

2021

Eindscriptie risico's mestgassen in de melkveestallen



Robin Cranendonk
CLM Onderzoek & Advies B.V.
25-5-2021

Samenvatting Nederlands

In dit onderzoek is gekeken naar de brand- en explosierisico's en de gezondheidsrisico's van de mestgassen in de melkveestallen. In het eerste onderdeel is er een risicoanalyse gemaakt van de verschillende mestgassen. Als er gekeken wordt naar het mestgas methaan, is te zien dat methaan het gas is wat brand of explosie kan veroorzaken. In de melkveestallen is het niet ondenkbaar dat er concentraties methaan zijn die een explosief luchtmengsel vormen. Dit is voornamelijk het geval tijdens het mixen. Ook is methaan sterk aanwezig bij schuimvorming, wat ongeveer voor 60-80% uit methaan bestaat. Als er een ontsteking bij het explosieve luchtmengsel of in het schuim komt, kan dit zorgen voor een explosie of een brand. Het type vloer is hierbij van belang. Bij een roostervloer kan de druk makkelijk weg door de kieren van de vloer, wat resulteert in een steekvlam door de roosters heen. Bij een emissiearme vloer kan de druk moeilijk weg, waardoor er een explosie kan ontstaan.

Bij ammoniak en waterstofsulfide wordt er voornamelijk gekeken naar de gezondheidsrisico's vanwege de giftigheid van de gassen. In bepaalde situaties kan één ademteug al fataal zijn, wat in het verleden ook regelmatig is gebeurd.

In deelvraag 2 worden de ontstekingsbronnen in de melkveestallen in kaart gebracht. Wat blijkt uit de schouws is dat het laadstation van de mestrobot vaak een vonkje veroorzaakt. Ook de borstelrobots kunnen een vonk veroorzaken. Daarnaast zijn er verschillende werkzaamheden die vonken veroorzaken, zoals uiers branden, slijpen van de hoeven en laswerkzaamheden. Ook de trekker die de mixer aandrijft, kan warme roetvonkjes veroorzaken die in de mixput kunnen vallen en een ontsteking kunnen veroorzaken.

In deelvraag 3, 4 en 5 worden verschillende aanbevelingen gedaan en uitgewerkt om op proactief, preventief en preparatief/repressief niveau respectievelijk de verschillende risico's te verminderen. Enkele interessante aanbevelingen zijn de kelderloze stal, biofiltratie, en additieven aan de mest op proactief niveau. Op preventief niveau zijn de belangrijkste aanbevelingen dat er tijdens het mixen rekening gehouden moet worden met de ontstekingsbronnen, en dat bepaalde activiteiten niet tijdens het mixen mogen. Op preparatief/repressief niveau is de breuklijn in de emissiearme vloer een belangrijke, en is het belangrijk dat er brandblussers zijn.

Summary English

This study looked at the fire, explosion and health risks of manure gases in dairy barns. In the first part, a risk analysis of the different manure gases was made. When looking at methane, it can be seen that methane is the gas that causes risk of fire or explosion. In dairy barns, it is not unthinkable that there are concentrations of methane that form an explosive air mixture. This is mainly the case during mixing. Methane is also strongly present during foam formation, which consists of about 60-80% methane. If there is an ignition that can ignite the explosive air mixture, or an ignition that gets into the foam, it can cause an explosion or a fire, depending on the type of floor. With a grate floor, the pressure can easily pass freely through the cracks of the floor, resulting in a flame jet through the grates. But with a low-emission floor, the pressure can hardly escape, resulting in an explosion.

With ammonia and hydrogen sulfide, the health risks are mainly considered because of the toxicity of the gases. In certain situations, one breath can be fatal, which has also happened regularly in the past.

In sub-question 2 the sources of ignition in the dairy houses are mapped out. What emerges from the inspections is that the loading station of the slurry robot often causes a spark. The brush robots can also cause a spark. In addition, there are several operations that cause sparks, such as udder burning, hoof grinding and welding operations. Also, the tractor that drives the mixer can cause hot soot sparks that can fall into the mix pit and cause an ignition.

In sub-questions 3, 4 and 5, several recommendations are made and elaborated to reduce the different risks at proactive, preventive and preparatory/repressive levels respectively. Some interesting recommendations are the cellarless barn, biofiltration, and additives to manure at the proactive level. On the preventive level, the main recommendations are to take into account the sources of ignition during mixing, and not to allow certain activities during mixing. At the preparatory/repressive level, the break line in the low-emission floor is an important one, and having fire extinguishers is important.

Inhoudsopgave

Samenvatting Nederlands	1
Summary English	1
1. Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Doel van het onderzoek	6
1.3 Probleemstelling	7
1.4 Deelvragen	7
2.Theoretisch kader	8
2.1 Bow-tie model	8
2.2 Veiligheidsketen	9
2.3 Wat is een explosie?	10
Ontstaan van een explosie	10
2.4 Explosieveiligheidswetgeving	10
2.5 Lower Explosion Limit (LEL)	11
2.6 Mestopslag	12
2.7 Milieurisico's	13
2.8 Begrippenlijst	14
3. Methoden en technieken	15
3.1 Mixed Method research	15
3.2 Dataverzameling en operationalisatie	16
3.2.1 Literatuurstudie	16
3.2.2 Interviews	16
3.2.3 Schouws	17
3.3 Data-analyse	17
3.3.1 Literatuurstudie	17
3.3.2 Interviews	18
3.3.3 Schouw	18
3.4 Betrouwbaarheid	18
3.5 Validiteit	19
4. Deelvraag 1: Risicoanalyse van de verschillende mestgassen	20
4.1 Methaan	20
4.2 Ammoniak	23
4.3 Waterstofsulfide	25

4.4 Incidenten mestgassen.....	26
4.4.1 Scenario's incidenten mestgassen	26
4.4.2 Incidenten methaanbrand en –explosies	27
4.4.3 Ongevallen mestgassen.....	27
5. Deelvraag 2: Ontstekingsbronnen in de melkveestallen.....	29
5.1 Terugkomende resultaten.....	31
6. Deelvraag 3: Proactieve oplossingen	33
6.1 Verandering in het voer om methaangehalte te verminderen.....	33
6.1.1 Zeewier als additief	33
6.1.2. 3-NOP van DSM	34
6.2 Mest uit de stal halen.....	34
6.2.1 Kelderloze stal	34
6.2.2 Mest uit de stal pompen in een mestsilos	34
6.3 Biofiltratie.....	35
6.3.2 Lely Sphere	35
6.4 verlaging temperatuur van de mest voor emissiereductie	36
6.4.2 Dakisolatie	36
6.5 schuimvorming tegengaan	36
6.5.2 Mineralen om schuimvorming tegen te gaan	37
6.6 Ureaseremmers.....	37
6.7 Ammoniakvermindering door mestverrijking.....	37
7. Deelvraag 4: Preventieve oplossingen	38
7.1 Activiteiten uit tijdens mixen	38
7.1.1 Mestrobot uit tijdens mixen.....	38
7.1.2 Niet lassen, slijpen van koeienhoeven of uiers branden tijdens het mixen.....	38
7.2 Dichte plaat bij het laadstation en onder de borstel apparatuur	38
7.3 Draadloze mestrobot.....	38
7.4 Speciaal deksel voor de mixput.....	39
7.5 Volledig doorluchten tijdens mixen, lassen, uiers branden en slijpen.....	39
7.5.2 Niet mixen tijdens bepaalde weersomstandigheden.....	39
7.6 Slijpen van koeienhoeven en uiers branden op een veilige plek met een dichte vloer, waar het niet mogelijk is om vonken tussen de spleten te laten komen.....	39
7.7 Speciale rubberen matten die makkelijk te verplaatsen zijn om te leggen op de vloer tijdens lassen, uiers branden, slijpen etc.	40
7.8 Niet roken in de stal	40

7.9 Bewustwording boeren	40
7.9.2 Arbocatalogus of RI&E.....	40
Preventieve oplossingen gezondheidsrisico's:.....	40
7.10 Raam dicht van de trekker, persoon mag niet in de trekker zitten.	40
7.11 Geen personen dicht bij de mixput.	41
7.12 Gebruik een handmeter.	41
7.12.2 Meetopstelling gasmelder.....	41
8. Deelvraag 5: Preparatieve en repressieve maatregelen	42
8.1 Preparatieve maatregelen.....	42
8.1.1 Aanwezigheid brandalarm.....	42
8.1.2 Aanwezigheid bluswater	42
8.1.3 Vergroten bereikbaarheid voor de hulpverleners.....	42
8.1.4 Informatie voor de hulpverleners	42
8.1.5 Ontruimingsplan.....	43
8.1.6 Takel of lier	43
8.2 Repressieve maatregelen	43
8.2.1 Brandblussers in de stal.....	43
8.2.2 Breuklijn zodat niet de hele vloer klapt.....	43
8.2.3 Backup flesje ademlucht	44
8.2.4 Bedrijfshulpverlener mestgassen	44
9. Conclusie	45
10. Bronnenlijst	49
Bijlage	54

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

In de laatste decennia is er meer oog gekomen voor het milieu en de impact daarop die wordt veroorzaakt door de agrarische sector. Zo staat de agrarische sector, en dan voornamelijk de veehouderij, erom bekend om de emissies die in de atmosfeer komen die bijdragen aan de opwarming van de aarde of verslechtering van de bodemkwaliteit (RvO, 2016). De belangrijkste emissies van stoffen naar de lucht zijn methaan (CH₄) (effect op klimaat), ammoniak (NH₃) (effect op natuur) en waterstofsulfide (H₂S) (effect op veiligheid).

In de melkveehouderij staan de koeien het grootste gedeelte van de tijd in de stal. De mest die ze produceren komt terecht in de kelders onder de stallen.

Er zijn momenteel twee soorten vloeren. De traditionele vloer, ook wel roostervloer genoemd, is de meest voorkomende vloer. Dit is een vloer dat dient als een soort rooster, waardoor de mest naar beneden in de kelder valt. Deze vloer zorgt er ook voor dat de stoffen die zich onder de vloer in de mest bevinden, gemakkelijk een uitweg weten te vinden door de roosters, en via de stal in de lucht komen. Dit kan schadelijk zijn voor het milieu. Daarom zijn er ook emissiearme vloeren. Dit zijn vrijwel compleet dichte vloeren, waar de mest om de zoveel tijd met een trekker door een opening naar binnen wordt geschoven. Hierdoor komt er minder ammoniak vrij in de lucht, wat beter is voor het milieu (WUR, 2014).

Naar aanleiding van een explosie in een stal met een emissiearme vloer, waarbij meerdere koeien de dood vonden en forse schade werd aangericht, is CLM Onderzoek en Advies B.V. (afgekort CLM) samen met het dochterbedrijf FarmGasLive op verzoek van het ministerie van LNV metingen gaan verrichten naar de stoffen in deze kelders. Hierbij kijken ze naar twee stallen met verschillende soorten vloeren om te zien of er een effect is op de concentraties van de stoffen die zich bevinden in de kelder. Tijdens dit meten is er met name onder de emissiearme vloer sprake van hoge concentraties methaan. In de meeste gevallen zijn deze concentraties nog ruim onder het LEL, het Lower Explosion Limit (CLM, 2020). Hoewel de hogere methaanconcentratie voornamelijk wordt gemeten in de stal met een emissiearme vloer, is het verband nog niet bewezen. Dit is echter wel een zeer actueel fenomeen, waar nog weinig onderzoek naar gedaan is.

Bij onderzoek naar het eerdergenoemde incident werd, uit gesprekken van de omgevingsdienst Twente met de boeren, duidelijk dat veel boeren, weleens te maken hebben gehad met een methaanbrandje. Dit waren in de meeste gevallen redelijk kleine incidenten die allemaal onder de vloer bleven en verder geen enorm grote impact hadden. Deze incidenten werden niet gerapporteerd. In dit onderzoek wordt er gekeken naar de veiligheidsrisico's die zich afspelen in melkveestallen door mestgasophopingen. Ook wordt er gekeken naar de mogelijkheden in management door boeren om deze risico's te verminderen.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is het creëren van een veiligere omgeving in de melkveestallen, en het reduceren van de kans op een methaanexplosie. De betrokken partijen hier zijn de boeren in de eerste plaats, waarbij de methaanophopingen plaatsvinden. De tweede partij die hierbij betrokken is, betreft uiteraard CLM. Zij verrichten met zusterbedrijf FarmGasLive de metingen, en daarom staat de

veiligheid van hun medewerkers ook op het spel. Het is belangrijk dat deze metingen veilig verlopen zonder dat er ook maar de geringste kans bestaat op een explosie.

De onderzoeksfunctie van dit onderzoek is **ontwerpend**. Er moeten maatregelen worden ontworpen om de kans op een methaanexplosie te reduceren. Dit zijn zowel proactieve, preventieve, preparatieve en repressieve maatregelen.

1.3 Probleemstelling

Bij dit onderdeel wordt gekeken naar de probleemstelling, en wordt de hoofdvraag geformuleerd. Dit onderzoek zal antwoord gaan geven op deze hoofdvraag. De probleemstelling luidt als volgt:

Hoe kunnen de risico's op branden en gasexplosies die ontstaan door de mestgassen bij melkveestallen geminimaliseerd worden?

1.4 Deelvragen

Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag, wordt er in dit onderzoek aan de hand van deze deelvragen verschillende aspecten binnen het onderwerp behandeld om een volledig antwoord te kunnen geven. De deelvragen luiden als volgt:

Deelvraag 1:

Wat zijn de risico's bij de stoffen methaan, ammoniak en waterstofsulfide?

Bij deze deelvraag wordt er een risicoanalyse gemaakt van de verschillende gassen/stoffen die zich in de mestkelder bevinden. Dit zijn de stoffen ammoniak (NH₃), methaan (CH₄) en waterstofsulfide (H₂S). Hier wordt gekeken naar de explosierisico's van deze stoffen. Ook wordt er beknopt gekeken naar de gezondheidsrisico's van de stoffen. Dit wordt uitgelegd omdat dit effect heeft op hoe de boeren kunnen omgaan met deze stoffen. In het theoretisch kader worden ook de milieurisico's besproken. Dit geeft geen antwoord op de hoofdvraag, maar hiermee moet wel rekening gehouden worden bij het beantwoorden van deze vraag. Er wordt geprobeerd een duidelijk beeld te schetsen van de hoeveelheid incidenten die deze stoffen veroorzaken op boerderijen met melkveestallen. Dit wordt gedaan aan de hand van berichten uit het nieuws en een onderzoek van derden (OD Twente, 2019). Ook wordt er gekeken naar de bijkomende risico's wanneer deze stoffen met elkaar gemengd worden. Het type deelvraag hier is beschrijvend.

Deelvraag 2:

Welke omstandigheden zijn meer of minder waarschijnlijk om een gasbrand of -explosie te veroorzaken?

Bij deze deelvraag wordt er een analyse gemaakt van de verschillende factoren die ervoor kunnen zorgen dat de stoffen kunnen exploderen of branden. Hoe brandbaar de stoffen ook kunnen zijn, er moet wel een ontsteking komen waardoor het in brand vliegt of explodeert. Door middel van een schouw worden de ontstekingsbronnen blootgesteld. Het type deelvraag hier is verklarend. Er wordt immers gekeken wat de oorzaken zijn van de brand- en explosierisico's en gezondheidsrisico's.

Deelvraag 3:

Wat zijn mogelijke proactieve oplossingen om ervoor te zorgen dat er geen gasexplosie of gasbrand kan ontstaan?

In deze deelvraag worden er verschillende mogelijke oplossingen uitgewerkt en toegelicht om het probleem proactief te verhelpen. Dit bestaat uit maatregelen die de boeren kunnen nemen in hun management van de stallen, waardoor het gevaar wordt voorkomen. Het type deelvraag hier is ontwerpend.

Deelvraag 4:

Wat zijn mogelijke preventieve oplossingen om ervoor te zorgen dat er geen gasexplosie of gasbrand kan ontstaan?

In deze deelvraag worden er verschillende mogelijke oplossingen uitgewerkt en toegelicht om het probleem preventief te verhelpen. Hier worden maatregelen beschreven die boeren kunnen nemen in het management van de stallen, ter voorkoming van een dergelijke calamiteit. Het type deelvraag hier is ontwerp.

Deelvraag 5:

Wat zijn mogelijke preparatieve en repressieve oplossingen om ervoor te zorgen dat een gasexplosie of gasbrand weinig tot geen schade aanricht?

In deze deelvraag worden de verschillende oplossingen uitgewerkt en toegelicht die het probleem repressief bestrijden. Ook worden verschillende maatregelen behandeld die ervoor zorgen dat het probleem repressief bestrijden op een goede manier is voorbereid. Hier wordt vooral gekeken naar de best practices die ervoor zorgen dat een gasexplosie beheersbaar blijft. Het type deelvraag hier is ontwerp.

2.Theoretisch kader

2.1 Bow-tie model

Het bow-tie model is een kwalitatieve risicoanalyse methode, waarmee er een beeld wordt gecreëerd van de risico's die in een organisatie aanwezig zijn, samen met de verschillende preventieve maatregelen en beschermingsmaatregelen die hierop kunnen worden toegepast. Hier worden de risico's, bedreigingen en beschermingsmaatregelen in een compleet model genoemd. Centraal hier staat de ongewenste gebeurtenis, in dit geval een mestgasexplosie. Links in het model staan de oorzaken en het beheer daarvan, en rechts staan de gevolgen en het beheer van die effecten (Overheid Vlaanderen, z.d.).

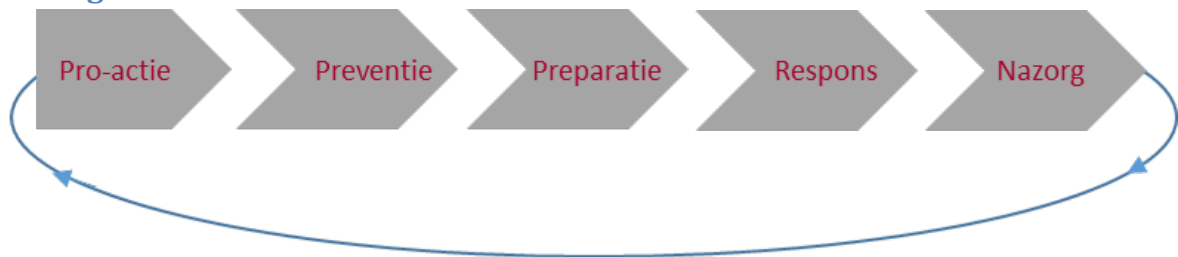


Figuur 1: Bow-tie model (adlig.nl, z.d.).

In dit onderzoek wordt er een soortgelijke risicoanalyse gemaakt als het bow-tie model. Het belangrijkste van deze methode in dit onderzoek is, dat er beheersmaatregelen -zowel preventief als beschermend- tussen de oorzaken en gebeurtenissen worden gelegd, én ook tussen de

gebeurtenissen en de gevolgen (Overheid Vlaanderen, z.d.). Er worden preventieve maatregelen aangebracht, zoals het wegnemen van de ontstekingsbronnen. Ook worden er andere preventieve maatregelen benoemd waarmee de kans op explosie wordt geminimaliseerd. Maar aan de andere kant van de bow-tie worden beheersmaatregelen aangebracht die ervoor zorgen dat een eventuele explosie geen of minimale schade kan aanrichten. Deze beheersmaatregelen worden behandeld in deelvraag 5.

2.2 Veiligheidsketen



Figuur 2: De veiligheidsketen (Trimension.nl, z.d.)

De veiligheidsketen is één van de meest belangrijke theorieën van de veiligheid. Hier worden in 5 schakels verschillende stappen besproken hoe er moet worden omgegaan in een gevaarlijke situatie.

De eerste schakel van de veiligheidsketen is proactie. Bij proactie wordt er gekeken naar het wegnemen van structurele oorzaken van onveiligheid. In de situatie van de mestgassen in de melkveestal wordt er gekeken naar maatregelen die helpen voorkomen dat een calamiteit in de vorm van een brand, explosie of gezondheidsincident zich voordoet.

De tweede schakel van de veiligheidsketen is preventie. Dit betekent het nemen van maatregelen om onveiligheid die zich kan voordoen vroegtijdig te stoppen, en daarmee de ongewenste effecten te beperken. In het geval van mestgassen wordt hier voornamelijk gekeken naar maatregelen die ervoor zorgen dat er geen ontsteking kan zijn waardoor de mestgassen kunnen branden of exploderen. Ook wordt er gekeken naar maatregelen die ervoor zorgen dat mens en dier niet in aanraking komen met een schadelijke concentratie mestgassen.

De derde schakel is preparatie. Hier bereid men zich voor om effectief op te treden in het geval van een calamiteit. Hier komen natuurlijk de voorbereidingen van de hulpdiensten te pas, maar ook de boeren kunnen in dit geval verschillende voorbereidende maatregelen treffen die ervoor zorgen dat tijdens een calamiteit adequaat gereageerd kan worden, en dat er bepaalde plannen zijn om goed te handelen in zo'n situatie.

De vierde schakel is de repressie. Hier wordt gekeken naar het adequaat optreden tijdens een onveilige situatie. Ook wordt er gekeken naar maatregelen die ervoor zorgen dat tijdens een onveilige situatie die situatie wordt beëindigd, en ervoor wordt gezorgd dat de schade beperkt blijft.

De vijfde schakel is de nazorg. Bij de nazorg gaat het om alle activiteiten die dienen om terug te keren naar de 'normale' situatie. Dit hoeft niet de oude situatie te zijn. Er wordt aandacht besteed aan het leed en schade wat is aangericht, er wordt geëvalueerd en er worden herstelmaatregelen genomen (Stol et al., 2016).

2.3 Wat is een explosie?

Ontstaan van een explosie

Er is sprake van explosiegevaar zodra een mengsel van een brandbare stof (dit kunnen gassen, dampen, nevels of stof zijn) en lucht onder atmosferische omstandigheden wordt ontstoken, en zich zal uitbreiden totdat alle brandbare stof verbrand is (Groot et al., 2009).

Gasexplosiegevaar

Op het moment dat brandbare gassen vrijkomen in de atmosfeer, worden ze direct vermengd met de lucht die ongeveer voor 21% uit zuurstof bestaat. Als de brandbare stof in het ontstane gasmengsel een concentratie heeft tussen de onderste en bovenste explosiegrens, kan het mengsel ontploffen indien er een ontstekingsbron is (Groot et al., 2009).

Branddriehoek

De branddriehoek is een model waarmee duidelijk wordt gemaakt wat er nodig is voor een brand of explosie. Het begrijpen van de branddriehoek helpt ook bij het begrijpen van de Lower Explosion Limit (LEL) en de Upper Explosion Limit (UEL). Dit zijn de volgende drie factoren:

- Zuurstof
- Brandstof
- Warmte/ontstekingstemperatuur

Te weinig brandstof of brandbaar gas zorgt ervoor dat er geen brand of explosie mogelijk is, of een zeer kleine. Te weinig zuurstof zorgt ervoor dat er geen brand of explosie kan plaatsvinden. Het ontbreken van een ontstekingsbron zorgt ervoor dat een luchtmengsel met een brandbaar gas niet tot brand of explosie kan leiden. Zonder één van deze drie factoren zal er dus geen brand of explosie plaatsvinden. Deze branddriehoek zorgt dus voor inzicht welke aspecten er kunnen worden aangepakt om een brand of explosie te voorkomen (Geertsma, 2017).



Figuur 3: Branddriehoek (brandweer.nl)

2.4 Explosieveiligheds wetgeving

In dit onderzoek gaat het over de veiligheid rondom risico's van explosies en hoe op een veilige manier gewerkt kan worden, en waar veiligheidsmaatregelen worden aangebracht om de risico's te minimaliseren. Hier komen Europese wettelijke richtlijnen op het gebied van explosie veiligheid te pas. Het is belangrijk voor het onderzoek en het schetsen van de situatie dat een goed beeld is wat eigenlijk de wettelijke richtlijnen zijn als het gaat om de explosie veiligheid. Daarom wordt een

overzicht gegeven van de ATEX richtlijnen en de Europese richtlijnen op gebied van explosieveiligheid.

Wettelijke verplichtingen

De werkgever is wettelijk verplicht zijn werknemers te beschermen tegen explosiegevaar, zoals vermeld in de Arbowet. In het Arbeidsomstandighedenbesluit, artikel 3.5 a-f staat de zogenaamde ATEX 153, dit zijn de Europese richtlijnen op gebied van explosiegevaar. De risico's van het explosiegevaar moeten volgens deze richtlijnen worden vastgelegd in een explosieveiligheidsdocument. Dat document bestaat uit de volgende punten:

- Een nadere risicoanalyse;
- Een gevarezone-indeling;
- Passende technische en organisatorische maatregelen;
- Voorlichting van de werknemers (Arbeidsomstandighedenbesluit, 1997).

Het voorkomen van explosiegevaar kan worden gerealiseerd in de volgende doelstellingen:

1. Preventief: zorg ervoor dat geen brandbaar stof/gas in de atmosfeer kan komen op plaatsen waar potentiële ontstekingsbronnen kunnen zijn (Hier kan worden gedacht aan 'schoonhuishouden' conform de definitie uit de IEC 61241 en/of NPR-7910-2, 2008).
2. Repressief: Indien preventie niet mogelijk is of niet effectief blijkt te zijn, moet er worden gezorgd dat een gaswolk niet kan worden ontstoken door gebruik te maken van explosieveilig materiaal.
3. Beheersing: Indien preventie en repressie niet mogelijk is of niet effectief blijkt te zijn, moet er worden gezorgd dat de schade die wordt veroorzaakt door een ontploffing geminimaliseerd wordt. Hier valt te denken aan een explosieluik. Ook moet ervoor worden gezorgd dat een eerste kleine explosie niet kan leiden tot een eventueel zwaardere secundaire explosie (Groot et al., 2009).

Deze informatie is nuttig en relevant voor het onderzoek omdat er informatie wordt gegeven over de Europese richtlijnen die in de Arbowet zijn opgenomen wat betreft de explosieveiligheid. Omdat methaanexplosies een redelijk nieuw fenomeen zijn, is er een goede kans dat deze richtlijnen nog niet worden nageleefd door de boeren.

Het meten van gasexplosiegevaar kan worden uitgevoerd middels een explosiemeter (LEL-meter). Op basis van deze meting kan direct worden vastgesteld of er sprake is van explosiegevaar. Als grens van mogelijke explosieve atmosfeer geldt de vuistregel in de Arbowetgeving 10% van de LEL-waarde (Groot et al., 2009).

2.5 Lower Explosion Limit (LEL)

De explosiegrenzen zijn de laagste en hoogste concentratie van een gas, die zijn uitgedrukt in een percentage van een luchtmengsel, waarbij het gas-luchtmengsel zou kunnen exploderen bij een ontsteking. Er moet sprake zijn van een bepaalde verzadiging in de lucht van een gas of een damp van een bepaalde stof om een explosie te kunnen veroorzaken. Een verzadiging die te laag is, zal niet tot een explosie leiden, en een verzadiging die te hoog is ook niet. Er is dus sprake van een ondergrens en bovengrens van de concentratie van het gas. Daarbinnen is een explosie wel mogelijk. Dit worden explosiegrenzen genoemd (Hall, 2018). Deze explosiegrenzen worden duidelijk gemaakt met de aanduiding LEL (Lower Explosion Limit) en UEL (Upper Explosion Limit).

Lower Explosion Limits of LEL-waarde

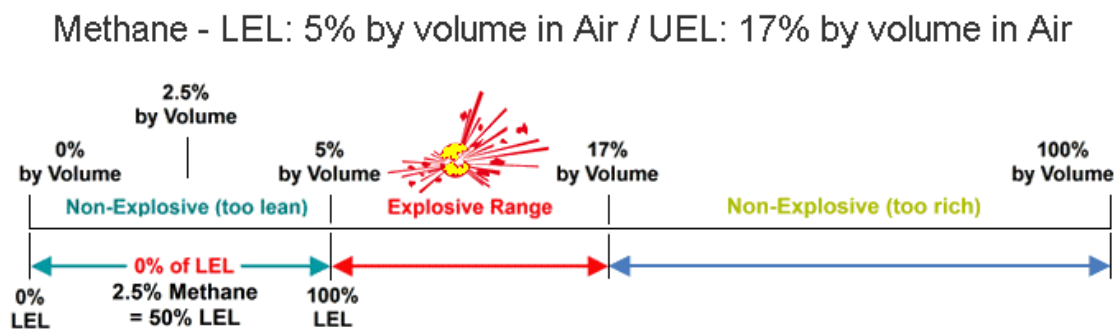
Als er een te lage concentratie is van een gas in het luchtmengsel, zal er geen gevaar zijn voor een explosie. Er is dan sprake van een te arm luchtmengsel. Het luchtmengsel kan alleen ontploffen als er voortdurend een bepaalde hoeveelheid warmte wordt toegevoegd van buitenaf, of als de concentratie van het gas in het luchtmengsel wordt verhoogd. Onder de LEL-waarde van een stof is geen explosie mogelijk (Geertsma, 2017).

Het is dus nuttig te weten hoe dicht men tegen de LEL-waarde zit betreffende de concentratie van het gas. Concentratie daarboven meten heeft geen zin, want dan heeft men reeds een potentieel gevaarlijke concentratie (Vandepottesafety, z.d.).

Upper Explosion Limits of UEL-waarde

Als er een te hoge concentratie is van een gas in het luchtmengsel, zal er eveneens geen gevaar zijn voor een explosie. Boven de UEL-waarde is er te weinig zuurstof in het luchtmengsel aanwezig. De concentratie van de stof of gas is hier zo hoog dat er te weinig zuurstof in het mengsel zit waardoor er geen explosie kan optreden. Er is dan sprake van een te rijk mengsel, omdat er teveel van een bepaalde stof in het luchtmengsel aanwezig is (Geerstma, 2017).

Zoals in onderstaande illustratie te zien is, is de LEL van methaan (CH_4) 5% volume (egasdepot, 2018). De LEL-waarde van Ammoniak (NH_3) is 15% volume (indsci.com). De LEL-waarde van waterstofsulfide is 4,3% volume (safetydetection.be). Naast de brandbaarheid van dit gas is het ook nog erg toxisch en zeer schadelijk voor de gezondheid (WUR, 2016).



Figuur 4: Illustratie van het LEL van Methaan (egasdepot,2018)

2.6 Mestopslag

Gewassen hebben mest nodig om te groeien. Daarom gebruiken de boeren hun mest en rijden dat over het land uit om op die manier voeding te geven aan de gewassen. Maar dit mag maar beperkt, omdat er anders te veel stikstof en fosfaat in de grond komt, wat slecht is voor de natuur, bodem en de kwaliteit van het grondwater en oppervlaktewater (RvO, 2020). Daarom mag er maar een gedeelte van het jaar mest worden uitgereden. In de meeste gevallen is dit tussen 16 februari en 31 augustus (RvO, 2021).

Dit zorgt ervoor dat de boeren op tijden dat ze niet de mest mogen uitrijden, de mest opslaan. Zo is er altijd voldoende mest om te gebruiken wanneer dat weer toegestaan is, en hebben ze ook opslag nodig om überhaupt de mest kwijt te kunnen uit de stallen.

Als de mest langdurig in de mestkelder ligt, kan er ontmenging ontstaan. Bij de mest van de koeien ontstaat er dan een drijvende korstvormige laag. Doordat er in de mestkelders weinig zuurstof is, ontstaat er korstvorming (Bioaktiv, 2021). Dit is een probleem voor de boeren, omdat het erg lastig is om de niet-homogene mest uit de mestkelder te pompen. Vanwege deze niet-homogene verdeling van de mest verschilt het verloop van de stikstof- en fosfaatgehalten erg tijdens het opzuigen van de mest uit de mestkelder. Dit zorgt weer voor problemen bij het bemesten van het land, omdat de nutriëntensamenstelling van de mest verschilt per vracht, waardoor er groeiverschillen komen op het land. Ook kunnen deze korsten ervoor zorgen dat de mestleidingen verstopt raken (Dekeyser, 2016).

Vanwege deze redenen mengen de boeren dus de mest regelmatig. Hierbij is mechanisch mengen de meest gebruikte methode. Hierbij wordt de mest door een roterende beweging van een mixer op gang gebracht en met elkaar vermengd. Dit wordt ook wel horizontaal mixen genoemd. Alternatieve methoden zijn rondpompen en mengen met lucht. Bij rondpompen zuigt een pomp de drijfmest op en spuit die via één of meerdere spuitkoppen terug in de mestkelder. De methode mengen met lucht is het homogeniseren van de mest door luchtbelletjes. Door middel van een compressor wordt er perslucht door slangen geperst. Deze slangen hebben kleine uitlatopeningen waardoor er overal in de mest verschillende luchtbelletjes geperst worden. Doordat de lucht weer opstijgt, wordt er gezorgd dat de mest verticaal gemixt wordt (Dekeyser, 2016).

Maar hier zijn ook extra risico's aan verbonden. Door een drijfslag in de mest worden de gassen grotendeels opgehoopt in de mest en die komen pas vrij als de mest in beweging wordt gebracht, tijdens het mixen. Die mestgassen kunnen zich dan verspreiden. Dit zorgt ervoor dat er op één moment massaal mestgassen tegelijkertijd in het luchtmengsel terecht komen (Dekeyser, 2016). Dit zorgt ervoor dat de concentratie van de mestgassen dus aanzienlijk stijgt in korte tijd. Als men het hele jaar door een gemiddelde concentratie meet die ver onder het LEL-waarde ligt, zal er op die momenten geen kans op explosie zijn. Maar tijdens het mixen komt er zoveel mestgas vrij in het luchtmengsel, wat ervoor kan zorgen dat het LEL wel bereikt kan worden. Op deze momenten is er dus sprake van een grotere kans op explosie, terwijl de boer erboven staat te mixen.

2.7 Milieurisico's

Het doel van dit onderzoek is het minimaliseren van de kans op een explosie van mestgassen. Hiervoor zijn oplossingen en maatregelen nodig om dat risico te minimaliseren. Maar er moet wel rekening gehouden worden dat deze maatregelen en oplossingen niet de milieurisico's verhogen. Als er door een bepaalde oplossing het risico op explosie wordt weggehaald, maar daardoor wordt er wel meer emissie uitgestoten, zal die oplossing niet worden doorgevoerd. De boeren moeten juist hun emissies verminderen, daarom zijn ze ook bezig met het gebruiken van emissiearme vloeren. Als veiligheidsoplossingen ervoor zorgen dat er alsnog veel schadelijke gassen in de atmosfeer komen, wordt het nut van een emissiearme vloer en andere emissie-verminderende maatregelen tenietgedaan. Er is bewust gekozen om dit niet in de deelvragen te behandelen, omdat dit geen antwoord geeft op de hoofdvraag. Het is echter wel een onderdeel om rekening mee te houden als er gekeken wordt naar de oplossingen en antwoorden op de hoofdvraag.

De meest voorkomende stoffen die in de mest zitten zijn vaak schadelijk voor het milieu en dragen bij aan de opwarming van de aarde. De bekendste hier is methaan, maar ook ammoniak en waterstofsulfide spelen hier een grote rol.

Methaan: Methaan is een broeikasgas wat bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Methaan blijft relatief kort in de atmosfeer, ongeveer 10 jaar. Dit terwijl koolstofdioxide (CO₂) maar liefst 100 jaar in de atmosfeer blijft. De reden dat methaan een serieuze broeikasgas is, komt omdat methaan maar liefst 25 keer sterker is dan koolstofdioxide. Voor dezelfde m³ methaan wordt dus 25 keer meer warmte vastgehouden in de atmosfeer (Bauer, 2013).

Ammoniak: Ammoniak ontstaat vanuit de mest en urine van het vee. Zodra dit neerslaat op de grond, ondervinden de planten die niet zoveel stikstof kunnen verwerken daar nadeel van. Planten die juist wel goed stikstof kunnen verwerken krijgen dan de overhand, waardoor de stikstofarme planten worden verdrongen en niet meer kunnen leven. Dit zorgt voor een verlies aan biodiversiteit (wur, 2015).

Waterstofsulfide: Waterstofsulfide is een dodelijk gas dat ontstaat bij de omzetting van organisch materiaal in een zuurstofarme omgeving (BeSWIC, 2012). Een mesthoop is hier een goed voorbeeld van. Waterstofsulfide heeft geen broeikas effect, maar is wel heel giftig. Als dit in de bodem of het water terecht komt, is er een kans dat de dieren die hiervan eten of drinken vergiftigd worden.

2.8 Begrippenlijst

PPM: Parts per million. Met ppm wordt bedoeld hoeveel parts van een bepaald gas per miljoen parts in het luchtmengsel bevindt. Als bij methaan de LEL-grens op 4,4% ligt, betekent dit dat er 44.000 parts per million in het luchtmengsel methaan zijn.

Emissies: De uitstoot van gassen die in de lucht komen.

Mixput: Put vaak achter de melkveestal waar de mixer kan worden aangesloten om de mest te mixen.

Slijpen: Het slijpen van de koeienhoeven. Dit moet om de zoveel tijd gebeuren zodat de koeien makkelijker kunnen lopen.

3. Methoden en technieken

3.1 Mixed Method research

In dit onderzoek is er een kwalitatief, kwantitatief en literatuuronderzoek uitgevoerd om een compleet antwoord te geven op de hoofdvraag. In dit onderzoek is er een methodische triangulatie toegepast, een combinatie van observaties (een kwantitatief onderzoek) en interviews (een kwalitatief onderzoek). Ook wordt er informatie gezocht aan de hand van een literatuurstudie. Door het combineren van deze verschillende methodieken is de betrouwbaarheid en interne validiteit van het onderzoek vergroot (Benders, 2020).

Een kwalitatief onderzoek is beschrijvend en verhalend van aard, en is gericht op interpretaties, ervaringen en betekenis. Resultaten van een kwalitatief onderzoek worden meestal weergegeven in woorden (Swaen, 2013).

In een kwantitatief onderzoek is er data verzameld die kunnen worden gecategoriseerd of gerangschikt. Deze data worden verzameld door middel van gestandaardiseerde technieken, zoals een schouw. De realiteit is objectief en onveranderlijk. Hier is gezocht naar correlaties en causale relaties tussen de variabelen (Swaen, 2013).

Mixed Method research per deelvraag

Deelvraag	Methode per deelvraag
Deelvraag 1: Risicoanalyse mestgassen	Interviews en literatuurstudie (kwalitatief)
Deelvraag 2: Het schouwen van ontstekingsbronnen	Schouwen (kwantitatief) en interviews (kwalitatief)
Deelvraag 3: Proactieve maatregelen	Interviews en literatuurstudie (kwalitatief)
Deelvraag 4: Preventieve maatregelen	Interviews en literatuurstudie (kwalitatief)
Deelvraag 5: Preparatieve/repressieve maatregelen	Interviews en literatuurstudie (kwalitatief)

De voordelen van de kwalitatieve methodiek zijn voornamelijk de flexibiliteit in het uitvoeren van het onderzoek en de praktische uitleg die wordt gegeven bij de interviews. Als eerste is het erg fijn om het interviewschema te kunnen bijstellen, ook al is het onderzoek al bezig. Tijdens het onderzoek is er informatie gevonden wat eerst nog niet bekend was, en dit heeft de interviews positief beïnvloed. Het is prettig om hierin te kunnen ontwikkelen. Ten tweede is er een praktisch beeld gecreëerd van de informatie verkregen in de interviews. Doordat een expert verteld over de verschillende topics, is er ook meteen een compleet beeld gegeven van hoe het in de praktijk zit. In de literatuur kan een hoop informatie worden gevonden over een bepaald onderwerp, maar door met een expert persoonlijk daarover te praten, is er een praktischer beeld gegeven.

Het nadeel van deze kwalitatieve methodiek is dat de informatie die wordt verkregen d.m.v. de interviews minder generaliseerbaar is. Er zit wellicht een bias bij de geïnterviewde(n). Dit kwam soms ook terug in het interview met Gerrit Stobbelaar. Daarom wordt de informatie van deze interviews nog herzien door een onderzoeker van het CLM. De reden dat er gekozen wordt voor een onderzoeker van het CLM is omdat zowel de onderzoeker zelf als CLM als organisatie een onafhankelijke partij is op dit gebied.

Het kwantitatieve deel van dit onderzoek is gericht op het beantwoorden van deelvraag 2. Door middel van een schouw is er op 10 verschillende boerderijen volgens een gestratificeerde steekproef de verschillende ontstekingsbronnen gemeten in de melkveestallen. Met behulp van de deductieve methode is het onderzoek en de hypotheses van de heer Stobbelaar en de kennis van Jetty Middelkoop getest (Benders, 2020). Deze zijn allebei geïnterviewd.

Het voordeel van deze kwantitatieve methodiek is dat de data generaliseerbaar is. In het geval van 10 boerderijen die worden geschouwd is dat beperkter, maar geeft het alsnog wel een duidelijk beeld van de situatie. Er is een bestaand onderzoek getest en betrouwbaar gemaakt. De data die uit deze kwantitatieve methodiek is gekomen heeft geen persoonlijke invloed gehad. Er is zwart op wit een empirisch onderzoek uitgewerkt.

3.2 Dataverzameling en operationalisatie

3.2.1 Literatuurstudie

De literatuurstudie is voor bijna alle deelvragen wel gebruikt. In deelvraag 1 is er gezocht naar de wetenschappelijke literatuur over de veiligheidsrisico's van de mestgassen. Dit zijn de explosierisico's en de brandrisico's, en ook gezondheidsrisico's. In het theoretisch kader zijn ook nog de milieurisico's uitgewerkt. Dit is gezocht via verschillende search-engines, zoals Google Scholar, Brave Browser etc. Zie bijlage voor de zoekstrategie voor deelvraag 1. Via deze engines is gezocht naar wetenschappelijke artikelen over de verschillende soorten mestgas, en is gekeken wat voor risico's die met zich meebrengen. Ook is aan de hand van interviews literatuur gebruikt. In de interviews is soms verwezen naar literatuur die bepaalde informatie uit het gesprek verder toelicht of bevestigt. Deze literatuur is na de interviews opgezocht. In deelvraag 3 en 5 is ook veel gebruik gemaakt van een literatuurstudie. Dit zijn voornamelijk verschillende oplossingen op zowel proactief niveau als op preparatief en repressief niveau. Deze literatuur is niet-systematisch opgezocht. Er is gezocht naar oplossingen die gericht zijn om de emissies uit de mest te reduceren en op die manier de risico's op een brand of explosie te verminderen (bij deelvraag 3). In veel geraadpleegde rapporten is gekeken naar verschillende oplossingen. Als een boeiende oplossing werd gevonden is vervolgens gericht op de desbetreffende oplossing gezocht voor bevestigende onderzoeken of juist voor tegensprekende onderzoeken. Bij deelvraag 5 is er meer specifiek gezocht op preparatieve en repressieve maatregelen bij branden en explosies, en daartussen is gezocht naar maatregelen op zowel preparatief en repressief niveau die ook van toepassing zijn bij melkveestallen.

3.2.2 Interviews

De interviews zijn gehouden met 3 verschillende personen met verschillende achtergronden op voorspraak van Erik van Well, onderzoeker van de keldermetingen bij CLM. Er is gevraagd naar personen met veel kennis van de risico's van mestgassen. Jetty Middelkoop werd genoemd. Zij is werkzaam bij de brandweer en heeft zich verdiept in de mestgassen. Deze contactpersoon weet veel van de mestgassen en de risico's die de gassen met zich meebrengen. Dit interview was een semigestructureerd interview. Er is aan de hand van een topiclijst met onderwerpen vragen gesteld waarover de geïnterviewde verteld heeft. De onderwerpen op de topiclijst werden hoe dan ook besproken, maar er was wel ruimte voor doorvragen (Dingemanse, 2015). In de bijlage 1 staat een topiclijst van dit interview. Ook kwam de naam Gerrit Stobbelaar naar voren. Hij doet veel onderzoek naar mestgassen en de melkveestallen. Daar had hij ook voor de Omgevingsdienst van Twente een grondige analyse gedaan wat voor factoren ervoor kunnen zorgen dat deze mestgassen kunnen exploderen of branden. Deze persoon is juist daarom benaderd, om met die informatie een goede schouw te maken voor deelvraag 2. Ook dit interview was een semigestructureerd interview met een topiclijst met onderwerpen die hoe dan ook werden besproken, maar waar er wel ruimte was voor doorvragen. In bijlage 2 staat een topiclijst van dit interview. Een ander interview werd gehouden met Gert-Jan Monteny. Hij is een onafhankelijke onderzoeker en adviseur, die o.a. advies geeft aan producenten van emissiearme vloeren. Om de interne validiteit te waarborgen was het belangrijk het verhaal van alle kanten te bekijken. Omdat er via Erik van Well werd aangegeven dat Gert-Jan Monteny ook advies gaf aan de producenten van de emissiearme

vloeren is deze ook gevraagd voor een interview. Ook dit interview was een semigestructureerd interview. In bijlage 3 staat een topiclijst van dit interview.

3.2.3 Schouws

Voor het beantwoorden van deelvraag 2 is er aan de hand van een interview met Gerrit Stobbelaar gekeken naar de verschillende ontstekingsbronnen in de melkveestallen. Om dit onderzoek betrouwbaar te maken is er aan de hand van het desbetreffende interview een schouwlijst gemaakt, waarna er aan de hand van de schouwlijst meerdere schouws is uitgevoerd op verschillende melkveebedrijven. De schouwlijst is te vinden in hoofdstuk 5.

Bij het uitvoeren van de schouw zijn er verschillende boerderijen gekozen die al meedoen aan het Kelderonderzoek van CLM en de WUR en gemotiveerd zijn om een bijdrage te leveren aan het onderzoek om de veeteelt duurzamer te maken. Ook is er via eigen netwerk gekeken naar geschikte boerderijen die in het gewenste profiel pasten en ook die zijn bezocht. Er zijn 10 verschillende boerderijen bezocht voor deze schouw om een compleet beeld te krijgen van de verschillende ontstekingsbronnen. Per melkveestal kunnen andere ontstekingsbronnen aanwezig zijn. Hier zijn zowel kleinere als grotere melkveestallen gebruikt voor de schouw om de validiteit te waarborgen.

Voor deze schouw is gebruik gemaakt van een selecte gestratificeerde steekproef. Aangezien er verschillende soorten melkveeboerderijen zijn, is het belangrijk dat de resultaten uit de schouw representatief zijn voor alle melkveeboerderijen en ook te generaliseren zijn. Er is gekeken in de selectie naar de grootte van de melkveeboerderijen voor wat betreft het melkveeaantal. Gemiddeld genomen zijn er volgens het CBS in 2020 per bedrijf 105 melkkoeien aanwezig (WUR, 2020). In de gestratificeerde steekproef is ervoor gezorgd dat er zowel kleine melkveeboerderijen (koeienaantal onder de 100) als grote melkveeboerderijen (koeienaantal rond de 200-250) zijn gebruikt om de schouw uit te voeren. Ook is er op melkveeboerderijen geschouwd waar het koeienaantal rond het gemiddelde ligt (tussen de 100 en 170). Er is dus een selectie gemaakt van 1 kleine melkveeboerderij, 6 middelgrote melkveeboerderijen en 3 grote melkveeboerderijen. Op deze boerderijen is er geschouwd.

Bij elke boerderij is de schouwlijst compleet ingevuld. De schouw kan op 4 mogelijke manieren worden beantwoord: 'Nee', 'Ja, maar niet tijdens mixen', 'Ja, ook tijdens mixen' en 'Niet van toepassing'. Er is sprake van 'Niet van toepassing' bij de volgende gevallen:

- Als de mestrobot op een veilige plek staat, maar wel aan staat, moet bij het tweede punt van de schouwlijst 'N.v.t.' worden ingevuld. De mestrobot staat wel aan, maar kan niet voor een ontsteking zorgen omdat het laadstation op een veilige plek staat.
- Als er geen sprake is van een mestrobot, maar een mestschuif.
- Als er bij het slijpen van de koeienhoeven geen slijpparaat wordt gebruikt waar vonken bij vrijkomen, maar als het met de hand met een mesje wordt gedaan. Daarbij komen geen vonken vrij, en is er dus geen sprake van kans op ontsteking.
- Als er een automatische mixinstallatie op de mixput staat, en er dus geen sprake is van het gebruik van een trekker die warme roetdeeltjes kan veroorzaken.

3.3 Data-analyse

3.3.1 Literatuurstudie

De analyse van de literatuur is in bepaalde gevallen zeer grondig. Sommige rapporten zijn diep geanalyseerd om bepaalde informatie te krijgen. Daaropvolgend is ook weer apart informatie gezocht op dat specifieke onderwerp. Vaak werd in de verschillende rapporten op specifieke kernwoorden gezocht om te kijken wat erover die kernwoorden werd uitgelegd. Als er dan een

onderwerp met een kernwoord bruikbaar was voor het onderzoek, werd dat kernwoord in andere rapporten ook altijd opgezocht. Ook in literatuur die eigenlijk over een ander onderwerp ging werden deze kernwoorden ook nog opgezocht om te kijken of die bepaalde literatuur aanvullende, bevestigende of juist tegensprekende informatie bevatte. In de meeste gevallen werd er gezocht naar een kern en was er al een idee naar wat voor informatie er gezocht werd. Maar in andere gevallen was er sprake van zoeken naar relevante informatie, waar daarna dieper op gezocht werd.

3.3.2 Interviews

De interviews werden vrij snel na het houden van het interview getranscribeerd. De interviews zijn allemaal letterlijk getranscribeerd, om de toon van het interview ook duidelijk te maken. De informatie afkomstig uit het interview met Gerrit Stobbelaar is voornamelijk gebruikt voor het maken van de schouwlijst. Veel informatie uit dit interview is opgenomen in deelvraag 1, voornamelijk over het verschil van de verschillende vloeren en de verschillende effecten bij een ontsteking van hoge concentratie mestgassen. Daarnaast had hij verschillende interessante oplossingen op proactief en repressief niveau. Die informatie is ook opgenomen in de deelvragen 3 en 5. De informatie uit het interview met Jetty Middelkoop is mede gebruikt als een bevestiging en aanvulling van de schouwlijst. Daarnaast is dit interview erg bruikbaar geweest voor aanvullen van informatie over de mestgassen in deelvraag 1. Ook gaf Middelkoop verschillende interessante preventieve oplossingen die in deelvraag 4 zijn opgenomen. Het interview met Gert-Jan Monteny liet vooral de andere kant van het verhaal zien, en gaf een beeld hoe de fabrikanten van de emissiearme vloeren tegen de problematiek aankijken. Ook werd informatie uit dit interview gebruikt om andere bevindingen te bevestigen en bepaalde informatie over additieven aan de mest aan te vullen.

3.3.3 Schouw

Na het uitvoeren van de schouw is er per bedrijf een korte terugblik gemaakt met bevindingen die zijn waargenomen op het bedrijf. De ingevulde schouws zijn op een rij gezet en is er gekeken naar overeenkomsten in de verschillende schouws. Daarna zijn de 10 verschillende schouws samengevoegd in 1 resultatenoverzicht van de schouw. Er is met kleuren en cijfers aangegeven hoe vaak een bepaald antwoord op een vraag uit de schouw voorkwam. Op die manier is er een kort en duidelijk overzicht van de verschillende ontstekingsbronnen in de melkveestallen en is er een kort overzicht van de bevindingen van de schouw. Daarna zijn de terugkomende resultaten uit de schouw uiteengezet en beschreven. Ook is er uitgelegd wat bepaalde bevindingen voor risico's met zich meebrengen.

3.4 Betrouwbaarheid

Bij de betrouwbaarheid gaat het om hoe consistent een bepaalde methode iets meet. Het is belangrijk dat het hele onderzoek dezelfde resultaten weergeven als het onderzoek met dezelfde methoden op exact dezelfde wijze nog een keer wordt uitgevoerd (Benders, 2016).

De betrouwbaarheid van dit onderzoek is gewaarborgd door tussentijdse besprekingen met een onderzoeker van het CLM die deelnam aan het onderzoeken van de keldermetingen. Hierdoor is er door een andere onderzoeker gekeken of deze methoden nauwkeurig zijn en of ze hetzelfde zouden meten als het onderzoek op dezelfde wijze nog een keer wordt uitgevoerd. Dit heeft de betrouwbaarheid vergroot, maar heeft niet volledig de betrouwbaarheid gegarandeerd omdat dit een onderzoeker is die onderzoek doet op gebied van milieurisico's in de veehouderij, en niet volledig bekend is met de veiligheidsaspecten.

Ook zijn de verschillende schouwen op een consistente wijze uitgevoerd, strak volgens het schouwplan. Bij elke schouw is op exact dezelfde wijze geschouwd, aan de hand van de schouwlijst. Hiervan is niet afgeweken.

3.5 Validiteit

Om de validiteit te bepalen van het onderzoek, moet er worden nagegaan of er met deze methoden daadwerkelijk gemeten wordt wat er gemeten moet worden (Benders, 2016).

Om de validiteit van dit onderzoek te waarborgen zijn de bevindingen elke keer onderbouwd. Het onderzoek is voldoende afgebakend en er is gezorgd dat de onderzoeksmethoden de daadwerkelijke problemen meten. Dit is gewaarborgd door de experts in de interviews een terugkoppeling te geven op de conclusies die worden getrokken in het onderzoek. Ook is een onderzoeker van het CLM gevraagd om de conclusies te herzien om te kijken of de juiste conclusies worden getrokken. Deze onderzoeker is onderdeel van het eerdergenoemde Keldermetingenonderzoek van het CLM. Om de interne validiteit te waarborgen is een kort gesprek gehouden met een adviseur van de producenten van de emissiearme vloeren. Op deze manier is de thematiek van verschillende kanten belicht en is er aangetoond dat dit onderzoek in een 'echte wereld' nut heeft, en niet slechts een papieren onderzoek. De producent van de emissiearme vloeren is niet gediend van de voorzichtige conclusie dat er wellicht een link is tussen een mestgasexplosie en de emissiearme vloer. Om dit punt vanuit een ander oogpunt te benaderen, is er een completer beeld gegeven aan dit onderzoek, waardoor de interne validiteit wordt gewaarborgd.

Bij de externe validiteit wordt er gekeken of de conclusies te generaliseren zijn naar de complete situatie (Swaen, 2014).

Om de externe validiteit te waarborgen zijn de schouws op meerdere locaties genomen. De schouws zijn genomen op 10 verschillende boerderijen van ook verschillende kalibers. Hierdoor is ervoor gezorgd dat er een valide beeld wordt gecreëerd van de verschillende boerderijen en de ontstekingsbronnen in de melkveestallen.


Deze 10 locaties geven een redelijk generaliseerbaar beeld van de werkelijke situatie op deze boerderijen, maar omdat slechts 10 boerderijen zijn geschouwd -terwijl er in 2020 14537 melkveebedrijven waren (wur, 2020)- is dit beeld niet volledig generaliseerbaar. Er is een aardige schets gegeven van de situatie in de melkveestallen, maar dit geeft niet het volledige beeld weer. Dit is echter wel voldoende om informatie te geven en om bruikbare oplossingen te bedenken voor het minimaliseren van de mestgasexplosies.

4. Deelvraag 1: Risicoanalyse van de verschillende mestgassen

In deze deelvraag worden de belangrijkste mestgassen besproken die aanwezig zijn in de melkveestallen. Dit zijn methaan, ammoniak en waterstofsulfide. Alle drie hebben ze hun eigen eigenschappen en overeenkomsten. In deze deelvraag is er een analyse gemaakt van de risico's en gevolgen van deze mestgassen. Hier wordt onderscheid gemaakt in de brand- en explosierisico's en de gezondheidsrisico's. In het eerste stuk wordt de mestgas methaan behandeld. Hier is een overzicht te zien van de verschillende eigenschappen van methaan, en wordt gekeken hoeveel methaanconcentraties nodig zijn om een explosie te veroorzaken. Dit is ook terug te zien in een matrix. In het tweede onderdeel van de deelvraag wordt de mestgas ammoniak behandeld. Ook hier is een overzicht te zien van de eigenschappen en effecten van de mestgas. Ditzelfde geldt voor waterstofsulfide in het derde onderdeel. Als vierde onderdeel wordt er een beeld gegeven van de daadwerkelijke incidenten die de mestgassen in het verleden al veroorzaakt hebben.

4.1 Methaan

Methaan is een van de belangrijkste mestgassen.

Fysische en chemische eigenschappen van methaan	
Kleur:	Kleurloos
Geur:	Geurloos
Vlampunt:	-188 °C
Zelfontbrandingstemperatuur:	595 °C
Brandbaarheidsgebied (tussen LEL en UEL):	4.4% volume (44.000 ppm) tot 15% volume (150.000 ppm).
Gevarenpictogrammen: H220: Zeer licht ontvlambaar H280: Gas onder druk	
Overige eigenschappen:	Asphyxiant, ofwel zuurstofverdringer
Bron:	(Westfalen, 2010)

Methaan ontstaat in de mestopslag door omzetting van organisch stof onder zuurstofloze omstandigheden. Ook koolstofdioxide komt hierbij vrij. De hoeveelheid methaan die vrijkomt is afhankelijk van de temperatuur, het type opslag, het voer en hoe oud de mest is. Mest kan onder zuurstofarme omstandigheden door zuurstofarme micro-organismen in o.a. methaan, ammoniak, waterstofsulfide worden omgezet (Šebek & Schils, 2006).

Een eigenschap van methaan is dat het een zuurstofverdringer is, ook wel een asphyxiant genoemd. Maar volgens mestgasdeskundige Jetty Middelkoop is elke gas dat geen zuurstof bevat een zuurstofverdringer. De grootste wat dat betreft aanwezig is in de mestgassen, is de koolstofdioxide, CO₂. Deze stof is ook aanwezig in de mestgassen, en kan ook voor gezondheidsrisico's zorgen bij mens en dier, omdat het een heel verstikkend effect heeft. CO₂ is een bijzonder verstikkende stof.

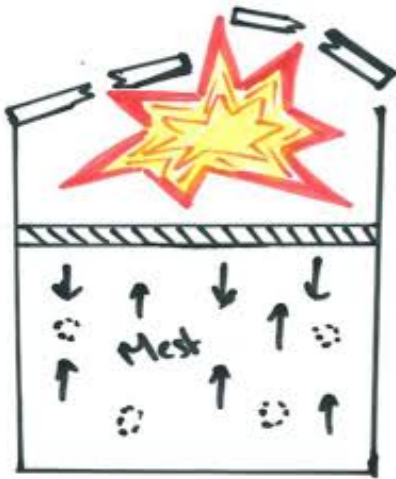
Gezondheidsrisico's

Bij het inademen van methaan kan de mens in ademnood komen. Dit komt omdat methaan de zuurstof in het luchtmengsel verdringt. Ook kunnen er hoofdpijn, sufheid en in het ergste geval bewusteloosheid optreden. Dit is enkel in gevallen met een erg hoge methaanconcentratie (Van der Woude, 2013).

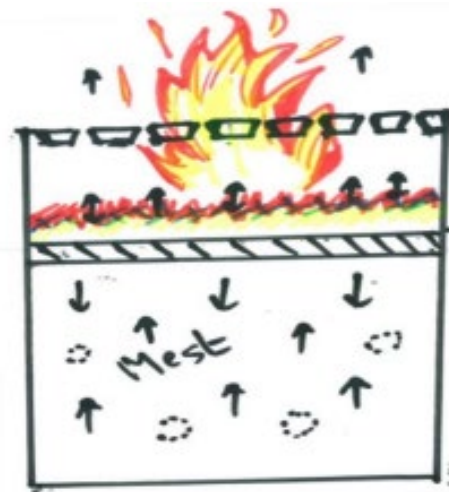
Verschil methaanbrand en -explosie

Er bestaan zowel methaanbranden als methaanexplosies. In het interview met Gerrit Stobbelaar werd het grote verschil goed verklaard.

In het geval van een roostervloer (met veel kieren en spleten) kan bij een ontsteking van de mestgassen, bij het bereiken van het LEL-waarde, een grote steekvlam ontstaan. Omdat de brandbare mestgassen meteen overal een uitweg vinden door de spleten van de roostervloer, ontstaat alleen een steekvlam, en blijft het bij een methaanbrand. Als sprake is van een emissiearme vloer, die vrijwel geheel uit beton bestaat en weinig spleten en openingen heeft, kan bij een ontsteking van de mestgassen, het ontstoken gas nergens heen. Het zit als het ware opgehoopt onder de dikke vloer. Dit resulteert in een explosie, die onder de emissiearme vloer kan blijven. Echter, de kracht van de explosie kan ook de vloer open doen knallen (OD Twente, 2019). In onderstaande afbeeldingen wordt het verschil gevisualiseerd.



Figuur 1: Explosie bij een dichte (emissiearme) vloer



Figuur 2: Brand bij een roostervloer

Explosiegevaar

De LEL-waarde van methaan is 4,4% ofwel 44.000 ppm. Dit betekent dat 4,4% van het luchtmengsel moet bestaan uit methaan om tot een explosie te komen. Deze grens is relatief laag. Op een normale dag in de melkveestal met een emissiearme vloer is de concentratie van methaan erg laag, gemiddeld rond de 1.600 ppm (CLM, 2020). De concentratie bij een melkveestal met een roostervloer ligt nog lager, rond de 40 ppm. Deze concentraties komen niet in de buurt van de LEL-

waarde en kunnen dus nooit voor een explosie zorgen. In het kelderonderzoek werd echter wel duidelijk dat, ondanks een lage gemiddelde concentratie, de pieken wel degelijk in de buurt komen van het LEL. In de melkveestallen met een emissiearme vloer was de hoogst gemeten concentratie 24209 ppm. Dit is nog steeds niet hoog genoeg om een explosie te veroorzaken, maar hogere pieken zijn niet uitgesloten en zijn zeker mogelijk. De hoogst gemeten concentratie bij de roostervloer was 14700 ppm (CLM, 2020).

Deze pieken werden gemeten tijdens het mixen van de mest. Tijdens het mixen of rondpompen van de mest komt er in één keer een grote hoeveelheid methaan vrij, omdat het methaan zich heeft opgehoopt in de mest (of mestkolom). Als de mest wordt gemixt komen deze gassen vrij in het luchtmengsel. Hierdoor zijn de methaanconcentraties tijdens het mixen extra hoog.

Een andere oorzaak voor de hoge pieken in de methaanconcentratie is de schuimvorming. Boven op de mest vormt zich schuim. Het is bekend dat deze schuimbellen ongeveer 60-80% methaan bevatten (Starmans et al, 2009). Tijdens het mixen gaan deze bellen kapot en komt er in één keer veel methaan in het luchtmengsel. Ook kunnen deze schuimbellen barsten op andere momenten. Er is een mogelijk verband met temperatuur en luchtdruk en het barsten van deze schuimbellen. Er zijn verschillende theorieën over het ontstaan van dit schuim, maar dat is nog niet wetenschappelijk onderbouwd. Het is voorlopig niet zeker hoe het precies ontstaat. Ook in het interview met Gert-Jan Monteny kwam naar voren dat vele jaren onderzoek eigenlijk nog niets heeft opgeleverd, en dat men het simpelweg nog niet weet.

In onderstaande matrix wordt de kans aangegeven waar de methaanconcentraties de LEL-waarde bereiken.

Matrix LEL-waarde methaan





Kans bereiken LEL-waarde methaanconcentraties	Nihil	Kleine kans	Mogelijk	Hoog risico
Normale dag, geen mixen. Geen schuimvorming.				
Normale dag, geen mixen. Wel schuimvorming.				
De mest wordt gemixt. Er is geen sprake van schuimvorming.				
De mest wordt gemixt. Er is sprake van schuimvorming.				

Waar hier wel rekening mee gehouden moet worden, is dat op een normale dag, waar niet gemixt wordt maar wel sprake is van schuimvorming, er een kleine kans is dat de methaanconcentraties de LEL-waarde bereiken. Het luchtmengsel zal dus waarschijnlijk niet hoog genoeg zijn voor een explosie. Maar er wordt echter wel gedacht dat zodra er een vonk in een laag schuim terecht komt, dit wel voor een explosie of brand zal zorgen. Deze vonk zal bij de meeste ontstekingsbronnen niet in de schuimlaag terecht komen, maar met lassen, slijpen of uiers branden is dit echter wel mogelijk. Begin 2020 is er in Enter een stalexplosie geweest wat ontstaan door schuimvorming, terwijl er niet

werd gemixt. Naar aanleiding daarvan heeft de Omgevingsdienst Twente nog gewaarschuwd voor de schuimvorming (OD Twente, 2020).

4.2 Ammoniak

Ammoniak is een kleurloos gas met een sterke geur. Het is een verbinding van stikstof (N₂) en waterstof (H₂). Ammoniak ontstaat in de mest als het dier eiwitten eet. In hoge concentraties is ammoniak giftig voor zowel mensen, dieren en planten. Ongeveer 90% van de totale ammoniakemissie in Nederland komt uit de landbouwsector (IenW, z.d.).

Fysische en chemische eigenschappen van ammoniak	
Kleur:	Kleurloos
Geur:	Ammoniakachtig
Vlampunt:	132 °C
Zelfontbrandingstemperatuur:	630 °C
Brandbaarheidsgebied (tussen LEL en UEL):	15.4% volume (154.000 ppm) tot 30% volume (300.000 ppm).
Gevarenpictogrammen:	
H220: Zeer licht ontvlambaar	
H280: Gas onder druk	
H331: Giftig bij inademing	
H400: Zeer giftig voor in het water levende organismen	
Overige eigenschappen:	Kan explosief mengsel

	vormen met lucht.
Bron:	(IGS, 2011).

Gezondheidsrisico's

Uit een Veehouderij en Gezondheid Omwonenden (VGO) onderzoek van het RIVM bleek dat mensen in een VGO-gebied een verminderde longfunctie hebben als de ammoniakconcentratie, afkomstig van de boerderijen, in de lucht hoog is. Volgens het onderzoek is het niet waarschijnlijk dat ammoniak zelf dit effect veroorzaakt, maar dat dit effect komt vanwege fijnstofdeeltjes die in de lucht worden gevormd wanneer ammoniak met andere stoffen in de lucht reageert (RIVM, 2016).

Verder is ammoniak een toxische stof en kan bij inademing zeer giftig zijn. Hier zal er een bijtend gevoel optreden, tranen, keelpijn en hoesten, moeizaam ademen en is er sprake van ademnood. Ook kan er sprake zijn van hoornvliesbeschadiging, verlies van gezichtsvermogen en ernstige brandwonden (Arbocatalogus, 2017). Dit zijn echter alleen bij concentraties van 2.000 ppm (IGS, 2011). Deze concentraties zullen echter bij een mestkelder niet te vinden zijn (CLM, 2020).

Explosiegevaar

Ammoniak heeft een LEL van 15.4% volume ofwel 154.000 ppm. Tijdens de keldermetingen lagen de concentraties van ammoniak bij de stal met een emissiearme vloer gemiddeld op slechts 15 ppm. Ook de maximum concentratie tijdens de pieken lag maar op 300 ppm. Bij de melkveeststal met een roostervloer lag de gemiddelde concentratie net wat hoger, op 17 ppm. De maximum concentratie was echter wel minder dan bij de emissiearme vloer, namelijk 184 ppm (CLM, 2020).

Zoals te zien is het explosiegevaar van dit mestgas een stuk minder groot risico dan bij het explosiegevaar van methaan. Ammoniak zal uit zichzelf niet snel tot een explosie leiden bij ontsteking, maar aangezien het alsnog een brandbaar mestgas betreft zal bij een methaanbrand of explosie dit gas ook branden.

4.3 Waterstofsulfide

Waterstofsulfide ontstaat bij de omzetting van organisch materiaal in de mest door anaerobe en sulfaatreducerende bacteriën in een zuurstofarme omgeving, zoals een mestkelder.

Fysische en chemische eigenschappen van waterstofsulfide	
Kleur:	Kleurloos
Geur:	Rotte eieren
Vlampunt:	100 °C
Zelfontbrandingstemperatuur:	270 °C
Brandbaarheidsgebied (tussen LEL en UEL):	4.3% volume (43.000 ppm) tot 45.5% volume (455.000 ppm).
Gevarenpictogrammen:	
H220: Zeer licht ontvlambaar	
H280: Gas onder druk	
H331: Giftig bij inademing	
H400: Zeer giftig voor in het water levende organismen	
Overige eigenschappen:	Bij explosie of brand kan dit gas zwaveldioxide vormen.
Bron:	(Air Liquide, 2000)

Als er gekeken wordt naar de gevarenaanduidingen bij waterstofsulfide zien we dat deze stof ten eerste uiterst brandbaar is. Maar het belangrijkste gevaar bij waterstofsulfide is dat het een zeer giftig gas is, en bij inademing voor veel gezondheidsrisico's zorgt.

Concentratie waterstofsulfide in ppm	Gezondheidsrisico's
0,0005 - 0.13 ppm	Deze concentratie is de geurdrempel. Hier ruikt men een rotte eieren lucht.
1.6 ppm	Deze concentratie geldt als de grenswaarde. < 1.6 ppm levert geen negatieve effecten op bij blootstelling van 8 uur per dag.
10-20 ppm	Laagste concentratie voor oogirritatie. Na 4-8 uur blootstelling kan er sprake zijn van hoofdpijn en misselijkheid.
50-100 ppm	Oogirritatie met kans op oogschade.
100-150 ppm	Irritatie van neus en keel. Hoesten, brandende en/of tranende ogen. Na 2-15 minuten wordt het reukorgaan verlamd en wordt de geur niet meer waargenomen.
150-250 ppm	Eerder genoemde effecten + hoofdpijn, duizeligheid, kortademigheid, misselijkheid, overgeven, evenwichtsproblemen, onrust en kans op longoedeem (bloedvaten in de longen beschadigd waardoor er vocht lekt)
250-700 ppm	Ernstige ademhalingsproblemen, kans op bewustzijnsverlies, kans op overlijden bij 15 minuten – 4 uur blootstelling.
700-1.000 ppm	Snel verlies van bewustzijn, ademhaling stopt, stuipen en sterfte binnen enkele happen adem tot 15 minuten. Kans op blijvend letsel.
>1.000 ppm	Bij de eerste hap adem is er sprake van verlamming van het middenrif, direct verlies van bewustzijn en grote kans op blijvend letsel en overlijden.
Bron:	(Hazmatcat, 2020)

Indien waterstofsulfide aanwezig is tijdens een brand of explosie, wat niet onmogelijk is bij de mestgassen, kan er giftige en/of corrosieve damp gevormd worden door thermische ontbinding. Bij thermische ontbinding gaat een stof bij een bepaalde minimumtemperatuur ontbinden. Deze chemische reactie zorgt ervoor dat de chemische bindingen van een stof uit elkaar vallen. Op deze manier ontstaat deze damp (sawakinome, z.d.). Deze damp heet zwaveldioxide.

Zwaveldioxide veroorzaakt zure regen. Dit ontstaat als zwaveldioxide met de waterdeeltjes in de lucht vermengd en reageert tot zwavelzuur. Zure regen veroorzaakt schade aan bossen, planten, gewassen en ook gebouwen. Het is voor de boer dus van groot belang dat er geen zure regen ontstaat, zodat zijn gewassen niet beschadigd worden. Ook zorgt zure regen voor verzuring van meren en sloten. Hierdoor verandert het waterecosysteem en komen bepaalde vissoorten minder voor (Enzler, 2010).

4.4 Incidenten mestgassen

4.4.1 Scenario's incidenten mestgassen

In het interview met Gerrit Stobbelaar is besproken wat er kan gebeuren bij een ontsteking van de mestgassen bij verschillende type vloeren. Hieronder volgen twee korte scenario's bij de verschillende vloertypes, gebaseerd op het interview met Gerrit Stobbelaar.

Scenario 1:

Scenario 1 ontstaat waarschijnlijk vooral bij melkveestallen met een roostervloer. In het geval van een ontsteking van de mestgassen in de kelder, ontstaat er een steekvlam. Deze steekvlam kan onder

de kelder blijven. Het kan echter ook dat deze steekvlam door de roosterspleten naar boven komt. Deze steekvlam kan schade opleveren aan de koeien, zoals brandwonden of schroeiplekken. Deze steekvlam kan er ook voor zorgen dat het hooi en stro in de boxen vlamvat. Hierdoor kan er een brand ontstaan in de melkveestal, die in het ergste geval kan afbranden.

Scenario 2:

Scenario 2 is meer waarschijnlijk bij melkveestallen met een emissiearme vloer. In het geval van ontsteking van de mestgassen in de kelder, ontstaat er een explosie, omdat de druk door de dichte vloer niet weg kan. Hierdoor wordt de vloer uit zijn voegen gedrukt en kan een gedeelte van de vloer in de mestkelder vallen. De koeien en mensen die boven dit stuk vloer staan, kunnen daarbij in de put vallen. Dit kan ervoor zorgen dat zowel mens als dier hieraan overlijdt, vanwege bijvoorbeeld de H₂S concentraties die zich in de mestkelder bevinden. Ook is het mogelijk dat de koeien omkomen omdat ze te veel mest in de longen krijgen, en pas later overlijden. Dit was het geval bij een explosie in Markelo (Tubantia, 2019). Bij een emissiearme vloer is de concentratie van mestgassen in de meeste gevallen wel gelijk onder de vloer. Bij ontsteking zal er dus overal mestgassen ontsteken waarbij de druk niet weg kan, wat resulteert in het klappen van de vloer. In een situatie waarbij slechts een klein gedeelte onder de emissiearme vloer een concentratie heeft hoger dan het LEL, zal bij een ontsteking leiden tot een steekvlam onder de vloer. Dit brandt ook het methaan weg, die zelf geen LEL-concentratie had. De druk is dan niet groot genoeg om de vloer te laten ontploffen, maar zal zorgen voor een brand onder de vloer, totdat de gassen zijn opgebrand.

In het interview met Gert-Jan Monteny kwam naar voren dat de fabrikanten wel actie willen ondernemen, maar alleen als er echt onderzoek is gedaan dat bewijst dat er inderdaad alleen bij emissiearme vloeren explosies plaats kunnen vinden, en dat de concentraties mestgassen bij emissiearme vloeren ook daadwerkelijk hoger zijn.

4.4.2 Incidenten methaanbrand en –explosies

Uit het interview met Gerrit Stobbelaar kwam naar voren dat deze methaanbranden en explosies redelijk vaak voorkomen. Uit de 22 agrarische bedrijven die meededen in het onderzoek waren er 4 bedrijven die aangaven wel eerder te maken gehad te hebben met een methaanbrand of –explosie (OD Twente, 2019).

Echter werd tijdens mondelinge overleggen wel vaker duidelijk dat dit fenomeen vaker voorkomt dan aangetoond werd in het onderzoek. Dit is echter niet vastgelegd of bewezen.

4.4.3 Ongevallen mestgassen

Tussen 1980 en 2013 zijn er in Nederland minimaal 35 ernstige ongevallen met mestgassen plaatsgevonden. Bij deze ongevallen vielen 57 slachtoffers, waarvan er 28 overleden. Dit werd bekendgemaakt in een rapport van de Onderzoeksraad voor Veiligheid in 2013. Sindsdien is de situatie niet minder ernstig geworden, maar juist verergerd. Zo is recent aangegeven dat er gemiddeld drie doden per jaar vallen door mestgassen (RTL, 2020). Dit is jaarlijks meer dan in de periode 1980-2013, waar het gemiddelde op ongeveer 1 per jaar lag.

Makkinga, juni 2013. In juni 2013 kwamen er 3 mensen om het leven in een mestsilo in Makkinga, doordat ze een fatale concentratie waterstofsulfide binnenkregen. Twee van de slachtoffers kwamen om het leven omdat ze het eerste slachtoffer onbeschermd te hulp wilden schieten (Dagblad van het Noorden, 2018).

Oldehove, mei 2018. Bij een boerderij in Odehove zijn twee personen in een mestkelder terecht gekomen. Hierbij overleed de 15-jarige zoon van de boer, die om onbekende reden in de mestkelder was gevallen. Zijn vader probeerde hem te redden, maar raakte zelf bij deze reddingspoging buiten bewustzijn (Dagblad van het Noorden, 2018).

Oostrum, januari 2020. Bij een boerderij in Oostrum zijn twee mannen van 75 en 49 jaar overleden na een val in de gierput (1limburg.nl, 2020).

Borculo, januari 2020. Bij een boerderij in het Brabantse Borculo is een man overleden nadat hij door onbekende redenen in de gierput is gevallen. De brandweer heeft de man nog uit de put weten te halen, maar toen was het slachtoffer al reeds overleden (De Stentor, 2020).

5. Deelvraag 2: Ontstekingsbronnen in de melkveestallen

‘Een ontstekingsbron is een bron die voldoende energie kan ontwikkelen en daardoor warmte kan afgeven om materiaal in de omgeving tot ontbranding te laten brengen’ (Obex, z.d.).

In de melkveestallen zijn er twee soorten ontstekingsbronnen. Dit zijn de elektrische, mechanische en de thermische ontstekingsbronnen. Bij elektrische ontstekingsbronnen kan in de melkveestallen gedacht worden aan elektrische vonken. Een voorbeeld hier is een elektrische vonk bij het laadstation van de mestrobot. Bij mechanische ontstekingsbronnen kan er in de melkveestal gedacht worden aan impactvonken, bijvoorbeeld tijdens het lassen of slijpen. Voorbeelden van thermische ontstekingsbronnen in de melkveestal zijn vlammen en hete gassen. Hierbij valt te denken aan uiers branden (IAB, 2015).

Door middel van een schouw is op 10 verschillende boerderijen gekeken naar de mogelijke ontstekingsbronnen die zich in de melkveestallen bevinden. Deze bronnen zorgen voor een mogelijke explosie of brand als het LEL-level wordt gehaald. Deze schouwlijst is opgesteld aan de hand van een interview met Gerrit Stobbelaar, die zelf ook meerdere onderzoeken heeft uitgevoerd naar mestgassen en emissiearme vloeren. Daarnaast is de input van brandweer en mestgasdeskundige Jetty Middelkoop in deze schouw verwerkt. Ook is er gekeken naar de verschillende ontstekingsbronnen die een voorgaande explosie of brand hebben veroorzaakt (Hazmatcat, 2020).

Ongeval zit in een klein hoekje

Op deze schouwlijst staan de ontstekingsbronnen die de meest waarschijnlijke oorzaak kunnen zijn om een ontsteking te veroorzaken die tot een explosie of brand leidt. Er zijn echter wel meer ontstekingsbronnen in de melkveestal die niet op deze lijst staan. Bewust is gekozen om die er niet bij te zetten omdat die ontstekingsbronnen dusdanig een kleine kans vormen om een ontsteking te veroorzaken van de mestgassen uit de kelder. Ook zijn er verschillende ontstekingsbronnen die niet in de schouw zijn opgenomen omdat die zeer weinig voorkomen. Voor de zekerheid is tijdens het schouwen ook gekeken naar onderstaande ontstekingsbronnen, maar op het schrikdraad na zijn die niet waargenomen. Hierbij worden deze ontstekingsbronnen niet volledig uitgesloten, want een ongeluk zit in een klein hoekje. Het is mogelijk dat deze ontstekingsbronnen in de toekomst de oorzaak kunnen zijn van een stalexplosie of -brand. Een paar voorbeelden van deze ontstekingsbronnen zijn:

- Kortsluiting bij elektrische apparaten: Dit zijn elektrische apparaten die zich in de stal bevinden. Bij een kortsluiting kunnen deze apparaten wel een ontsteking veroorzaken. Deze kans is alsnog vrij klein, omdat deze apparaten op bijna een meter hoogte of nog hoger van de vloer staan. In het interview met Gerrit Stobbelaar kwam naar voren dat de hoogste concentratie van mestgassen voornamelijk dicht bij de vloer is, omdat bij elke centimeter boven de vloer er meer ventilatie en dus zuurstof door de open zijwanden bijkomt. Hierdoor is er een minder hoge concentratie mestgassen in het luchtmengsel. Voorbeelden hiervan zijn de melkrobots, automatische voersystemen, elektronische adapters van computers, accu's en frequentiewisselaars van zonnepanelen (NMV, 2021).
- Schrikdraad: Schrikdraad wordt soms in en vooral rondom de melkveestallen gebruikt om koeien een bepaalde kant op te sturen, meestal bij het naar de weide brengen. Dit schrikdraad is in de meeste gevallen op dusdanige hoogte dat het niet voor een ontsteking kan zorgen, en is ook vaak niet in de stallen aanwezig, maar alleen buiten de stallen. Toch kan dit ook voor een ontsteking zorgen, al is de kans zeer gering (NMV, 2021).
- Kapotte of stoffige stopcontacten: Deze kunnen voor een ontsteking zorgen bij kortsluiting o.i.d. maar deze stopcontacten staan in alle gevallen meer dan 1.5 meter hoog van de vloer.

De kans dat dit een ontsteking van de mestgassen veroorzaakt is enorm klein, maar wordt niet uitgesloten (NMV, 2021).

- Vliegenvanger: In het interview met brandweer Jetty Middelkoop kwam naar voren dat er ook weleens vliegenvangers een vonk kunnen geven als er een vlieg geëlektrocuteerd wordt. Als er rondom de vliegenvanger een explosief luchtmengsel hangt, kan dit een ontsteking zijn die een brand of explosie kan veroorzaken.
- Roken op de vloer: In het interview met Jetty Middelkoop werd duidelijk dat roken al eerder een oorzaak is geweest van een brandje. Als er gerookt wordt op de vloer, kan een brandend stukje as in de kelder terecht komen en een explosie of brand veroorzaken. Als er personen op de vloer lopen, kan dat fatale gevolgen hebben.
- Technische problemen mixer: In het interview met Jetty Middelkoop werd er gesproken over een voorval waar een mixer aanliep, wat een vonk veroorzaakte, dat vervolgens in de open mixput terecht kwam. Dit zal vrijwel niet voorkomen en is niet makkelijk te schouwen, maar laat wel zien dat er een hoop ontstekingsbronnen zich kunnen bevinden in en rondom de melkveestal.

Schouwlijst ontstekingsbronnen

Type ontsteking	Beschrijving ontsteking	Nee	Ja(Niet tijdens mixen)	Ja (tijdens mixen)	N.v.t.
Mestrobot	Staat de mestrobot oplaadpaal boven spleten van de kelder?				
	Staat de mestrobot aan tijdens het mixen?				
Borstelrobot	Staat de borstelrobot aan tijdens het mixen?				
Uiers branden	Is er soms sprake van het uiers branden in de melkveestal zelf? (Op de vloer boven de kelder)				
Lassen	Is er weleens sprake van lasactiviteiten in de melkveestal boven de vloer?				
Uitlaat trekker	Staat de trekker vlakbij de mixput tijdens het mixen? (minder dan 3 meter van de put vandaan)				
Slijpen	Is er weleens sprake van slijpen van de koeienhoeven in de melkveestal zelf?(Op de vloer boven de kelder)				
Deksel mixput	Staat de mixput open (tijdens het mixen)?				

5.1 Terugkomende resultaten

Resultatenmatrix

In deze matrix komt een overzicht van de uitkomsten van de schouw. Per type ontsteking waarnaar gekeken is, wordt een kleur gegeven die overeenkomt met de hoeveelheid keren dat die bepaalde uitkomst geschouwd is.

Rood: 6 of meer dan 6 keer geschouwd

Oranje: Meer dan 3 keer geschouwd, en minder dan 6 keer geschouwd.

Groen: Minder dan 3 keer geschouwd

Resultatenmatrix

Type ontsteking	Beschrijving ontsteking	Nee	Ja(Niet tijdens mixen)	Ja (tijdens mixen)	N.v.t.
Mestrobot	Staat de mestrobot oplaadpaal boven spleten van de kelder?	2	1	5	2
	Staat de mestrobot aan tijdens het mixen?			6	4
Borstelrobot	Staat de borstelrobot aan tijdens het mixen?			10	
Uiers branden	Is er soms sprake van het uiers branden in de melkveestal zelf? (Op de vloer boven de kelder)	3	7		
Lassen	Is er weleens sprake van lasactiviteiten in de melkveestal boven de vloer?	3	7		
Uitlaat trekker	Staat de trekker vlakbij de mixput tijdens het mixen? (minder dan 3 meter van de put vandaan)			9	1
Slijpen	Is er weleens sprake van slijpen van de koeienhoeven in de melkveestal zelf? (Op de vloer boven de kelder)	2	7		1
Deksel mixput	Staat de mixput open (tijdens het mixen)?	5		5	

Wat hieruit opvalt is dat de mestrobot bij meer dan de helft van de boerderijen boven op de vloer staat, en dat die ook aan staat tijdens het mixen. Dit kan niet altijd goed blijven gaan. Vroeg of laat zullen ook bij deze boerderijen een brandje of een explosie ontstaan als er tijdens het mixen een LEL-niveau wordt bereikt van de mestgassen, die dan door het vonkje van de mestrobot ontstoken worden. Bij al de boerderijen staan de borstelrobots ook aan tijdens het mixen. Nu is de kans bij de borstelrobot minder groot om een ontsteking van mestgassen te veroorzaken, ook omdat die wat hoger staat, maar dat gaat vroeg of laat wel een keer mis.

Tijdens het mixen wordt er op geen enkele boerderij uiers gebrand, gelast of hoeven geslepen. Dat is een goed teken, maar omdat het wel boven op de vloer gebeurt in de meeste gevallen is het niet geheel vrij van risico's. Ook als er niet gemixt wordt kan er een LEL-niveau van mestgassen worden bereikt, zeker als er sprake is van schuimvorming.

In bijna alle gevallen staan de trekkers vlakbij de mixput, en in een hoop gevallen werd ook duidelijk dat de mixput wagenwijd openstaat tijdens het mixen, omdat er planken normaalgesproken overheen zitten. De kans dat er een warm roetstukje een ontsteking zal veroorzaken is klein, maar

omdat er door zoveel boeren op deze manier wordt gemixt, zal het vroeg of laat ook een oorzaak zijn van een explosie of brand. Ook met de open mixputten bij een hoop gevallen ontstaat er de kans dat een verkeerde wind de mestgassen in de put naar de achterkant blazen, wat ervoor zorgt dat al die mestgassen op dezelfde plek vrijkomen.

Tijdens het schouwen is ook gekeken naar andere opvallende ontstekingsbronnen, ook degene die eerdergenoemd zijn maar niet in de schouw terecht zijn gekomen. Geen van die ontstekingsbronnen zijn waargenomen tijdens de schouws, op het schrikdraad na. Dit schrikdraad kan een ontsteking veroorzaken, maar die was in eigenlijk alle waargenomen gevallen zo enorm klein omdat die zich niet in de buurt van de vloer bevonden.

Vonkje mestrobot

Tijdens het schouwen bij boerderij 7, kwam de mestrobot precies naar het laadstation toe. Samen met de boer is gekeken naar de veiligheid van de situatie, met behulp van een handmeter. De concentraties van methaan en ammoniak waren op dat moment laag, en was er geen sprake een gevaarlijke situatie. Ook was er geen sprake van schuimvorming op dat moment. Samen met de boer is er meerdere keren geprobeerd om de mestrobot te laten opladen aan het laadstation, door hem elke keer uit te zetten en te verplaatsen. Van de 5 keer dat de mestrobot een connectie maakte met het laadstation, kwam er 3 keer zichtbaar een vonkje vrij. Dat vonkje kwam vrij op ongeveer 30cm hoogte van de vloer. Op het moment van een LEL-niveau concentratie van mestgassen, kan dit vonkje dus echt een ontsteking zijn, als het LEL-niveau slechts 30cm boven de vloer aanwezig is.

Tekstblok 1: Vonkje mestrobot

Hot spots

De hot spots, d.w.z. de plekken waar er een grote kans bestaat om een onveilige situatie te krijgen zijn dus voornamelijk de volgende plekken:

- Het laadstation van de mestrobot: Hier ontstaat in veel gevallen een vonkje, en tijdens mixen kan hier een LEL-niveau van mestgassen hangen. Als de mixput open is en de wind waait via de mixput in de kelder, kan de wind de mestgassen naar de andere kant blazen. Het uiteinde van de andere kant is meestal de plek waar het laadstation van de mestrobot staat. Als de mestgassen door de wind naar de andere kant worden geblazen, komen die allemaal naar boven op de plek van het laadstation.
- Borstelrobots: Over de stal verspreid staan vaak meerdere borstelrobots. Hier kan een vonk ontstaan als hij aangaat. Op die plekken kan er dus een onveilige situatie ontstaan.
- Plekken waar gelast wordt, uiers worden gebrand, of hoeven worden geslepen: Deze activiteiten zijn niet gebonden aan een bepaalde plek in de melkveestal, zeker het lassen niet. Maar als deze activiteiten plaatsvinden boven de vloer, is de hele vloer een hot spot. Dit is helemaal het geval tijdens het mixen, maar kan ook niet tijdens het mixen zorgen voor onveilige situaties, bijvoorbeeld als er sprake is van schuimvorming.
- Mixput: De mixput is een hot spot voor zowel brand- en explosierisico's als gezondheidsrisico's. Zeker in het geval van een open mixput tijdens het mixen. De uitlaat van de trekker kan voor warme roetvonken zorgen die een ontsteking kunnen veroorzaken in de open mixput. Ook is er een bijkomend risico met de open mixput dat de wind in de mixput kan waaien, waardoor de mestgassen in de kelder naar één kant worden geblazen. De andere kant van de mixput is vaak het de kant waar het laadstation van de mestrobot staat. Ook is een open mixput gevaarlijk voor de gezondheid. Met bepaalde winden kan er in één keer een hoop mestgassen uit de mixput worden geblazen, en als er mensen in de buurt zijn, zoals bijvoorbeeld in de trekker met het raam open, kan dit erg gevaarlijk zijn.

6. Deelvraag 3: Proactieve oplossingen

Bij de eerste stap in de veiligheidsketen wordt er gekeken naar proactieve maatregelen. Dit zijn maatregelen die al in de eerste fase van het 'voorkomen' worden genomen. In dit geval wordt er gekeken naar hoe ervoor gezorgd kan worden dat de mestgassen niet meer een explosief luchtmengsel kunnen vormen, of dat het explosief luchtmengsel niet meer een gevaar kan vormen in de melkveestal (Stol et al., 2016).

Hieronder staan verschillende veelbelovende opties uit de literatuur en uit de interviews die op proactieve wijze de brand- en explosierisico's en de gezondheidsrisico's kunnen verminderen. In de selectie van opties is er gekeken of er bewijs was of het daadwerkelijk werkt, en of er geen bijkomende risico's plaatsvinden. Indien er geen bewijs is of het daadwerkelijk werkt, of als er bijkomende risico's aan vast zitten, zijn deze opties niet opgenomen in deze deelvraag. Opties waar het niet zeker van is of het werkt, maar wat met eventueel extra onderzoek wel veelbelovend kan zijn, zijn wel opgenomen en wordt er aanbevolen dat verder onderzoek nodig is.

6.1 Verandering in het voer om methaangehalte te verminderen

Om het methaangehalte in de mest te verminderen, moet er op een andere manier gevoerd worden. Dit kan door bepaalde onderdelen van het voer te vervangen of eruit te halen, maar kan ook door bepaalde soorten voer als additief toe te voegen waardoor de methaanuitstoot verminderd (Vellinga et al., 2009).

Volgens Gerrit Stobbelaar zorgt een dieet met meer ruwvoer en minder krachtvoer voor een vermindering in de ammoniakemissies. Hij zegt dat met de brokjes krachtvoer die de koeien voortdurend op bepaalde bedrijven krijgen, ze eigenlijk aan de diarree gevoerd worden, omdat de pens zoveel krachtvoer niet goed kan verwerken, waardoor er veel meer en dunnere ontlasting is. En dat zorgt weer voor meer emissies. Dit is echter wel de input van één onderzoek en persoon. Dit zijn zeer interessante waarnemingen, maar dit is nog niet door anderen onderzocht.

Maar hier komen nog meer dilemma's bij kijken. Uit onderzoek blijkt dat meer eiwit aanbieden effectief is, omdat eiwitfermentatie weinig methaan geeft. Echter stuurt het mestbeleid aan op minder eiwitten in het rantsoen, om de ammoniakemissie te verminderen (Bannink et al., 2009).

Uit een proef van DairyCampus blijkt dat een maïsrijk rantsoen voor de koeien zorgt voor een vermindering in methaan tijdens het opboeren. Daartegenover blijkt wel dat de methaanemissies in de mest met een maïsrijk rantsoen veel hoger zijn dan bij een grasrijk rantsoen (Melkvee, 2020).

Daarom is het belangrijk dat er goed gekeken wordt naar zowel de emissies tijdens het opboeren als de emissies in de mestopslag. Veel studies richten zich alleen op het verminderen van emissies tijdens het opboeren van de koe, maar als die maatregelen betekenen dat de emissies in de mestopslag juist omhooggaan, wordt het gevaar op een mestgasbrand of -explosie alleen maar groter.

6.1.1 Zeewier als additief

Zeewier als additief bij het voer voor de koeien kan leiden tot een vermindering in de methaanuitstoot van de koe uit de pens tijdens het opboeren. In de afgelopen jaren zijn er meerdere onderzoeken geweest naar het toevoegen van zeewier aan het voer voor de koeien en het effect daarvan op de methaanuitstoot. Uit deze onderzoeken is gebleken dat er inderdaad methaanvermindering is als er zeewier wordt toegevoegd aan het dieet. Uit recent onderzoek van Wouter Muizelaar blijkt dat niet alle soorten zeewier geschikt zijn. *Asparagopsis taxiformis*, een veelbelovend zeewier uit Australië, die ongeveer voor 90% methaanreductie zorgde, blijkt het stofje bromoform te hebben, wat de pens van de koe uiteindelijk beschadigt. Maar andere soorten zeewier blijven wel een effectieve optie, aldus Muizelaar (WUR,2021).

Na contact met Muizelaar, bleek dat alle onderzoeken ‘van het effect van zeewier’ keken naar de enterische werking van het zeewier. D.w.z. dat er gekeken wordt naar het methaan dat wordt gecreëerd in de pens van de koe en uiteindelijk wordt opgeboerd, en dat er niet is gekeken naar de effecten van zeewier op de methaanemissies uit de mest van de koe. Het zou goed kunnen dat zeewier hier ook effect op heeft, wat zowel een negatief als een positief effect kan zijn. Er is nog onderzoek nodig om dit te kunnen vaststellen.

6.1.2. 3-NOP van DSM

Het nog niet uitgebrachte 3-NOP van DSM is een veelbelovend middel wat aan het voer toegevoegd kan worden. Dit zou de methaanemissies van de koe drastisch reduceren (DSM, 2019). Maar uit mailcontact met ILVO, het Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek, bleek dat er geen of weinig verschil te zien was aan de methaanemissies uit de mest na toevoeging van het middel aan het voer van de koeien.

6.2 Mest uit de stal halen

6.2.1 Kelderloze stal

De kelderloze stal is een fenomeen wat in Nederland nog niet veel voorkomt, maar in Amerika wel meer voorkomt. Uit gesprek met Gerrit Stobbelaar werden wel een aantal voordelen duidelijk van de kelderloze stal, die hij ook in zijn eigen rapport heeft staan.

De kelderloze stal heeft een dichte vloer, zonder kelder eronder. De mest wordt dan naar een mestsilosilo buiten de stal gebracht en opgeslagen. Dit zorgt voor minder emissie op de vloer, en minder emissie in de mestopslag, van zowel methaan als ammoniak etc. Ook is het leefklimaat voor de koeien aanzienlijk beter, omdat ze niet de hele dag in de mestgassen rondlopen (wat voor de diergezondheid niet goed kan zijn). Dit kan eventueel een verhoging in de melkproductie betekenen (Stobbelaar, 2020).

Omdat er veel minder emissies en concentratie van mestgassen in de stal hangt, kunnen de ontstekingsbronnen in de stal niet zorgen voor een explosie of brandje. Er hoeft niet meer te worden gemixt in de stal, met alle bijkomende risico's van dien, zowel gezondheidsrisico's als explosierisico's. Eigenlijk alle risico's van mestgassen worden met de kelderloze stal vermeden (Stobbelaar, 2020).

De mestsilosilo buiten de stal heeft een los dak, waar de druk altijd heen kan gaan in geval van een ontsteking en explosie. De schade hierbij is aanzienlijk minder dan wanneer zoiets gebeurt in de melkveestal, waar ook meer kans is dat zoiets gebeurt, vanwege meerdere ontstekingsbronnen.

Ook kan het methaan in een mestsilosilo makkelijker worden afgevangen en verkocht als biogas, of kan makkelijker worden afgefakkeld, wat vanwege milieuredenen weer voordelen heeft.

De kelderloze stal heeft dus veel voordelen. Maar het is wel een hele operatie om een stal met een bestaande kelder om te bouwen naar een kelderloze stal, en er moet een mestsilosilo worden gebouwd, waar wel ruimte voor nodig moet zijn op de boerderij. Dat hele proces zal niet goedkoop zijn. Maar de kelderloze stal is wel een idee voor de toekomst, en als boeren al van plan zijn om een nieuwe stal te bouwen of een stal te verbouwen, is een kelderloze stal een optie met een hoop voordelen. Bij het bouwen van een nieuwe stal kan een kelderloze stal 25% goedkoper zijn dan een traditionele stal (WUR, 2014).

6.2.2 Mest uit de stal pompen in een mestsilosilo

Als de mest zich niet in de stal onder de vloer bevindt, brengt dit ook minder risico's met zich mee. Wat ook al besproken is bij de kelderloze stal, is het veiliger om de mest apart opgeslagen te hebben in een mestsilosilo buiten. Als het voor de boeren niet (economisch) haalbaar is om een kelderloze stal te maken, is het wel een veilige optie om de mest voortdurend uit de stal te halen en in een mestsilosilo

te pompen. Als er veel minder mest in de kelder ligt onder de stal, zorgt dat ook voor een minder hoge concentratie van mestgassen in het luchtmengsel. Zeker in de warmste maanden in de zomer is het van belang dat er zo weinig mogelijk mest in de kelder is, omdat bij hogere temperaturen meer methaan wordt gevormd. Als de koeien het land op gaan, is het van belang dat de mestkelder goed wordt leeggemaakt, zodat er minder emissies worden gevormd.

Ook is het van belang dat de mestopslag van tijd tot tijd in zijn geheel wordt leeggemaakt. Want als er steeds een beetje mest uit de opslag wordt gehaald, blijven er altijd nog een hoop bacteriën achter in de kelder, die altijd voedsel (mest) tot hun beschikking hebben om methaan te produceren. Daarom is het beter om de mestopslag regelmatig helemaal leeg te maken, en voornamelijk in de warmere maanden (Agroenergiek, z.d.).

Daarnaast kan er eventueel gebruik worden gemaakt van een mestscheider in dit proces, wat voor de boer ook meerdere voordelen mee brengt. Te denken valt aan effectievere werking van het uitrijden van de mest door de dunne mestscheiding, minder kosten aan kunstmest voor het land en de dikke mestscheiding die wordt gebruikt als bedekking van de ligboxen in de melkveestal, wat het dierwelzijn van de koeien verbetert (Maverko, z.d.). Maar Jetty Middelkoop waarschuwt wel voor de eventuele risico's van de mestscheider. Volgens haar is er geen onderzoek gedaan naar emissies in de mestscheiders, en het zou kunnen dat een mestscheider hoge concentraties aan mestgassen bevat.

6.3 Biofiltratie

Uit onderzoek uit 2003 werd er succesvol methaan uit de ventilatielucht gehaald in de kelder d.m.v. een biofilter. Deze filter zorgt ervoor dat het methaan uit de ventilatielucht wordt gehaald, en zorgt voor een methaanreductie van maar liefst 85%. Maar ook ammoniak en waterstofsulfide worden door deze biofilter uit de lucht gefilterd, met 90-100% reductie van ammoniak en 100% reductie van waterstofsulfide. Het biofilter dat hiervoor werd gebruikt was zeer eenvoudig en heeft nauwelijks processturing nodig van de boer (Melse, 2003).

Wel wordt in een vervolgonderzoek uit 2003 geconcludeerd dat het economisch nog niet haalbaar is. Per ton CO₂ equivalent kost deze oplossing in een 'best case scenario' €110-€142, en in een 'worstcasescenario' €246 - €497 per ton CO₂ equivalent. Ter vergelijking, alternatieven zoals vergistingsinstallaties en het affakkelen van biogas hebben een prijskaartje van €56 per ton CO₂ equivalent, en €34 per ton CO₂ equivalent respectievelijk. Het rapport noemde wel additionele technieken die eventueel de prijs zouden reduceren (Melse, 2003).

Dit was echter een studie uit 2003. Er is meer onderzoek nodig of er in deze tijd economisch haalbare mogelijkheden zijn met een biofilter, want deze technische oplossing heeft wel bewezen effectief te zijn.

6.3.2 Lely Sphere

Lely, het bedrijf achter verschillende robots in de landbouwsector, heeft een systeem geïntroduceerd dat de mest van de vloer scheidt in drie verschillende stromen. De eerste stroom is de dikke mest die rijk is aan fosfaat en organische stof. De tweede stroom is de kalirijke urine, en de derde stroom is het stikstofrijk spuiwater. Met deze scheiding beweert het bedrijf de ammoniakemissie bij een standaard ligboxenstal tot ongeveer 70% te verminderen (Lely, z.d.).

De voordelen voor de boeren hiervan is dat er minder kunstmest hoeft worden aangekocht, omdat het bemesten nu veel makkelijker gaat, omdat de ammoniak als stikstof behouden blijft en niet in de atmosfeer terecht komt. Ook hoeven de boeren minder mest af te voeren. De boeren kunnen met deze drie verschillende soorten mest makkelijker en exacter de bemesting aansturen (Lely, z.d.).

Een Lely Sphere-installatie is echter niet goedkoop. Het systeem kost tussen de €150.000 en €170.000 voor een gemiddeld bedrijf (met ongeveer 120 koeien). Volgens Lely zal de Lely Sphere ongeveer €5000 opleveren per jaar aan besparingen aan kunstmest en mestafvoer. Maar de grootste drijfveer om dit aan te schaffen is, is de milieuwetgeving. Lely probeert het systeem op de RAV-lijst te krijgen, zodat het systeem ook kan worden gebruikt bij het intern salderen (Nieuwe Oogst, 2020).

Uit gesprek met een medewerker van Lely bleek dat ondanks de Lely Sphere alleen de ammoniakemissie weg weet te filteren, de Lely Sphere er wel voor zorgt dat alle mestgassen worden weggezogen uit de melkveestal. Alleen ammoniak wordt eruit gefilterd, en de rest gaat de lucht in. Dit zorgt er wel voor dat de concentraties mestgassen in de stal aanzienlijk lager zijn, wat ervoor zorgt dat er een veel minder grote kans is dat er een explosief luchtmengsel gevormd kan worden. Dit is wellicht het grootste voordeel van de Lely Sphere als het gaat om de verschillende risico's van de mestgassen te verminderen.

6.4 verlaging temperatuur van de mest voor emissiereductie

Als er onder anaërobe (zuurstofarme) omstandigheden en bij temperaturen hoger dan ongeveer 15°C mest van dieren wordt bewaard, zal er methaan worden geproduceerd door bacteriën (COM, 1996).

Een oplossing om de vorming van methaan door deze bacteriën tegen te gaan is dus om de temperatuur onder de vloer in de mestkelder te verlagen, en ervoor te zorgen dat deze altijd onder de 15°C blijft, of nog net wat lager om zeker te zijn. Hiervoor zijn koelsystemen nodig die onder de vloer in de mestkelder deze temperatuur te handhaven. Om dat gewenste effect te halen, is er wel een behoorlijk koelsysteem nodig. Dit soort kaliber koelsystemen kan worden gevonden in bepaalde kassen. De aanschafprijs van dit soort koelsystemen is hoog. Dit kan oplopen tot tienduizenden euro's (WUR, 2004). Ook verbruiken deze koelsystemen ook een hoop energie.

Ook is het mogelijk om een warmtewisselaar in de keldervloer aan te brengen. Er zijn verschillende experimenten gaande waar deze warmtewisselaar wordt getest en het effect daarvan. Verder onderzoek moet nog uitwijzen of dit daadwerkelijk effectief is (WUR, 2017). Economisch zal dit waarschijnlijk alleen interessant zijn als er iets met de warmte gedaan kan worden, zoals bijvoorbeeld een huis verwarmen.

Daarom zal dit niet een reële optie zijn voor de meeste boeren. Maar het is wel een optie die naar alle waarschijnlijkheid effect heeft.

6.4.2 Dakisolatie

In het geval van warme dagen, komt er een hoop zon en warmte terecht op het dak wat ook de stal verder opwarmt. Deze directe warmte-instraling overdag kan worden beperkt als er een goede dakisolatie is. Dit zal er ook voor zorgen dat er minder methaan en ammoniak ontstaat. Deze maatregel is ook toepasbaar in bestaande stallen, en vereist geen nieuw dak. Het dierwelzijn en de melkproductie gaat hierbij er ook op vooruit, omdat de hittestress die de koeien ondergaan hiermee wordt beperkt en verminderd (WUR, 2017).

6.5 schuimvorming tegengaan

Het voorkomen van schuimvorming is een effectieve oplossing voor het verminderen van de risico's op explosiegevaar, omdat de methaanconcentraties tijdens het mixen mindere pieken zullen opleveren. Het is niet bekend of schuimvorming voor meer methaan in het algemeen zorgt, maar de schuimbellen slaan wel een hoop methaan op. En mogelijk werkt de schuim als isolatielaag, wat ervoor zorgt dat het warmer is, wat ervoor zorgt dat er meer methaan wordt gevormd. Tijdens het mixen komt die methaan dan in één keer vrij omdat die schuimbellen dan kapot worden gemaakt door het mixen. Uit gesprekken met de verschillende boeren tijdens het schouwen, werd duidelijk dat op bijna elk bedrijf wel (eens) sprake was van schuimvorming. Maar er waren ook enkele

bedrijven waar er nooit schuimvorming was. Één boer gaf aan dat dat waarschijnlijk komt omdat hij enkel alleen gras voert aan zijn koeien, en verder geen enkel ander voedingsmiddel. Deze theorie zou kunnen kloppen, want bij andere boerderijen waar er geen sprake van schuimvorming was, bleek er voornamelijk of alleen gras gevoerd te worden. Dit zou dus wel een oplossing kunnen zijn om schuimvorming tegen te gaan, maar het is nog niet wetenschappelijk bewezen. Het zou kunnen dat er ook andere factoren speelden bij de desbetreffende bedrijven die ervoor zorgden dat er geen schuimvorming ontstond, zoals de diepte van de kelder (Starmans et al., 2009).

6.5.2 Mineralen om schuimvorming tegen te gaan

Tijdens het schouwen gaf één boer aan dat hij een mineralenmiddel had wat de schuimvorming voor ongeveer een week wegnam. Het was voor hem geen doen om elke week dat middel te gebruiken, maar hij gaf wel aan dat hij het gebruikt voordat hij gaat mixen. Dit zorgt wel voor een vermindering in het risico op explosie of brand. Er is immers een minder grote kans dat het methaan een explosief luchtmengsel kan vormen tijdens het mixen. Hoe het middel heette kon hij zich niet herinneren, maar hier kan eventueel ook verder gekeken naar worden. Een onderzoek naar de werking van zo'n middel bij verschillende soorten bedrijven zou gunstig zijn.

Een andere boer gaf aan dat hij het nieuwe mineralenmiddel FX toevoegt aan de mest, om de ammoniak te verminderen en ook de schuimvorming tegen te gaan. Het bedrijf geeft aan de schuimvorming met 80-90% te verlagen, wat bleek uit eigen onderzoek (bergfourage, 2021). Of dit in de praktijk op grootschalig gebruik ook hetzelfde resultaat haalt, moet nog worden onderzocht. Ook moet er worden gekeken of het niet hetzelfde effect heeft als de mineralenmix van de eerdergenoemde boer, die maar een week effectief zijn.

6.6 Ureaseremmers

Ammoniak wordt grotendeels gevormd door het enzym urease/urinezuur dat ureum omzet door bacteriën in ammonium, wat vervolgens wordt omgezet in ammoniak (WUR, 2017). Dit proces kan worden voorkomen door ureaseremmers. Deze ureaseremmers blokkeren de omzetting van urease naar ammoniak. Door deze ureaseremmer te verdunnen en te besproeien over de vloer en in de kelder, kan ervoor worden gezorgd dat de vorming van ammoniak wordt geblokkeerd. Er zijn onderzoeken geweest die dit al onderzocht hebben waaruit bleek dat dit effectief werkt, maar momenteel wordt er nog meer onderzoek gedaan naar de beste opties omtrent deze maatregel (WUR, 2008).

6.7 Ammoniakvermindering door mestverrijking

Bij mestverrijking wordt de mest verrijkt met magnesiumchloride. Hierbij wordt het magnesium toegevoegd aan de mest, die zich dan bindt met fosfaat en ammoniak. Deze drie componenten die gebonden worden vormen dan samen magnesium ammonium fosfaat, ook wel struviet genoemd. Struviet is een natuurlijke meststof die zich goed kan hechten aan gronddeeltjes. Hierdoor kunnen gewassen meer belangrijke mineralen opnemen, omdat ze meer tijd daarvoor hebben. Doordat de ammoniak hier wordt gebonden, en onderdeel wordt van een andere stof, vormt deze minder risico's in de stal en minder milieuschade bij het uitrijden op het land. De ammoniakemissies worden hiermee omlaaggehaald. Er zijn drie verschillende bedrijven die deze techniek toepassen en een bewezen middel op de markt hebben gebracht. Dit zijn Nedmag, Agri Minerals en Lallemand (Monteny). Al deze bedrijven hebben een soortgelijk product, met ongeveer dezelfde werking en effect. Gert-Jan Monteny heeft in een interview aangegeven dat deze additieven meerdere malen getest zijn en werkend blijken.

7. Deelvraag 4: Preventieve oplossingen

Op de tweede plek in de veiligheidsketen staan de preventieve oplossingen, waar er gekeken wordt naar de maatregelen die kunnen worden genomen om het probleem preventief te verhelpen, maar de oorzaak niet wordt weggenomen. In dit geval wordt het risico van brand of explosie wel preventief verholpen, maar wordt de oorzaak niet volledig weggenomen, want het luchtmengsel bevat mogelijk nog wel een explosieve concentratie aan mestgassen (Stol et al., 2016).

Hieronder worden verschillende veelbelovende opties uit de literatuur en uit de interviews gegeven die op preventieve wijze de brand- en explosierisico's en de gezondheidsrisico's kunnen verminderen. Sommige van deze opties zijn niet in de praktijk bewezen of getest, maar zijn bedacht als counter op verschillende bevindingen tijdens het schouwen.

7.1 Activiteiten uit tijdens mixen

7.1.1 Mestrobot uit tijdens mixen

Dit is een zeer simpele, maar belangrijke handeling die een boer kan doen om het explosiegevaar tegen te gaan. Doordat de mestrobot bij zijn laadstation waarschijnlijk bijna altijd een vonkje veroorzaakt als hij begint met opladen (zie tekstblok 1), is het cruciaal dat dit vonkje niet plaats kan vinden tijdens het mixen van de mest, wanneer de methaanconcentraties extra hoog zijn vanwege het vrijkomen van het methaan in zowel de mest als de schuimlagen op de mest door het mixen. Deze simpele handeling zorgt ervoor dat de mestrobot niet automatisch naar het laadstation gaat en een vonkje zal veroorzaken. Een tijdje na het mixen van de mest kan de mestrobot weer aan, omdat het meeste methaan dan weer vermengd is met extra lucht, en geen LEL-concentraties bereikt.

7.1.2 Niet lassen, slijpen van koeienhoeven of uiers branden tijdens het mixen

Tijdens het mixen mag er absoluut niet worden gelast, koeienhoeven worden geslepen of uiers worden gebrand boven de vloer. Omdat tijdens het mixen er een hoge concentratie mestgassen is, kunnen lasvonkjes, vonkjes bij het slijpen en het vuur van het uiers branden zorgen voor een ontsteking van deze mestgassen, waardoor er een brand kan komen bij een roostervloer of een explosie bij een emissiearme vloer.

Ook als er sprake is van (grote) hoeveelheden schuimvorming, moeten deze werkzaamheden worden vermeden.

7.2 Dichte plaat bij het laadstation en onder de borstel apparatuur

Om het risico te verkleinen dat er een vonkje bij het laadstation daadwerkelijk een ontsteking kan veroorzaken van de mestgassen, is het verstandig om een klein oppervlakte bij het laadstation van de mestrobot te bedekken met een dichte plaat. Hiermee wordt er gezorgd dat er geen openingen meer zijn waar de mestgassen naar boven kunnen komen rondom de plek waar een vonk ontstaat, wat een explosie kan veroorzaken. Als deze openingen rondom het oppervlaktegebied dicht zijn, is er minder sprake van een hoge concentratie mestgassen op de plek waar het vonkje ontstaat. Dit komt omdat de mestgassen onder de vloer blijven op het stuk van de dichte plaat, en de mestgassen die op andere plekken uit de vloer komen (niet in directe buurt van deze plaat), worden verdund door de ventilatie in de stal tegen de tijd dat ze bij het laadpunt komen waar een vonkje kan ontstaan.

Ditzelfde geldt voor de borstelapparaten waar de koeien zich aan kunnen schrobben. Ook hier geldt dat er verschillende spleten en kiertjes onder dit apparaat staan, waar mestgassen vrijkomen. Als ook hier een rubberen mat of een andere vorm van dichte ondergrond kan worden aangebracht, zal er geen sprake zijn dat een vonkje de mestgassen kan ontsteken en een explosie kan veroorzaken.

7.3 Draadloze mestrobot

Een mestrobot die volledig draadloos kan worden opgeladen zal ook ervoor zorgen dat er geen vonkje meer kan ontstaan. Als er geen vonkje meer kan ontstaan, zal er ook geen ontsteking

plaatsvinden bij de mestgassen in de kelder. Deze oplossing komt wel te liggen bij de fabrikant(en) van de mestrobot. Deze moet er eigenlijk voor zorgen om een mestrobot en laadstation te leveren waar geen vonkjes kunnen ontstaan.

7.4 Speciaal deksel voor de mixput

De mixput is voor zowel de explosierisico's als de gezondheidsrisico's een belangrijk onderdeel als het gaat om het veiliger omgaan met de mestgassen. Tijdens het mixen staan bij veel bedrijven de mixput open. Dit komt vaak omdat er dan sprake is van houten planken als deksel van de mixput. Alle bedrijven horen een goed sluitend deksel te hebben die ook tijdens het mixen dicht kan. Dit zorgt er in de eerste plaats voor dat er niet in de mixput gevallen kan worden, een fenomeen wat helaas vaker voorkomt. Ten tweede zorgt het ervoor dat er niet een hoop gassen via de put naar boven komen, waar een persoon in de buurt door bedwelmd kan raken. Ten derde zorgt deze maatregel ervoor dat er geen wind via de mixput in de kelder kan waaien, wat ervoor zorgt dat alle mestgassen die vrijkomen tijdens het mixen omhoog worden geblazen. De concentraties van de mestgassen zijn dan erg hoog en kunnen ook deels boven de vloer uitkomen.

7.5 Volledig doorluchten tijdens mixen, lassen, uiers branden en slijpen

Het is cruciaal dat er tijdens het mixen er voldoende ventilatie is. De concentraties van de mestgassen kunnen hoog oplopen tijdens het mixen, en om ervoor te zorgen dat die concentraties niet zo hoog worden om explosief of brandbaar te zijn, is het belangrijk dat er voldoende doorgelucht wordt tijdens het mixen. Het luchtmengsel krijgt dan meer zuurstof erbij, wat ervoor zorgt dat het luchtmengsel niet explosief of brandbaar wordt door de hoge concentraties mestgassen.

Ook tijdens lasactiviteiten moet er genoeg doorgelucht worden zodat de kans op een ontsteking minimaal is. Hetzelfde geldt voor het uiers branden en het slijpen van de hoeven, in het geval dat dat gebeurt op de vloer van de melkveestal.

7.5.2 Niet mixen tijdens bepaalde weersomstandigheden

Ook al staat het op de planning, het is niet altijd het beste moment om te mixen. Om de brand- en explosierisico's maar ook de gezondheidsrisico's te verminderen, is het niet verstandig om te gaan mixen op een dag met windstilheid. De mestgassen die vrijkomen bij het mixen kunnen dan nergens heen, en dan zal de concentratie van deze mestgassen behoorlijk oplopen in de hele stal, wat de kans op explosie of brand vergroot, en de kans op gezondheidsrisico's voor mens en dier ook vergroot. Ook moet er worden gekeken waar de wind vandaan komt. Als de wind precies in de mixput waait, waait de wind eigenlijk alle mestgassen in de mestkelder naar een bepaald punt toe waar ze dan allemaal vrijkomen.

Daarom moet er worden gemixt op dagen met voldoende wind en mogelijkheden voor beluchting, en moet er worden gekeken naar de windrichting, en moet er niet worden gemixt als de wind de mixput in kan waaien.

7.6 Slijpen van koeienhoeven en uiers branden op een veilige plek met een dichte vloer, waar het niet mogelijk is om vonken tussen de spleten te laten komen

Het slijpen van koeienhoeven en het uiers branden boven de vloer is risicovol. Ook als er niet wordt gemixt kan het voorkomen dat er een LEL-level wordt bereikt door de mestgassen. Zeker in gevallen waar schuimvorming plaatsvindt. Daarom is het niet verstandig om boven de vloer van de kelder de koeienhoeven te slijpen of de uiers te branden. Geadviseerd wordt om dit te doen op een plek waar een dichte vloer is. Dit geldt ook voor het lassen, maar dat is niet altijd mogelijk om dat op andere plekken te doen. Dan moet er gekeken worden naar de maatregelen bij 7.5 en 7.7.

7.7 Speciale rubberen matten die makkelijk te verplaatsen zijn om te leggen op de vloer tijdens lassen, uiers branden, slijpen etc.

Tijdens het lassen is het belangrijk dat de lasvonken niet in de spleten van de vloer komen, en op die manier in de kelder belanden waar de mestgassen een hogere concentratie hebben. Als er op de vloer een rubberen mat wordt gelegd die makkelijk te verplaatsen is, zorgt dit ervoor dat de lasvonkjes niet in de kieren en spleten van de vloer belanden.

Dit zelfde geldt ook voor als er uiers worden gebrand of hoeven worden geslepen boven de vloer.

Dit is een simpele en goedkope maatregel die elke boer makkelijk kan doen. Toch zorgt dit er voor dat er een hoop ontstekingsbronnen onschadelijk worden gemaakt, omdat de vonkjes hierdoor niet in aanraking kunnen komen met een hoge concentratie van mestgassen.

7.8 Niet roken in de stal

Het spreekt eigenlijk voor zich, maar toch komt het voor en is dat tijdens dit onderzoek ook naar voren gekomen. Niet roken in de stal, en helemaal niet boven de roostervloer. Roken zorgt voor genoeg vonkjes en een vonkje kan voor een ontsteking zorgen wat kan leiden tot een brand of explosie. Daarom mag er absoluut niet worden gerookt boven de vloer.

7.9 Bewustwording boeren

Uit het gesprek met Jetty Middelkoop kwam ook naar voren dat de veiligheidsexperts uit verschillende industriële sectoren met verbazing kijken naar de risico's van de mestgassen in boerderijen. Waar er in de industriële sectoren overal maatregelen voor zijn, zijn er bij de boerderijen weinig maatregelen genomen waaruit blijkt dat er veel rekening gehouden wordt met de risico's. Een aanbeveling van Jetty Middelkoop was dan ook dat er meer bewustwording moest komen bij de boeren en de gehele sector. Kennis is ook veiligheid, en als er in de melkveehouderij meer bewustwording en kennis is van de gevaren rondom de mestgassen, worden er ook meer maatregelen genomen die de risico's verminderen. Daarom moet er een andere houding komen t.o.v. de melkveehouderij, door zowel de sector zelf als daarbuiten. Er moet meer aandacht komen voor de gevaren en risico's, en er moeten duidelijke richtlijnen en regels komen hoe daarmee moet worden omgegaan.

7.9.2 Arbocatalogus of RI&E

Het is belangrijk dat de boeren een Risico Inventarisatie en Evaluatie tot hun beschikking hebben. In deze RI&E staan alle verschillende risico's op het bedrijf. Het is van belang dat elke werknemer bewust is van deze risico's, zodat die zich niet in gevaarlijke situaties kan begeven. In de Arbocatalogus staan ook verschillende richtlijnen waaraan een werkgever zich moet houden, die ervoor zorgen dat de werknemer niet in gevaar wordt gebracht. In verschillende industriële sectoren waar gewerkt wordt met gevaarlijke stoffen, zijn er veel richtlijnen waaraan gehouden moet worden. De veiligheidsexperts uit die sectoren verbazen zich erover dat er zo weinig maatregelen worden genomen bij de boerderijen, terwijl ze vinden dat de boeren met een even groot risico te maken hebben als in de industriële sector. De richtlijnen uit de Arbocatalogus kunnen de boeren beter op weg helpen om de situatie wat veiliger te maken, en de RI&E zal wat meer bewustzijn bijbrengen en meer inzicht in de specifieke gevaren in de melkstal.

Preventieve oplossingen gezondheidsrisico's:

7.10 Raam dicht van de trekker, persoon mag niet in de trekker zitten.

Tijdens het mixen moet de trekker zorgen voor de motorkracht van het mixen. Vaak blijft de boer op de trekker zitten nadat het mixapparaat is aangesloten op de trekker. Indien er een verkeerde wind staat die alle vrijkomende mestgassen richting de trekker blaast, kan de persoon die in de trekker zit in één keer een hoop mestgassen in zijn cabine krijgen, als het achterraam van de trekker openstaat.

Dat kan leiden tot bewusteloosheid of andere gezondheidsrisico's. In een zeer extreem geval kan het zelfs fataal zijn. Daarom is het belangrijk dat het achterraam van de trekker altijd dichtzit als er iemand in de trekker zit tijdens het mixen. Ook wordt geadviseerd om niet in de trekker te blijven zitten, maar meteen de trekker te verlaten na het starten.

7.11 Geen personen dicht bij de mixput.

Tijdens het mixen moet er worden geprobeerd om niet dicht bij de mixput te komen. Zeker als er sprake is van een open mixput, kan een windvlaag die een hoop mestgassen naar boven brengt al ernstige gezondheidsrisico's met zich meebrengen. Ook kan er in de openstaande mixput worden gevallen, wat fataal kan aflopen.

De boer moet er ook voor zorgen dat tijdens het mixen er geen kinderen in de buurt van de stal mogen spelen, en niet in de buurt van de mixput mogen komen. Kinderen zijn zich niet bewust van het gevaar, en kunnen makkelijker in de put vallen of bedwelmd raken in de stal tijdens het mixen.

7.12 Gebruik een handmeter.

In het geval dat een persoon toch in de buurt moet zijn van de mixput of in de melkveestal tijdens het mixen, wordt er geadviseerd om altijd een handmeter te dragen. Dit is een kleine aanschaffing, maar als die zorgvuldig wordt gebruikt kan dat wel levens redden. De handmeter geeft op tijd aan wat de verschillende concentraties van mestgassen zijn. Hierdoor wordt een persoon vroegtijdig gealarmeerd dat er een hoge concentratie van een bepaald gas is.

7.12.2 Meetopstelling gasmelder

In het interview met Jetty Middelkoop is er gesproken over een prototype van een meetopstelling voor de verschillende mestgassen. De bedenker, Siebolt Visser, heeft volgens Jetty Middelkoop een werkzaam meetsysteem gemaakt met een soort stoplicht met de kleuren groen, oranje en rood. Op het moment dat de meetsensoren een hoge concentratie mestgassen meten, verandert de kleur op het stoplicht. Bij veilige situaties staat het licht op groen, bij situaties waar het wat gevaarlijker kan zijn op oranje, en bij situaties waar er een gevaarlijke concentratie mestgassen aanwezig is op rood. Het is niet bekend hoeveel zo'n systeem zou kosten.

8. Deelvraag 5: Preparatieve en repressieve maatregelen

8.1 Preparatieve maatregelen

Om ervoor te zorgen dat er een adequaat respons komt op een brand of explosie, moeten er ook preparatieve maatregelen worden genomen. Dit zijn voorbereidende maatregelen om ervoor te zorgen dat de repressie zo goed mogelijk verloopt en dat alle nodige maatregelen al zijn genomen die in de repressie nodig zijn. In de eerste plaats liggen die maatregelen bij de brandweer en ambulance etc. om ervoor te zorgen dat zij goed voorbereid zijn om repressieve hulp te bieden bij een incident. Maar ook de boer zelf kan een aantal maatregelen nemen waardoor een adequate hulpverlening zo goed mogelijk kan worden gerealiseerd (Stol et al., 2016).

8.1.1 Aanwezigheid brandalarm

Om een snelle adequate repressie te verwezenlijken, is het van belang dat een brandje zo snel mogelijk wordt opgemerkt. Als er een brandalarm afgaat zodra er een brandje gedetecteerd wordt, kan de boer die zelf met een brandblusser nog blussen, in geval van een kleine beginnende brand. Als de brand al niet zelf meer te blussen is, kan de brandweer meteen worden gealarmeerd, waardoor de hulp sneller aanwezig is. Vaak zijn de boeren bezig op het land of elders dan in de melkveestal, en zullen ze niet meteen aanwezig zijn bij een brand. Een brandalarm zorgt ervoor dat de situatie niet snel kan escaleren zonder dat de boer het door heeft, en zorgt ervoor dat hulpverlening sneller gealarmeerd kan worden.

8.1.2 Aanwezigheid bluswater

Om ervoor te kunnen zorgen dat bij een stalbrand de brandweer adequaat kan handelen, is het van belang dat er een grote hoeveelheid bluswater in de buurt is waar de brandweer gebruik van kan maken. Het uitgraven van een slootje vlakbij de melkveestal is een relatief goedkope en effectieve optie, omdat er geen speciale waterleiding hoeft worden aangelegd of een wateropslagplaats. Indien het voor de boer mogelijk is om een sloot dicht in de buurt te kunnen verlengen, kan dit ervoor zorgen dat de brandweer sneller water tot beschikking heeft om te blussen (RIVM, 2016).

8.1.3 Vergroten bereikbaarheid voor de hulpverleners

In het geval van een brand of een persoon die in de mestkelder is gevallen, moet er z.s.m. hulpverlening komen zoals brandweer en ambulance. Maar deze moeten wel naar de melkveestal kunnen om de hulp te verlenen. Daarom moet er voor worden gezorgd dat er altijd ruimte genoeg is op het pad om een brandweerwagen of ambulanceauto door te kunnen laten. Het mag eigenlijk niet gebeuren dat er een trekker of andere objecten staan die de weg naar de melkveestal blokkeren om wat voor reden dan ook.

8.1.4 Informatie voor de hulpverleners

In het geval van een stalbrand door een steekvlam na ontsteking van de mestgassen, moet de brandweer er aan te pas komen. Op het moment dat de brandweer arriveert, is het cruciaal dat de brandweer voldoende informatie krijgt over de situatie. Gebruikelijke vragen die dan ter plekke gesteld worden aan de boer gaan over de volgende onderwerpen:

- Indeling/plattegrond van de stal
- Aanwezige materialen en stoffen in de stal
- Aanwezige dieren in de stal
- Aanwezige mensen/dieren en/of materialen die naast de stal die in brand staat staan (Looije et al., 2010).

Deze informatie is erg belangrijk voor de brandweer om zo goed mogelijk te werk kunnen gaan. Op zo'n moment is het voor een boer best hectisch. Het kan dus voorkomen dat een boer niet alles precies weet op dat moment. Ook duurt het bevragen van de boer enige tijd voor de brandweer. Daarom is het verstandig om van tevoren een informatielijst of -bord te hebben waar deze

informatie op staat. Dan kan de boer op dat moment andere dingen doen, en heeft de brandweer meteen de nodige informatie.

8.1.5 Ontruimingsplan

In het geval dat er een grote stalbrand komt, is het van belang dat er zoveel mogelijk koeien hier gered worden en niet omkomen in de brand. Hierom is het belangrijk dat er een ontruimingsplan wordt gemaakt door de boer zelf, waar hij bepaalde maatregelen in neemt, die hij op dat moment kan uitvoeren zodat de koeien zeer snel de stal kunnen verlaten naar een veilige en afgezette plek. Dat laatste is ook erg belangrijk, omdat het voor zowel de koe als de brandweer van belang is dat de koeien in alle paniek niet over het erf rennen waar ze hulpverleners in de weg lopen, of dat ze weer terug naar de stal rennen. Dit is eerder voorgekomen (Looije et al., 2010).

Dit ontruimingsplan kan per boer erg verschillend zijn, als er maar voor gezorgd kan worden dat er in zeer korte tijd alle koeien uit de stal kunnen worden gehaald en naar een veilige afgezette plek worden gebracht, waar ze niet ergens anders heen kunnen. Het is belangrijk dat de boer van tevoren al zo'n plan heeft, en dat ook heeft geoefend. Dit zou bijvoorbeeld geoefend kunnen worden als de koeien weer de weide in mogen.

8.1.6 Takel of lier

Zorg voor een takel en/of lier om iemand snel uit de mestkelder, mixput of mesttank te halen. Als iemand in de mest ligt, duurt het erg kort voordat hij zijn bewustzijn verliest. Dit is wel te leiden uit de hoge concentraties H₂S in de mest (Middelkoop). Daarom is het van uiterst belang om een takel of lier in de buurt te hebben zodat als er een knecht of familielid in de buurt is de persoon uit de mest kan trekken, zonder zichzelf in levensgevaar te brengen door te dicht bij de mestkelder of mesttank te staan.

8.2 Repressieve maatregelen

De repressie is de vierde schakel in de veiligheidsketen, en kijkt naar alle maatregelen die kunnen worden genomen om het risico/gevaar tijdens het incident zo goed mogelijk te verhelpen. Hier wordt gekeken naar maatregelen die door de boer kunnen worden genomen om een eventuele brand of explosie zo goed mogelijk te blussen en de schade te beperken, zodat er geen ernstige gevolgen zitten aan het incident (Stol et al., 2016).

8.2.1 Brandblussers in de stal

Ten tijde van een brand kan de boer zelf al wat doen om de brand te blussen, zeker als het nog maar een kleine beginnende brand is. In dat geval is het van belang dat de boer een brandblusser in de stal heeft hangen. Hiermee kan hij de beginnende brand nog blussen, voordat die zich weet uit te breiden.

Een sprinklerinstallatie is in dit geval effectiever, omdat die ook werkt als de boer niet aanwezig is tijdens het beginnen van de brand. Maar een sprinklerinstallatie kost ongeveer €140.000 euro, afhankelijk van de grootte van het bedrijf en de hoeveelheid ligboxen (Looije et al., 2010). Deze investering is voor veel bedrijven niet financieel te dragen. Daarom is het wel van belang dat er sprake is van een brandblusser zodat de boer zelf een beginnend brandje kan blussen. Dit in combinatie met een brandmelder kan ervoor zorgen dat de brand vroegtijdig kan worden geblust en zo geen grote schade kan veroorzaken.

8.2.2 Breuklijn zodat niet de hele vloer klapt.

Als er een explosie ontstaat bij een emissiearme vloer, is het van belang dat niet de vloer uit z'n voegen knalt, en omhoog schiet op bepaalde plekken waar een koeien zich bevinden. Daarom is het van belang dat er bepaalde plekken zijn in de vloer waar zich een breuklijn bevindt. Deze breuklijn is een zwakker stuk vloer, die als eerste omhoog komt bij een explosie. De druk kan dan via deze breuklijnen ontsnappen, wat ervoor zorgt dat de vloer niet geheel omhoog komt. Deze breuklijnen

worden dan zodanig geplaatst op plekken waar zo min mogelijk schade ontstaat bij een explosie. Hierdoor wordt er voorkomen dat er geen koeien in de mestkelder kunnen vallen door een explosie, en dat de schade beperkt blijft.

8.2.3 Backup flesje ademlucht

Als de boer gevaarlijke ruimtes betreedt, is het belangrijk dat hij een backup flesje ademlucht heeft. In het geval van een defect ademluchtsysteem bij aanraking met bepaalde concentraties mestgassen, kan hij de gevaarlijke ruimte toch nog ontkomen met behulp van een flesje met ademlucht. Dit zorgt ervoor dat hij niet bewusteloos raakt door het snakken naar adem terwijl er allemaal schadelijke concentraties mestgassen aanwezig zijn. En door middel van dit flesje nog weg te kunnen, voorkom je dat je bewusteloos raakt in een gevaarlijke ruimte met mestgassen, die de gezondheid na bewusteloos raken nog verder kan aantasten of zelfs iemand zal doden (Stigas, z.d.).

8.2.4 Bedrijfshulpverlener mestgassen

Het is belangrijk dat er iemand op het bedrijf is, die eigenlijk zelf niet kans heeft om in gevaar te komen met mestgassen, die weet hoe je moet redden en hoe er moet omgegaan worden met iemand die in de aanraking is gekomen met mestgassen en eventueel bedwelmd is geraakt. Snelle en juiste hulp kan hierbij levens redden, en het duurt toch altijd even voordat hulpdiensten aanwezig zijn. Een korte cursus om bedrijfshulpverlener te worden kan in geval van nood levens redden (stigas, z.d.).

9. Conclusie

Methaanexplosies in melkveestallen zijn een gevaar voor boeren, koeien en technisch personeel. In dit onderzoek is op basis van literatuurstudie, interviews en schouws onderzocht hoe deze risico's verminderd kunnen worden.

De verschillende mestgassen hebben allemaal verschillende eigenschappen en risico's. Ammoniak en waterstofsulfide zijn giftig bij inademing. De concentraties aan waterstofsulfide die zich in mestkelders bevinden kunnen dodelijk zijn. Deze mestgassen hebben de afgelopen jaren tot meerdere overlijdensgevallen geleid. Bij methaan is er met name sprake van brand- en explosierisico's. Vooral bij het mixen van mest waar schuimvorming kan leiden tot plotseling verhoogde concentraties, waardoor het LEL-niveau wordt bereikt en bij ontsteking brand of explosie kan plaatsvinden. Bij de open roostervloeren zal dit leiden tot een steekvlam, die een stalbrand kan veroorzaken. Bij de meer gesloten emissievrije vloeren kan de drukopbouw onder de vloer dan moeilijk ontsnappen, waardoor een explosie ontstaat en de vloer omhoog komt. Beide scenario's kunnen grote gevolgen hebben voor mens en dier.

De verschillende risico's bij de mestgassen methaan, ammoniak en waterstofsulfide zijn de brand- en explosierisico's bij methaan, voornamelijk tijdens het mixen en als er sprake is van schuimvorming. Bij ammoniak en waterstofsulfide zijn dat voornamelijk gezondheidsrisico's, vanwege de giftigheid van deze mestgassen. Vooral hogere concentraties waterstofsulfide kunnen dodelijk zijn.

De omstandigheden die een ontsteking kunnen veroorzaken wat kan leiden tot een brand of explosie, zijn de verschillende robots in de eerste plaats. Met name het laadstation van de mestrobot die meestal een vonk geeft tijdens het opladen, kan een ontsteking van mestgassen veroorzaken, omdat die vlak boven de vloer staat en boven de spleten. Ook de borstelrobots veroorzaken weleens een vonkje. Daarnaast zijn er verschillende werkzaamheden die in de melkveestal gebeuren, die een ontsteking kunnen veroorzaken. Deze zijn laswerkzaamheden boven de vloer, het branden van uiers boven de vloer en het slijpen van de koeienhoeven boven de vloer. Als laatste is er nog de trekker die de mixer aanstuurt. Hier kan een warm roetdeeltje uit de uitlaat in de mixput vallen, als er geen deksel op zit. Een bijkomend probleem is dat als er geen deksel op zit en de mixput open is, er tijdens het mixen wind in kan blazen vanuit een bepaalde richting. Deze wind blaast de mestgassen in de kelder naar één bepaald punt, waar de concentratie dan erg hoog is. De andere kant van de stal is vaak de plek waar ook het laadstation van de mestrobot staat.

De hoofdvraag '*Hoe kunnen de risico's op branden en gasexplosies die ontstaan door de mestgassen bij melkveestallen geminimaliseerd worden*' kan worden beantwoord door de deelvragen 3,4 en 5 te beantwoorden. In de onderstaande schema's staat een overzicht van de verschillende mogelijkheden hoe de brand- en explosierisico's in de melkveestallen geminimaliseerd kunnen worden op proactief, preventief en preparatief en repressief niveau.

Op proactief gebied zijn er verschillende mogelijke oplossingen die ervoor zorgen dat er in de melkveestallen een zeer kleine kans is dat er een hoge concentratie mestgassen wordt bereikt. In onderstaande tabel staan verschillende opties en wordt er aangegeven hoe effectief en economisch haalbaar die opties zijn.

Tabel proactieve oplossingen

Proactieve oplossingen	Economische aantrekkelijkheid	Nadelen
Mest uit de stal halen. Dit kan d.m.v. een kelderloze stal of regelmatig uit de kelder pompen en opslaan in	Bij nieuwbouw goedkoper dan een	Meer ruimte nodig,

mestsilo. Hoewel het bouwen van een kelderloze stal niet goedkoop is, blijkt wel dat het goedkoper is dan een 'normale' stal met kelder. Als een boer toch van plan is een nieuwe stal te bouwen of een huidige stal te renoveren, is een kelderloze stal economisch juist aantrekkelijker.	klassieke stal. Verbetering dierwelzijn.	voornamelijk voor mestsilo. Verbouwing naar kelderstal is duur.
Biofiltratie. Dit kan zowel de Lely Sphere betreffen als andere biofilters. Biofiltratie is een zeer effectieve proactieve maatregel, omdat bijna alle emissies worden weggezogen uit de stal.	Hoge investering, deels terug te verdienen wegens emissiereductie. In de toekomst eventueel meer.	Prijs.
Temperatuur verlagen in de kelder en stal. Dit kan door een koelinstallatie of een warmtewisselaar, maar ook door dakisolatie. Dit brengt voordelen mee zoals emissiereductie in de mest, maar ook dierwelzijn.	Hoge investering. Indien er met een warmtewisselaar wat gedaan kan worden met de warmte, is deze optie economisch niet echt haalbaar.	Prijs
Schuimvorming tegengaan. Of het door aanpassingen in het voer is of door toevoeging van mineralenmixen, het bestrijden van schuimvorming is een effectieve proactieve oplossing om de kans op een brand of explosie door de mestgassen te verminderen. Zeker bij schuimvorming is er een vergrotende kans op het bereiken van een LEL-grens tijdens het mixen, en ook als er niet wordt gemixt kunnen de schuimbellen explosief genoeg zijn bij een ontsteking.	Deze optie is economisch ook haalbaar voor de boeren	Regelmatig toevoegen van mineralen aan de mest. Effectiviteit niet voor altijd. Ook is het nog niet grootschalig wetenschappelijk getest.
Additieven voor de mest. Deze additieven die aan de mest kan worden toegevoegd werken effectief om vooral de ammoniakemissie te verminderen. Ook zijn dit soort additieven economisch haalbaar.		Regelmatig toevoegen van mengsels aan de mest. In sommige gevallen kan de methaanemissie verhoogt, terwijl de ammoniakemissie omlaag gaat.

Op preventief gebied zijn er verschillende oplossingen die ervoor zorgen dat de kans op een ontsteking van mestgassen erg klein is. In onderstaande tabel staan een aantal mogelijke opties.

Tabel preventieve oplossingen

Preventieve oplossingen	Economische	Nadelen
-------------------------	-------------	---------

	aantrekkelijkheid	
Activiteiten uit tijdens het mixen. Zowel de mestrobot, de borstelrobot als werkzaamheden zoals lassen, slijpen en uiers branden moeten tijdens het mixen uit staan. Het is erg riskant om deze ontstekingsbronnen aan te hebben tijdens het mixen, waar er een hogere concentratie mestgassen ontstaat.	Deze maatregel kost niks voor de boeren.	
Dichte ondergrond bij ontstekingsbronnen. Dit geldt zowel voor een dicht stuk vloer bij het laadstation van de mestrobot en onder de borstelrobots, maar ook de verplaatsbare mat die op de vloer gelegd kan worden tijdens werkzaamheden zoals lassen, uiers branden en slijpen waar vonken bij vrijkomen.	De vloer moet worden gedicht, dit kan verschillen in de kosten, maar zal geen dure optie zijn. Ook de verplaatsbare mat zal wat kosten, maar niet veel.	De mat wordt gauw erg vies vanwege de mest op de vloer. Ook is er een opbergplek voor nodig.
Deksel voor de mixput. Het is belangrijk dat de mixput een dicht deksel heeft en geen losse planken. Het deksel zorgt er voor dat tijdens het mixen er geen warm roetdeeltje uit de uitlaat van de trekker in de mixput terecht kan komen, en voorkomt dat de wind in de kelder kan blazen waardoor alle mestgassen naar één kant worden geblazen.	Een deksel kost wel wat, maar is geen dure optie.	
Rekening houden met weer tijdens mixen. Tijdens het mixen is voldoende doorluchten erg belangrijk. Dit is echter alleen mogelijk als er voldoende wind staat en ook vanuit een goede richting. Daarom moet er alleen gemixt worden als het weer gunstig is.	Deze maatregel kost niks voor de boeren.	Niet altijd handig i.v.m. de planning.
Werkzaamheden met kans op ontsteking niet boven de vloer. Laswerkzaamheden, slijpen en uiers branden zijn werkzaamheden waar vonken ontstaan. Het is belangrijk dat die werkzaamheden niet boven de vloer gebeuren. Bij schuimvorming kunnen die vonken een brand of explosie veroorzaken, ook al wordt er niet gemixt.	Deze maatregel kost niks voor de boeren.	Extra tijd kwijt om werkzaamheden naar veilige plek te verplaatsen.
Bewustwording in de sector van het gevaar en de risico's rondom de mestgassen en de ontstekingsbronnen.		

Op preparatief en repressief gebied zijn er verschillende oplossingen die ervoor zorgen dat tijdens een brand of explosie er adequaat gehandeld kan worden en de schade beperkt zal houden.

Preparatieve en repressieve oplossingen	Economische aantrekkelijkheid	Nadelen
Aanwezigheid brandalarm. Een brandalarm kan ervoor zorgen dat de boer op tijd gealarmeerd wordt om een beginnend brandje te blussen. Ook zorgt dit ervoor dat er sneller de hulpdiensten gealarmeerd kunnen worden.	De aanschaf van een brandalarm is niet duur, en als er op tijd een beginnende brand mee wordt geblust, bespaard dat een hoop	

	schade.	
Ontruimingsplan. Een ontruimingsplan om ervoor te zorgen dat de koeien bij een brand zo snel mogelijk uit de stal kunnen is erg belangrijk voor zowel de dieren zelf als het adequaat hulpverleners van de brandweer.	Deze maatregel kost niks voor de boeren.	Kost tijd om dit voor te bereiden en te oefenen.
Breklijn bij de emissiearme vloer. Om ervoor te zorgen dat de druk tijdens een ontsteking van mestgassen toch weg kan, is een breuklijn die zwakker is dan de rest van de vloer erg effectief om ervoor te zorgen dat de druk op die plekken kan vrijkomen. Dit zorgt ervoor dat niet de hele vloer omhoog wordt geklapt.	De aanleg van een breuklijn kost wel wat, maar bespaart een hoop schade in geval van een explosie.	

Aanbevelingen

In dit onderzoek zijn er verschillende mogelijke maatregelen naar voren gekomen die de risico's op brand of explosie door mestgassen in de melkveestallen minimaliseren. Hieronder komt een overzicht met de belangrijkste maatregelen die worden aanbevolen aan de boeren.

- Kelderloze stal: Aan de kelderloze stal zitten een hoop voordelen. Om helemaal van de brand- en explosierisico's en gezondheidsrisico's van mestgassen in de melkveestal af te zijn, is een kelderloze stal de beste optie. De mestsilo is een veel betere opslagplek dan een kelder onder de stal.
- Schuimvorming tegengaan: Schuimvorming is een zeer groot bijkomend risico in de melkveestal als er gekeken wordt naar brand- en explosiegevaar. Daarom is het cruciaal dat hiertegen gevochten wordt. Dit kan door aanpassingen in het voer, of door mineralentoevoegingen.
- Activiteiten uit tijdens het mixen: De mestrobot en borstelrobots moeten tijdens het mixen uit staan. Ook werkzaamheden zoals lassen, uiers branden en slijpen van koeienhoeven mogen tijdens het mixen niet plaatsvinden.
- Dichte ondergrond bij ontstekingsbronnen: Zorg voor een dicht stuk vloer bij het laadstation van de mestrobot en de borstelrobots. Ook tijdens lassen, uiers branden en slijpen van koeienhoeven moet er een dichte ondergrond zijn. Dit kan een andere plek zijn dan de vloer, maar als dat niet mogelijk is, moet er voor een mat worden gezorgd die op de vloer wordt gelegd waardoor vonken niet meer in de spleten van de vloer terecht kunnen komen.
- Deksel voor de mixput: Losse planken boven de mixput moet verleden tijd worden. Er moet een dicht deksel komen die ook grotendeels dicht kan tijdens het mixen.
- Mixen alleen als het weer gunstig is: Het mixen mag enkel alleen gebeuren tijdens gunstig weer, waar er voldoende wind is van de zijkanten, waardoor er voldoende ventilatie is tijdens het mixen. Vermijd mixen bij windstil weer, ook als het op de planning staat.
- Brandalarm: Een brandalarm kan ervoor zorgen dat een beginnend brandje nog op tijd geblust kan worden. Ook kunnen de hulpdiensten sneller gealarmeerd worden, omdat een brand eerder wordt opgemerkt. De boer is immers niet altijd in de stal bezig.
- Breuklijn in een emissiearme vloer: De schade van een explosie kan enorm worden beperkt met een breuklijn. Dit zorgt ervoor dat niet de hele vloer klapt, maar dat slechts een aangewezen gedeelte sneuvelt om de druk weg te kunnen laten gaan.

Als deze aanbevelingen worden opgevolgd door de boeren, zullen de risico's op brand, explosie en gezondheidsgevaar in de melkveestallen verminderen. Uiteraard kan er altijd van alles mis gaan, een ongeluk zit tenslotte in een klein hoekje.

10. Bronnenlijst

- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2016). *De Nederlandse landbouw en het klimaat*. Geraadpleegd van: https://www.rvo.nl/sites/default/files/2016/12/RVO_De%20Nederlandse%20landbouw%20en%20het%20klimaat_Broch_def.pdf
- Wageningen University & Research (2019). *Keldermetingen methaan en ammoniak*. Geraadpleegd van: <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksprojecten-LNV/Expertisegebieden/kennisonline/Keldermetingen-methaan-en-ammoniak.htm>
- Wageningen University & Research (2014). *Elke boer aan de emissiearme vloer*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/297651>
- Geertsma, P. (2017). *Wat zijn explosiegrenzen LEL en UEL?* Geraadpleegd van: <https://www.technischwerken.nl/kennisbank/veiligheid-kennisbank/wat-zijn-explosiegrenzen-lel-en-uel/>
- Groot, Arthur; Coffeng, Peter; Bulkman, Corné; Siegert, Helger (2009). *Dossier Explosieveiligheid*. Geraadpleegd van: http://www.arbokennisnet.nl/images/dynamic/Dossiers/Explosieveiligheid_en_verstikkingsgevaar/D_Explosieveiligheid.pdf
- Hall, B. (2018, 14 februari). *Understanding Lower Explosive Limit (LEL)*. egasdepot.com. Geraadpleegd van: <https://egasdepot.com/blog/understanding-lower-explosive-limit-lel/>
- Brandweer Nederland. (z.d.). *Hoe ontstaat brand?* Geraadpleegd van: <https://www.brandweer.nl/voor-de-jeugd/hoe-ontstaat-brand>
- Industrial Scientific. (z.d.). *LEL of combustibale gas*. Geraadpleegd van: <https://www.indsci.com/en/training/general-gas-education/lel-of-combustible-gas/>
- Safety & Detection. (z.d.). *Waterstofsulfide: een onderschat gas?!* Geraadpleegd van: [https://www.safetymetings.be/waterstofsulfide-een-onderschat-gas/#:~:text=De%20LEL%20\(lower%20explosion%20limit,van%20H2S%20is%205%20ppm.](https://www.safetymetings.be/waterstofsulfide-een-onderschat-gas/#:~:text=De%20LEL%20(lower%20explosion%20limit,van%20H2S%20is%205%20ppm.)
- Wageningen University & Research. (2016). *Mestgassen uit melkveemest: jaarrond metingen van H2S-concentraties*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/401764>
- Van de putte Safety. (z.d.). *Gasdetectie*. Geraadpleegd van: <https://www.vdp.com/resources/34/11.pdf>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (28-08-2020). *Mest gebruiken en uitrijden*. Geraadpleegd van: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mest/gebruiken-en-uitrijden>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (20-01-2021). *Wanneer mest uitrijden?* Geraadpleegd van: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mest/gebruiken-en-uitrijden/wanneer-mest-uitrijden>

Bioaktiv. (z.d.). *Drijfmest*. Geraadpleegd van: <https://bioaktiv.nl/mest/drijfmest/>

Dekeyser, D. (03-05-2016). *Mest mixen: een noodzaak, maar doe het veilig!* Geraadpleegd van: [https://deloonwerker.be/mest-mixen-noodzaak-veilig/#:~:text=Mechanisch%20mengen%20van%20mest%20is,gang%20brengen%20\(horizontaal%20mixen\)](https://deloonwerker.be/mest-mixen-noodzaak-veilig/#:~:text=Mechanisch%20mengen%20van%20mest%20is,gang%20brengen%20(horizontaal%20mixen)).

BeSWIC. (13-06-2012). *Waterstofsulfide: een dodelijk gevaar*. Geraadpleegd van: <https://www.beswic.be/nl/blog/waterstofsulfide-een-dodelijk-gevaar?language=nl#:~:text=Waterstofsulfide%20is%20een%20dodelijk%20gas,bodem%20van%20een%20septische%20put>.

Wageningen University & Research. (z.d.). *Dossier Ammoniak*. Geraadpleegd van: <https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/Ammoniak-1.htm>

Benders, L. (30-11-2016). *Validiteit en betrouwbaarheid vaststellen in je scriptie*. Geraadpleegd van: <https://www.scribbr.nl/onderzoeksmethoden/validiteit-en-betrouwbaarheid-vaststellen-scriptie/>

Swaen, B. (10-10-2013). *Wat is kwalitatief en kwantitatief onderzoek?* Geraadpleegd van: <https://www.scribbr.nl/onderzoeksmethoden/kwalitatief-vs-quantitatief-onderzoek/>

Dingemans, K. (08-09-2015). *Soorten interviews*. Geraadpleegd van: <https://www.scribbr.nl/onderzoeksmethoden/soorten-interviews/#semigestructureerd>

Wageningen University & Research. (17-12-2020). *Agriamatie – informatie over de agrosector*. Geraadpleegd van: [https://www.agriamatie.nl/ThemaResultaat.aspx?subpubID=2232&themalID=2272&indicatorID=2100§orID=2245#:~:text=Het%20gemiddelde%20aantal%20melkkoeien%20per,gestopt%20\(2%20C3%25\)](https://www.agriamatie.nl/ThemaResultaat.aspx?subpubID=2232&themalID=2272&indicatorID=2100§orID=2245#:~:text=Het%20gemiddelde%20aantal%20melkkoeien%20per,gestopt%20(2%20C3%25)).

Benders, L. (24-08-2020). *Triangulatie (mixed methods) in je scriptie*. Geraadpleegd van: <https://www.scribbr.nl/onderzoeksmethoden/triangulatie-mixed-methods/>

Overheid Vlaanderen. (z.d.). *Vlinderdasmodel*. Geraadpleegd van

<https://overheid.vlaanderen.be/organisatie/risico-en-bedrijfscontinu%C3%AFteitsmanagement/vlinderdasmodel>

Overheid.nl wettenbank. (01-01-2021). *Arbeidsomstandighedenbesluit*. Geraadpleegd van: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0008498/2021-01-01#Hoofdstuk3>

Stol, W; Tielenburg, C; Rodenhuis, W; Kolthoff, E; Van Duin, M; Veenstra, S (2016). *Basisboek Integrale Veiligheid*.

Westfalen. (23-11-2010). *Veiligheidsinformatieblad methaan*. Geraadpleegd van: <https://taalegas.nl/veiligheidsbladen/Veilighheidsblad%20Methaan.pdf>

Van der Woude, Irene. (2013). *Mogelijke gezondheidseffecten van alternatieve energiebronnen*. Geraadpleegd van: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/gezondheidsaspecten-v56-618333-bw.pdf>

Šebek, L.B.J.; Schils, R.L.M. (2006). *Implementatie van reductiemaatregelen op praktijkbedrijven binnen project Koeien & Kansen*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/27395>

Starmans, D.A.J.; Blanken, K.; Kupers, G.C.C.; Timmerman, M. (2009). *Schuimvorming op mest*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/371232>

Omgevingsdienst Twente. (2019). *Ongeval melkrundveestal met emissiearme vloer te Markelo*. Geraadpleegd van: https://www.hofvantwente.nl/fileadmin/files/hofvantwente/inwoners/actueel/Rapport_emissiearme_vloeren_HvT.pdf

Omgevingsdienst Twente. (31-01-2020). *Aandacht voor risico's mestputten*. Geraadpleegd van: <https://odtwente.nl/nieuws/1564817.aspx>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (z.d.). *Ammoniak*. Geraadpleegd van: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/ammoniak/>

Int. Gas & Services N.V. (14-11-2011). *Veiligheidsinformatieblad ammoniak*. Geraadpleegd van: http://www.igs-cymaco.be/pdf/4_nl.pdf

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (05-07-2016). *Veehouderij en gezondheid omwonenden*. Geraadpleegd van: <https://www.rivm.nl/publicaties/veehouderij-en-gezondheid-omwonenden>

Stigas. (2017). *Gevaren van mestgassen*. Geraadpleegd van: <https://www.stigas.nl/agroarbo/bijlagen/gevaren-van-mestgassen/>

Air Liquide. (11-11-2000). *Veiligheidsinformatieblad (MSDS)*. Geraadpleegd van: <https://www.arbo-binnenvaart.nl/userfiles/file/achtergrond%20blootstel%20gev%20stof/veiligheidsinformatieblad%20msds%20h2s.pdf>

Hazmatcat. (23-02-2020). *Waterstofsulfide (zwavelwaterstof, H₂S)*. Geraadpleegd van: <http://www.hazmatcat.nl/Rotting/Rottingsgassen/Waterstofsulfide/>

Sawakinome. (z.d.). *Difference between thermal decomposition and thermal dissociation*. Geraadpleegd van: <https://nl.sawakinome.com/articles/physical-chemistry/difference-between-thermal-decomposition-and-thermal-dissociation.html>

Enzler, S.M. (2010). *Schadelijke stoffen – zwaveldioxide*. Geraadpleegd van: <https://www.lenntech.nl/schadelijke-stoffen/zwaveldioxide.htm>

RTL Nieuws. (15-02-2020). *Drie doden per jaar door mestgassen: één ademteug en je bent weg*. Geraadpleegd van: <https://www.rtlnieuws.nl/nieuws/nederland/artikel/5022231/nog-altijd-mestongevallen-risico-aandacht>

Westfalen. (23-11-2010). *Veiligheidsinformatieblad methaan*. Geraadpleegd van: <https://taalegas.nl/veiligheidsbladen/Veilighheidsblad%20Methaan.pdf>

Dagblad van het Noorden. (12-05-2018). *Twee personen in Oldehove vallen in mestput*. Geraadpleegd van: https://www.dvhn.nl/groningen/Twee-personen-in-Oldehove-vallen-in-mestput-in-kritieke-toestand-naar-ziekenhuis-update-23173728.html?harvest_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

Dagblad van het Noorden. (22-05-2018). *Slachtoffer ongeval in Oldenhove overleden*. Geraadpleegd van: <https://www.dvhn.nl/groningen/Slachtoffer-ongeval-mestput-in-Oldehove-overleden-23202555.html>

Laarman, M. (24-01-2020). *Twee mannen van 75 en 49 jaar overleden na val in gierput*. Geraadpleegd van: <https://www.1limburg.nl/twee-mannen-van-75-en-49-jaar-overleden-na-val-gierput?context=topstory>

De Stentor. (21-01-2020). *Man overleden na val in gierput Borculo*. Geraadpleegd van: <https://www.destentor.nl/berkelland/man-overleden-na-val-in-gierput-in-borculo~a9a029d5/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

Obex. (z.d.). *Ontstekingsbron*. Geraadpleegd van: <https://www.obex.nl/kennisbank/ontstekingsbron/#:~:text=Een%20ontstekingsbron%20is%20een%20bron,zijn%20van%20een%20CE%20markering.>

Kuitert, G. (24-02-2019). *Schokkende beelden van koe die uit mest wordt getakeld in Markelo*. Geraadpleegd van: <https://www.tubantia.nl/hof-van-twente/schokkende-beelden-van-koe-die-uit-mest-wordt-getakeld-in-markelo~ab5ddfc1/#:~:text=Er%20was%20sprake%20van%20een,of%20ammoniak%20in%20de%20ogen.>

IAB. (24-02-2015). *Ontstekingsbronnen in ATEX zones*. Geraadpleegd van: <https://www.iab-ingenieurs.nl/ontstekingsbronnen-in-atex-zones/>

Hazmatcat. (23-02-2020). *Recente mestongevallen*. Geraadpleegd van: <http://www.hazmatcat.nl/Rotting/Mestgassen/Recente-mestongevallen/>

Nederlandse Melkveehouders Vakbond (NMV). (31-03-2021). *Onderzoeksraad voor veiligheid erkent extra risico bij toepassing emissiearme stallen*. Geraadpleegd van: <https://nmv.nu/onderzoeksraad-voor-veiligheid-erkent-extra-risico-bij-toepassing-emissiearme-stallen/>

Vellinga, T.; De Haan, M.; Evers, A. (2009). *Vermindering van de uitstoot van broeikasgassen op het melkveebedrijf*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/5358>

Bannink, A.; Šebek, L.B.J.; Dijkstra, J. (02-05-2009). Geraadpleegd van: https://agroenergiek.nl/system/files/documenten/boek/methaan_te_lijf_via_voer.pdf

Melkvee. (03-12-2020). *Snijmais geeft hogere methaanemissie in mest dan grasrantsoen*. Geraadpleegd van: <https://www.melkvee.nl/artikel/376980-snijmais-geeft-hogere-methaanemissie-in-mest-dan-grasrantsoen/>

Wageningen University & Research. (12-03-2021). *Zeewier als methaanremmer niet vrij van risico's*. Geraadpleegd van: <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/livestock-research/show-wlr/Zeewier-als-methaanremmer-niet-vrij-van-risicos.htm>

Koninklijke DSM NV. (2019). *Taking action on climate change, together*. Geraadpleegd van: https://www.dsm.com/content/dam/dsm/corporate/en_US/documents/summary-scientific-papers-3nop-booklet.pdf

- AgroEnergiek. (z.d.). *Maatregelen aan de mestopslag*. Geraadpleegd van: <https://agroenergiek.nl/thema/maatregelen-aan-de-mestopslag>
- Maverko. (z.d.). *Mestscheiden*. Geraadpleegd van: <https://www.maverko.nl/mestscheiden/>
- Melse, R.W. (04-2003). *Verwijdering van methaan uit ventilatielucht van een drijfmestopslag met een pilot-scale biofilter*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/294171>
- Melse, R.W. (10-2003). *Biologisch filter voor verwijdering van methaan uit lucht van stallen en mestopslagen*. Geraadpleegd van: https://agriconnect.nl/system/files/documenten/boek/55_biologisch_filter_voor_verwijdering_van_methaan_uit_lucht_van_stallen_en_mestopslagen_tcm24-240747.pdf
- Lely. (2020). *Sphere*. Geraadpleegd van: <https://www.lely.com/nl/sphere/>
- Huiden, F. (10-10-2020). *Ammoniak afzuigen met Lely Sphere*. Geraadpleegd van: <https://www.nieuweoogst.nl/nieuws/2020/10/10/ammoniak-afzuigen-met-lely-sphere>
- Commissie van de Europese Gemeenschappen. (15-11-1996). *Strategienota inzake het verminderen van de uitstoot van methaan*. Geraadpleegd van: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1996:0557:FIN:NL:PDF>
- Mosquera, J. (2017). *Overzicht van maatregelen om de ammoniakemissie uit de veehouderij te beperken*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/427311>
- De Zwart, H.F. (2004). *Energiezuinige koudeproductie systemen voor (semi) gesloten kassen*. Geraadpleegd van: <https://edepot.wur.nl/41129>
- Berg Fourage. (2021). *FX Mineralen*. Geraadpleegd van: <https://www.bergfourage.nl/fx/>
- Wageningen University & Research. (2008). *Verkenning perspective van Ureaseremmers voor beperking van ammoniakemissie uit Nederlandse melkveestallen*. Geraadpleegd van: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/121012>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (12-06-2018). *Maatregelen Omgevingsveiligheid*. Geraadpleegd van: <https://omgevingsveiligheid.rivm.nl/maatregelen#:~:text=Voorbeelden%20bouwkundige%20maatregelen%20explosie&text=Om%20mensen%20te%20beschermen%20tegen%20de%20gevolgen%20van%20een%20explosie,zoals%20glas%2C%20vliesgevel%20of%20grind.&text=Een%20dikkere%20gevel%20kan%20bescherming%20bieden%20tegen%20een%20explosie>.
- Looije, M.; Smit, M. (2010). *Brand in veestallen*. Geraadpleegd van: https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/rapport_brand_in_veestallen.pdf
- Stobbelaar, G. (06-10-2020). *De melkveehouderij van de toekomst*.

Bijlage

Bijlage 1: Topiclijst interview met Jetty Middelkoop

Topics	Voorbeeldvragen
Risico's methaan Methaan explosie Methaan brand Plek hoge concentraties Zuurstofverdrijvend methaan	Wat zijn de explosierisico's bij methaan? Waar kunnen er allemaal hoge concentraties methaan ontstaan in de melkveestal? Methaan is toch ook zuurstofverdrijvend?
Risico's ammoniak Gezondheidsrisico's ammoniak Ammoniak brand	Wat zijn de explosie/brandrisico's bij ammoniak? Wat zijn de gezondheidsrisico's bij ammoniak? Wat is het verschil tussen een ammoniakbrand en –explosie? Brand ammoniak mee als het LEL-niveau van ammoniak niet is bereikt maar dat van methaan wel?
Gezondheidsrisico's waterstofsulfide Waterstofsulfide brand Waterstof sulfide explosie	Wat zijn de gezondheidsrisico's van waterstofsulfide? Wat zijn de overige risico's bij waterstofsulfide?
Risico's mixen van mest	Wat zijn de risico's als de boeren de mest mixen? Wat doet het mixen met het Lower Explosion Level?
Schuimvorming	Wat is volgens u de oorzaak van schuimvorming? En wat kan ertegen gedaan worden?
Ontstekingsbronnen	Wat voor ontstekingsbronnen zijn er in de melkveestallen?
Preventieve maatregelen	Wat voor maatregelen kunnen de boeren zelf nemen op preventief niveau om ervoor te zorgen dat de risico's op brand en explosie en gezondheidsrisico's verminderen?

Bijlage 2: Topiclijst interview met Gerrit Stobbelaar

Topics	Voorbeeldvragen
Ontstekingsbronnen	Wat zijn de meest voorkomende ontstekingsbronnen in de melkveestallen? Wat zijn wat minder voorkomende ontstekingsbronnen in de melkveestallen? Op wat voor manier kunnen deze ontstekingsbronnen een explosie veroorzaken?
Plek van de ontstekingsbronnen	Zijn deze ontstekingsbronnen te verplaatsen naar een veiligere plek of zijn ze essentieel voor de boeren op die bepaalde plek?
Kans op ontsteken en veroorzaken explosie	Wat is de kans van elke ontstekingsbron dat het daadwerkelijk zal leiden tot een ontsteking en een explosie?
Plek explosie en omstandigheden explosie	Onder welke omstandigheden kan er een

	explosie plaatsvinden en op welke plek?
Proactieve maatregelen Maatregelen aan het voer	Wat voor maatregelen kunnen boeren nemen op proactief niveau om de risico's te verminderen? Wat voor maatregelen in het voer kunnen er genomen worden die de emissies reduceert?
Verschil methaanbrand en methaanexplosie	Wat is precies het verschil tussen een methaanbrand en een methaanexplosie?
Breuklijnen in de vloer	Wat houden breuklijnen in de vloer precies in en wat is het effect daarvan?

Bijlage 3: Topicijst Gert-Jan Monteny

Topics	Voorbeeldvragen
Houding fabrikanten emissiearme vloeren t.o.v. problematiek.	Hoe kijken de fabrikanten van de emissiearme vloeren naar de huidige problematiek als er gekeken wordt naar de stalexplosies?
Schuimvorming	Heeft u enig idee hoe schuimvorming precies ontstaat en wat ertegen gedaan kan worden?
Proactieve maatregelen Additieven aan de mest	Wat voor maatregelen kunnen boeren nemen op proactief niveau om de risico's te verminderen? Wat zijn bepaalde additieven aan de mest en hoe werken ze? Wat zijn de effecten daarvan op de emissies?

Bijlage 4: Overzicht zoekplaatsen informatie

De verschillende zoekplatformen die gebruikt worden om informatiebronnen te vinden voor het literatuuronderzoek staan hieronder vermeld:

- Google en Google Scholar
- Researchgate.net
- HBO kennisbank
- Duckduckgo
- Brave Browser(search engine)