Mestgassen uit melkveemest: jaarrond metingen van H_2S-concentraties

M. Timmerman

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Mestgassen uit melkveemest: jaarrond metingen van H_2S-concentraties

M. Timmerman

Wageningen Livestock Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research, gefinancierd door ZuivelNL.

Wageningen Livestock Research
Wageningen, december 2016

Rapport 1002

M. Timmerman, 2016. *Mestgassen uit melkveemest: jaarrond metingen van H_2S-concentraties.* Wageningen Livestock Research, Rapport 1002.

Samenvatting
Op een praktijk melkveebedrijf zijn jaarrond metingen uitgevoerd naar het voorkomen verhoogde waterstofsulfide (H_2S) concentraties in een mestkelder van een melkveestal voorzien van een H_2S-veiligheidssysteem. Daarnaast is een quick-scan uitgevoerd naar gepubliceerde onderzoeksresultaten over het vrijkomen van waterstofsulfide uit mest in melkveestallen. De resultaten lieten zien dat bij het mixen van mest na aanvang tot zeer snelle stijgingen in de H_2S-concentraties boven de mest leidt en (zeer) snel leidt tot een piekwaarden. Piekwaarden van meer dan 150 ppm H_2S blijken veelvuldig voor te komen. Ook blijkt de H_2S-concentraties voor een langere periode (> 15 minuten) verhoogd te zijn. De H_2S-concentraties kunnen sterk variëren zelfs wanneer de omstandigheden en handelswijze gelijk zijn. Ook tijdens het verpompen van het mest komt het regelmatig voor dat de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uitkomt. H_2S-concentraties van meer dan 10 ppm blijken ook te kunnen voorkomen als de mest niet wordt gemixt of verpompt. Het nemen van passende veiligheidsmaatregelen voor en tijdens het mixen van mest is noodzakelijk voor een veilige en gezonde werkomgeving.

Summary
On a commercial dairy farm year-round measurements were made into the occurrence of elevated hydrogen sulfide (H_2S) concentrations in a manure pit of a dairy barn, equipped with a H_2S-safety system. Also a short review of the literature was made. The results show that during manure mixing the H_2S-concentration rises very quickly after the start and leads (very) rapidly to a peak value. Peak concentrations of more than 150 ppm H_2S occurred frequently. The elevated H_2S concentrations remained frequently for longer periods of time (>15 minutes). The H_2S-concentrations can vary strongly even during periods in which operational circumstances and actions were equal. During pumping of manure it occurred frequently that the H_2S concentrations rose above 10 ppm. At times when manure is not being mixed or pumped the H_2S concentrations can be sometimes elevated to above 10 ppm. Taking appropriate safety measures before and during mixing of manure is a necessity for a safe and healthy working environment.

Dit rapport is gratis te downloaden op http://dx.doi.org/10.18174/401764 of op www.wur.nl/livestock-research (onder Wageningen Livestock Research publicaties).

© 2016 Wageningen Livestock Research
Postbus 338, 6700 AH Wageningen, T 0317 48 39 53,
E info.livestockresearch@wur.nl, www.wur.nl/livestock-research. Wageningen Livestock Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

Wageningen Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever of auteur.

De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op als onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Inhoud

Samenvatting **5**

1 Inleiding **7**

1.1 Aanleiding 7
1.2 Doel 7
1.3 Resultaat en afbakening 7

2 Materiaal en Methode **8**

2.1 Materiaal 8
2.2 Methoden 9

3 Resultaten **10**

3.1 Quick scan literatuur 10
3.1.1 Algemeen 10
3.1.2 Gevolgen bij blootstelling aan waterstofsulfide 10
3.1.3 Meetresultaten uit literatuurbronnen 11
3.1.4 Invloedsfactoren 13
3.2 Praktijkmetingen 14
3.2.1 Mest mixen 14
3.2.2 Verpompen van mest 18
3.2.3 Overige periode 19
3.2.4 Mesthoogte en –samenstelling 20
3.2.5 Ervaringen met het H_2S-veiligheidsysteem 20
3.2.6 Aanvullende metingen op Dairy Campus 21

4 Discussie **22**

5 Conclusies en aanbevelingen **23**

5.1 Conclusies 23
5.2 Aanbevelingen 24

Literatuur **25**

Bijlage 1 Websites met veiligheidsinformatie **26**

Samenvatting

Het vrijkomen van giftige mestgassen zoals waterstofsulfide (H_2S) en blauwzuurgas (HCN) tijdens het opslaan, mixen en overpompen van mest zijn schadelijk voor mens en dier en is dodelijk bij hoge concentraties. Voor zover bekend zijn nog nooit langdurige metingen gedaan naar de concentraties van mestgassen in melkveestallen. Het doel van het onderzoek was om inzicht te krijgen in het verloop van waterstofsulfideconcentraties over een lange periode op verschillende plekken in de mestkelder van een melkveestal, ter indicatie van het optreden van (potentieel) gevaarlijke situaties in melkveestallen door giftige mestgassen. Naast de metingen is een quick-scan gedaan in de literatuur naar onderzoeksresultaten over het vrijkomen van waterstofsulfide uit mest in melkveestallen.

De resultaten uit het literatuuronderzoek lieten zien dat de H_2S-concentratie direct na aanvang van het mixen zeer sterk stijgt en (zeer) snel leidt tot een piekwaarde. Piekconcentraties van meer dan 150 ppm H_2S kwamen veelvuldig voor en vormen een direct gevaar voor mens en dier. Het kwam regelmatig voor dat de H_2S-concentraties gedurende langere tijd (15 minuten) boven de 10 ppm H_2S lagen. De H_2S-concentratie bleek daarnaast sterk te variëren zelfs wanneer de operationele condities en handelswijze gelijk waren. Verder zijn er indicaties dat rantsoen met hogere zwavelgehalten tot hogere H_2S-concentraties leiden en dat lagere mixsnelheden tot lagere H_2S-concentraties leiden.

Uit de praktijkmetingen van de H_2S-concentratie in een mestkelder van een melkveestal met een prototype H_2S-veiligheidssysteem bleek de toename in de H_2S-concentratie tijdens het mixen afhankelijk te zijn of de mest wel of niet goed gemixt kon worden. Als er een korst op de mest aanwezig was die tijdens het mixen niet goed opgemengd werd met de mest steeg de H_2S-concentratie niet zo sterk als dat de korst wel goed kon worden opgemengd of als er geen korst aanwezig was. Na afloop van het mixen nam de H_2S-concentratie niet snel af, maar had een afwisselend patroon met stijgingen en dalingen waardoor na het stoppen van het mixen nog een bepaalde tijd verhoogde H_2S-concentraties werden gemeten. Tijdens het verpompen van mest naar een mesttank, vrachtwagen of overpompen bleek in 46% van de gevallen de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uit te komen. En tijdens de periode dat er geen mest werd gemixt of overgepompt kwam op 3,0% van de meetdagen het voor dat de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uit kwam. In totaal kwam het op 7,8% van de meetdagen voor dat de H_2S-concentratie een bepaalde tijd boven de 10 ppm H_2S uitkwam op het praktijkbedrijf en op Dairy Campus was het 7,0% van de meetdagen.

De resultaten uit de literatuur en metingen laten zien dat het mixen van mest leidt tot een dermate substantiële toename in het de H_2S-concentratie dat gezondheidsrisico's als gevolg van het inademen van giftige mestgassen sterk toenemen. Het nemen van veiligheidsmaatregelen (zoals het maximaal ventileren) bij het mixen van mest is daarom een absolute noodzaak voor een veilige en gezonde werkomstandigheden. De veiligheidsmaatregelen dienen volledig in werking te zijn voor aanvang van het mixen, omdat de H_2S-concentraties zeer snel toenemen na het starten van het mixen. Aangezien H_2S-concentraties sterk kunnen variëren, zelfs bij gelijkwaardige omstandigheden, kan men er niet vanuit gaan dat de werkomgeving veilig is als er bij eerdere gelegenheden niks is gebeurd. Tijdens het overpompen van mest kunnen de H_2S-concentraties ook verhoogd zijn, maar niet zo hoog als tijdens het mixen van de mest. Ook tijdens de perioden waarin geen mest word gemixt of overgepompt kunnen verhoogde H_2S-concentraties voorkomen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Veilige werk- en leefomstandigheden zijn noodzakelijke randvoorwaarden voor het uitoefenen van een melkveebedrijf. Het vrijkomen van giftige mestgassen zoals waterstofsulfide (H_2S) en blauwzuurgas (HCN) tijdens het opslaan, mixen en overpompen van mest draagt niet bij aan goede werk- en leefomstandigheden. Mestgassen zijn schadelijk voor mensen en dieren en zorgen bij hoge concentraties in melkveestallen voor levensgevaarlijke situaties voor zowel mens als dier. Het gevaar van mestgassen wordt nog steeds onderschat, want er gebeuren nog regelmatig ongelukken met mestgassen waarbij koeien doodgaan en soms ook menselijke slachtoffers te betreuren zijn (Hietkamp, 2010; Meesters, 2012; OVV, 2014; Anoniem, 2015a+b+b+c; Middelkoop, 2015).

Om loonwerkers en veehouders beter voor te lichten over de gevaren van mestgassen is de website www.mestgassen.nl opgezet. Metingen van het Praktijknetwerk 'Laat de gassen je niet verrassen' laten zien dat waterstofsulfide (H_2S) zich meer ophoopt in mestkelders onder emissiearme vloeren onder traditionele roostervloeren (Anoniem, 2014). Door installatie van steeds meer emissiearme vloeren neemt het veiligheidsrisico van mestgassen in de praktijk toe. Een ander punt wat de risico's vergroot, is dat mest steeds langer en ook in grotere hoeveelheden in mestkelders wordt opgeslagen. En bij het begin van het uitrijseizoen komt het regelmatig voor dat de mest tot vlak aan de roosters staat waardoor mestgassen uit de mestkelder worden gedrukt.

Voor zover bekend zijn nog nooit langdurige metingen gedaan naar de concentraties van mestgassen in melkveestallen. Indicatieve metingen van o.a. het Praktijknetwerk 'Laat de gassen je niet verrassen' laten zien dat hoge concentraties aan H_2S veelvuldig voorkomen onder emissiearme vloeren. Hierbij is het onduidelijk of het gevaar van mestgassen zich hoofdzakelijk voordoet bij het mestmixen of dat het een sluimerend gevaar is dat (veel) vaker voorkomt dan men denkt.

1.2 Doel

Inzicht krijgen in het verloop van waterstofsulfideconcentraties gedurende één jaar op verschillende plekken in de mestkelder van een melkveestal, ter indicatie van het optreden van (potentieel) gevaarlijke situaties in melkveestallen door giftige mestgassen.

1.3 Resultaat en afbakening

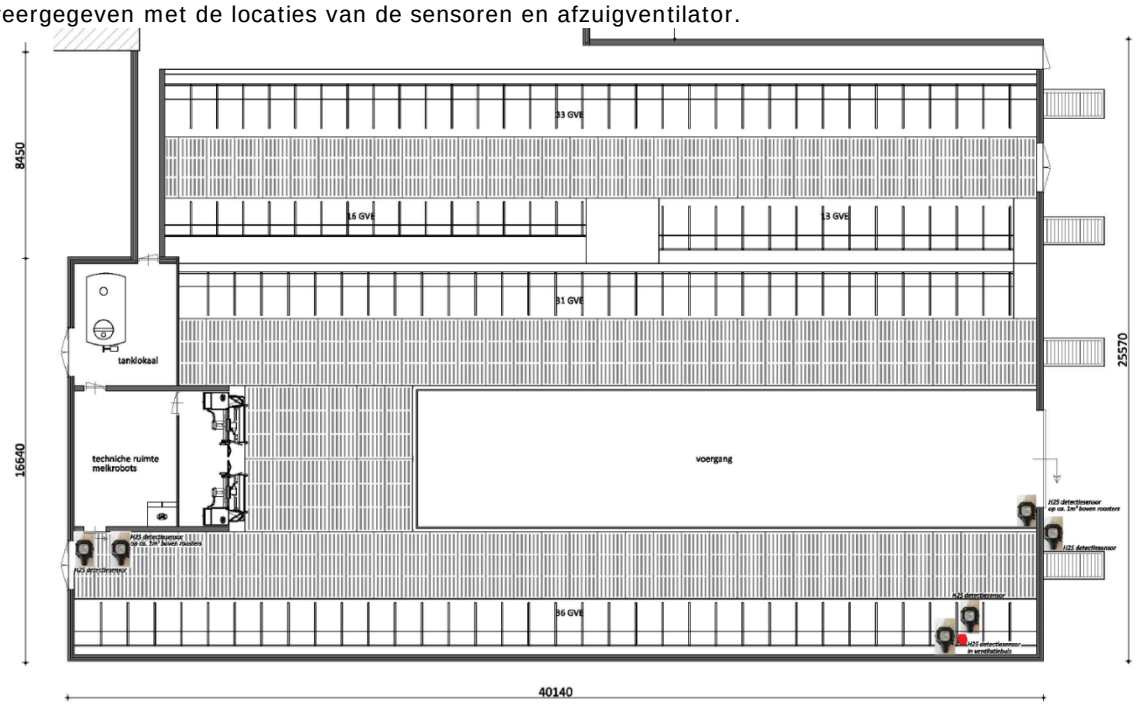
In dit onderzoek is alleen de concentratie aan waterstofsulfide (H_2S) gemeten als indicator voor het optreden van gevaarlijke situaties door mestgassen. De metingen werden uitgevoerd in een mestkelder van een melkveestal die voorzien was van een prototype H_2S-veiligheidsysteem wat de mogelijkheid bood om jaarrond metingen te kunnen uitvoeren

2 Materiaal en Methode

2.1 Materiaal

Het onderzoek vond plaats in de melkveestal van een praktijk melkveebedrijf. De melkveestal had 110 dierplaatsen en twee melkrobots. De spoel- en melkresten van de melkrobots en melktank werden afgevoerd via het riool. In de stal werden alleen melkgevende koeien gehouden die jaarrond op stal werden gehouden. Het voerrantsoen bestond op drogestof basis voor ongeveer 60% uit gras (kuilgras en vers gras via zomerstalvoedering), 6% mais en 34% krachtvoerbrok aangevuld met mineralen. Er werden geen bijproducten gevoerd. Als strooisel voor de ligboxen werd alleen gebruik gemaakt van zaagsel. De mest van de melkkoeien werd opgevangen in drie mestkelders die niet met elkaar verbonden waren. Er werden geen additieven gebruikt die bij de mest werden gedaan. In één van de drie mestkelders van de melkveestal was een prototype H_2S-veiligheidssysteem, afkomstig van de firma Siebolt Visser Bouw- en Handelsonderneming, geïnstalleerd. De mestkelder waar het veiligheidssysteem was ingebouwd had een diepte van 2 meter en een volume van 396 m^3. Het veiligheidssysteem bood de mogelijkheid om jaarrond metingen uit te voeren naar de concentratie van waterstofsulfide (H_2S) op verschillende plekken in de stal.

Het veiligheidssysteem bestond uit een afzuigventilator (capaciteit 3200 m^3/uur; ventilatievoud is 16 bij een halfvolle mestput) voor afzuiging van de mestput onder de ligboxen, een besturingssysteem, vier meetpunten, waarschuwingslampen en een zwaailicht. De vier meetpunten zaten in de mestkelder bij de mix-opening aan de achterkant van de stal, halverwege de buis van de afzuigventilator, onder een ligbox achter in de stal en op roosterhoogte voorin de stal. Op elk meetpunt was op roosterhoogte een H_2S-sensor (Hanwei CP01) geïnstalleerd met een gekalibreerd meetbereik van 0 tot 100 ppm. Tijdens het onderzoek zijn nog twee extra meetpunten geïnstalleerd op circa 1 meter hoogte (één bij het voerhek en één voorin de stal) om zo het gevaar voor mens en dier beter in beeld te kunnen brengen en vormden tevens een betere indicatie van de potentiele gezondheidsrisico's van mestgassen voor de aanwezige melkkoeien. In figuur 1 staat de plattegrond van de melkveestal weergegeven met de locaties van de sensoren en afzuigventilator.



Figuur 1 *Plattegrond van de melkveestal met de locatie van de zes* H_2S*-sensoren en de afzuigventilator (rode stip rechtsonder).*

De afzuigventilator zoog de lucht van de mestput van onder de ligboxen vandaan via een ventilatiekoker door het dak van de stal naar buiten toe. De H_2S-sensoren waren aangesloten op het besturingssysteem (Hanwei KB2160) van het veiligheidssysteem die de afzuigventilator, twee rode lampen en een zwaailamp aanzette zodra de ingestelde grenswaarde van 10 ppm werd overschreden en zodra de ingestelde grenswaarde van 15 ppm werd overschreden werd een alarmsignaal geproduceerd. Deze waarden waren ingesteld door de installateur. Zodra de situatie weer veilig was (meting onder de grenswaarde van 10 ppm) dan ging het zwaailicht, alarmsignaal en één rode lamp uit, ging er een groene lamp branden en draaide de afzuigventilator nog zeven minuten door. De tweede rode lamp ging pas uit als deze door de veehouder werd gereset, zodat de veehouder kennis van had genomen dat er een onveilige situatie in de stal was geweest.

2.2 Methoden

Wekelijks werd de hoogte van de mest in de mestkelder gemeten en opgeschreven in een logboek. Als mest werd gemixt, uitgereden, overgepompt of afgevoerd werd dit ook genoteerd in het logboek en tevens werd dan kort de weersituatie op het bedrijf opgeschreven. Eventuele bijzonderheden werden ook genoteerd in het logboek. Verder werden op verschillende momenten tijdens de onderzoeksperiode een mestmonster genomen uit de mestkelder en geanalyseerd door het milieulaboratorium van Wageningen Livestock Research op de volgende parameters: drogestof, totaal-stikstof en ammonium-stikstof, fosfaat, kalium en zwavel. Het data-acquisitie systeem van het besturingssysteem sloeg alleen meetwaarden op zodra het alarm afging. Echter het data-acquisitie systeem functioneerde niet zoals was aangegeven door de leverancier, want het sloeg niet de maximale gemeten H_2S-concentratie op maar alleen een willekeurige meetwaarde tijdens een periode met een verhoogde H_2S-concentratie. Er is getracht met een aanvullende datalogger om de piekwaarden op te slaan, maar vanwege problemen met de signaaldraad en communicatiepoort zijn hiermee geen betrouwbare data mee verzameld. De gemeten maximale waarde was in de meeste gevallen bij het mixen en verpompen ook afgelezen van het display en opgeschreven in het logboek en van sommige momenten waren er ook foto's en video opnames gemaakt van het display met meetgegevens, zodat achterhaald kon worden wat de maximale H_2S-concentratie was geweest. De metingen vingen aan op 13 juni 2015 en duurden tot en met 26 september 2016. De resultaten van de metingen zijn onderverdeeld naar dagen waarop mest werd gemixt, mest werd verpompt en overige dagen waarin geen handelingen met de mest plaatsvonden. Naast de metingen is een Quick scan gedaan in de literatuur naar onderzoeksresultaten over het vrijkomen van waterstofsulfide uit mest in melkveestallen.

3 Resultaten

In paragraaf 3.1 worden de resultaten beschreven van de Quick scan in de literatuur naar onderzoeksresultaten over het vrijkomen van waterstofsulfide (H_2S) uit mest in melkveestallen. In paragraaf 3.2 zijn de resultaten beschreven van de metingen op het praktijk melkveebedrijf.

3.1 Quick scan literatuur

3.1.1 Algemeen

Drijfmest is een biologisch actieve massa waarin allerlei biochemische processen plaatsvinden. Bij deze processen ontstaan en komen onder andere de volgende schadelijke gassen vrij: methaan (CH_4), ammoniak (NH_3), koolstofdioxide (CO_2), zwavelwaterstof/waterstofsulfide (H_2S) en cyanide/blauwzuurgas (HCN). Deze gassen blijven voor een groot deel in de mest opgeslagen in gasbelletjes, vooral onder de aanwezige drijflaag. Tijdens het mixen of rondpompen krijgen deze gassen de gelegenheid te ontwijken en dringen dan door de roostervloer de stal binnen (Counotte et al., 1988). Methaan (0,72 kg/m^3), ammoniak (0,77 kg/m^3) en blauwzuurgas (0,69 kg/m^3) zijn lichter dan lucht (1,29 kg/m^3) en ontwijken daardoor relatief makkelijk uit mestkelders. Dit in tegenstelling tot koolstofdioxide (1,97 kg/m^3) en waterstofsulfide (1,58 kg/m^3) die zwaarder zijn lucht en dus minder makkelijk uit de mestput ontwijken en daardoor meer ‘blijven hangen’ in mestkelders.

De grenswaarde is een concentratieniveau van een gas, damp, aerosol, vezel of van stof in de lucht op de werkplek. Bij de vaststelling van deze waarde wordt zoveel mogelijk als uitgangspunt gehanteerd dat – voor zover de huidige kennis reikt – de gezondheid van de werknemers én hun nageslacht niet wordt benadeeld. Zelfs niet bij herhaalde blootstelling aan die concentratie, gedurende een langere tot zelfs een arbeidsleven omvattende periode. Grenswaarden zijn geen absolute blootstellingsgrenzen, maar tijdgewogen gemiddelden over acht uur, aangeduid met TGG-8u. Binnen deze periode van acht uur kunnen concentratieniveaus voorkomen die hoger zijn dan de grenswaarde als getal, mits deze hogere waarden worden gecompenseerd door lagere waarden waardoor het acht-uur-gemiddelde niet wordt overschreden. De wettelijke grenswaarden voor H_2S bedragen in:

- Nederland: 1,6 ppm (2,3 mg/m^3) over 8 uur.
- België: 5 ppm (7,1 mg/m^3) over 8 uur en 10 ppm (14,2 mg/m3) over 15 minuten.
- Duitsland: 5 ppm (7,1 mg/m^3) over 8 uur en 10 ppm (14,2 mg/m3) over 15 minuten.

De wettelijke grenswaarde voor H_2S is in Nederland is op 1 januari 2007 verlaagd van 10 ppm (15 mg/m3) naar 1,6 ppm (2,3 mg/m^3), tijd gewogen gemiddelde over 8 uur (SER, 2016).

3.1.2 Gevolgen bij blootstelling aan waterstofsulfide

Waterstofsulfide heeft een lage geurdrempel van 0,005 tot 0,13 ppm en heeft een karakteristieke geur van rotte eieren. Echter bij concentraties boven de circa 100 ppm raakt het reukorgaan verlamd en is de geur niet meer herkenbaar voor mensen waardoor het gevaar niet meer te ruiken is. De wettelijke grenswaarde voor waterstofsulfide bedraagt 1,6 ppm, want inhoudt dat bij alleen lagere concentraties een hele werkdag kan worden gewerkt zonder dat schadelijke gevolgen voor de gezondheid optreden (Hietkamp, 2010). In tabel 1 staan de mogelijke effecten van blootstelling aan waterstofsulfide op het menselijk lichaam bij verschillende concentraties weergegeven.

Tabel 1 *Effecten van waterstofsulfide (H_2S) op het menselijk lichaam (Middelkoop, 2013).*

H_2S concentratie (ppm)	Effect
0.0005 – 0,13	- Geurdrempel
1,6	- Wettelijke grenswaarde
10	- Oogirritatie - Na 4 – 8 uur blootstelling hoofdpijn en misselijkheid
100 - 150	- Hoesten - Sterke oogirritatie - Na 2 – 15 minuten verlamming van het geurvermogen
150 - 250	- Hoofdpijn - Duizeligheid - Misselijkheid - Evenwichtsproblemen - Longoedeem
250 - 700	- Ernstige irritatie ademhalingsstelsel - Mogelijk bewustzijnsverlies - Kans op overlijden tussen 15 minuten en 4 uur
700 - 1000	- Snel bewustzijnsverlies - Stop ademhaling en sterfte binnen 15 minuten - Kans op blijvend letsel
1000 - 2000	- Bij eerst ademteug verlamming van het middenrif - Direct bewustzijnsverlies - Overlijden binnen enkele minuten, zelfs als slachtoffer in de frisse lucht wordt gebracht (sudden knock-out, sudden death)

Ondanks dat de gevaren van mestgassen algemeen bekend zijn in de agrarische sector gebeuren er jaarlijks (dodelijke) ongelukken met mens en dier in Nederland als gevolg van het vrijkomen van gassen uit mest (Hietkamp, 2010; OVV, 2014; Anoniem, 2015a+b+b+c; Middelkoop, 2015). Ook buiten Nederland komen ongelukken met mestgassen voor (Morse et al., 1981; Donham, 1982; Hallam, 2012; Andriamanohiarisoamanana et al., 2015; Middelkoop, 2015). In bijlage 1 zijn websites weergegeven die informatie verschaffen om de veiligheid bij het werken met mest te vergroten.

3.1.3 Meetresultaten uit literatuurbronnen

Counotte et al. (1988) hebben op 22 Nederlandse rundveebedrijven metingen verricht naar het vrijkomen van gassen (NH_3, O_2, CH_4, CO_2, H_2S en HCN) tijdens het mixen van mest. Van de gemeten gassen bleken waterstofsulfide en blauwzuur in dermate hoge concentraties voor te komen, dat zij afzonderlijk een acute dood tot gevolg kunnen hebben. Bij waterstofsulfide werden piekconcentraties gemeten tot 1000 ppm. Meer dan 30% van de metingen waren hoger dan 450 ppm en de helft was boven de 300 ppm wat direct gevaar oplevert voor mens en dier. Op alle bedrijven werden waarden gemeten die lagen boven de (toen wettelijk geldende) maximaal toegelaten concentratie (MAC-waarde) van 10 ppm waarin gewerkt mocht worden. Ook de gemeten concentraties gedurende langere perioden (15 minuten) bleken verontrustend te zijn. Bij cyanide werden piekconcentraties gemeten van 10 tot 400 ppm. De concentraties gedurende langere perioden (15 minuten) schommelden tussen de 4 en 114 ppm. Deze concentraties zijn op zich alarmerend hoog. De gemeten concentraties aan H_2S en HCN kwamen plaatselijk tot zeer plaatselijk en op geringe hoogte boven de roosters voor. Op circa 1,5 meter boven de roosters waren de concentraties meer dan gehalveerd. Verder schommelden de concentraties in de tijd nogal sterk. Waterstofsulfide is afkomstig van bacteriën die eiwitten en andere bacteriën afbreken, terwijl over de herkomst van het waterstofcyanide weinig bekend was. Verondersteld werd dat de cyanide bij de afbraak van voeders vrij kwam door de aanwezigheid van cyanide in deze voeders. In dit onderzoek bleek vooral graskuil relatief hoge concentraties cyanide te bevatten.

Groves en Ellwood (1991) hebben op vier rundveebedrijven onderzoek gedaan naar het verloop van de H_2S-concentratie tijdens het mixen van mest.

1) Op locatie 1 werd wekelijks de mest van de 200 melkkoeien uit de stal gespoeld naar een verzamelput van 57 m^3. Het mixen van deze verzamelput leidde één minuut na aanvang tot de hoogst gemeten H_2S-concentratie van 103 ppm, waarna concentratie langzaam afnam. Na het mixen en overpompen van de mest naar de eindopslag werd een H_2S-concentratie van 13 ppm gemeten bij het mestoppervlak en op 1,2 m hoogte boven het mestoppervlak werd een concentratie van 6 ppm gemeten.

2) Op locatie 2 werd de mest van de 160 melkkoeien met een mestschuif uit de stal naar een verzamelput van 36 m^3 afgevoerd, welke wekelijks werd geleegd. Uit de verzamelput werden vijf vrachten van 2,25 m^3 gezogen, waarbij voor de eerste en derde vracht werd gemixt. Bij aanvang van het mixen steeg de H_2S-concentratie zeer sterk: bij de eerste keer tot 140 ppm en na de tweede keer tot 40 ppm, waarna de concentratie langzaam af. Ook tijdens het opzuigen van de mest werden verhoogde H_2S-concentraties tot 20 ppm gemeten.
3) Op locatie 3 werd rundvee gehouden in een stal met aan beide zijden van de voergang een mestput van 2 m breed en 1,7 m diep. Het mixen van één mestput vond plaats door op acht verschillende plekken verdeeld over de lengte van de mestput telkens een rooster van de mestput te tillen en daar gedurende circa vijf minuten de mest te mixen. Op de meeste mixpunten werd een aanzienlijke stijging in H_2S-concentratie gemeten na aanvang van het mixen. Op het vijfde mixpunt werd de hoogste piekconcentratie gemeten van richting de 300 ppm, gevolgd door het tweede mixpunt met een piekconcentratie van 200 ppm.
4) Op locatie 4 werd vleesvee gehouden in een stal met aan beide zijden van de voergang twee mestkelders. In de ochtend werd de linker mestkelder op verschillende plekken achter elkaar gemixt en in de middag werd de rechter mestput op verschillende punten gemixt. Het rundvee was niet aanwezig in de stal tijdens het mixen. Na aanvang van het mixen werd een sterke stijging van de H_2S-concentratie gemeten, waarna de concentratie regelmatig boven de 10-minuuts grenswaarde van 15 ppm uitkwam. In de middag werden veel hogere concentraties gemeten, omdat men de deuren had dicht gedaan in verband met een regenstortbui. Er werden piekconcentraties gemeten van 541 ppm ter hoogte van de roostervloer en 180 ppm op hoofdhoogte.

Patni en Clarke (1991) hebben op verschillende dagen in een melkveestal en een jongveestal metingen verricht naar de H_2S-concentraties op verschillende plekken in de stal. De metingen werden verricht ter hoogte van de vloer voor, tijdens en na het mixen van de drijfmest. Uit de meetresultaten kwam naar voren dat de H_2S-concentratie sterk varieerde zelfs wanneer de operationele condities en procedures gelijk waren. Er bleek niet veel verschil te zijn tussen de zomer- en winterperiode. Er was een tendens naar lagere H_2S-concentraties in de jongveestal. De 15-minuut grenswaarde van 15 ppm werd regelmatig overschreden. In tabel 2 staan de resultaten van de uitgevoerde metingen weergegeven.

Tabel 2 *Gemeten H_2S-concentratie ter hoogte van de vloer in een melkvee- en jongveestal (Patni en Clarke, 1991).*

Meetpunt	Melkveestal		Jongveestal
Bij pompkelder	Zomer	Winter	Winter
Aantal metingen	9	10	6
Piekconcentratie (ppm)	15 – 62	11 – 63	5 - 41
Piekconcentratie 15 min-gemiddelde (ppm)	6 - 31	1 - 42	2 - 30
Tussen pompkelder en recirculatie-straalbuis			
Aantal metingen	9	11	4
Piekconcentratie (ppm)	6 – 55	2 – 56	4 - 22
Piekconcentratie 15 min-gemiddelde (ppm)	2 - 37	2 - 44	3 - 11
Bij recirculatie-straalbuis			
Aantal metingen	10	11	4
Piekconcentratie (ppm)	3 – 42	4 – 70	4 - 23
Piekconcentratie 15 min-gemiddelde (ppm)	2 – 33	3 – 55	2 - 10

Uenk et al. (1993) hebben bij vier mestsilo's de luchtsamenstelling gemeten vóór en na het mixen van de mest. Eén mestsilo bevatte alleen varkensmest, terwijl de andere drie mestsilo's zowel rundveemeest als varkensmest bevatte waarbij het aandeel varkensmest beneden de 20% lag. Uit de resultaten kwam naar voren dat vóór het mixen er geen gevaarlijke hoeveelheden H_2S werd gemeten. De maximale gemeten waarde bedroeg 2 ppm. Na het mixen werden in enkele gevallen direct dodelijke concentraties gemeten van meer dan 1000 ppm. De maximale gemeten waarde bedroeg 4100 ppm.

Scully *et al.* (2007) hebben gedurende 99 dagen in de winter metingen verricht naar de hoogte van H_2S-concentraties in mestputten van een vleesveestal. In de ene helft van de mestputten werd de mest dagelijks gemixt met luchtbellen (Aeromix systeem) en in de andere helft werd de mest eenmalig gemixt met een traditionele mixer. Bij de niet-beluchte mest werd direct onder de roosters geen H_2S gemeten, terwijl bij de beluchte mest wel incidenteel H_2S werd gemeten tot een maximale piekwaarde van 7 ppm. Bij de niet-beluchte mest werd tijdens het mixen hoge H_2S-concentraties gemeten tot een maximale piek van 275 ppm direct onder de roosters. Direct na het starten van het mixen van de niet-beluchte mest werden hoge concentraties gemeten. Tijdens het wegpompen van de niet-beluchte mest werden H_2S-concentraties gemeten tot 107 ppm, terwijl bij het wegpompen van de beluchte mest H_2S-concentraties van minder dan 10 ppm werd gemeten. Naast deze metingen in de vleesveestal zijn ook metingen uitgevoerd op drie melkveebedrijven waar de mest dagelijks werd gemixt met luchtbellen via het Aeromix-systeem in de periode april-mei. Uit de resultaten kwam naar voren dat de productie van H_2S alleen plaatsvond tijdens de perioden van mixen met de luchtbellen. De hoogst gemeten piekwaarden direct onder de roostervloer bedroeg 119 ppm, terwijl de hoogste gemeten 5 minuten-waarde 74 ppm bedroeg. Pieken tot 30 ppm waren gebruikelijker tijdens het beluchten.

3.1.4 Invloedsfactoren

Counotte et al. (1988) hebben tijdens hun onderzoek op 22 Nederlandse rundveebedrijven naar het vrijkomen van gassen (NH_3, O_2, CH_4, CO_2, H_2S en HCN) bij het mixen van mest ook gekeken naar een aantal factoren die de hoogte van concentratie van gassen beïnvloeden.

- Mest
  In de mestmonsters en de voermonsters werden de cyanideconcentraties gemeten, maar er kon geen relatie worden aangetoond tussen bepaalde voedselpatronen en de gevonden cyanideconcentraties in de mest. Er kon ook geen relatie worden vastgesteld tussen gasconcentraties en mesttemperatuur. Ook de gemiddelde verblijftijd had geen meetbare invloed op de gasconcentraties. Wel kon worden vastgesteld dat bij dikke, stijve mengmest gassen minder vrijkwamen.
- Mestopslag
  De diepte van de kelder of de hoeveelheid mest die was opgeslagen in de kelder had geen invloed op de gasconcentraties. Wel werd eenmaal geconstateerd dat bij een verlengde ligboxenstal er op de overgang van oude naar de nieuwe, diepere, kelder emissie van gassen plaatsvond. Bij opslag van mest onder ligboxen en voergang kan de overgang van de gesloten gedeelten onder de ligboxen naar het open gedeelte onder de roosters toe een sterk verhogend effect hebben op de gasconcentraties.
- Mestbewerking
  Er werd geen verschil gevonden tussen pompen en mixers. Wel bleek het toerental van de trekker een belangrijke rol te spelen. Bij circa 300 tot 350 omwentelingen per minuut van de aftakas waren de gasconcentraties aanzienlijk lager. Bij het stilzetten van de mixer treedt een snelle nivellering op van de vloeistofniveaus in de kelder waardoor een hoeveelheid geconcentreerd mengsel van gassen snel in de stal kan worden gebracht.
- Ventilatie
  Hoewel er geen direct verband was tussen de diverse factoren en de optredende gasconcentraties, bleek wel duidelijk dat ook hoge windsnelheden geen garantie zijn voor het voorkomen van te hoge gasconcentraties in de stal. De windrichting is ook van belang. In de situaties waarin de mestput aan de lijzijde was gelegen, verplaatsten probleemgebieden zich naar de mixopening buiten de stal wat soms tot levensgevaarlijke situaties leidde. De onderdruk aan lijzijde zorgde blijkbaar voor ontluchting van de mestkelders.

Stevens *et al.* (1993) hebben onderzoek gedaan naar het effect van het rantsoen en opslagtijd op het sulfide-gehalte in melkveedrijfmest. De vier onderzochte rantsoenen bestonden uit ruwvoer en krachtvoer en waren zo samengesteld dat ze een verschillend eiwitgehalte hadden. De samenstelling was geformuleerd om een gelijkwaardige melkproductie (20 kg/dag) te krijgen bij de vier rantsoenen. De vier rantsoenen bestonden uit twee niveaus van eiwitgehalte (17 en 34%) en twee niveaus van verteerbaarheid van het ruwvoer (laag en hoog). In tabel 3 staan de resultaten van het onderzoek weergegeven.

De rantsoenen met het hoge eiwitgehalte bleken significant hogere sulfide-gehalte in de mest te geven. Het hoogste sulfide-gehalte in de mest werd gerealiseerd bij het rantsoen met het hoge eiwitgehalte en het grootste aandeel krachtvoer, maar dit rantsoen had niet het hoogste zwavelgehalte in het rantsoen. De hoogste sulfide-gehalte werd gevonden aan het begin van de opslagtijd. Over de opslagduur van 12 maanden daalde het sulfide-gehalte in de mest bij alle rantsoenen. Het sulfide-gehalte neemt af als het wordt gemetaboliseerd of omgezet naar gassen. De emissie van waterstofsulfide is afhankelijk van de pH van de mest. Ook het totale zwavelgehalte in de mest daalde gedurende de opslagperiode met gemiddeld 19% van 478 mg/kg naar 385 mg/kg.

Tabel 3 *Gevoerde rantsoenen, gemiddelde zwavel- en stikstofgehalte van het rantsoen en het gemiddelde zwavel- en sulfidegehalte in de bijbehorende drijfmest (Stevens et al., 1993).*

Dagelijks opname en rantsoenbeschrijving	Gem. S-gehalte van het rantsoen (g S/kg)	Gem. N-gehalte van het rantsoen (g N/kg)	Gem. zwavel gehalte in de mest (g S/kg)	Gem. Sulfide gehalte in de mest (mg S/liter)
2,6 kg krachtvoer: 34% eiwit 9,7 kg ruwvoer: hoog verteerbaar	2,36	34,6	0,45	50
4,1 kg krachtvoer: 34% eiwit 9,1 kg ruwvoer: laag verteerbaar	2,11	31,3	0,51	56
4,3 kg krachtvoer: 17% eiwit 8,3 kg ruwvoer: hoog verteerbaar	1,81	28,0	0,50	42
6,9 kg krachtvoer: 17% eiwit 8,1 kg ruwvoer: laag verteerbaar	1,63	23,0	0,45	35

Andriamanohiarisoamanana *et al*. (2015) hebben onderzoek gedaan naar het effect van verschillende drogestofgehalten (3, 5, 7, 9 en 11%), mixsnelheden (100, 200, 300 en 400 rpm), mixtijden (5, 15, 30 en 60 minuten) en mixfrequenties (1, 2, 3 of 4x per dag) op de productie van waterstofsulfide uit mest afkomstig van een melkveebedrijf met een krachtvoer gebaseerd rantsoen en van een melkveebedrijf met een ruwvoer gebaseerd rantsoen. De resultaten duiden erop dat de hoeveelheid van de opgenomen zwavelhoudende producten het potentieel van H_2S-emissie uit melkveemest bepaalt. De dagelijkse zwavelopname was bij het krachtvoerrantsoen hoger dan het ruwvoerrantsoen, in de mest was het zwavelgehalte hoger en werd ook een hogere H_2S-emissie gerealiseerd. De H_2S-concentratie nam toe met het drogestofgehalte tot een maximum van 1133 ppm bij een drogestofgehalte van 9%, waarna het bij een toenemend drogestofgehalte afnam. De H_2S-emissie nam toe bij een hogere mixsnelheid met een piekconcentratie van 3996 ppm bij 400 rpm. Dezelfde trend was te zien bij toename in mixtijd van de mest waar bij langere mixtijden de H_2S-emissie toe nam. Bij lage mixsnelheden (<200 rpm) en korte mixtijden (<15 min.) werden lage H_2S-emissies gemeten. Er werden geen significante verschillen gevonden tussen verschillende mixfrequenties, maar bij 1x per dag mixen lag de H_2S-emissie in het algemeen wel hoger dan bij vaker mixen per dag. De auteurs gaven aan dat regelmatig mixen bij een lage mixsnelheid gedurende een korte tijd een lagere H_2S-emissie uit mest zal geven. Uit de resultaten kwam ook naar voren dat H_2S sterk afhankelijk is van zowel pH als temperatuur. Een sterke daling van 3500 naar 306 ppm werd vastgesteld toen de temperatuur van de mest daalde van 24°C naar 10°C. Dit effect kan worden verklaard doordat de sulfaat-reducerende bacteriën gevoelig zijn voor schommelingen in de temperatuur. Daarnaast is de temperatuur van invloed op de transformatie van water opgelost H_2S naar gasvorming H_2S. Uit de resultaten kwam duidelijk naar voren dat bij 18°C de activiteit van de sulfaat-reducerende bacteriën en de H_2S-concentratie exponentieel toenamen. Verder nam bij een daling van de pH van 7,32 naar 6,83 de H_2S-concentratie toe met 285%. De pH is van invloed op dissociatie van moleculair H_2S (water opgelost) naar de ionische vormen (HS^- en H^+). Bij een stijging van de pH van 6,79 naar 9,05 werd een daling van de H_2S-concentratie vastgesteld van 4000 naar 20 ppm.

3.2 Praktijkmetingen

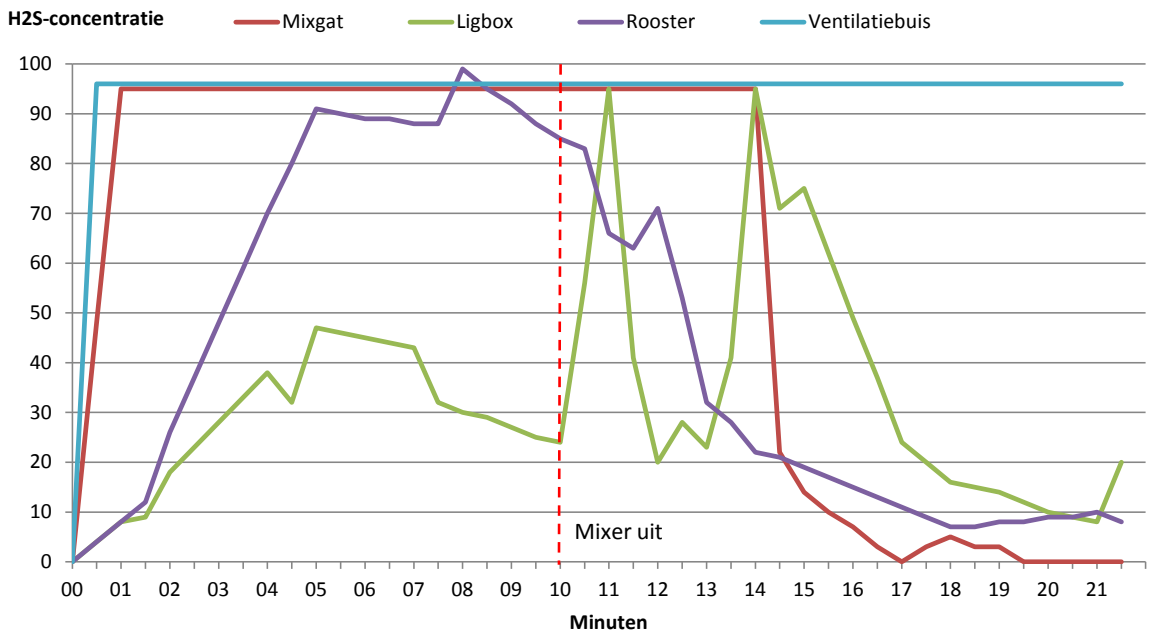
3.2.1 Mest mixen

Tijdens de meetperiode werd de mestkelder in totaal 11 keer gemixt, waarvan twee keer op één dag is gemixt om de korstlaag die op de mest weg aanwezig was goed met de mest te kunnen mengen. Hierna wordt van elke keer mixen de verzamelde meetdata beschreven.

Op 13 juni 2015 werd om ongeveer 13:30 gestart met het mixen van de mest en om ongeveer 13:40 werd de mixer uitgezet. Het verloop van de H_2S-concentatie bij de vier meetpunten was als volgt:

- De H_2S-concentratie bij de mix-opening steeg binnen de minuut naar 95 ppm en bleef tijdens de hele duur van het mixen (10 minuten) op 94-95 ppm zitten en bleef na afloop van het mixen nog vier minuten op deze waarde zitten, waarna de concentratie begon te dalen naar onder de 10 ppm.
- Bij het meetpunt onder de ligboxen achter in de stal was de H_2S-concentratie na aanvang van het mixen 18 ppm en steeg door 47 ppm om vervolgens te zakken naar 24 ppm. Nadat de mixer was uitgezet steeg de concentratie binnen 10 seconden naar 56 ppm en zat binnen 40 seconden op 95 ppm. Hierna vertoonde de concentratie een grillig patroon. De concentratie schommelde continu: het zakte en dan steeg het weer naar 95 ppm om vervolgens weer te zakken. Circa 12 minuten na het stoppen van het mixen was de concentratie gedaald naar 20 ppm.
- De H_2S-concentratie bij het meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal was na aanvang van het mixen circa 20 ppm en steeg door tot rond de 90 ppm tijdens de periode van mixen. Nadat de mixer was uitgezet daalde de concentratie eerst naar 56 ppm om vervolgens weer kort te stijgen om vervolgens verder te dalen. Circa 12 minuten na het stoppen van het mixen was de concentratie gedaald tot onder de 10 ppm.
- De concentratie in de ventilatiebuis van de mestkelder met de draaiende afzuigventilator bedroeg tijdens de hele mixperiode 96 ppm en na het stoppen van het mixen bleef de H_2S-concentratie ook op 96 ppm staan en was 12 minuten na afloop van het mixen nog steeds op 96 ppm.

Figuur 2 geeft een indicatief verloop van de H_2S-concentratie op de verschillende meetpunten o.b.v. de video-opnamen van de meetwaarden die zijn gemaakt tijdens het mixen.



Figuur 2 *Plattegrond van de melkveestal met de locatie van de zes H_2S-sensoren en de afzuigventilator (rode stip rechtsonder).*

Op 16 juni 2015 werd om 9:00 mest gemixt bij windstil en miezerig weer. Er werd een maximale H_2S-concentratie van 20 ppm gemeten. Dit was drie dagen na de vorige keer mixen.

Op 17 oktober 2015 werd van 14:30 tot 15:00 mest gemixt bij noordoostenwind met windkracht 2, bewolkt weer en een hoge luchtvochtigheid. Normaal gesproken werd bij dit soort weer niet gemixt, maar omdat de transporteur mest kwam ophalen moest er gemixt worden. De mesthoogte was circa 73 cm. Het H_2S-veiligheidssysteem trad direct na aanvang van het mixen in werking. Op alle meetpunten werd een verhoging gemeten, behalve bij het meetpunt voor in de stal. Er werden H_2S-concentraties gemeten tot en met 96 ppm. Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte was voorafgaand aan het mixen een circa 7 cm dikke korst/drijflaag aanwezig en bij de volgende meting werd geen korst/drijflaag meer aangetroffen op de mest.

Op 21 december 2015 werd van ongeveer 13:30 tot 13:45 de mest gemixt bij een zuidwestenwind met windkracht 6 en bewolkt/zonnig weer. De mesthoogte was circa 82 cm. Binnen 10 seconden na aanvang was de H_2S-concentratie op een meetpunt boven de 10 ppm gestegen waardoor het H_2S-veiligheidsysteem in werking trad en de waarschuwingslampen gingen branden. Na twee minuten werd op alle meetpunten (incl. de twee meetpunten op 1 meter hoogte) H_2S gemeten. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:

- Mix-opening: 95 ppm
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: eerst 55 ppm en later 95 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: waarschijnlijk stuk.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: 6 ppm
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: 30 ppm

Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte was voorafgaand aan het mixen een circa 8 cm dikke korst/drijflaag aanwezig en bij de volgende meting werd een kleine korst/drijflaag op de mest geconstateerd.

Op 12 maart 2016 werd van ongeveer 11:30 tot 12:00 de mest gemixt bij een oostenwind met windkracht 3 en zonnig weer. Het mixen ging niet helemaal goed doordat de bovenste korst op de mest bleef zitten en de mest onder de korstlaag heen ging. Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte voorafgaand aan het mixen was een circa 10 cm dikke korst/drijflaag aanwezig en bij de volgende meting werd nog een circa 8 cm dikke korst/drijflaag op de mest gemeten. De mesthoogte was circa 180 cm wat betekende dat de mestput behoorlijk vol zat. De eerste vijf minuten ging het alarm niet af, maar daarna wel. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:

- Mix-opening: 21 ppm
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 31 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 23 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: geen verhoging.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: 10 ppm

Circa 10 minuten na afloop van het mixen werd met een handmeter buiten de stal op afstand van enkele meters afstand van de mix-opening een H_2S-concentratie van 5 ppm gemeten. In de stal werd op neushoogte van de koeien een H_2S-concentratie gemeten van 14 ppm en op circa 10-20 cm boven de roosters werd een concentratie van 48 ppm gemeten.

Op 18 maart 2016 werd van ongeveer 15:30 tot 16:00 de mest gemixt bij een noordenwind met windkracht 3-4 en bewolkt weer. Het mixen was nog niet helemaal goed gelukt, omdat de korstlaag nog niet helemaal kapot werd gemixt. Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte voorafgaand aan het mixen was een circa 8 cm dikke korst/drijflaag aanwezig en bij de volgende meting werd nog een kleine korst/drijflaag op de mest vastgesteld. De mesthoogte was circa 185 cm. Direct aanvang van het mixen ging het alarm af en sloeg de afzuiging van de mestkelder ook direct aan. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:

- Mix-opening: geen verhoging.
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 36 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: geen verhoging.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: 56 ppm

Na afloop van het mixen liepen de waarden rustig naar beneden. Met een handmeter is buiten de stal in de buurt van het ventilatiegordijn gemeten en werd een H_2S-concentratie van circa 45 ppm gemeten.

Op 21 april 2016 werd van ongeveer 11:15 tot 11:45 de mest gemixt bij een noordoostenwind met windkracht 2-3 en zonnig weer. De mesthoogte was circa 153 cm. Direct aanvang van het mixen ging het alarm af en sloeg de afzuiging van de mestkelder ook direct aan. De korstlaag was nog niet helemaal kapot, vooral voor in de stal niet. Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte voorafgaand aan het mixen was een circa 8 cm dikke korst/drijflaag aanwezig.

De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:
- Mix-opening: geen verhoging, maar met een handmeter werd circa 50 ppm gemeten waar schuimvorming optrad in de mix-opening.
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 27 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: 5 ppm.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: kleine verhoging.

Na afloop van het mixen liepen de waarden rustig naar beneden. Met een handmeter is buiten de stal in de buurt van het ventilatiegordijn gemeten en werd een H_2S-concentratie van circa 45 ppm gemeten.

Op 21 april 2016 werd na het uitrijden van mest i.v.m. de korstlaag opnieuw van ongeveer 15:10 tot 15:40 de mest gemixt bij een noordoostenwind met windkracht 2-3 en zonnig weer. Direct aanvang van het mixen ging het alarm af en sloeg de afzuiging van de mestkelder ook direct aan. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:
- Mix-opening: geen verhoging.
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 43 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: 17 ppm.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: 5 ppm.

Na afloop van het mixen was er geen korstlaag meer.

Op 11 mei 2016 werd van ongeveer 15:15 tot 15:30 de mest gemixt bij een zuidoostenwind met windkracht 5 en zonnig weer. De mesthoogte was circa 92 cm. Het alarm ging af en de afzuiging van de mestkelder sloeg ook aan. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:
- Mix-opening: geen verhoging.
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 4 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: 18 ppm.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: geen verhoging.

Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte was voorafgaand aan het mixen een circa 5 cm dikke korst/drijflaag aanwezigen bij de volgende meting werd geen korst/drijflaag meer aangetroffen op de mest.

Op 21 juli 2016 werd van ongeveer 16:30 tot 16:45 de mest gemixt bij een zuidwestenwind met windkracht 4 en zonnig warm weer. De mesthoogte was circa 95 cm. Het alarm ging af en de afzuiging van de mestkelder sloeg ook aan. De H_2S-concentratie liep bij de verschillende meetpunten op tot:
- Mix-opening: geen verhoging.
- Ventilatiebuis mestkelder met draaiende afzuigventilator: 96 ppm
- Meetpunt onder de ligboxen achter in de stal: 79 ppm.
- Meetpunt bij de rooster in de mestkelder voorin de stal: geen verhoging.
- Voorin de stal op 1 meter hoogte: geen verhoging.
- Achterin de stal op 1 meter hoogte: 11 ppm.

Bij de wekelijkse meting van de mesthoogte was voorafgaand aan het mixen geen korst/drijflaag aanwezigen en bij de volgende meting werd ook geen korst/drijflaag meer aangetroffen op de mest.

De meetresultaten duiden erop dat de toename in H_2S-concentratie afhankelijk was of de mest wel of niet goed gemixt kon worden. Tijdens drie dagen kon de aanwezige korst op de mest niet goed door de mest worden gemixt (mest ging deels onder de korstlaag door), waardoor de korstlaag deels aanwezig bleef op de mest. Op deze dagen steeg de H_2S-concentratie niet zo sterk als op de dagen waar er geen korst aanwezig was of dat de korst goed in de mest kon worden gemixt. Na afloop van het mixen bleek dat de concentraties zowel kunnen toe- als afnemen en dat er een afwisselend patroon kan voorkomen met stijgingen en dalingen. Dit duidt erop dat na afloop van het mixen er nog een bepaalde tijd een situatie in de stal is met een verhoogd risico op hoge H_2S-concentraties.

Op 10 november 2016 werd van ongeveer 13:15 tot 13:30 mest gemixt, waarbij de afzuigventilator van het H_2S-veiligheidsysteem was uitgeschakeld om na te gaan hoever de H_2S-concentratie zou oplopen zonder dat de mestkelder werd geventileerd. Bij zowel het mixgat, onder de ligboxen achter in de stal als de afzuigbuis loopt de H_2S-concentratie op tot 95-96 ppm tijdens het mixen. Het meetpunt bij de roosters voorin de stal bleek stuk te zijn. Op 1 meter hoogte voorin de stal liep de H_2S-concentratie op tot 100 ppm (einde meetbereik), terwijl op 1 meter hoogte achterin de stal de concentratie onder de 10 ppm bleef. Dit verschil kan verklaard worden doordat de mest rond werd gepompt en waarbij de voorin de stal de mest onder de ligboxen vandaan in het kanaal onder de roosters stroomde het gevormde H_2S onder de ligboxen daar vrijkwam, terwijl het meetpunt op 1 meter hoogte achter in de stal vlak naast de openstaande deuren van de voergang was gesitueerd waar de lucht vrijelijk tussen binnen en buiten kon stromen. De gemeten lagen aanzienlijk hoger dan tijdens de keren dat er gemixt waarbij de mestkelder actief werd geventileerd door de afzuigventilator van het H_2S-veiligheidssysteem. Het lijkt er dus op dat het H_2S-veiligheidssysteem tijdens het mest mixen de H_2S-concentraties op verschillende plekken in de stal onder de 100 ppm kon houden doordat de lucht in de mestkelder werd afzogen via de ventilatiebuis waardoor verse lucht naar de mestkelder werd aangevoerd. Tevens lijkt het erop dat plekken waar de mest onder de ligboxen vandaan komt en in de kanalen onder de roosters stroomt een risicovolle plek is waar tijdens het mixen naar verwachting veel H_2S zal vrijkomen.

3.2.2 Verpompen van mest

Het verpompen van de mest vond in totaal 26 keer plaats tijdens de meetperiode, waarvan 22 keer mest met een mesttank op eigen land werd uitgereden, 4 keer werd mest afgevoerd met een vrachtwagen en 1 keer werd van mest van een andere kelder naar de onderzoekskelder overgepompt. In tabel 4 staan de meetresultaten en de waarnemingen uit het logboek weergegeven.

Tabel 4 *Meetresultaten tijdens het uitrijden, afvoeren en overpompen van mest.*

Datum	H_2S	Meetpunt[1)]	Mesthoogte	Weer	Windrichting	Windkracht
17 juni 2015	≥ 10 ppm	Mixgat	100 cm	-	Zuidwest	5
29 juni 2015	≥ 10 ppm	Mixgat, Buis	109 cm	Zon	Oost	4
30 juni 2015	≥ 10 ppm	Mixgat, Buis	60 cm	Zon	Zuidoost	3
22 juli 2015	≥ 15 ppm	Voor	44 cm	Zonnig	Zuidwest	4
3 aug. 2015	≥ 10 ppm	Mixgat, Achter	54 cm	Zon	Zuidoost	4
11 aug. 2015	≥ 10 ppm	Mixgat, Voor	30 cm	Zon, bewolkt	West	2
24 aug. 2015	≥ 10 ppm	Mixgat	39 cm	Bewolkt	Zuidoost	2
31 aug. 2015	≥ 10 ppm	Mixgat	27 cm	Bewolkt	Oost	2
14 sept. 2015	≥ 10 ppm	Mixgat	44 cm	Bewolkt	Zuidoost	4
20 okt. 2015[2)]	-	-	76 cm	Bewolkt	Noord	2
21 okt. 2015[2)]	-	-	61 cm	Bewolkt	Zuidwest	4
22 okt. 2015[2)]	-	-	47 cm	Regen, bewolkt	West	3
23 okt. 2015[2)]	-	-	33 cm	Zonnig, bewolkt	West	3
27 feb. 2015[3)]	≥ 10 ppm	Mixgat, Buis, Achter	143 cm	Zonnig	Oost	5
21 mrt. 2016	-	-	152 cm	Bewolkt	Noordwest	3/4
21 april 2016	-	-	153 cm	Zonnig	Noordoost	2/3
22 april 2016	-	-	125 cm	Zonnig	Noordoost	3
23 april 2016	-	-	81 cm	Zonnig, bewolkt	Noord	4
12 mei 2016	-	-	93 cm	Zonnig, bewolkt	Noordoost	5
19 mei 2016	-	-	57 cm	Zonnig, bewolkt	Zuidwest	3
24 mei 2016	-	-	38 cm	Bewolkt	Noordwest	4/5
25 mei 2016	-	-	36 cm	Bewolkt	Noord	2/3
22 juli 2016	-	-	96 cm	Zonnig, bewolkt	Zuidoost	2
19 aug 2016	≥ 10 ppm	Mixgat, Buis	64 cm	Zonnig, warm	Zuidoost	3
27 aug 2016	≥ 10 ppm	Mixgat, Achter+1	28 cm	Zonnig	Noordoost	4
30 aug 2016	-	-	20 cm	Zonnig	West	3

1) Buis = ventilatiebuis mestkelder, Achter = Achter in de stal, Achter+1 = Achter in de stal op 1 meter hoogte, Voor = Voor in de stal, Voor+1 = Voor in de stal op 1 meter hoogte
2) Mestafvoer
3) Mest overpompen

Doordat de datalogger van het besturingssysteem niet de maximale piekwaarde logde zodra de drempelwaarde werd overschreden tijdens het mest verpompen zijn er geen piekwaarden gemeten tijdens het mest verpompen. Er kon alleen op basis van of een meetwaarde was opgeslagen op een bepaalde dag bepaald worden dat de drempelwaarde was overschreden. Bij 12 gevallen van mest verpompen ging het alarm af vanwege verhoogde H_2S-concentraties, tijdens de overige 14 keer ging het alarm ging niet en bleef de H_2S-concentratie onder de drempelwaarde van 10 ppm. Soms kwam het bij uitrijden van mest voor dat het alarm eerst niet af ging, maar later wel. Van de in totaal 26 keer mest verpompen kwam bij 46% van de gevallen de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uit. In 11 van de 12 gevallen was de H_2S-concentratie verhoogd bij de mixer opening, en soms ook bij de andere meetpunten. De meest problematische gebied bij het overpompen van mest lijkt dan ook de plek te zijn waar de mest uit de mestkelder wordt gezogen wat ook verklaarbaar is aangezien dat de plek is waar de mest in beweging wordt gezet.

3.2.3 Overige periode

Tijdens de perioden dat er geen mest werd gemixt of overgepompt ging het alarm in totaal 14 keer af omdat de H_2S-concentratie de drempelwaarde van 10 ppm overschreed. In tabel 5 staan de meetresultaten weergegeven.

Tabel 5 *Meetresultaten tijdens de periode dat er geen mest werd gemixt of overgepompt.*

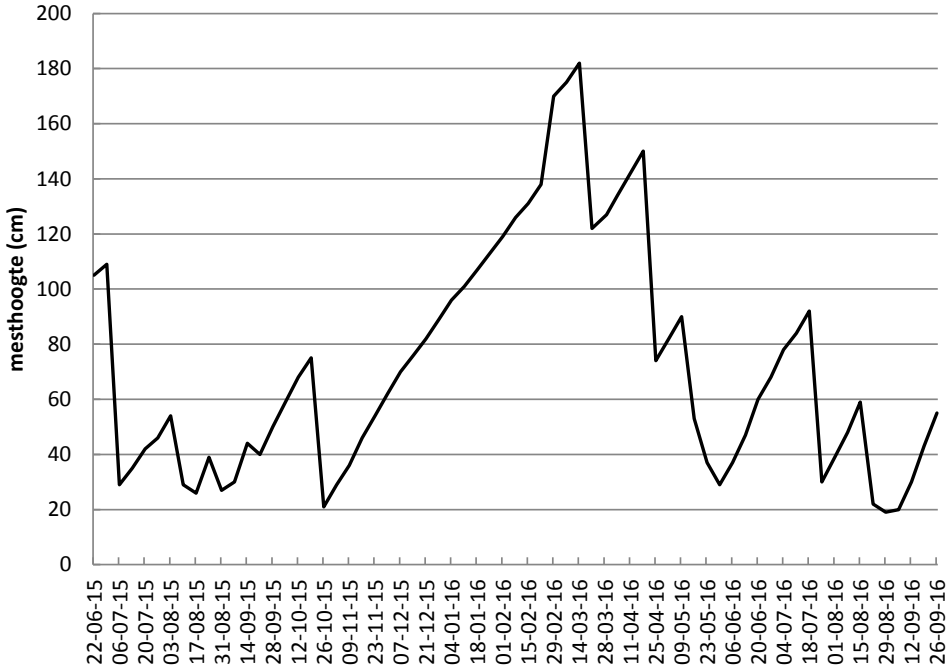
Datum	H_2S	Meetpunt[1)]	Mesthoogte	Windrichting[2)]	Windsnelheid[2)]
14 juni 2015	≥ 10 ppm	Mixgat, Achter, Voor	97 cm	14 ° (N)	3.0 m/s
01 juli 2015	≥ 10 ppm	Mixgat	16 cm	112 ° (OZO)	5.3 m/s
18 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	40 cm	245 ° (WZW)	4.5 m/s
20 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	42 cm	205 ° (ZZW)	3.5 m/s
21 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	43 cm	247 ° (WZW)	6.0 m/s
24 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	42 cm	81 ° (O)	3.4 m/s
25 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	43 cm	311 ° (NW)	7.0 m/s
26 juli 2015	≥ 10 ppm	Voor	44 cm	211 ° (ZZW)	4.3 m/s
16 feb. 2016	≥ 15 ppm	Voor	132 cm	175 ° (Z)	2.6 m/s
17 feb. 2016	≥ 15 ppm	Voor	133 cm	147 ° (ZZO)	4.2 m/s
17 mrt. 2016	≥ 15 ppm	Voerhek achter	185 cm	11 ° (N)	4.5 m/s
05 mei 2016	≥ 10 ppm	Voor	82 cm	130 ° (ZO)	3.9 m/s
23 aug. 2016	≥ 10 ppm	Achter+1	23 cm	168 ° (Z)	2.6 m/s
28 aug. 2016	≥ 15 ppm	Mixgat	18 cm	225 ° (ZW)	5.2 m/s

1) Buis = ventilatiebuis mestkelder, Achter = Achter in de stal, Achter+1 = Achter in de stal op 1 meter hoogte, Voor = Voor in de stal, Voor+1 = Voor in de stal op 1 meter hoogte
2) Overheersende windrichting en gemiddelde windsnelheid weerstation Leeuwarden (KNMI, 2016a)

Doordat de datalogger van het besturingssysteem niet de maximale piekwaarde logde zodra de drempelwaarde werd overschreden zijn er geen piekwaarden gemeten op de dagen dat de drempelwaarde werd overschreden. Er kon alleen op basis van of een meetwaarde was opgeslagen op een bepaalde dag bepaald worden dat de drempelwaarde was overschreden. Tijdens de perioden dat er geen mest werd gemixt of overgepompt ging het alarm in totaal 14 keer af vanwege verhoogde H_2S-concentratie (≥10 ppm). Dit komt neer op 3,0% van de dagen in de meetperiode. Bij maar drie gevallen was de H_2S-concentratie verhoogd bij de mixer opening. In 10 van de 14 gevallen was de concentratie verhoogd bij het meetpunt voor in de stal. Onduidelijk is waarom het zo vaak dit meetpunt betrof. In zes gevallen betrof het de periode van 18 tot 26 juli 2015, waarbij de mesthoogte laag was (< 50 cm), zie figuur 1. Tijdens deze periode was het geen warme periode, de maximum temperaturen lagen tussen de 19 en 23°C. Maar begin juli was er een warme periode geweest met temperaturen boven de 30°C (KNMI, 2016b). Mogelijk dat de mesttemperatuur verhoogd was als gevolg van het eerdere warmere weer, maar aangezien de temperatuur van de mest niet is gemeten blijft de oorzaak van de verhogingen onbekend. Verder lijken de verhogingen geen verband te houden met de mesthoogte aangezien verhoging voorkomen bij zowel lage, gemiddelde als hoge meststanden in de mestput. Een duidelijk verband met windrichting en/of windsnelheid leek er ook niet te zijn.

3.2.4 Mesthoogte en –samenstelling

In figuur 3 staat de gemeten mesthoogte in de mestkelder weergegeven tijdens de meetperiode.



Figuur 3 *Mesthoogte in de mestkelder met de H_2S-sensoren tijdens de meetperiode.*

De mesthoogte in de mestkelder laat een zaagtandpatroon zien. Doordat de melkkoeien jaarrond op stal staan neemt de mesthoogte vrijwel lineair toe met niet al te veel variatie gedurende het hele jaar. Alleen eind februari 2016 heeft een sterkere stijging plaatsgevonden doordat circa 40 m^3 mest van een andere kelder naar de mestkelder met de H_2S-sensoren werd gepompt. De dalingen in mesthoogte werden veroorzaakt door het uitrijden van mest op eigen land of het afvoeren van mest van het bedrijf.

Tabel 6 geeft een overzicht van de mestsamenstelling in de mestkelder van de melkveestal tijdens de meetperiode. Het lijkt erop dat het stikstofgehalte van de mest is toegenomen als gevolg van een toename in het ammonium-stikstof gehalte. Mogelijk veroorzaakt door in verschil of er graskuil of vers gras werd gevoerd. Ook het kali gehalte vertoonde een lichte toename. Het zwavelgehalte in de mest varieerde rond 0,50 g/kg.

Tabel 6 *Mestsamenstelling in de mestkelder op verschillende momenten in de gerapporteerde periode.*

Datum	Drogestof (g/kg)	N-totaal (g/kg)	Ammonia-N (g/kg)	P_2O_5 (g/kg)	K (g/kg)	S (g/kg)
17-10-2015	77,6	3,79	1,68	1,12	5,31	0,56
12-03-2016	64,4	3,88	2,08	1,04	5,59	0,42
21-04-2016	74,3	4,34	2,31	1,18	5,89	0,49
21-07-2016	82,6	4,28	2,12	1,11	5,85	0,55

3.2.5 Ervaringen met het H_2S-veiligheidsysteem

Op het praktijk melkveebedrijf was men zich al aardig bewust van de gevaren van mestgassen en mixte men in principe alleen bij gunstige weersomstandigheden. Ze gaven echter aan dat het concreet meten, weergeven van de hoogte van de H_2S-concentraties en de waarschuwingslampen ze meer bewust zijn geworden van de gevaarlijke situaties die optreden als gevolg van het vrijkomen van H_2S tijdens het mixen en verpompen van mest.

3.2.6 Aanvullende metingen op Dairy Campus

Eind 2015 is op Dairy Campus een H_2S-meetsysteem geïnstalleerd met vier verschillende meetpunten en een meetbereik tot 500 ppm. De vier meetpunten zaten in de mestkelder op roosterhoogte voorin en achterin de stal en op 1 meter hoogte op beide plekken. In de periode van 30 december 2015 tot en met 26 september was het systeem operationeel. Het data-acquisitie systeem van het besturingssysteem sloeg alleen meetwaarden op zodra de drempelwaarde van 10 ppm werd overschreden, maar sloeg niet de maximale gemeten H_2S-concentratie op maar alleen een willekeurige meetwaarde op van een periode met een verhoogde H_2S-concentratie. Er waren geen aanvullende gegevens beschikbaar, waardoor een nadere analyse niet mogelijk was. Van 271 meetdagen werd op 19 dagen de drempelwaarde overschreden wat neerkomt dat op 7,0% van de dagen de H_2S-concentratie verhoogd was. Hierbij dient wel opgemerkt dat de meetperiode geen jaarrond periode betrof, waarbij een deel van periode waarin geen mest mocht mag worden uitgereden niet in de meetperiode zat.

4 Discussie

De hoogte van de H_2S-concentratie wordt medebepaald door de hoeveelheid zwavelverbindingen die in de mest terecht komt. Een belangrijke invloedsfactor op de mestsamenstelling is het rantsoen wat de melkkoeien krijgen en dus op het zwavelgehalte en sulfidegehalte in de mest (Stevens et al. 1993). Bepaalde bijproducten zoals tarwegistconcentraat hebben een hoog sulfaatgehalte. Ook het gebruik van andere zwavelhoudende producten, zoals bijvoorbeeld gips (calciumsulfaat) als strooisel voor in de ligboxen, zorgen voor een extra aanvoer van zwavel naar de mest zodra deze in de mest terecht komen. Het rantsoen op het melkveebedrijf bestond uit gras, mais en krachtvoer. Er werden geen bijproducten gevoerd. Ook werd op het melkveebedrijf geen gebruik gemaakt van gips (calciumsulfaat) als strooisel voor in de ligboxen. Naar verwachting had bij gebruik van bijproducten met een hoog sulfaatgehalte in het rantsoen en/of gips in de ligboxen de H_2S-concentratie hoger gelegen dan wat gemeten is dit onderzoek.

Op het melkveebedrijf was een prototype van een H_2S-veiligheidssysteem geïnstalleerd dat zorgde dat de mestkelder werd geventileerd als de grenswaarde van 10 ppm werd overschreden. Het systeem kon waarden tot 100 ppm betrouwbaar meten. De waarnemingen duiden erop dat de H_2S-concentratie bijna altijd onder de 100 ppm bleven. Dat de meetwaarden niet hoger uitvielen werd veroorzaakt doordat de mestkelder actief werd geventileerd (53 m3/min.) zodra de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uitkwam. Als er niet actief werd geventileerd dan werd de einde van het meetbereik (100 ppm) bereikt wat betekende de werkelijke waarde boven de 100 ppm lag. Wat de waarnemingen ook duidelijk maakte was dat ondanks dat als er actieve ventilatie plaats vond, de concentratie van H_2S nog steeds boven de 10 ppm lag en dus er geen veilige werk- en leefomstandigheden in de stal was bij een draaiende afzuigventilator. Door het actief ventileren van de mestkelder werd de mestlucht met H_2S naar buiten verplaatst en daar wordt verspreid. Doordat de afgezogen lucht opgemengd wrdt met buitenlucht zal de H_2S-concentratie snel afnemen, maar ter plaatse van het uitblaaspunt kunnen nog steeds hoge concentraties voorkomen. Om dit probleem te verminderen kan er voor gekozen worden om een hogere ventilatiekoker te plaatsen waardoor de mestlucht op een grotere hoogte in de buitenlucht vrijkomt waar een grotere windsnelheid heerst en een grotere vermenging met buitenlucht optreedt. Een oplossing om de afvoer van H_2S naar de buitenlucht ter voorkomen is om de afgezogen mestlucht door een biofilter of luchtwasser te halen. Het is bekend dat biofilters goed in staat zijn om waterstofsulfide uit stallucht te verwijderen (zie bijv. Melse, 2003 en Iranpour et al., 2005).

Het installeren van het toegepaste H_2S-veiligheidsysteem werd door de installateur geschat op circa €5000. Het verhogen van het meetbereik van 100 ppm naar 500 ppm maakt het systeem niet veel duurder. Naast de investeringskosten bestaan de operationele kosten uit onderhoud en controle van het H_2S-systeem om te zorgen het systeem betrouwbare metingen geeft van de H_2S-concentratie. Bekend is dat H_2S zorgt voor een achteruitgang van de kwaliteit van beton in melkveestallen (Abdelmseeh et al., 2008). Door het veiligheidssysteem wordt de blootstelling en aantasting van het aanwezige beton, betonnen roosters en boxen aan H_2S verminderd vanwege het actief ventileren van de mestkelder bij verhoogde H_2S-concentraties. Het financieel voordeel wat hiermee samenhangt is echter moeilijk in geld uit te drukken. Een alternatief systeem om de risico's te verminderen bij het mixen en overpompen van mest is om een ventilatiesysteem voor de mestkelder te installeren met een aan/uit-knop buiten de stal die wordt aangezet zodra er gemixt of mest wordt overgepompt. Een andere variant is om alleen met sensoren te werken om het gevaar te detecteren en met de waarschuwingslampen aan te geven dat het onveilig is om de stal te betreden. Echter dan worden bij het mixen van de mest de hoge H_2S-concentraties in de stal niet actief bestreden. Een draagbare handmeter voor H_2S (kosten circa €150 excl. BTW) is ook een hulpmiddel om verhoogde H_2S-concentraties in de stal te detecteren en een waarschuwingssignaal af te geven.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit (inter)nationale onderzoeken naar de hoogte van waterstofsulfideconcentraties tijdens het mixen van mest kwamen de volgende zaken naar voren:

- Piekconcentraties van meer dan 150 ppm H_2S kwamen veelvuldig voor en vormen een direct gevaar voor mens en dier. De hoogst gerapporteerde meetwaarde bedroeg 4100 ppm H_2S.
- De H_2S-concentratie steeg direct na aanvang van het mixen zeer sterk en leidde (zeer) snel tot een piekwaarde.
- De H_2S-concentratie bleek sterk te variëren zelfs wanneer de operationele condities en handelswijze gelijk waren.
- Het kwam regelmatig voor dat de H_2S-concentraties gedurende langere tijd (15 minuten) boven de 10 ppm H_2S lagen.
- Het lijkt erop dat rantsoenen met hogere zwavelgehalten tot hogere H_2S-emissies uit de mest leiden.
- Het lijkt erop dat lagere mixsnelheden tot lagere H_2S-concentraties leiden.

Uit de praktijkmetingen van de H_2S-concentratie in een mestkelder van een melkveestal voorzien van een prototype H_2S-veiligheidssysteem kwamen de volgende zaken naar voren:

- Tijdens het mixen van de mest bleek de toename in de H_2S-concentratie afhankelijk te zijn van de vraag of de mest wel of niet goed gemixt kon worden. Als er een korst op de mest aanwezig was die tijdens het mixen niet opgemengd werd met de mest steeg de H_2S-concentratie niet zo sterk als dat de korst wel goed kon worden opgemengd of als er geen korst aanwezig was.
- Na afloop van het mixen nam de H_2S-concentratie niet snel af, maar had een afwisselend patroon met stijgingen en dalingen waardoor er na stoppen van de mixer nog een bepaalde tijd verhoogde H_2S-concentraties werden gemeten.
- Tijdens het verpompen van mest naar een mesttank, vrachten of overpompen bleek in 46% van de gevallen de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uit te komen.
- Tijdens de periode dat er geen mest werd gemixt of overgepompt kwam op 3,0% van de meetdagen het voor dat de H_2S-concentratie boven de 10 ppm uit kwam.
- Op het praktijkbedrijf kwam het op in totaal 7,8% van de meetdagen voor dat de H_2S-concentratie een bepaalde tijd boven de 10 ppm H_2S uitkwam en op Dairy Campus was het 7,0% van de meetdagen.

De resultaten uit de literatuur en metingen laten zien dat het mixen van mest leidt tot een dermate substantiële toename in het de H_2S-concentratie dat gezondheidsrisico's als gevolg van het inademen van giftige mestgassen sterk toenemen. Het nemen van veiligheidsmaatregelen (zoals maximaal ventileren) bij het mixen van mest is daarom een absolute noodzaak voor een veilige en gezonde werkomstandigheden. De veiligheidsmaatregelen dienen volledig in werking te zijn voor aanvang van het mixen, omdat de H_2S-concentraties zeer snel toenemen na het starten van het mixen. Aangezien H_2S-concentraties sterk kunnen variëren, zelfs bij gelijkwaardige omstandigheden, kan men er niet vanuit gaan dat de werkomgeving veilig is als er bij eerdere gelegenheden niks is gebeurd. Tijdens het overpompen van mest kunnen de H_2S-concentraties ook verhoogd zijn, maar niet zo hoog als tijdens het mixen van de mest. Ook tijdens de perioden waarin geen mest word gemixt of overgepompt kunnen verhoogde H_2S-concentraties voorkomen.

5.2 Aanbevelingen

Het uitgevoerde onderzoek was verkennend van aard waarin er geen onderzoek is verricht mogelijke opties om vorming van mestgassen te voorkomen c.q. te verminderen en welke maatregelen mogelijk te nemen zijn om hoge concentraties te voorkomen. Tevens is geen onderzoek gedaan naar de concentraties bij verschillende emissiearme vloeren of dat bepaalde specifieke plekken in de stal een verhoogd risico hebben op het voorkomen van hogere H_2S-concentraties. In een uitgebreider vervolgonderzoek kunnen deze aspecten onderzocht worden waarin ook relaties met stankproblematiek, emissie van broeikasgassen en effecten van mestgassen op de gezondheid van melkkoeien in meegenomen kunnen worden.

De ontwikkeling van een eenvoudig, goedkoop en robuust vast alarmsysteem met sensoren in de mestkelder wat in staat is om de hoogte van waterstofsulfide in de mestput te meten en tijdig te waarschuwen voor gevaarlijke situatie in de stal biedt de mogelijkheid om de veiligheid op een melkveebedrijf te verbeteren en de bewustwording bij de veehouder vergroten. Aanvullend op het systeem kan de mestkelder actief worden geventileerd tijdens perioden met verhoogde H_2S-concentraties om de concentratie in de stal te verminderen. Om de risico's verder te verkleinen zou de afgevoerde stallucht door een luchtwasser of (bio)filter gehaald dienen te worden om de H_2S uit de lucht te verwijderen, maar dit zal aanvullende onderzoek vergen om kleine kosteneffectieve oplossing te ontwikkelen die discontinu kan werken en toch periodieke piekconcentraties kan verwijderen.

Literatuur

Andriamanohiarisoamanana, F. J., Y. Sakamoto, T. Yamashiro, S. Yasui, M. Iwasaki, I. Ihara, O. Tsuji en K. Umetsu. 2015. Effects of handling parameters on hydrogen sulfide emission from stored dairy manure. Journal of Environmental Management 154: 110-116.

Anoniem. 2014. Onder emissiearme vloeren zit H_2S. Agrabeton. http://www.cementenbeton.nl/publicaties/agrabeton/dossiers/vloeren-en-verhardingen/vloeren/onder-emissiearme-vloeren-zit-h2s

Anoniem. 2015a. Koeien dood bij mixen mest. Leeuwarder Courant, 9 april 2015.

Anoniem. 2015b. Kalfjes dood mixen van mest. Leeuwarder Courant, 16 april 2015.

Anoniem. 2015c. Brandweer redt man die onwel raakte bij werk aan mestopslag. Leeuwarder Courant, 17 april 2015.

Counotte, G. H. M., B. van Keulen, G. W. Lieben, E. Mulder, L. T. van der Veen, D. Verbiesen en P. Zandstra. 1988. Gevaren bij het mixen van mengmest in ligboxenstallen: het vrijkomen van zwavelwaterstof en blauwzuurgas. Gezondheidsdienst voor Dieren.

Donham, K. J. 1982. Acute toxic exposure to gases from liquid manure. Journal of Occupational medicine 24 (2):142-145.

Groves, J. A. en P. A. Ellwood. 1991. Gases in agricultural slurry stores. Annals of Occupational Hygiene 35 (2): 139-151.

Hallam, D.M., J. Liao en K. Choi, 2012. Manure pit injuries: rare, deadly, and preventable. Journal of Emergencies, Trauma, and Shock 5 (3): 253-256.

Hietkamp. 2010. Als vogels het loodje leggen - Gevaarlijke gassen op boerderij. Plattelands Post 40:6-8.

HSElife UNIO. 2015. HSE Guidelines - H_2S Zwavelwaterstof. HSElife UNIO. http://www.hselifeunio.com/sites/default/files/HSElife%20UNIO%20H2S%20A6%20NL_0.pdf

Iranpour, R., H.H.J. Cox, M.A. Deshusses en E.D. Schroeder. 2005. Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal. Environmental Progress 24 (3): 254-267.

KNMI, 2016a. Klimatologie - Daggegevens van het weer in Nederland. Online beschikbaar via: http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/index.cgi

KNMI, 2016b. Weather statistics Leewarden Juni-July 2015. Online beschikbaar via: https://weerstatistieken.nl/leeuwarden/2015/juli

Meesters, T. 2012. Fatale afloop mest mixen – Vergiftiging pinken door gassen uit mestkelder. Veeteelt 29 (2):27.

Melse, R.W., 2003. Verwijdering van methaan uit ventilatielucht van een drijfmestopslag met een pilot-scale biofilter. IMAG, Wageningen. Nota P 2003-20. http://edepot.wur.nl/294171.

Middelkoop, J. 2013. Kiek uut met stront – Leidraad veilig werken in mestopslagen. Soest.

Middelkoop, J. 2015. Recente mestongevallen. http://www.hazmatcat.nl/html/mestgassen.html

Morse, D.L., M.A. Woodbury, K. Rentmeester en D. Farmer. 1981. Death caused by fermenting manure. Journal of the American Medical Association 245 (1): 63-64.

OVV. 2014. Dodelijk ongeval in mestsilo te Makkinga. Onderzoeksraad voor Veiligheid, Den Haag.

Patni, N.K. en S.P. Clarke. 1991. Transient hazardous conditions in animal buildings due to manure gas released during slurry mixing. Applied Engineering in Agriculture 7 (4): 478-484.

Scully, H., J. P. Frost, S. Gilkinson en J. J. Lenehan. 2007. Research into hydrogen sulfide (H_2S) emissions from stored slurry which undergone low rate aeration. Dunsany, Ireland, Teagasc Grange Beef Research Centre.

SER, 2016. Arbeidsomstandigheden: grenswaarden. Sociaal-Economische Raad, Den Haag. https://www.ser.nl/nl/themas/arbeidsomstandigheden/grenswaarden.aspx geraadpleegd op 15 juli 2016.

Stevens, R. J., R. J. Laughlin en J. P. Frost. 1993. Effects of diet and storage time on the concentration of sulphide in dairy-cow slurry. Bioresource Technology 45 (1): 13-16.

Uenk, G.H., T.G.M. Demmers en M.G. Hissink, 1993. Luchtsamenstelling onder de overkapping van mestsilo's vóór en na het mixen van de mest. IMAG-DLO, Wageningen. Rapport 93-10.

Bijlage 1 Websites met veiligheidsinformatie

Op de volgende websites wordt informatie verstrekt en adviezen gegeven over maatregelen om de veiligheid bij werkzaamheden met mest te vergroten, zoals bijvoorbeeld mest mixen:

- Arbocatalogus agrarische en groente sectoren (www.agroarbo.nl)
  - http://www.agroarbo.nl/melkvee-en-graasdieren/overige/mestgassen/
  - http://www.agroarbo.nl/mechanisch-loonwerk/gevaarlijke-stoffen/mestgassen/

- Brandweer Eibergen (www.brandweereibergen.nl)
  - http://www.brandweereibergen.nl/veiligheid-preventie/gevaar-van-mestgassen/

- Gezondheidsdienst voor Dieren (www.gddiergezondheid.nl)
  - http://www.gddiergezondheid.nl/actueel/nieuws/2014/06/mixen%20van%20drijfmest%20kan%20gevaar%20opleveren%20voor%20mens%20en%20dier

- HazMatCat (www.hazmatcat.nl)
  - http://www.hazmatcat.nl/html/mestgassen.html
  - http://www.hazmatcat.nl/2013-12-15__Leidraad_veilig_werken_in_mestopslagen.pdf

- Mestgassen, laat je niet verrassen!
  - www.mestgassen.nl

- PennState - Confined-Space Manure Ventilation Design Tool (in Engels)
  - https://sites.psu.edu/ventilationdesign/
  - An online tool that manure pit designers and field engineers can use to predict how long a confined-space manure storage needs to be ventilated before it is safe to enter.

To explore the potential of nature to improve the quality of life

Wageningen Livestock Research
Postbus 338
6700 AH Wageningen
T 0317 48 39 53
E info.livestockresearch@wur.nl
www.wur.nl/livestock-research

Wageningen Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van stichting DLO en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.