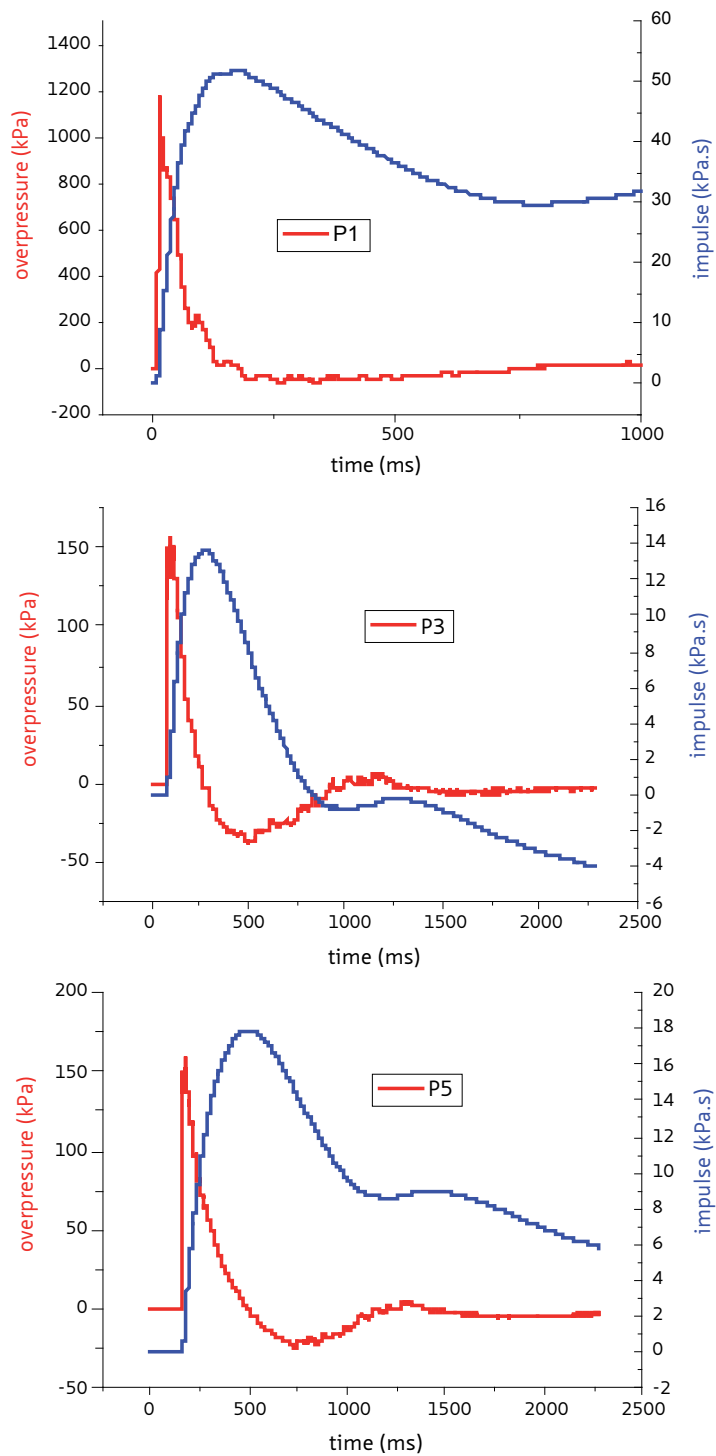
2.3 Nieuwe kennis

2.3.1 Toepassing van het TNO-model op een BLEVE van LPG in een tunnel

Het TNO model werd toegepast op de berekening van de drukgolf na een BLEVE van 50 m³ LPG in een tunnelbuis. Het model werd eerst uitgebreid met een procedure om de tijd die verloopt tijdens het catastrofaal openscheuren van het vat in rekening te brengen. Dit werd gedaan door de grootte van het oppervlak waardoor de uitstroom naar de omgeving gebeurt lineair te laten toenemen in de tijd, en dit zo dat het totale openscheuren van het vat een totale tijdsduur heeft van 0.0 s (instantaan openscheuren), 0.1s, 0.2s, of 0.5s (snel maar geleidelijk openscheuren). De berekeningen betroffen een geïdealiseerde cilindrisch symmetrische geometrie waarbij een vat van 2.5 m diameter en 12 m lengte zich bevindt op de centrale as van een cilindrische tunnel met doorsnede 72 m² (equivalent met de Thomassentunnel).

Voor de temperatuur van de LPG net voor de explosie werden twee gevallen beschouwd: 326 K en 340 K. Deze temperaturen corresponderen respectievelijk met een druk in het vat van 1800 kPa (18 bar) en 2500 kPa (25 bar).

De kracht van de resulterende explosie werd gekarakteriseerd door de berekende evolutie van de overdruk als functie van de tijd en de tijdsintegraal van de overdruk (impuls van de drukgolf) op de wand van de tunnel op verschillende afstanden van de locatie van (het centrale symmetrievlak van) het vat, namelijk 0m, 20m, 40m en 80m (zie Figuur 1). De berekeningen tonen aan dat de typische tijdschaal voor het explosieproces van 50 m³ LPG in een tunnel met een doorsnede met oppervlakte 72 m² van de orde 0.1 s is.



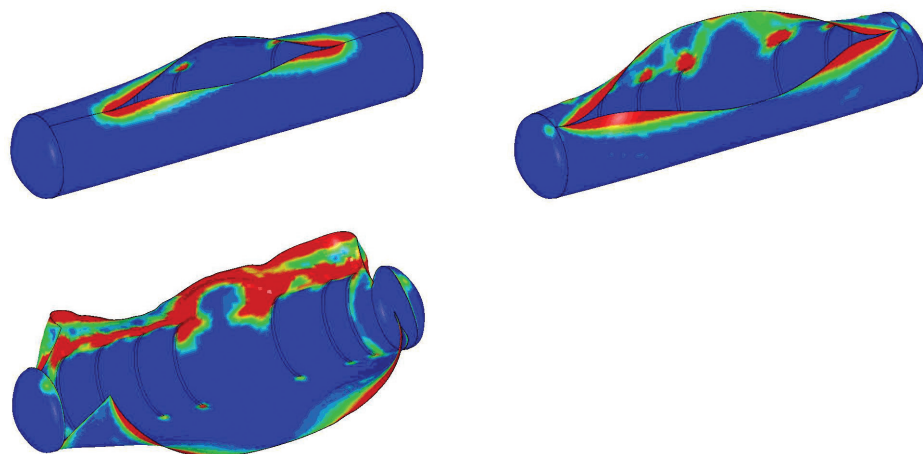
Figuur 1. Druk- en impuls belastingsprofielen op een afstand $R = 0, 40$ en 80 m, voor een bezwijktijd van 0 seconden.

In Tabel 1 is een aantal piekwaarden voor de belasting gegeven voor verschillende bezwijktijden. De hoogste drukken treden op ter plaatse van de tank waar het gas nog niet volledig is verdampt en de tunnel wordt belast door de stagnatiedruk van vloeistof-gasmengsel. Duidelijk is dat vooral de hoge drukken ter plaatse van de explosie sterk reduceren wanneer de bezwijktijd van de tank verlengd wordt.

R (m)	$t_{\text{fail}} = 0 \text{ s}$		$t_{\text{fail}} = 0.1 \text{ s}$		$t_{\text{fail}} = 0.2 \text{ s}$		$t_{\text{fail}} = 0.5 \text{ s}$	
	P (kPa)	I (kPa.s)	P (kPa)	I (kPa.s)	P (kPa)	I (kPa.s)	P (kPa)	I (kPa.s)
0	1180	52	800	65	700	75	600	90
40	150	14	140	12	120	14	95	13

Tabel 1. Piekwaarden voor de druk- (P) en impulsbelasting (I) bij verschillende bezwijktijden (0, 0.1, 0.2 en 0.5 s) en LPG temperatuur van 326 K

Om inzicht te krijgen in welke tijd een (LPG) tank openscheurt en de inhoud vrij kan komen is met behulp van de LS-DYNA code dit aspect numeriek onderzocht. Voor een 50 m³ LPG tank [Solico rapport, 2006] en variatie in materiaaleigenschappen is bepaald hoe snel een scheur zich kan voortplanten en een opening in de tank is gevormd ter grootte van de helft van het oorspronkelijke tankoppervlak. Uit deze modellering bleek dat een reële bovengrens voor de bezwijktijd van het vat ligt in de orde van 0.025 s. Hieruit volgde de belangrijke conclusie dat de verdampingstijd (0.1 s) significant langer is dan de tijd nodig voor het openscheuren en bezwijken van het vat (0.025 s). Voor de modellering van een LPG BLEVE in een tunnel dient dus uitgegaan te worden van instantaan bezwijken. Opgemerkt wordt dat het bezwijken van een tank en de inwendige druk onderling afhankelijk zijn. In het algemeen zal het openscheuren en vervolgens bezwijken als een gekoppeld probleem beschreven moeten worden. Voor de LPG tank blijkt echter dat het drukverval tijdens het scheurproces nihil is.



Figuur 2. Simulatie van scheuren en bezwijken van tank voor $t = 15, 20$ en 30 msec

De met het 2D-model berekende overdrukken en impulsen op de tunnelwand voor deze situatie van het instantaan openscheuren, zijn weergegeven in Tabel 2. De berekeningsresultaten laten zien dat de tunnel ter hoogte van de tank belast wordt door de stagnatiedruk van de radiale uitstroom van het (vloeibare) gas. Deze sterke stroming wordt vervolgens afgebogen en er ontwikkelt zich een 1-D stroming. We zien dus dat na een afstand van 20 meter de belasting gereduceerd is tot de orde van 100 – 200 kPa (1 -2 bar).

Afstand benedenstroms (m)	LPG temperatuur 326 K		LPG temperatuur 340 K	
	ΔP (kPa)	I+ (kPa.s)	ΔP (kPa)	I+ (kPa.s)
0	1180	52	1620 (*)	64
20	110	6.5	130	9.5
40	150	13.5	175	14.5
60	155	17.5	185	18.5
80	150	18.0	185	20.5

(*) Deze druk is gebruikt in de EEM berekeningen (paragraaf 4.3.)

Tabel 2. Drukbelasting op de tunnelwand tengevolge van een 50 m³ LPG BLEVE voor een tunnel met een doorsnede van 72 m². Hierbij is ΔP de overdruk en I+ is de impuls.

2.3.2 Ontwikkeling van een meer gedetailleerd verdampingsmodel

In het kader van het project heeft de Delft Cluster commissie "Bijzondere belastingen" een nieuw model ontwikkeld dat in principe een nauwkeuriger, minder conservatieve voorspelling van de kracht van de explosie zal opleveren. Dit nieuwe model is in ontwikkeling in het kader van een promotiestudie aan de TU Delft die nog loopt tot eind 2010. Maar hier kunnen al eerste resultaten worden vermeld. Het nieuwe model verschilt van het TNO model op de volgende punten:

- de verdamping van de vloeistof wordt expliciet uitgerekend. Het rekendomein omvat dan ook niet alleen de omgeving maar ook het inwendige van de oorspronkelijke vloeistofmassa.
- het thermodynamische model voor het exploderend medium omvat niet alleen de eigenschappen bij evenwicht, maar ook de eigenschappen in de metastabiele toestand. Om dit te realiseren werd onderzocht welke modellen beschikbaar zijn in de literatuur voor een aantal relevante stoffen. In samenwerking met de Sectie Energietechniek van TU Delft werd een nieuwe rekenmodule ontwikkeld die de eigenschappen van de metastabiele toestanden berekend (dichtheid, geluidssnelheid, etc.). Deze maakt in eerste instantie gebruik van een geavanceerde kubische toestandsvergelijking (PRSV).
- het stromingsmodel bestaat uit de combinatie van de Eulervergelijkingen voor de omringende lucht en een twee-fasenmodel voor het expanderende mengsel van vloeistof en damp.

- het twee-fasenmodel berekent voor elke plaats en tijd in het rekendomein de snelheid van de verdamping. De relatieve hoeveelheid damp wordt gekarakteriseerd door de dampvolumefractie.
- er wordt verondersteld dat vloeistof en damp een gelijke snelheid en druk hebben, maar een verschillende temperatuur.
- om de effecten van de verschillende modelveronderstellingen snel te kunnen testen werd het model eerst geïmplementeerd in een 1-dimensionale versie. Dit is voldoende om de initiële ontwikkeling van de drukgolven inclusief het ontstaan van een schok in de buurt van het vat te beschrijven. Om directe vergelijking met het nieuwe model mogelijk te maken heeft TNO ook een 1-dimensionale versie van hun model ter beschikking gesteld.
- de numerieke oplossingsmethode gebruikt door TNO is een eindige differentiemethode. De methode gebruikt in het nieuwe model is de methode der karakteristieken.

Het nieuwe model heeft een analoge structuur als het model gepubliceerd door Pinhasi e.a. Maar ten opzichte van dat werk werden de volgende verbeteringen aangebracht:

- het thermodynamisch model (PRSV, ook voor metastabiele toestanden) is meer algemeen.
- voor de fysische modellering van de massa- en warmteoverdracht bij snelle verdamping worden relaxatiemodellen gebruikt. De gevoeligheid voor de relaxatietijd, die een maat is voor de snelheid van de verdamping, wordt doorgerekend.
- schokgolven in de omringende lucht worden expliciet berekend door het algoritme en niet door eenvoudige schokrelaties beschreven.
- de snelle evolutie van de druk in het gebied waar de tankinhoud voor het eerst in contact komt met de omringende lucht wordt in meer detail beschreven.

2.3.3 Vergelijking van het TNO model en het model van de commissie "Bijzondere belastingen" (CBB model)

Door voorspellingen van het TNO model en het nieuwe model van de commissie "Bijzondere belastingen" met elkaar te vergelijken kan bestudeerd worden wat de gevolgen zijn van de conservatieve veronderstellingen gebruikt in het TNO model. Omdat het nieuwe model nu nog enkel geprogrammeerd is voor een 1-dimensionale geometrie, is deze vergelijking enkel voor deze geometrie uitgevoerd. Maar in vervolg hierop worden ook enkele gevolgtrekkingen voor de 2-dimensionale simulaties met het TNO model, zoals hierboven beschreven, gemaakt. Het TNO model en het nieuwe werden toegepast op een vlakke 1-dimensionale simulatie van een BLEVE van LPG bij een begindruk van 1800 kPa (18 bar) en 2500 kPa (25 bar). De sterkte van de schokgolven voorspeld door beide modellen werden met elkaar vergeleken. (Zie Tabel 3). De overdruk voorspeld door het nieuwe model is lager dan die voorspeld door het TNO model, en dit in sterkere mate naarmate de begindruk hoger is. Naarmate de verdamping trager verloopt zal de drukpuls nog minder sterk zijn.

De berekening met het CBB model werd uitgevoerd met een aangenomen waarde van de relaxatietijd van 2×10^{-5} s. Dit komt neer op een veronderstelling van snelle verdamping analoog aan de veronderstelling van het TNO model. De resulterende verschillen in de voorspellingen tussen de modellen komen dan vooral voort uit de verschillende in modellering van de drukverlaging in de vloeistof. Het TNO-model gebruikt een globale

temperatuur- en drukverlaging. Het CBB model is lokaal en voorspelt het drukprofiel in het vloeistof-damp mengsel. Naast de initiële drukverlaging wordt ook de daaropvolgende omkering van de drukevolutie omwille van de snelle dampgeneratie erdoor beschreven.

Initiële LPG eigenschappen (druk, temperatuur, dichtheid)			Overdruk voorspeld door TNO model (kPa (bar))	Overdruk voorspeld door CBB model (kPa (bar))	Relaxatietijd gebruikt in CBB model (s)
(kPa (bar))	K	kg/m ³			
1800 (18)	325	446	340 (3.4)	300 (3.0)	2×10^{-5}
2500 (25)	341	396	400 (4.0)	340 (3.4)	2×10^{-5}

Tabel 3. Vergelijking van de hoogte van de drukpuls voorspeld voor een 1-dimensionele configuratie door het TNO model en het CBB model

Ook de voorspellingen van het TNO model en het CBB model voor de evolutie van het maximum van de dynamische druk $p_{dyn} = 0.5\rho v^2$ van de expanderende massastroom (met ρ de dichtheid en v de snelheid) zy met elkaar vergeleken. Bij het begin van de explosie voorspellen beide modellen dezelfde waarde (voor begindruk 1800 kPa (18 bar) en 2500 kPa (25 bar), dynamische druk respectievelijk 800 kPa (8 bar) en 1100 kPa (11 bar)). Het TNO model voorspelt dat deze piekwaarde constant blijft tijdens de expansie, terwijl het CBB model een snelle afname voorspelt met een factor ongeveer drie. Dit is onder meer het gevolg van de invloed van de voortschrijdende verdamping.

2.4 Conclusies

De berekeningen van de BLEVE van 50 m³ LPG in een tunnelbuis hebben aangetoond dat de tunnelwand in de directe omgeving van de BLEVE onderworpen is aan de volledige stagnatiedruk van de radiale uitstroming uit het vat. De overdrukken en de impuls voorspeld door het TNO model in het geval van instantaan openscheuren van het vat zijn samengevat in Tabel 1.

De berekeningen van een 1-dimensionale situatie met zowel het TNO model als de huidige versie van het model van de commissie "Bijzondere belastingen" hebben laten zien dat het TNO model de hoogste drukken voorspelt, in overeenstemming met de conservatieve modelveronderstellingen. Het verschil tussen beide modellen is relatief klein voor de statische druk (10 – 15 %), De verschillen in de evolutie van de dynamische druk lopen op tot een factor drie. Dit wijst erop dat de door het TNO model voorspelde piekwaarde van de stagnatiedruk op de wand van de tunnel ter hoogte van het vat (Zie Tabel 2) mogelijk te conservatief is met een factor ongeveer drie.

De hoogte van de drukpuls wordt groter naarmate de LPG initieel bij hogere temperatuur is en het initiële drukverschil groter is. Deze trend wordt door alle modellen goed voorspeld.

Het model van de commissie "Bijzondere belastingen" moet nog uitgebreid worden met een meer gedetailleerde beschrijving van de verdampingssnelheid en moet nog toegepast worden op de 50 m³ LPG in een tunnelbuis. Daarom zijn definitieve conclusies over de mate waarin het TNO model de sterkte van de drukpuls te hoog voorspeld nog niet beschikbaar.

Slotconclusie:

Er is een conservatief 2D BLEVE model beschikbaar voor de predictie van de belasting op tunnelwand. Het model beschrijft de belasting als functie van plaats en tijd. De variabelen in het model zijn: type en volume van het gas, de temperatuur, de bezwijktijd van de tank en afmetingen dwarsdoorsnede tunnel. Het conservatieve 2 D model is het uitgangspunt geweest voor de response studie in dit project.

Opmerking:

Op basis van het meer geavanceerde, 1-dimensionale verdampingsmodel is er de indicatie dat de maatgevende stagnatiedruk op de wand ter plaatse van het vat, in het 2D model te conservatief is met mogelijk een factor 3. Dit zal het komend jaar (2010) in het promotieonderzoek aan de TU-Delft verder onderzocht worden.

3 Modelling dynamische grondresponse

3.1 Inleiding

Bij een explosie in een tunnel wordt de omliggende grond, via de tunnelwand, belast door een stootbelasting. Als de belasting die de tunnelwand doorgeeft voldoende groot is kunnen er in de grond wateroverspanningen ontstaan en de draagkracht en stabiliteit van de grond afnemen.

In de grond treden twee onderscheidbare fases op:

- de fase met een toenemende belasting waarbij de tunnelconstructie naar de grond toe beweegt. De grond wordt primair op druk en afschuiving belast.
- de fase met een afnemende belasting waarbij de tunnelconstructie weer terug veert en dus van de grond af beweegt. Hierbij kan mogelijk een grote ontspanning in de grond optreden.

Voor de grond, de grond-tunnelresponse en de funderingen van belendingen is deze tweede fase waarschijnlijk het grootste risico, terwijl daar ook een grote kennislacune aanwezig is.

Een aangewezen methode om de response te berekenen is de Eindige Elementen Methode (EEM). Gebruik hiervan met standaard programmatuur levert wel een tweetal knelpunten op:

- excessieve rekentijden bij hoge frequentie componenten in de belastingsfase.
- combinatie van dynamische belasting in de belastingsfase en consolidatie, vooral in de ontlastingsfase.

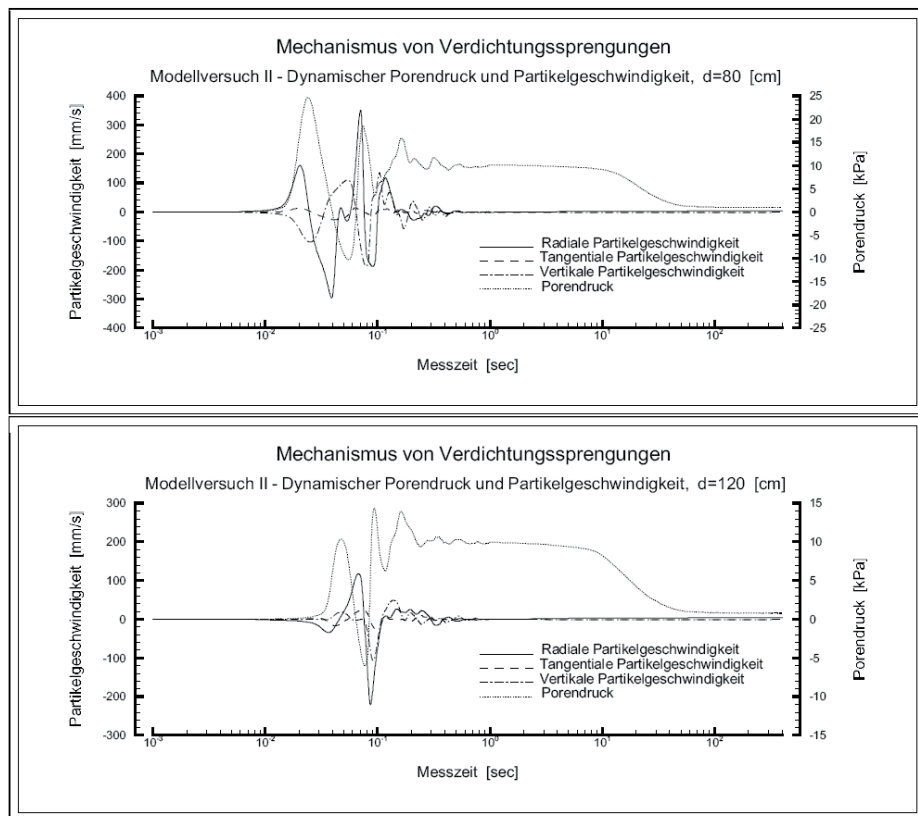
De duur van de explosie hangt af van het type explosie, maar is zeer kort (voor een BLEVE orde grootte 0,1 s), zodat deze situatie voor de grond als een ongedraineerde belasting-situatie kan worden beschouwd. De door de explosie opgewekte schokgolf zal aanwezige constructies in de omgeving (funderingen, leidingen etc.) dynamisch belasten. Vanuit geotechnisch oogpunt worden de problemen voor de omgeving ook verwacht voor de situatie na de explosie. Dit zijn de fasen waarbij de explosie belasting weer afneemt en de fase waarin de opgewekte wateroverspanning zal dissiperen. Het dissipatieproces start eigenlijk al tijdens de explosie. Om dit proces correct te modelleren is een model nodig dat gelijktijdig dynamische effecten en consolidatie effecten meeneemt. Het in Nederland populaire programma PLAXIS heeft deze optie niet beschikbaar. Om dit toch te kunnen doorrekenen is de Biot optie in PLAXIS ingebouwd. Bovendien is in PLAXIS een nieuwe methode geïmplementeerd waarmee hoogfrequente golfverschijnselen op een efficiënte wijze gemodelleerd worden. Samen met de BIOT optie kunnen nu in PLAXIS hoog- en laagfrequente verschijnselen beschreven worden voor grond als twee-fasen materiaal.

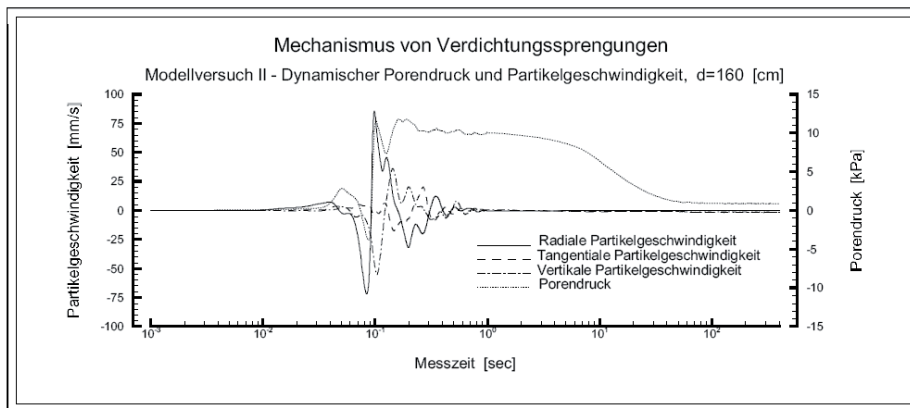
Om een indruk te krijgen van het gedrag van grond bij een snelle belasting en ontlasting is een serie triaxiaalproeven uitgevoerd. De inzichten die bij deze proeven zijn verworven zijn gebruikt bij de verdere interpretatie en beoordeling van de numerieke analyses.

3.2 Bestaande kennis

De internationale literatuur bevat een aantal papers over de effecten van explosies in grond. Grotendeels betreft dit beschrijvingen van proeven waarbij op enige diepte een explosieve lading tot detonatie wordt gebracht. De response in de omgeving is gemeten en hieruit zijn vervolgens empirische relaties afgeleid. In een beperkt aantal gevallen is geprobeerd om met geavanceerde grondmodellen de situatie na te rekenen. Deze modellen zijn slecht of in het geheel niet beschikbaar voor algemeen gebruik. Uit de gepubliceerde literatuur blijkt dat bij een explosie in de ondergrond grote waterover-spanningen kunnen ontstaan. Een voorbeeld is weergegeven in Figuur 3.

Het aantal papers waarbij de effecten van een explosie op een ondergrondse constructie worden beschreven is beperkt. Literatuur over de effecten op de grond bij een explosie in een tunnel zijn niet gevonden. Een belangrijk aspect daarbij is dat de explosie druk eerst de tunnelwand moet passeren voordat de omgeving wordt belast.





Figuur 3. Test data uit: Nandor Tamaskovics, Beitrag zur Klärung der Mechanismen von Verdichtungssprengungen, thesis Technische Universität Bergakademie Freiberg, Juni 2000

3.3 Nieuwe kennis

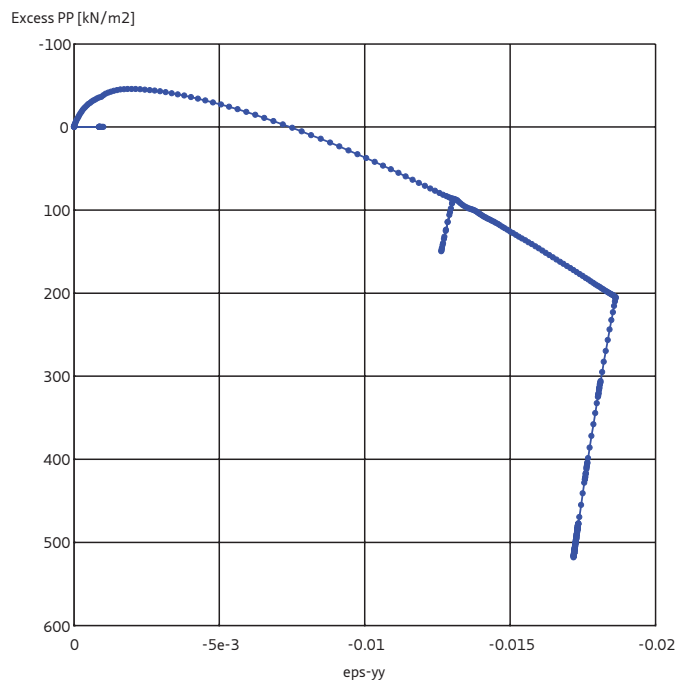
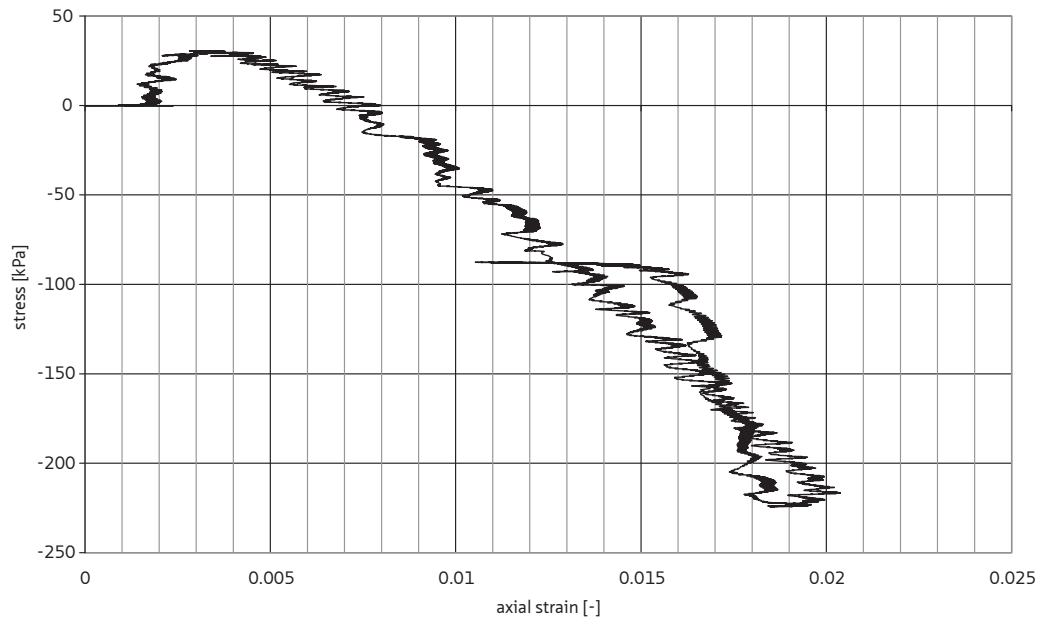
3.3.1 Resultaten triaxiaalproeven

Een serie van 5 triaxiaalproeven is uitgevoerd. Gevarieerd is de dichtheid van het zand, de snelheid van belastingen en de grootte van de opgelegde vervorming. De maximale belastingssnelheid bij de snelle proeven kwam overeen met een axiale reksnelheid van 130 % per seconde.

Uit de proeven blijkt niet dat, binnen de gebruikte range van reksnelheden, er een verschil in het gemiddelde grondgedrag van het sample is bij langzaam en snel belastingen en ontlasten. Bij dichtgepakt zand wordt aan het einde van de proef een netto wateroverspanning gevonden, bij losgepakt zand is er netto sprake van een wateroverspanning. Opvallend in de proeven is wel dat zowel bij dicht- als losgepakt zand bij ontlasten de wateroverspanning toeneemt. Dit gedrag wordt ook gevonden in cyclische triaxiaalproeven, met name als het spanningpad de bezwijkomhullende nadert of bereikt.

Bij narekenen van de proeven met PLAXIS (BIOT optie) wordt voor de belastingfase een goede overeenstemming gevonden. Voor de ontlastfase is er sprake van een essentieel verschil in gedrag. Waar de proeven voor de ontlastfase een toename van de wateroverspanning laten zien, wordt in de berekening een afname gevonden. Dit verschil is een gevolg van de gebruikte constitutieve beschrijving. De in PLAXIS beschikbare grondmodellen veronderstellen bij ontlasten een lineair-elastisch grondgedrag. Bij ontlasten neemt de isotrope spanning af. Voor de ongedraineerde situatie blijft de effectieve isotrope spanning gelijk. Het resultaat hiervan is dat in het model de waterspanning afneemt (er ontstaat waterunderspanning).

Door deze te hoge waterunderspanning in PLAXIS is de korrelspanning te hoog en wordt de sterkte van de grond overschat. Het gedrag van de grond na de explosie wordt dus niet goed voorspeld.

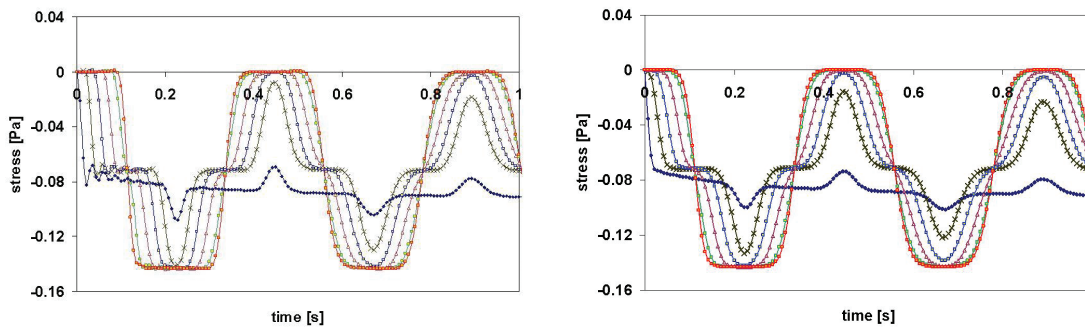


Figuur 4. Verloop wateroverspanning bij dichtgepakt zand tijdens belasten en ontlasten, links in de proef, rechts volgens EEM modellering

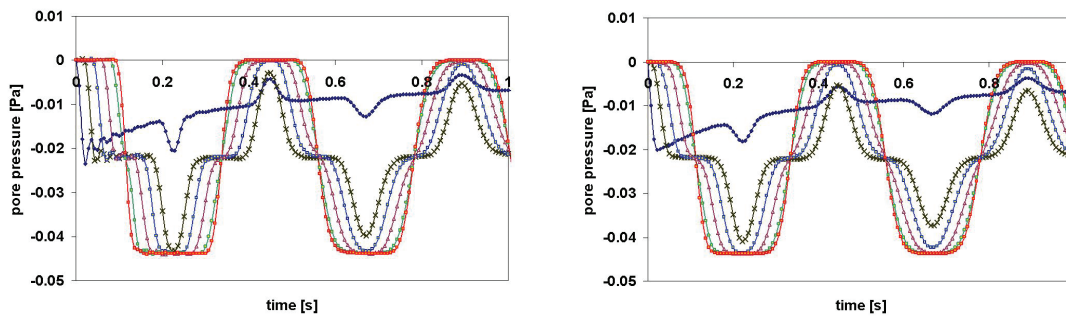
3.3.2 Ontwikkeling PTU

Omdat een explosie in zeer korte tijd plaats vindt zal de geïnduceerde grondschok hoge frequenties kunnen bevatten. Gebruik van de normale regels voor de keuze van elementgrootte en tijdstap resulteert dan in kleine elementen en kleine tijdstappen. De reken-tijd wordt dan excessief groot. In de praktijk zal de vereiste elementgrootte en tijdstap sterk bepaald worden door de grootte en het type explosie en in welke mate de explosie

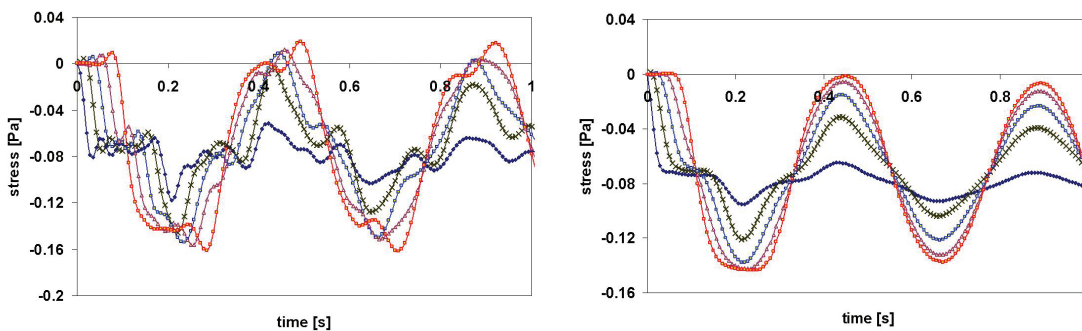
belasting wordt gedempt. Om tot een algemeen toepasbare oplossing te komen, is er in het huidige onderzoek een methode ontwikkeld waarmee hoogfrequente golfuitbreiding efficiënt, met een grove mesh structuur beschreven kan worden. Met de Partition of Time Unity method (PTU) worden de elementen "verrijkt" waardoor discontinuïteiten, grote gradiënten die binnen het element optreden beschreven kunnen worden. De ontwikkelde methode is mesh onafhankelijk. De PTU methode is ook geïmplementeerd in PLAXIS zodat samen met de BIOT implementatie hoog- en laagfrequente verschijnselen beschreven kunnen worden voor grond als tweefasen materiaal [13]. In Figuur 5 zijn de berekende resultaten weergegeven voor een eendimensionaal probleem van een stepload op een bodem kolom. De schok is aangebracht aan de linkerkant en reflecteert tegen de stijve grens aan de rechterkant. In dit voorbeeld heeft de bodem een hoge permeabiliteit. Door de BIOT feature wordt het tweefasen materiaal gepresenteerd. De schokken in het poriewater en het skelet beginnen zich af te tekenen, zie de laatste twee grafieken in Figuur 5.



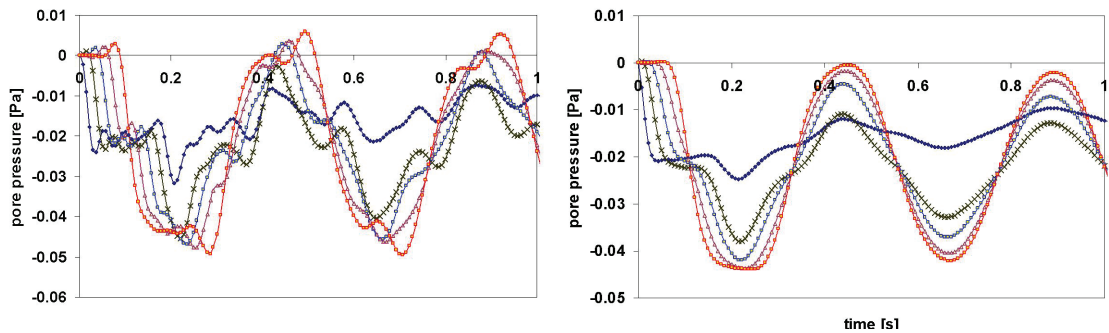
Solid stress distributions, 10 elements of 1m length. a) Newmark $\gamma = 0.605$ $\beta = 0.3025$, b) PTU.



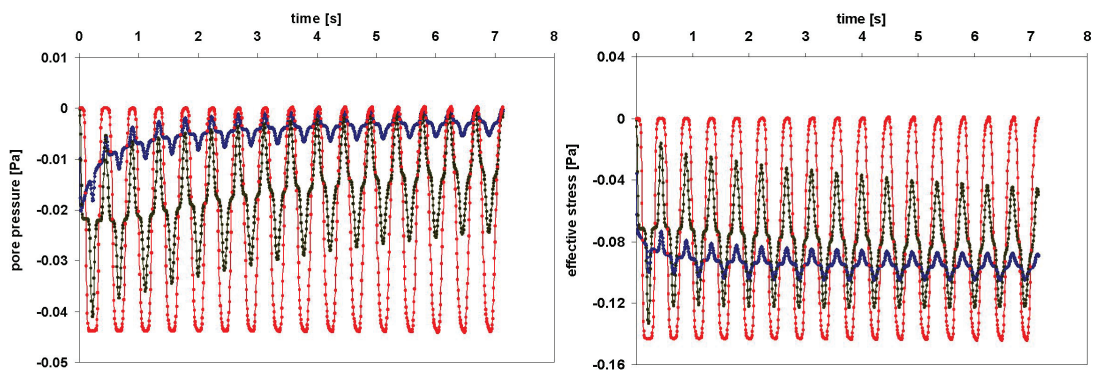
Pore pressure distributions, 10 elements of 1m length. a) Newmark $\gamma = 0.605$ $\beta = 0.3025$, b) PTU



Solid stress distributions, 5 elements of 2m length. a) Newmark $\gamma = 0.605$ $\beta = 0.3025$, b) PTU



Pore pressure distributions, 5 elements of 2m length. a) Newmark $\gamma = 0.605$ $\beta = 0.3025$, b) PTU.



Pore pressure and solid stress (PTU) for longer time (7 sec)

Figuur 5. Example of propagating shock in skeleton and water of a soil column

3.3.3 Implementatie en validatie in PLAXIS

In een speciale versie van PLAXIS zijn ten behoeve van dit project de volgende opties geïmplementeerd:

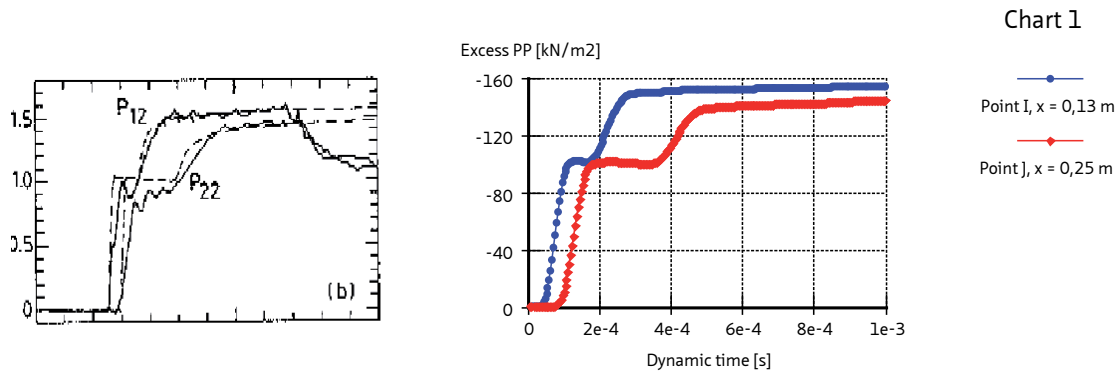
- Biot consolidatie.
- PTU.

De opties zijn momenteel niet beschikbaar in de commerciële versie van PLAXIS. Binnen dit project zal dat ook niet worden gerealiseerd. PLAXIS bv zal de opties minstens tot juli 2012 onderhouden. Er is een handleiding opgesteld. Hierin wordt aangegeven hoe een berekening met gebruik van deze opties uitgevoerd moet worden en op welke wijze de extra parameters gekozen kunnen worden. Het model is geverifieerd, waarbij de huidige beperkingen zijn aangegeven.

Voor de validatie van het model zijn door vd Grinten uitgevoerde [Van der Grinten 1987] schokbuisexperimenten gebruikt. Figuur 5 toont het gemeten verloop van de waterdruk op twee punten van het uiteinde. De grootte van de belasting was 1,65 bar (165 kPa). De getrokken lijn is het resultaat van de meting en de gestippelde lijn is het resultaat van een analytische berekening door vd Grinten.

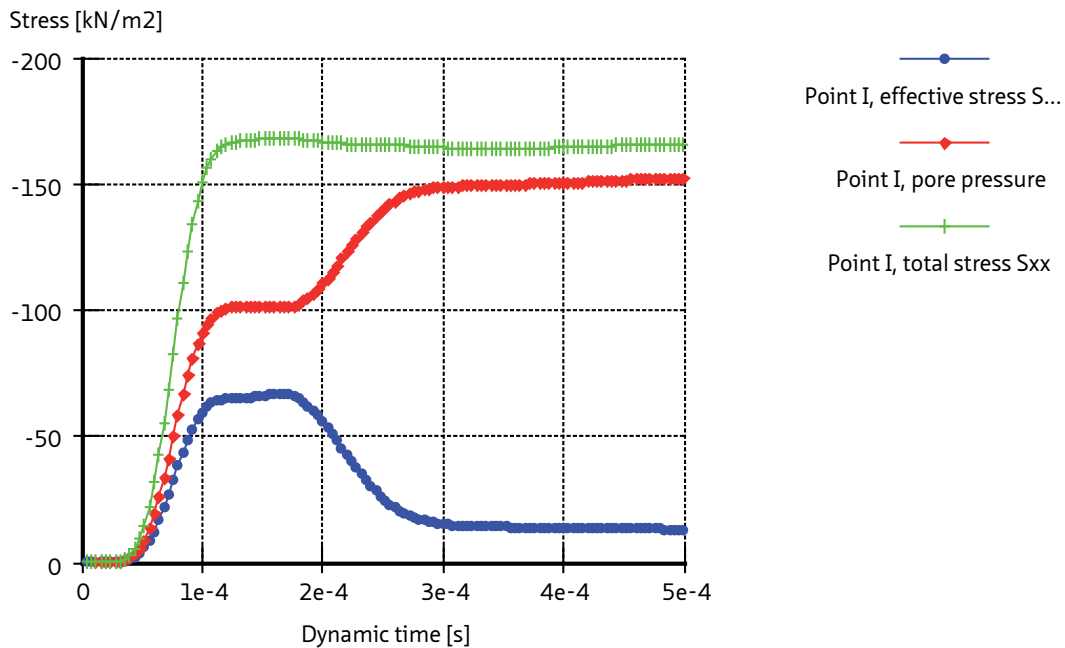
De situatie van het schokbuisexperiment is tevens doorgerekend met PLAXIS. Hierin is de belasting een stapfunctie met een amplitude van 165 kPa (1,65 bar). De berekende

waterspanningen op twee punten is weergegeven in de rechter figuur van figuur 5. Een goede overeenstemming wordt gevonden.



Figuur 6. Vergelijking resultaat schokbuis testen vd Grinten met PLAXIS; linker figuur toont verloop waterspanning in schokbuis experiment op 0,13 m (p12) en 0,22 m (p22) vanaf de rand, schaalverdeling op horizontale as is 0,1 ms per interval, schaalverdeling op de verticale as is in bar, drukspanning is positief; rechter figuur toont verloop waterspanning volgens PLAXIS op vergelijkbare punten, hier is een drukspanning negatief.

De opgelegde belasting wordt verdeeld over de korrelspanning (effectieve spanning) en de waterspanning. Figuur 6 toont de met PLAXIS berekende spanningen in punt I, op 0,13 m van de rand. De totaalspanning komt overeen met de opgelegde belasting van 165 kPa.



Figuur 7. Verloop spanningen (effectieve spanning S'_{xx} , waterspanning en totaal spanning S_{xx}) in simulatie met PLAXIS

3.4 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste resultaten van het uitgevoerde onderzoek naar de dynamische response van grond en modellering zijn:

- de reksnelheid lijkt een verwaarloosbare invloed te hebben op het gedrag van grond voor de gebruikte reksnelheid van 4% per uur tot 130% per seconde. De te verwachten reksnelheid bij een BLEVE ligt in de buurt van 13% per seconde.
- het inzicht in het gedrag van grond bij ontlasten na belasten tot plasticiteit is toegenomen. Bij ontlasten blijkt de waterspanning toe te nemen, dit gedrag wordt door de meeste grondmodellen niet voorspeld.
- de optie Biot is in een testversie van PLAXIS succesvol geïmplementeerd, een vergelijking met de proefresultaten van vd Grinten levert een goede overeenkomst.
- de PTU optie is in een testversie van PLAXIS geïmplementeerd.

Als aanbevelingen voor de verdere implementatie in PLAXIS worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- maak een combinatie met absorberende randvoorwaarden mogelijk en implementeer een niet drainerende rand, zodat gebruik kan worden gemaakt van een kleiner (meer efficiënt) eindige elementenmodel.
- maak een combinatie van droog en waterverzadigde grond in dezelfde berekening mogelijk.

4 Dynamische grond-tunnelresponse

4.1 Inleiding

Ten behoeve van het onderzoek naar de response van het systeem van tunnelconstructie en omringende grond ('full system response') onder invloed van een explosiebelasting, zijn eindige-elementenberekeningen uitgevoerd. Hiervoor is de Thomassen tunnel als benchmark gekozen.

Het doel van het onderzoek is het scheppen van duidelijkheid over de mogelijkheden om de response van het totale tunnelsysteem (tunnelconstructie en omringende grond) te kwantificeren met behulp van (geavanceerde) numerieke codes. Daaruit afgeleide doelen zijn het scheppen van duidelijkheid over de rol die grond speelt in de response op de explosiebelasting en het opstellen van een conceptwerkwijze om de explosiebestendigheid van tunnels te beoordelen.

Voor de modellering zijn de volgende eindige-elementenprogramma's gebruikt:

- LS-DYNA, met een geavanceerd materiaalmodel voor de tunnel en een eenvoudig materiaalmodel voor de omliggende grond;
- PLAXIS, met een eenvoudig materiaalmodel voor de tunnel en een geavanceerd materiaalmodel voor de grond.

Voor deze aanpak is gekozen, omdat er geen programma's beschikbaar zijn met goede, geavanceerde materiaalmodellen voor zowel de constructie als voor de grond.

4.2 Bestaande kennis

Het dynamische gedrag van de Thomassen tunnel onder invloed van een BLEVE-belasting is eerder, in een voorbereidend onderzoek, onderzocht met behulp van de eindige-elementenprogramma's DIANA en LS-DYNA. Hieruit bleek dat zowel DIANA als LS-DYNA geschikte platforms zijn voor de modellering van high impact loading van constructies, echter implementatie van tijdsafhankelijk materiaalgedrag (strain rate dependency) is voor DIANA minder eenduidig dan voor LS-DYNA. Daar komt bij dat de programmastructuur en de oplossingsmethodiek (expliciete solver) van LS-DYNA zich beter lenen voor dynamische berekeningen dan de programmastructuur en oplossingsmethodiek (impliciete solver) van DIANA. Om deze reden is in het onderhavige onderzoek gebruik gemaakt van LS-DYNA.

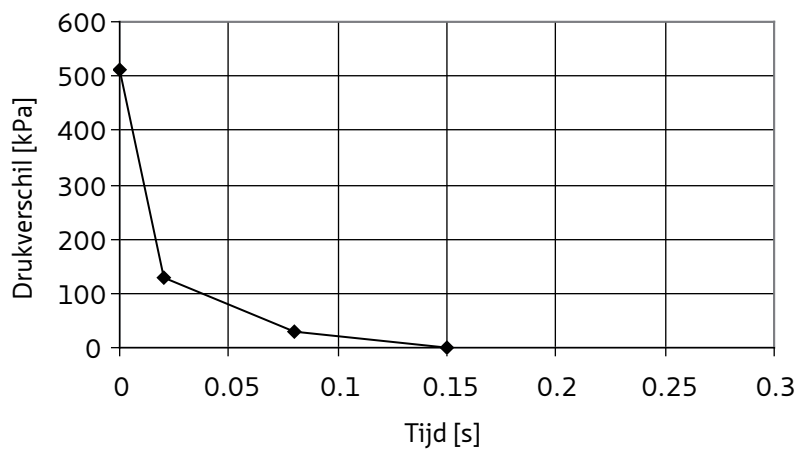
Vorbereidende berekeningen met LS-DYNA, waarbij een landtunnel (zonder grond) met een explosiebelasting is gemodelleerd, gaven aan dat bij een BLEVE-belasting (maximale druk 510 kPa (5,10 bar); impuls 12 kPa·s) lokaal, over een beperkte lengte, schade optrad aan de middenwand van de tunnel. De vloeigrens van de wapening werd niet bereikt. Op basis hiervan is geconcludeerd dat geen globaal bezwijken optreedt.

Zoals opgemerkt, is de omringende grond niet meegenomen in het voorbereidende onderzoek. Hierdoor is een deel van de belasting op de tunnel niet meegenomen, evenals de dynamische effecten in de grond en de ondersteuning van de tunnel door de grond.

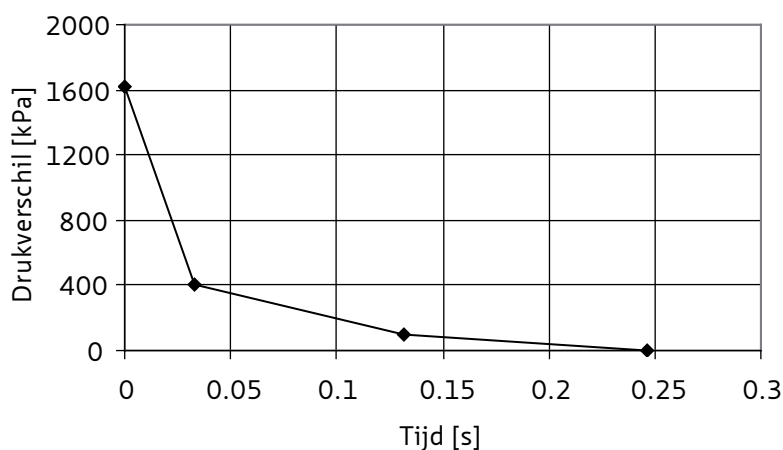
4.3 Nieuwe kennis tunnelresponse (resultaten berekeningen met LS-DYNA)

De berekeningen in LS-DYNA zijn uitgevoerd voor een LPG-BLEVE (zie [6]) en zijn gericht op de initiële response. Aspecten op lange termijn zoals reboundeffecten en de stabiliteit van de totale tunnelconstructie zijn niet onderzocht.

De maatgevende, maximale explosiebelasting treedt op ter plaatse van de tank. Voor de berekeningen is uitgegaan van een, op conservatieve aannamen gebaseerde, maximale BLEVE-belasting, zie tabel 2. Tevens is gerekend met een gereduceerde BLEVE-belasting, gebaseerd op het meer gedetailleerde en minder conservatieve 1D-rekenmodel, zie hoofdstuk 2. Het drukverschil in de tijd is voor de gereduceerde en de maximale BLEVE-belasting weergegeven in respectievelijk Figuur 7 en Figuur 8.



Figuur 8. Drukverschil als functie van de tijd voor een gereduceerde BLEVE



Figuur 9. Drukverschil als functie van de tijd voor een maximale BLEVE

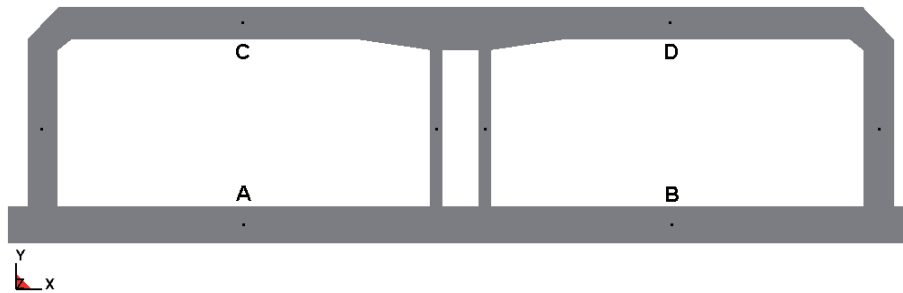
Voor de voorspelling van het dynamische gedrag van de tunnel zijn zowel de traagheid als de stijfheid van de omliggende grond in de berekeningen meegenomen. De waterbelasting is op het model geplaatst, echter de traagheid van het water is niet meegenomen in

de modellering. Niet gepubliceerde resultaten tonen aan dat de traagheid van het water geen significante invloed heeft op de resultaten.

Om de invloed van de grond op het totale dynamische gedrag van het tunnelsysteem te beschouwen, is een gevoeligheidsstudie met LS-DYNA uitgevoerd. Hierin zijn de volgende situaties beschouwd (G = glijdingsmodulus, Δp = drukverschil, I = impuls):

1. Slappe grond ($G = 5$ MPa), gereduceerde BLEVE ($\Delta p = 510$ kPa; $I = 12$ kPa·s);
2. Stijve grond ($G = 150$ MPa), gereduceerde BLEVE ($\Delta p = 510$ kPa; $I = 12$ kPa·s);
3. Slappe grond ($G = 5$ MPa), maximale BLEVE ($\Delta p = 1600$ kPa; $I = 64$ kPa·s);
4. Stijve grond ($G = 150$ MPa), maximale BLEVE ($\Delta p = 1600$ kPa; $I = 64$ kPa·s).

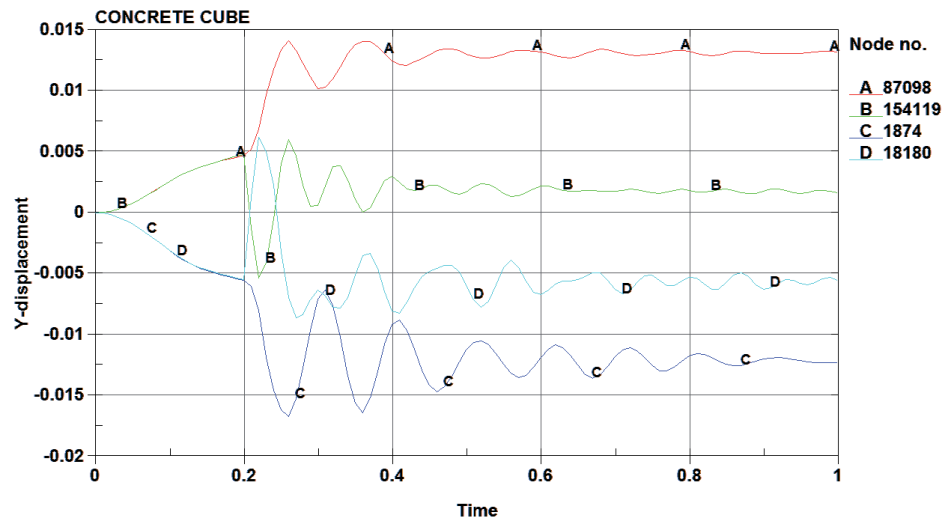
Figuur 9 geeft een overzicht van knooppuntnummers die zijn beschouwd voor de analyse van de verticale verplaatsingen. De BLEVE vindt plaats in de rechter tunnelkoker.



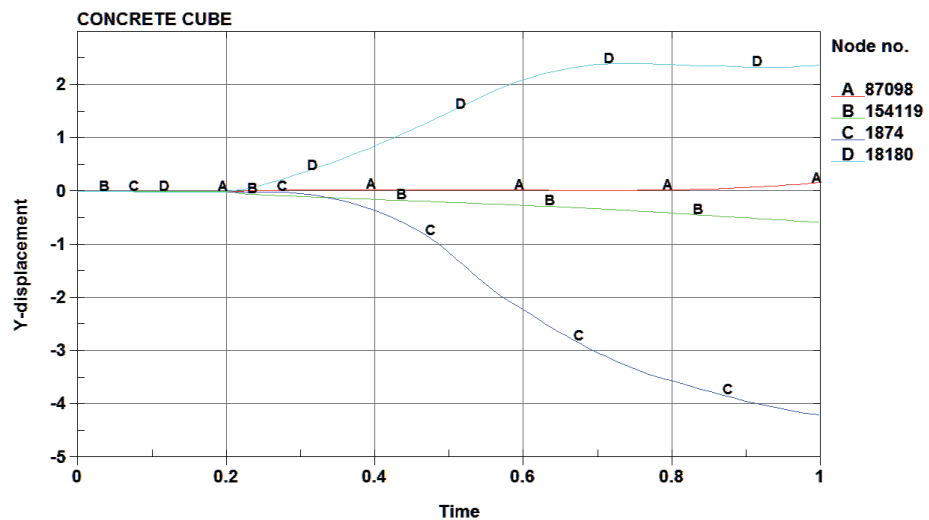
Figuur 10. Beschouwde knopen met betrekking tot vervormingen

Uit de berekeningen is gebleken dat de invloed van de stijfheid van de grond marginaal is voor het gedrag van de tunnel. Dit betekent dat gesteld kan worden dat de grondstijfheid van ondergeschikt belang is, zolang deze grondstijfheid binnen de gestelde grenzen ($5 \leq G \leq 150$ MPa) blijft. Indien er bijvoorbeeld verweking van de grond optreedt, is het mogelijk dat de invloed van de grond wel groot is voor uiteindelijke stabiliteit en schade aan de tunnel. Omdat in het onderhavige onderzoek slappe grond tot grotere dynamische effecten in de tunnel leidt, zijn in het vervolg van deze samenvatting alleen de resultaten voor slappe grond beschouwd.

De resultaten met betrekking tot de (verticale) verplaatsing van het dak en de vloer in de tijd, zijn weergegeven in Figuur 10 en Figuur 11. Figuur 10 heeft betrekking op een gereduceerde BLEVE-belasting, Figuur 11 betreft een maximale BLEVE-belasting. In de berekening zijn allereerst (tot 0,2 sec) de statische belastingen aangebracht (eigen gewicht, grond- en waterdrukken). De explosiebelasting is aangebracht vanaf 0,2 sec.



Figuur 11. Verticale verplaatsingen (in meters) ten gevolge van een gereduceerde BLEVE-belasting in slappe grond. (Punt A = vloer links, punt B = vloer rechts, punt C = dak links, punt D = dak rechts.)



Figuur 12. Verticale verplaatsingen (in meters) ten gevolge van een maximale BLEVE-belasting (slappe grond). (Punt A = vloer links, punt B = vloer rechts, punt C = dak links, punt D = dak rechts.)

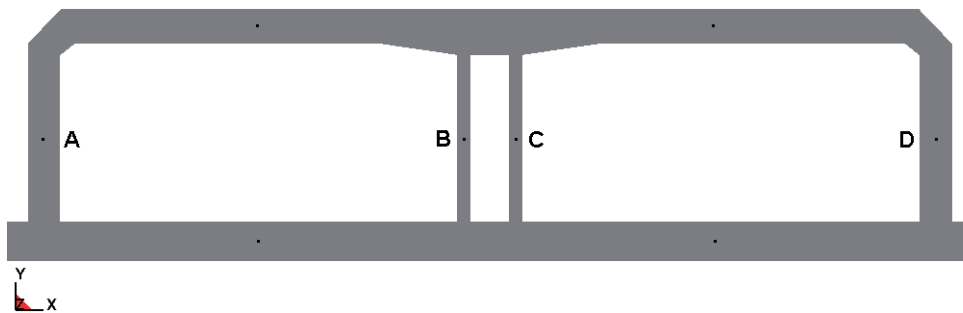
De resultaten laten zien dat bij een gereduceerde BLEVE-belasting (Figuur 10) de maximale, verticale verplaatsing ten gevolge van de permanente belasting voor zowel het dak als de vloer gelijk is aan 5 mm. Bij het aanbrengen van de explosiebelasting verplaatst in de rechter tunnelkoker het dak omhoog en de vloer omlaag. De linker tunnelkoker vertoont een tegengestelde response.

De maximale verticale verplaatsing van het dak en de vloer onder invloed van een gereduceerde BLEVE-belasting is ruim 10 mm. Dit is een verdubbeling van de statische uitbuiging. Verder is te zien dat na verloop van tijd (na 1 sec) min of meer een even-

wichtstoestand is opgetreden, waarbij schade ertoe leidt dat het dak en (in mindere mate) de vloer blijvend vervormen.

Figuur 11 laat zien dat de verplaatsingen onder invloed van een maximale BLEVE-belasting enkele ordes groter zijn dan bij een gereduceerde BLEVE-belasting. Het dak van de rechter tunnelkoker verplaatst in 1 s bijna 2,5 m omhoog. Dergelijke grote verplaatsingen leiden tot wantrouwen van de resultaten van de berekeningen. In een dergelijke situatie is normaliter bezwijken opgetreden en/ of spelen secundaire effecten een niet te verwaarlozen rol. Om deze reden kan op basis van deze resultaten worden gesteld dat het dak van beide kokers bezwijkt onder invloed van een maximale BLEVE-belasting.

Figuur 12 geeft een overzicht van knoopnummers die zijn beschouwd voor de analyse van het horizontale verplaatsingen.

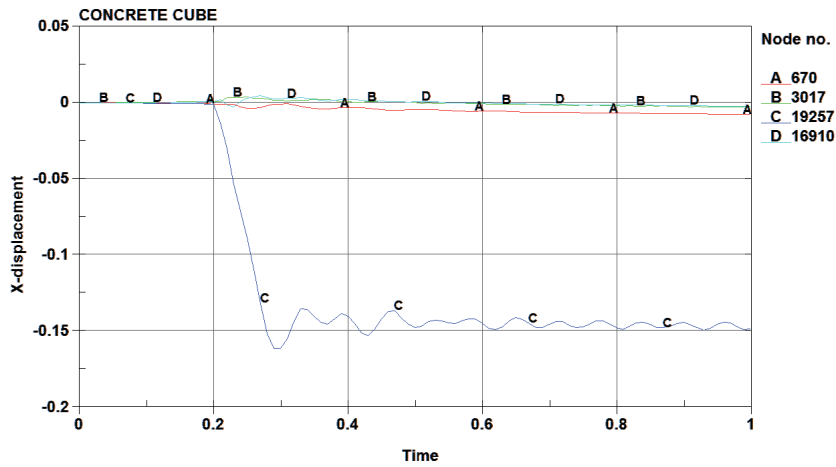


Figuur 13. Beschouwde knopen met betrekking tot horizontale verplaatsingen

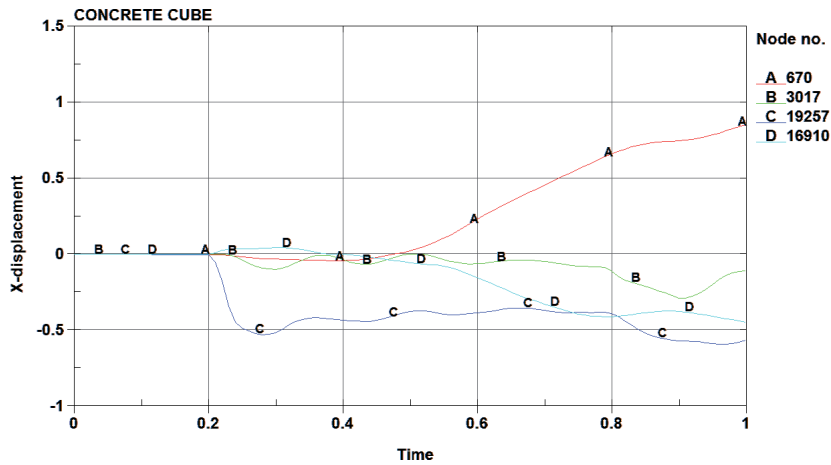
De horizontale (wand)verplaatsingen in de tijd zijn weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14 (respectievelijk voor een gereduceerde BLEVE-belasting en een maximale BLEVE-belasting). De horizontale verplaatsingen van de wanden ten gevolge van de permanente belasting zijn ongeveer gelijk aan 1 mm.

Onder invloed van een gereduceerde BLEVE-belasting ondergaat de tussenwand in de rechter tunnelkoker een maximale blijvende verplaatsing van 150 mm naar links. De horizontale verplaatsingen van de overige wanden zijn relatief klein.

Bij een maximale BLEVE-belasting zal de tussenwand van de rechter tunnelkoker een maximale horizontale verplaatsing van 0,5 m ondergaan. Vanaf 0,3 s na het aanbrenge van de explosie vervormen ook de overige wanden substantieel. Hierbij geldt overigens ook dat dergelijke grote verplaatsingen leiden tot wantrouwen van de resultaten van de berekeningen. In een dergelijke situatie is normaliter bezwijken opgetreden en/ of spelen secundaire effecten een niet te verwaarlozen rol.

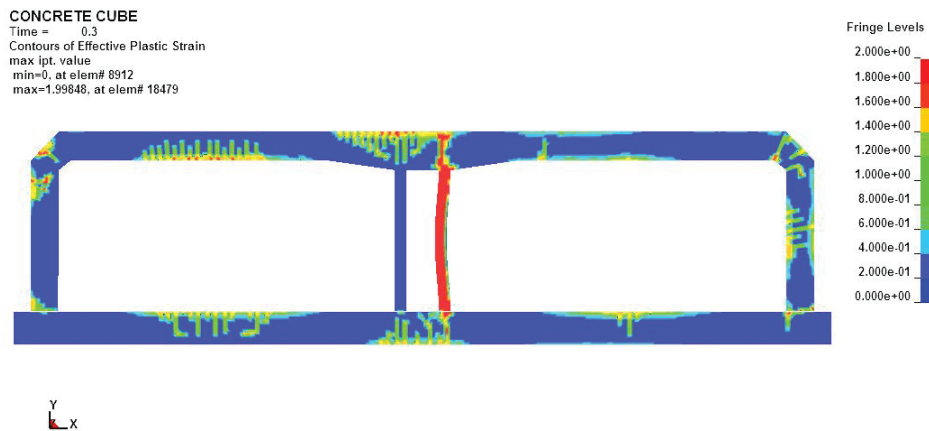


Figuur 14. verplaatsingen (in meters) ten gevolge van een gereduceerde BLEVE-belasting. (Punt A = buitenwand links, punt B = binnenwand links, punt C = binnenwand rechts, punt D = buitenwand rechts.)

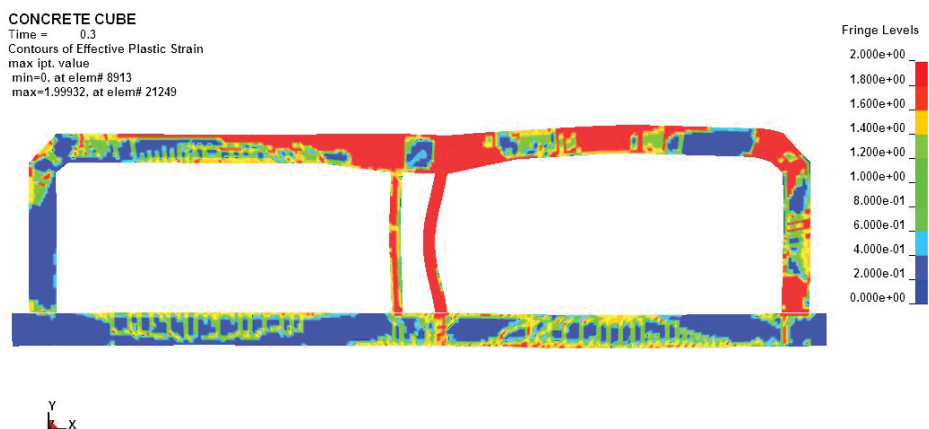


Figuur 15. Horizontale verplaatsingen (in meters) ten gevolge van een maximale BLEVE-belasting. (Punt A = buitenwand links, punt B = binnenwand links, punt C = binnenwand rechts, punt D = buitenwand rechts.)

Een beeld van de schade aan het beton kan worden verkregen met behulp van Figuur 15 en Figuur 16. De schade wordt in deze figuren aangeduid met een getal tussen 0 (onbeschadigd) en 2 (volledig beschadigd). Beschadiging treedt op onder druk (plasticiteit) en onder trek (scheurvorming). Voor een afbeelding van de schade is alleen het betongedrag van belang. De wapening is niet meegenomen in de afbeeldingen van de schade. Verder wordt opgemerkt dat beschadigingen niet omkeerbaar zijn (eens beschadigd, blijft beschadigd), ondanks het feit dat dit bij cyclische belastingen wel het geval is.



Figuur 16. Afbeelding van de schade op 0,1 s na start van een gereduceerde BLEVE-belasting (slappe grond)



Figuur 17. Afbeelding van de schade op 0,1 s na start van een maximale BLEVE-belasting (slappe grond)

De afbeeldingen van de schade (Figuur 15 en Figuur 16) laten zien dat in beide gevallen (gereduceerde en maximale BLEVE-belasting) veel schade optreedt aan de middenwand. In geval van een maximale BLEVE-belasting, treedt ook substantiële schade op aan het dak en de buitenwand van de koker waar de explosie plaatsvindt. Opgemerkt wordt dat, gegeven het tijdstip waar de figuren betrekking op hebben, de kracht van de explosie nog dusdanig groot is, dat ook schade kan ontstaan door rondvliegende onderdelen van de bezweken tussenwand. Dergelijke fenomenen zijn echter niet in de modellering meege-
nomen.

Zoals opgemerkt treedt in geval van de maximale BLEVE-belasting (Figuur 16) ook schade op in de overige onderdelen van de koker (dak en rechterwand). Uit de rest van het onderzoek blijkt dat op verschillende plaatsen in het dak de stuikrek van het beton wordt overschreden. Tevens wordt in de wapening aan de onderzijde van het dak van de rechter tunnelkoker de vloeispanning van de wapening overschreden. De maximale rek in de wapening bedraagt 8%. Dit betekent dat het niet onwaarschijnlijk is dat wapenings-

breuk optreedt (de rekenwaarde van de breukrek is 3,5%, de werkelijke breukrek varieert tussen 7 en 10%).

Zoals al eerder opgemerkt, kan op grond van de grote vervormingen, de aanzienlijke hoeveelheid schade, de overschrijding van de stuikrek van het beton en een overschrijding van de vloeispanning van de wapening ervan uit worden gegaan dat de tunnelconstructie onder invloed van een maximale BLEVE-belasting bezwijkt.

4.4 Nieuwe kennis grondresponse (resultaten berekeningen met PLAXIS)

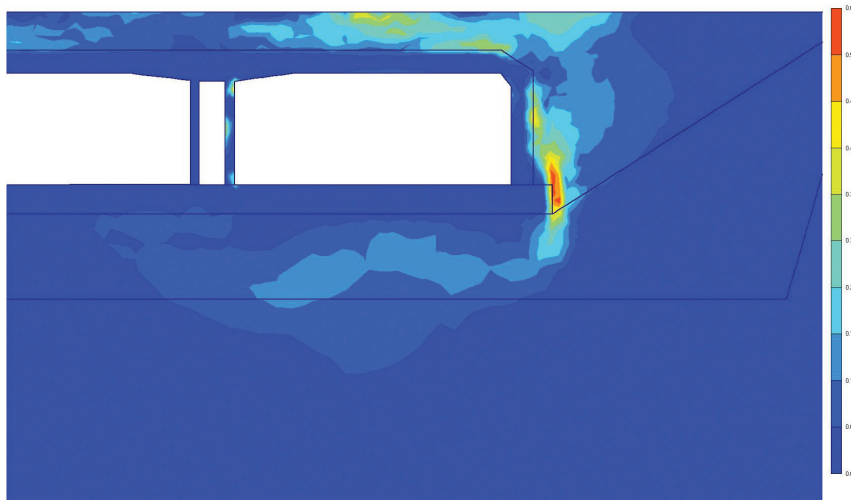
De grondresponsie is berekend met PLAXIS. In plaxis zijn geen modellen aanwezig voor beschrijving van het niet-lineaire betongedrag, zodat in deze berekeningen voor de tunnel een relatief eenvoudig model is gebruikt. De tunnel response kan dus afwijken van de berekende responsie met het meer geavanceerde model in LS-Dyna. Dit wordt verder in de volgende paragraaf besproken. Vermeldenswaard is dat ook de berekeningen met Plaxis laten zien dat de sterkte en stijfheid van de grond weinig invloed heeft op de tunnelresponsie.

Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van de, in het kader van dit project, ontwikkelde in Plaxis geïmplementeerde opties PTU en Biot. Deze blijken naar tevredenheid te werken.

In paragraaf 3.3.1 is al aangetoond dat de huidige grondmodellen het gedrag bij ontlasten niet correct beschrijven. De wateroverspanningen rond de tunnel na passage van de schokgolf kunnen nog niet correct worden voorspeld. Een indicatie van het grondgedrag kan wel worden verkregen op basis van de berekende schuifrekken. Bij de uitgevoerde triaxiaal proeven wordt geconstateerd dat bij schuifrekken van ongeveer 0,2 % en hoger sprake is van plastisch gedrag. Bij deze waarden wordt, op basis van deze proeven, verwacht dat er bij ontlasten wateroverspanningen ontstaan.

Figuur 17 toont de optredende schuifrekken op het moment dat ze ongeveer maximaal zijn. De zone waar deze groter zijn dan 0,2% is enige meters rond de tunnel. In deze zone kunnen na ontlasten relevante wateroverspanningen aanwezig zijn.

Voor de tunnel betekent een wateroverspanning onder de tunnel een vermindering van de verticale stabiliteit. Als de wateroverspanning voldoende hoog is, is de opwaartse waterdruk hoger dan het gewicht van de tunnel. Een opwaartse beweging is het gevolg. Hoeveel de tunnel eventueel opwaarts beweegt is niet onderzocht. Hierbij spelen o.a. de lengte effecten een rol. Verwacht wordt dat er sprake zal zijn van extra spanningen in de elementen en voegen en mogelijk ongelijkmatige vervorming van de tunnel.



Figuur 18. Afbeelding Verdeling equivalente schuifrek op $t = 0.08s$ na start van een gereduceerde BLEVE-belasting, range van waarden is van +0.6% (rood) tot 0% (blauw)

Door dissipatie van de wateroverspanningen rond de tunnel kunnen waterspanningen op enige afstand van de tunnel de waterspanningen nog oplopen. Na verloop van tijd is de wateroverspanning door dissipatie verdwenen. In de tussentijd kan door dissipatie op enige afstand van de tunnel de wateroverspanning tijdelijk toenemen. Dit kan de stabiliteit van constructies (funderingen, leidingen) in gevaar brengen.

De ontwikkelde Biot optie in Plaxis biedt de mogelijkheid voor het berekenen van situaties waarbij gelijktijdig dynamica en dissipatie effecten van belang zijn.

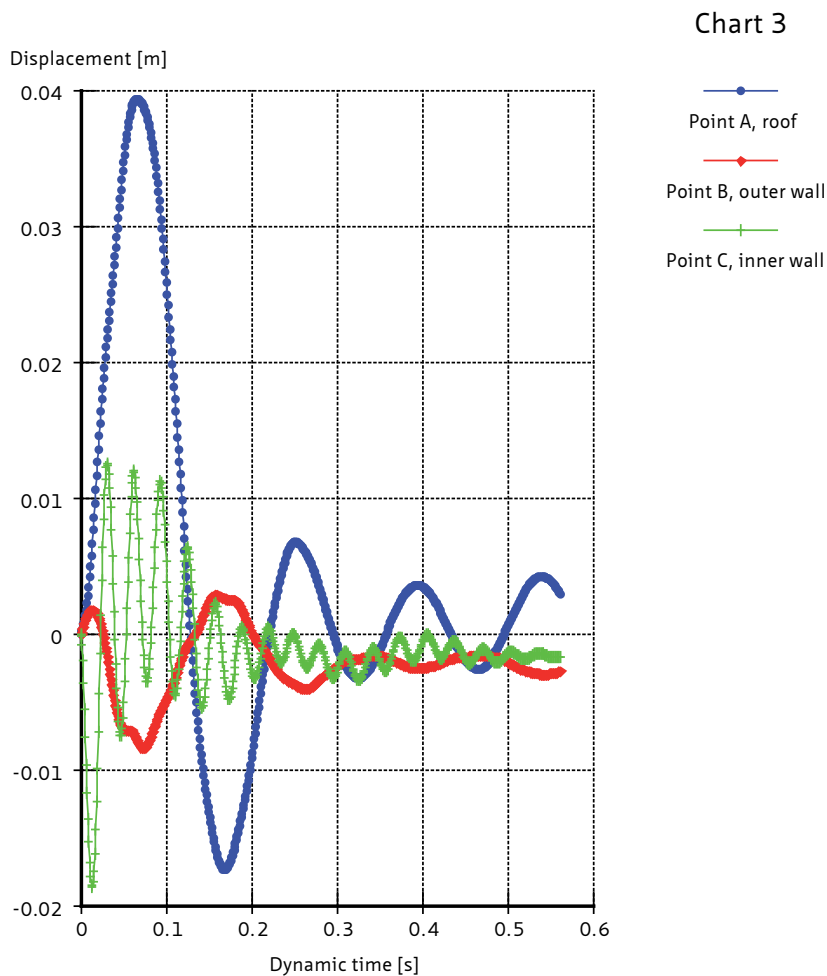
4.5 Vergelijking tunnelresponsie in LS-Dyna en in Plaxis

Zowel in de LS-DYNA berekening als in de PLAXIS berekening wordt de responsie van de tunnel op een explosie berekend.

Voorafgaand aan de Plaxis berekeningen voor de tunnel-grond responsie is het gedrag van een tunnel in Plaxis vergeleken met het gedrag van een tunnel in Diana. In deze berekeningen was geen grond aanwezig en is het tunnelgedrag lineair-elastisch verondersteld. Hieruit volgde een goede overeenstemming.

Het tunnel gedrag in Diana en LS-Dyna is vervolgens onderling vergeleken en leverde ook een goede overeenstemming

De tunnel responsie volgens LS-DYNA is beschreven in hoofdstuk 4. De volgende figuur toont de tunnelresponsie volgens één van de PLAXIS berekeningen.



Figuur 19. Verplaatsingsrespons van de tunnel. 'point A roof' is gelijk aan punt D in figuur 9, 'point B, outer wall' is gelijk aan punt D in figuur 12, 'point C, inner wall' is gelijk aan punt C in figuur 12. (run: caland5-run3.plx)

Als de resultaten voor de niet lineaire tunnel responsie (zie de figuren 10 en 13) volgens de PLAXIS en LS-Dyna berekeningen worden vergeleken blijken deze op diverse onderdelen te verschillen. Twee verschillen worden hier expliciet benoemd. De opwaartse verplaatsing van het dak tengevolge van een BLEVE is in LS-DYNA maximaal 10 mm opwaarts, gevolgd door een neerwaartse beweging tot iets onder de beginpositie. In PLAXIS is de opwaartse beweging van de tunnel ongeveer 4 cm, dus een factor 4 groter. De frequentie waarmee het dak na de explosie beweegt is ook verschillend, deze is ongeveer 5 Hz volgens de PLAXIS berekening en ongeveer 10 Hz volgens LS-Dyna berekening.

De oorzaak van deze verschillen wordt gezocht in de constitutieve modellering van de betonconstructie en tweede orde effecten van vervormingen. PLAXIS is niet in staat het niet-lineaire betongedrag (o.a. scheurvorming) te modelleren en is daarmee ongeschikt om het tunnelgedrag te modelleren indien in de tunnel wordt belast tot voorbij scheurvorming.

Voor een gekoppelde tunnel-grond responsie berekening wordt aanbevolen om eerst de tunnel responsie te berekenen. Het hierbij te gebruiken constitutieve model moet vooral het gedrag van beton onder dynamische belasting goed beschrijven. Vervolgens kan deze responsie gebruikt worden als invoer voor de berekening van de grondresponsie in een model voor de grondresponsie. Dit kan door de tunnelparameters in het tweede model zodanig te kiezen dat hiermee een vergelijkbare tunnelresponsie wordt bereikt. Het tweede model moet vooral het constitutieve gedrag van grond als twee fasen medium beschrijven, waarbij de nadruk moet liggen op de correcte modellering van het ontlastingsgedrag.

4.6 Conclusies

Samenvattend worden uit het onderzoek de volgende conclusies getrokken voor de response van de tunnel over een lengte van 40 meter waar de BLEVE plaats vindt:

1. Een gereduceerde BLEVE-belasting ($\Delta p = 510$ kPa; $I = 12$ kPa·s) leidt tot lokaal bezwijken:
 - a. de tussenwand in de tunnelkoker waar de explosie plaatsvindt, zal binnen 0.03 s bezwijken.
 - b. aan de binnenzijde van het dak, de vloer en de wanden treedt scheurvorming op.
 - c. aan de buitenzijde van het dak en de vloer, ter plaatse van de tussenwanden en de verbinding tussen het dak en de buitenwanden, treedt scheurvorming op.
2. Een maximale BLEVE-belasting ($\Delta p = 1600$ kPa; $I = 64$ kPa·s) leidt tot globaal bezwijken:
 - a. de tussenwand in de tunnelkoker waar de explosie plaatsvindt, zal binnen 0.01 s bezwijken.
 - b. vloeit en mogelijke breuk van de wapening leiden tot grote vervormingen.

De verschillen in het dynamisch gedrag voor een tunnel in slappe grond en een tunnel in stijve grond zijn klein. De verschillen zijn voornamelijk waar te nemen in het scheurpatroon. In de tunnelkoker waar de explosie plaatsvindt, leidt stijvere grond tot minder scheuren. De verschillen zijn echter beperkt en hebben geen invloed op bovenstaande conclusies.

De resultaten van de berekeningen in LS-DYNA en PLAXIS zijn verschillend op diverse onderdelen. Als voorbeeld is de opwaartse verplaatsing van het dak tengevolge van een BLEVE in LS-DYNA maximaal 10 mm. In PLAXIS is deze ongeveer 4x groter. De verschillen worden in het bijzonder veroorzaakt door tekortkomingen in het materiaalmodel voor beton in PLAXIS (vooral in het niet-lineaire gebied)..

De berekeningen hebben laten zien dat een voorspelling kan worden gegeven van het dynamische gedrag van een tunnelconstructie onder impactbelasting. De resultaten laten zien dat het gedrag wordt gedomineerd door de tunnelconstructie. Het dimensioneren van explosiebestendige tunnels vraagt daarom om een geavanceerd materiaalmodel voor de tunnelconstructie. De grond moet in de modellering worden meegenomen, echter, zolang de grondstijfheid binnen de gestelde grenzen blijft, zijn de grondeigenschappen niet van belang. Een eenvoudig materiaalmodel voor de grond volstaat in dit geval. De

betrouwbaarheid van de materiaalmodellen voor beton onder dynamische omstandigheden is in het onderhavige onderzoek echter niet gevalideerd. Hiervoor is een experimentele validatie noodzakelijk.

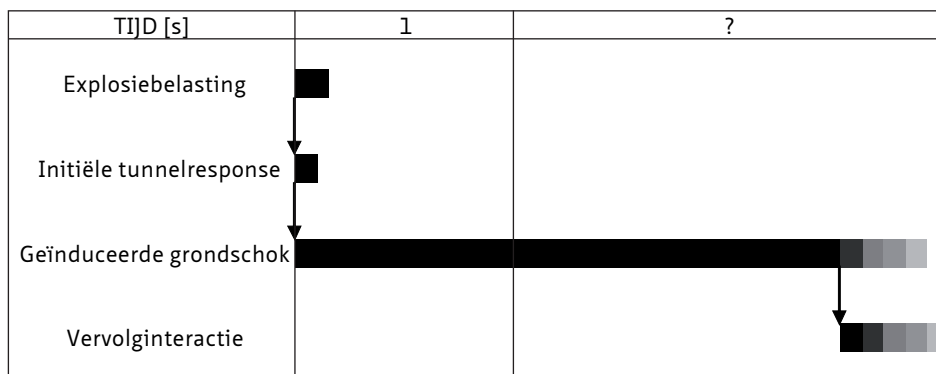
5 Conceptwerkwijze beoordeling explosiebestendigheid tunnels

Een afgeleid doel van het onderzoek naar de full system response is het opstellen van een conceptwerkwijze om de explosiebestendigheid van tunnels te beoordelen. Op basis van de in het onderhavige onderzoek opgedane kennis, is een concept werkwijze ontwikkeld. Deze conceptwerkwijze bestaat uit de volgende stappen:

1. Aanbrengen van de explosiebelasting;
2. Berekening van de initiële tunnelresponse;
3. Berekening van de geïnduceerde grondschock;
4. Berekening vervolginteractie;
 - a. reboundeffect;
 - b. stabiliteit van de tunnelconstructie;
 - c. effecten op de omgeving.

Opgemerkt wordt dat het huidige onderzoek zich heeft gericht op stap 1 tot en met 3.

In het balkenschema in Figuur 20 zijn de onderdelen van een berekening ten behoeve van een beoordeling van de explosiebestendigheid van een tunnel uitgezet tegen de tijd.



Figuur 20. Conceptwerkwijze beoordeling explosiebestendige tunnels

Na een kwantificering van de explosiebelasting conform hoofdstuk 2 van dit rapport betreft de eerste stap het aanbrengen van de explosiebelasting. Als voorbeeld wordt de "lage" explosiebelasting genomen, die 0,15 s aanwezig is. In Figuur 20 is dit in het balkenschema weergegeven.

Een tweede stap is het berekenen van de initiële response van de tunnelconstructie. Van de in het onderhavige onderzoek gebruikte rekenpakketten blijkt LS-DYNA hiervoor het meest geschikt te zijn. Als wederom de "lage" explosiebelasting als voorbeeld wordt genomen, blijkt uit Figuur 13 dat de initiële response voornamelijk optreedt tot 0,1 sec na het aanbrengen van de explosiebelasting, zie Figuur 20.

De pijlen in Figuur 20 geven de tijdsrelaties weer tussen de opeenvolgende stappen in de conceptwerkwijze. Hieruit blijkt dat de initiële response direct vanaf het aanbrengen van de explosiebelasting moet worden bepaald.

Een derde stap binnen de conceptwerkwijze betreft een berekening van de geïnduceerde grondschok. Deze bestaat uit een directe schok tgv de doorgegeven explosiebelasting en de drukpuls tgv vervormingen van de tunnel. De directe schok kan zowel in PLAXIS als LS-DYNA worden berekend. De in LS-DYNA berekende vervormingen van de tunnelconstructie dienen als invoer voor het tweede deel van de geïnduceerde grondschok.

Met behulp van de geïnduceerde grondschok kunnen uiteindelijk de langetermijneffecten voor de tunnel en de omgeving worden bepaald. Omdat deze langetermijneffecten in het onderhavige onderzoek niet zijn onderzocht, bestaat er geen zekerheid over de periode waarover de grondresponse moet worden bepaald. In ieder geval dient de grondresponse direct vanaf het aanbrengen van de explosiebelasting te worden bepaald. In het onderhavige onderzoek is gebleken dat binnen 1 sec na het aanbrengen van de explosiebelasting nog geen reboundeffecten zijn waargenomen. De bepaling van de grondresponse dient derhalve langer dan 1 sec na het aanbrengen van de explosiebelasting te worden bepaald, zie Figuur 20.

De laatste stap binnen de conceptwerkwijze voor een beoordeling van de explosiebestendigheid van een tunnel betreft het bepalen van de langetermijneffecten. De reboundeffecten en de stabiliteit van de tunnel kunnen wederom met LS-DYNA worden bepaald, met behulp van de in PLAXIS berekende gronddrukken- en verplaatsingen. De effecten voor de omgeving kunnen worden bepaald in PLAXIS.

6 Conclusies

Door het uitvoeren van een uitgebreide voorstudie, is het probleemgebied grondig geïnventariseerd en zijn de bestaande onderzoeksvragen vastgesteld. De meest relevante onderzoeksvragen hebben geleid tot het technisch onderzoek.

Het onderzoek heeft geresulteerd in antwoorden op de gestelde onderzoeksvragen:

- welke belasting treedt op bij een BLEVE in een tunnel?
- hoe reageert de tunnel als deze dynamisch tot bezwijken wordt gebracht?
- hoe reageert de grond onder de dynamische belastingen die de tunnel doorgeeft?

In het technisch onderzoek is een model opgesteld om de gevolgen van een BLEVE te voorspellen. Het model is generiek toepasbaar. In de huidige studie is een BLEVE van een 50 m³ LPG tank in een tunnelbuis als benchmark gebruikt. Deze studie leverde de volgende antwoorden op de onderzoeksvragen op:

- voor de uitgewerkte benchmark² geldt dat de explosiekracht ter plaatse van de BLEVE meer dan 1000 kPa (10 bar) is (conservatief model) en op een grotere afstand is afgenomen tot circa 150 kPa (1.5 bar).
- voor berekeningen waarin de constructie en de grond worden gemodelleerd, kan onder andere gebruik worden gemaakt van het eindige elementenpakket LS-DYNA. Hierin is de constructie geavanceerd gemodelleerd en de bodem eenvoudig. Voor het tunnelgedrag tijdens de explosie blijkt dit voldoende betrouwbaar te zijn. Voor berekeningen waarbij de stabiliteit van de grond moet worden bepaald, is een geavanceerdere grondmodellering noodzakelijk. Deze is gedeeltelijk beschikbaar in PLAXIS. De grondmodellering voor de ontlastfase, en daarmee de eindsituatie, blijkt te leiden tot een onderschatting van de wateroverspanning.
- voor de uitgewerkte benchmark geldt dat lokaal (over een lengte van ongeveer 40 m) zal grote schade aan de tunnel optreden. Deze conclusie is gebaseerd op de huidige stand van zaken met betrekking tot de kracht van de explosie bij een LPG-BLEVE. Het promotieonderzoek loopt echter nog een jaar door (afronding eind 2010). Naar verwachting is het huidige model conservatief en zal de kracht van de explosie mogelijk een factor 3 lager zijn. Dit zou betekenen dat er constructieve maatregelen mogelijk zijn, zodat tunnels "explosieproof" kunnen worden gebouwd.
- voor het bepalen van de grondschok is een nieuw 2 fase model in PLAXIS ontwikkeld. Door deze inpassing in PLAXIS wordt de ontwikkelde kennis geborgd en blijft deze in de nabije toekomst beschikbaar voor praktijktoepassingen.
- in PLAXIS kan de hoogfrequente schokpropagatie met grote elementen worden gemodelleerd. In combinatie met het 2 fase model kan de geïnduceerde grondschok voor de omgeving van de tunnel worden bepaald.

Het onderzoek heeft inzicht en gereedschappen opgeleverd om de consequenties van explosies te kwantificeren.

Naast een bestaande (conservatieve) predictie van een BLEVE belasting is er een meer

² De 50 m³ LPG BLEVE is in het huidige onderzoek als voorbeeld gekozen. Of de LPG BLEVE als bovengrens voor BLEVE belastingen gehanteerd kan worden voor alle tot vloeistofverdichte gassen, is niet onderzocht.

gedetailleerd rekenmodel ontwikkeld op basis waarvan minder conservatieve predicties mogelijk zijn. Naar verwachting is het nieuwe rekenmodel eind 2010 beschikbaar. Er is gevonden dat de responsie van de tunnel onafhankelijk van de responsie van de grond berekend kan worden. Voor de grond is de rekentechniek verbeterd en in Plaxis geïmplementeerd.

De modellen tunnel en grond zijn nog niet compleet. Dit wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door beperkingen in de thans beschikbare materiaalmodellen. In de tunnelmodellering betreft het vooral de scheurvorming, het gedrag na scheuren en het bezwijken op stuik van de wapening in de betondrukzone. In de grondmodellering betreft het vooral het constitutieve gedrag bij ontlasten van de grond nadat de initiële schokgolf gepasseerd is.

Met de ontwikkelde gereedschappen is het voor de initiële response mogelijk om de haalbaarheid van explosiebestendige tunnels te bepalen. Omdat de beschikbare materiaal modellen te beperkt zijn, zijn uitspraken over duurzaamheid en reparatiekosten nog niet mogelijk.

7 Referenties

- 1 T. Abbasi and S.A. Abbasi, The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management, J. Hazard. Mat. 141 (2007) 489-519
- 2 A.C. van den Berg, M.M. Van der Voort, J. Weerheijm and N.H.A. Versloot, Expansion-Controlled Evaporation – A safe approach to BLEVE blast, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.17, No.6, 397-405, 2004
- 3 A.C. van den Berg, M.M. Van der Voort, J. Weerheijm and N.H.A. Versloot, BLEVE blast by expansion controlled evaporation, Process Safety Progress, 25, 44-51, 2006
- 4 G.A. Pinhasi, A. Ullmann and A. Dayan, 1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion, Int. J. Heat Mass Transfer, 50 (2007) 4780-4795
- 5 L. van Schepdael en P. Globevnik; Explosie tankauto's, Fase 2: Analyse tankauto LPG, Solico rapport, 3 juli, 2006
- 6 A.C. van den Berg, J. Mediavilla Varas, J. Weerheijm, J.R. van Deursen, Pressure load on a cylindrical tunnel caused by a LPG BLEVE: Influence of the vessel failure time; DC/TNO report 2009
- 7 Grinten, J.G.M., An experimental study of shock-induced wave propagation in dry, water-saturated, and partially saturated porous media, Ph.D thesis Eindhoven University of Technology, December 1987
- 8 J.F.M. Wessels, J. Weerheijm, P. Hölscher, Vooronderzoek "Bijzondere Belastingen", Eindrapport DC, juni 2006.
- 9 M. Xie, D. Roekaerts, On the need for experimental data sets for BLEVE model validation, Report TU Delft / DC/COB "L1", 2009.
- 10 A.H.J.M. Vervuurt, F.M.B. Galanti, A.J. Wubs, A.C. van den Berg, Effect of explosions in tunnels, Preliminary assessment of the structural response, Report TNO / DC/COB 2007-D-R0156/A "R1", mei 2007.
- 11 P Meijers, Soil response during an explosion in a tunnel, Report Deltares / DC/COB 1001136-006-GEO-0001 "R2", oktober 2009.
- 12 H.G. Burggraaf, A.H.J.M. Vervuurt, J. Weerheijm, Full system response Thomassen-tunnel under impact load using LS Dyna, Report TNO / DC/COB "R3", november 2009.
- 13 R. al Khoury, J. Weerheijm, L.J. Sluys. Numerical Modeling of Soil Behaviour under Blast Loading. DC project C31D03, subworkpackage R2. TU-Delft report, July 2009.

