

GT-200302

8 februari 2021

# De verspreiding van aardgas en waterstof in de bodem

Praktijktesten en numerieke simulatie



► Partner  
for  
Progress



**GT-200302**

8 februari 2021

# De verspreiding van aardgas en waterstof in de bodem

Praktijktesten en numerieke simulatie

© 2021 Kiwa N.V.

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag  
worden veelevoudigd,  
opgeslagen in een  
geautomatiseerd  
gegevensbestand, of openbaar  
gemaakt, in enige vorm of op  
enige wijze, hetzij elektronisch,  
mechanisch, door fotokopieën,  
opnamen, of enig andere  
manier, zonder voorafgaande  
schriftelijke toestemming van de  
uitgever.

**Kiwa Technology B.V.**  
Wilmsdorp 50  
Postbus 137  
7300 AC Apeldoorn

Tel. 088 998 35 21  
technology@kiwa.nl

www.kiwatechnology.com

## Colofon

|                            |                                                      |
|----------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Titel</b>               | De verspreiding van aardgas en waterstof in de bodem |
| <b>Projectnummer</b>       | 004P001714                                           |
| <b>Projectmanager</b>      | C.J.A. Pulles                                        |
| <b>Opdrachtgever</b>       | Netbeheer Nederland                                  |
| <b>Kwaliteitsborger(s)</b> | C.J.A. Pulles                                        |
| <b>Auteur(s)(s)</b>        | Kooiman, Arie                                        |

**Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het Contractonderzoekproject/adviesproject. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.**



# Voorwoord

Het programma Kenniscentrum Gasnetbeheer is gericht op instandhouding, uitbreiding en verspreiding van specifieke kennis op het gebied van het gasnetbeheer. De activiteiten van Kiwa Technology zijn erop gericht de netbeheerders zo goed mogelijk te ondersteunen met registraties, analyses, onderzoek en advies.

Een van de onderdelen van het activiteitenprogramma voor 2020 is het uitvoeren van ondersteunend onderzoek met betrekking tot de veiligheid bij de distributie en toepassing van duurzaam geproduceerde gassen

Eén van de onderzoeken die in dit kader worden uitgevoerd is de verspreiding van waterstof in vergelijking met aardgas in de bodem.

Er zijn er praktijkmetingen uitgevoerd op een proefveld op het terrein van Kiwa Technology in Apeldoorn.

In het kader van het Kenniscentrum Gasnetbeheer is een vergelijkende numerieke simulatie gemaakt van de verspreiding van aardgas en waterstof in de droge bodem. Daarover is in december 2020 een artikel verschenen in de Nieuwsbrief van het kenniscentrum. Informatie uit dat artikel is ook opgenomen in dit rapport.



# Samenvatting

Via een modelstudie is nagegaan in hoeverre de verspreiding in de bodem bij waterstof anders verloopt dan bij aardgas. Tevens zijn praktijkmetingen uitgevoerd om na te gaan welk verschil er is tussen de verspreiding van een aardgaslek en de verspreiding van een waterstoflek uit dezelfde lekopening.

De praktijkmetingen zijn uitgevoerd op een proefveld op het terrein van Kiwa in Apeldoorn. Een buisje met een klein gaatje is ingegraven op 0,8 m diepte. Eerst is gedurende een periode 50 l/h methaan gedoseerd. Daarna zijn metingen verricht met methaanmeetapparatuur waarmee met respectievelijk sleepmat, stolp en bodemsonde de concentratie op verschillende afstanden vanaf de lekbron is gemeten. De metingen vonden in 3 richtingen ten opzichte van de lekbron plaats. Vervolgens is de grond schoongespoeld met lucht en is via datzelfde buisje waterstof gedoseerd met dezelfde voordruk als van het methaan. Hierbij ontstond een volumedebiet van 120,2 l/h. Aan dit lek zijn dezelfde proeven uitgevoerd maar nu met twee verschillende fabricaten waterstofmeetapparatuur.

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD). De debiet-, druk en concentratieverdeling van het gas rondom een lek zijn uitgerekend onder stationaire condities. Dit is gedaan bij een aardgaslek en bij een waterstoflek.

Uit de modelberekening en de praktijkproeven blijkt het volgende:

- Lekgrootte: Bij eenzelfde gatgrootte van een lek, is de verhouding tussen het lekdebiet van waterstof en aardgas bij gelijke voordruk:
  - Model: 2,6
  - Praktijkproeven: 2,4
- Verspreiding van waterstof en aardgas
  - Model: de verschillen zijn gering.
  - Praktijkproeven: verschillen zijn gering. Verspreiding bij aardgas iets groter dan bij waterstof<sup>1</sup>.
- Concentratieverdeling van waterstof:
  - Model:
    - Ter hoogte van het lek is de concentratie van waterstof iets meer gepiekt dan van aardgas.
    - Ter hoogte van het maaiveld (en 5 cm daaronder) is nauwelijks meer verschil te constateren.
    - In het grootste deel van het gebied is de verhouding tussen de genormeerde concentratie  $H_2/CH_4$  tussen de 0,65 en 0,75. Anders gezegd: Bij een gegeven lek-grootte van  $H_2$  resp.  $CH_4$  is over het hele verspreidingsgebied een redelijk constante verhouding tussen de concentratie van  $H_2$  en  $CH_4$ .<sup>2</sup>
  - Praktijkproeven:
    - Op maaiveldhoogte bij waterstof iets meer gepiekt bij stolpmetingen. Bij meting met de sleepmat is dit effect niet zichtbaar.

<sup>1</sup> De spreiding in de meetresultaten is groot. Een betrouwbare kwantificering van het verschil in verspreidingsbreedte is daarom niet te geven.

<sup>2</sup> NB. Debiet is evenredig met de concentratiegradiënt en de diffusiecoëfficiënt. Concentratie op zichzelf zegt niets over het debiet. Als het verspreidingspatroon hetzelfde is, zijn echter ook de gradiënten ongeveer hetzelfde en dan is de volumestroom van  $H_2$  dus ca 3x zo groot als bij aardgas.



- In de bodem vlak onder het maaiveld kon een eventueel verschil niet worden nagegaan vanwege de beperking van het meetbereik van de waterstofmeetapparatuur.
- De concentraties over het hele verspreidingsgebied vlak boven en vlak onder het maaiveld, liggen voor waterstof onder die van methaan, met een  $H_2/CH_4$  -verhouding van:
  - ca. 0,4 tot 0,7 bij de sleepmat;
  - ca. 0,02 tot 0,8 bij de stolp;
  - ca. 0 tot 0,12 bij de bodemsonde.

Deze verhoudingen vertonen derhalve veel meer variatie dan de genormeerde verhouding  $H_2/CH_4$  tussen de 0,65 en 0,75. Oorzaak is de grote spreiding in de meetresultaten van de praktijkmetingen.

De verschillen tussen de modelberekeningen en de praktijkproeven kunnen als volgt worden verklaard. De modelberekeningen zijn gebaseerd op verspreiding in de droge bodem. Bij de praktijkproeven zijn er complicerende omstandigheden, zoals capillair water, scheurtjes en obstakels in de bodem en andere vormen van bodemgelaagdheid en homogeniteit. Die zijn ook oorzaak van de grote spreiding van de meetresultaten van de praktijkproeven.

Kijkend naar de resultaten van zowel de modelberekeningen als de praktijkproeven zijn de hoofdconclusies ten aanzien van een lek van waterstof dan wel aardgas:

- er is weinig verschil in de grootte van het verspreidingsgebied;
- er is wel een duidelijk verschil in de hoogte van de gemeten concentraties. Over het hele verspreidingsgebied is de concentratie voor waterstof lager dan voor aardgas.

Naar aanleiding van de resultaten van de modelberekeningen en de praktijkproeven zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

Ten aanzien van de klassering van lekindicaties in NEN 7244-9 verdient het aanbeveling om voor waterstof de volgende zaken te overwegen:

- De afstanden voor de verschillende lekindicatieklassen voor waterstof gelijk te kiezen als bij aardgas
- Lagere, nog nader te bepalen grenzen te kiezen voor de concentraties die de lekindicatieklassen begrenzen. Een eerste indicatie hiervoor is dat die grenzen voor de lekindicatieklassen voor waterstof op ca 50 - 70% liggen van de grenzen die voor aardgas gelden.<sup>1</sup>
- Wanneer sprake is van bijmenging van waterstof bij aardgas dan wordt aanbevolen om een  $CH_4$ -detector te hanteren met een evenredig aangescherpte detectie grens (dus 80% van de waardes voor aardgas).<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> de overweging hierbij is dat de lekdebieten van  $H_2$  bij eenzelfde concentratie met sleepmat-meting ca 2 à 3 zo groot zijn als bij  $CH_4$ . Als  $H_2$  weglekt in ondergrondse holtes (kruipruimtes) zal bij gelijkblijvende ventilatie daar, de concentratie navenant hoger worden.

<sup>2</sup> Lekzoeken met  $H_2$ -detector wordt voor deze situatie ontraden, tot eventueel aanvullend onderzoek aantoont dat daarmee voldoende gevoeligheid/selectiviteit wordt behaald.



# Inhoudsopgave

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
|          | <b>Voorwoord</b>                                                        | <b>1</b>  |
|          | <b>Samenvatting</b>                                                     | <b>2</b>  |
|          | <b>Inhoudsopgave</b>                                                    | <b>4</b>  |
| <b>1</b> | <b>Aanleiding, doel en aanpak onderzoek</b>                             | <b>6</b>  |
| 1.1      | Aanleiding onderzoek                                                    | 6         |
| 1.2      | Doel onderzoek                                                          | 6         |
| 1.3      | Aanpak                                                                  | 6         |
| <b>2</b> | <b>Praktijktests: testopstelling, procedure en gebruikte apparatuur</b> | <b>7</b>  |
| 2.1      | Testopstelling                                                          | 7         |
| 2.2      | Werkwijze                                                               | 8         |
| 2.3      | Gebruikte gasdetectieapparatuur                                         | 10        |
| 2.3.1    | Detectieapparatuur voor methaan                                         | 10        |
| 2.3.2    | Detectieapparatuur voor waterstof                                       | 10        |
| <b>3</b> | <b>Meetresultaten praktijktests</b>                                     | <b>12</b> |
| 3.1      | Algemeen                                                                | 12        |
| 3.2      | Meetwaarden sleepmat                                                    | 13        |
| 3.3      | Meetwaarden stolp                                                       | 15        |
| 3.4      | Meetwaarden bodemsonde                                                  | 18        |
| 3.5      | Meetresultaten met de Sensistor.                                        | 20        |
| 3.6      | Beschouwing meetresultaten                                              | 22        |
| 3.6.1    | Vergelijking per meetmethode                                            | 22        |
| 3.6.2    | Vergelijking op basis van kans op een meetwaarde > 0                    | 23        |
| 3.6.3    | Vergelijking van de resultaten per meetserie                            | 25        |
| <b>4</b> | <b>Resultaten modelberekening</b>                                       | <b>28</b> |
| 4.1      | Vergelijking tussen lekkage van waterstof en aardgas                    | 28        |
| 4.2      | Drie effecten spelen een rol                                            | 28        |
| 4.3      | Aanpak                                                                  | 29        |
| 4.4      | Resultaten                                                              | 30        |
| 4.5      | Waterstof verspreidt zich in de bodem op dezelfde wijze als aardgas     | 32        |
| 4.6      | Geringe verschillen in verspreiding tussen aardgas en waterstof         | 35        |
| 4.7      | Vergelijking met resultaten praktijkproeven                             | 36        |
| <b>5</b> | <b>Conclusies en aanbevelingen</b>                                      | <b>38</b> |
| 5.1      | Conclusies                                                              | 38        |



|     |                                            |           |
|-----|--------------------------------------------|-----------|
| 5.2 | Aanbevelingen                              | 39        |
| I   | <b>Meetwaarden methaan: IRwin</b>          | <b>40</b> |
| II  | <b>Meetwaarden waterstof: Hunter H2</b>    | <b>41</b> |
| III | <b>Meetindicaties waterstof: Sensistor</b> | <b>43</b> |



# 1 Aanleiding, doel en aanpak onderzoek

## 1.1 Aanleiding onderzoek

De ontwikkelingen in het energielandschap volgen elkaar in rap tempo op. Zowel de energievraag, als de energiemix verandert. De netbeheerders passen zich hierop aan en anticiperen op deze veranderingen. Het fossiel gasgebruik in de bebouwde omgeving zal de komende decennia geleidelijk aan worden teruggedrongen. Dit hoeft echter niet te betekenen dat het gasnet zelf zal verdwijnen. Gas zal meer en meer als back-up brandstof worden ingezet en fossiel aardgas zal in toenemende mate worden vervangen door duurzaam geproduceerde gassen, zoals waterstof, groen gas en 'ruw biomethaan' (oftewel gedeeltelijk opgewerkt biogas). Bij al deze veranderingen moet het gasnet betrouwbaar blijven en mag de veiligheid en leveringszekerheid niet in het gedrang komen.

Om adequaat te kunnen reageren bij incidenten, waarbij duurzaam geproduceerde gassen betrokken zijn, zal kennis opgedaan moeten worden over de effecten die ontsnapt gas heeft. Hierbij kan gedacht worden aan vraagstukken gericht op verspreiding van een gaswolk (waterstof, waterstof-aardgas mengsels, biomethaan, aardgas) in de bodem en in de lucht, als ook aan de verspreiding in gebouwen.

Gaslekkages in gasnetten worden opgespoord via bovengronds lekzoeken. Op basis van onderzoek is een meetprocedure opgesteld voor het reproduceerbaar bovengronds detecteren van aardgaslekkages. Recent is verschenen de norm NEN 7249:2020: Bovengronds lekzoeken - Methode sleepmat. Deze norm vervangt de Meetprocedure bovengronds lekzoeken van Netbeheer Nederland. Wanneer niet aardgas maar waterstof wordt gedistribueerd is het van belang om na te gaan in hoeverre deze meetprocedure zou moeten worden aangepast op basis van het verspreidingsgedrag in de bodem.

Een ander aspect is om kennis op te doen over in hoeverre incidenten met duurzaam geproduceerde gassen een ander risico opleveren dan bij soortgelijke incidenten met aardgas.

## 1.2 Doel onderzoek

Via een modelstudie nagaan in hoeverre de verspreiding in de bodem bij waterstof anders verloopt dan bij aardgas.

Daarnaast met praktijkmetingen vaststellen of er een verschil is, en zo ja hoe groot dit is, tussen de verspreiding van een aardgaslek en de verspreiding van een waterstoflek uit dezelfde lekopening.

## 1.3 Aanpak

Er zijn praktijkmetingen verricht aan een ondergronds lek van methaan op een proefveld op het terrein van Kiwa in Apeldoorn. Bovengronds is de lekverspreiding gemeten. Vervolgens zijn deze metingen herhaald met waterstof.

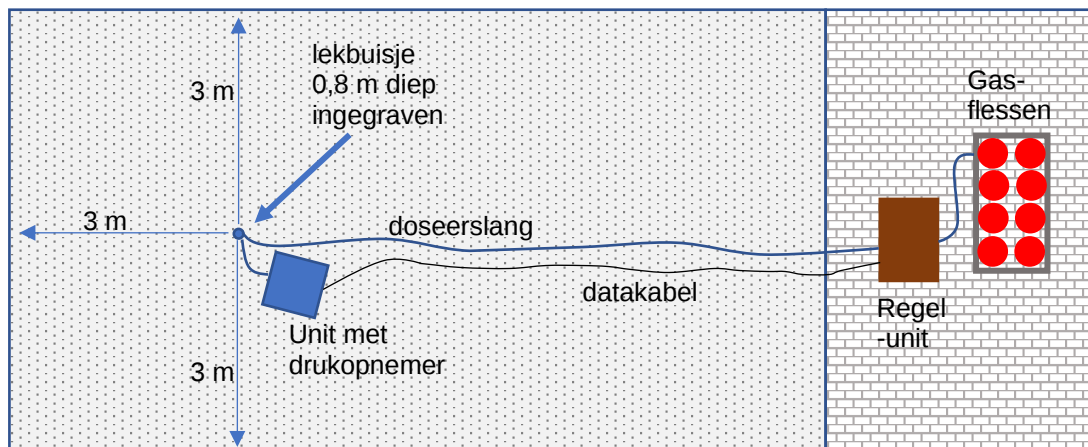
Noot: In het kader van het Kenniscentrum Gasnetbeheer is een modellering uitgevoerd waarvan de resultaten ook zijn verwerkt in dit rapport. Hiertoe is een numerieke model gemaakt van een groot volume grond waar een leiding in ligt met een gedefinieerd lek.



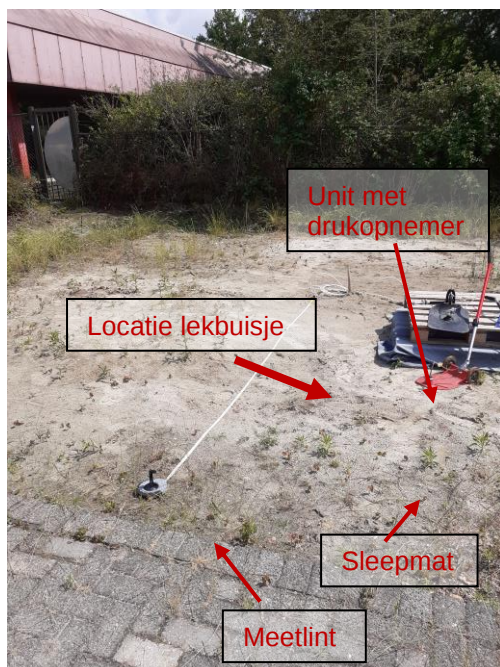
## 2 Praktijktests: testopstelling, procedure en gebruikte apparatuur

### 2.1 Testopstelling

Voor de praktijktesten is gebruik gemaakt van het proefveldje op het terrein van Kiwa in Apeldoorn, dat al eerder is gebruikt voor proeven met ondergrondse lekken.



Figuur 1 Schema bovenaanzicht proefveld



Figuur 2 Foto van het bemeten gedeelte van het proefveld

Op 0,8 m diepte is een buisje ingegraven met een gaatje van ca. 1 mm doorsnede. Op dat lekbuisje is een slang aangesloten voor de aanvoer van het te doseren gas.



Het gas wordt aangevoerd vanuit een gasflessenpakket, via een meet- en regelunit waarmee met behulp van mass flow controllers (MFC's) het gasdebiet kan worden geregeld.

Een drukopnemer, die vlakbij het lekbuisje is opgesteld en met een apart slangetje is aangesloten, meet de druk in het lekbuisje. De meetgegevens van de drukopnemer worden via een datakabel doorgegeven aan de meet-en regelunit.

Met behulp van een meetlint wordt voor de bovengrondse metingen de horizontale afstand ten opzichte van het lekbuisje bepaald.

Het proefveld bestaat uit voornamelijk zandgrond met wisselende samenstelling, waar hier en daar ook puin in zit<sup>1</sup>, met een deklaag van ophoogzand. Rondom de plek waar het lekbuisje is ingegraven zit 1 m<sup>3</sup> zand met een korrelgrootte van 200µm (= 0,2 mm). Er is sprake van natuurlijke verdichting van de grond doordat het zand enkele maanden ongeroerd is gebleven.

## 2.2 Werkwijze

In drie richtingen is de verspreiding van het ondergronds gedoseerde lekgas gemeten (de vierde richting was niet goed bruikbaar i.v.m. de conditie van het proefveld en de aanwezigheid van de unit met de drukopnemer). Daarvoor zijn de volgende drie meetmethoden gebruikt, in de hiernavolgende volgorde:

1. Sleepmat
2. Stolp
3. Bodemsonde

De volgende attributen worden gebruikt in bij deze drie meetmethoden:



*Figuur 3 Van links naar rechts: sleepmat, stolpsonde en bodemsonde*

<sup>1</sup> Dit bleek uit sonderingen die in 2020 zijn uitgevoerd (zie Fugro-rapport 1420-162976.R01 ) in het kader van het GERG project "Quantifying leakage from underground pipelines" waarvoor dit proefveld ook is gebruikt.



In NEN 7249:2020 staan de uitvoering en het gebruik van de sleepmat en de stolp voorgeschreven:

Sleepmat:

- de afmeting moet minimaal 20 cm bij 30 cm zijn;
  - het materiaal moet goed contact maken met het aardoppervlak.
- De loopsnelheid bedraagt maximaal 3 km/s<sup>1</sup>.

Stolp:

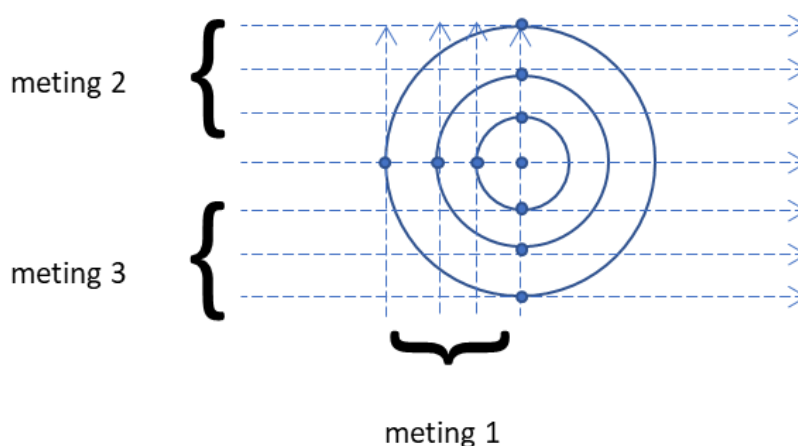
- de diameter moet minimaal 7 cm zijn;
- het materiaal moet goed contact maken met het aardoppervlak.

Als de stolp wordt toegepast dan mag de onderlinge afstand tussen de opeenvolgende meetlocaties maximaal 75 cm bedragen en moet de stolp minimaal 2 s in contact met de bodem zijn.

Het gebruik van een bodemsonde staat niet in deze norm beschreven. Een bodemsonde wordt in de bodem gestoken en zuigt lucht uit de bodem aan. Dit attribuut wordt gebruikt bij de preciezere lokalisering van een lek.

Ad 1)

Bij het bepalen van de meetwaarde voor de sleepmat op een bepaalde afstand van het lek is dit gebeurd met een loopsnelheid van maximaal 3 km/h, conform het meetprotocol van NEN 7249. Om dit te realiseren is de volgende meetwijze gevolgd: Met de sleepmat wordt een patroon van parallelle sporen gelopen zoals schematisch is aangegeven volgens meting 1 in figuur 4: Begonnen is met meting 1 op het spoor met een minimale afstand tot het lek van 3 m, waarbij het volgende spoor telkens 0,2 m dichter bij de lekbron ligt. Zo worden per meting 15 sporen gelopen. Op elk spoor passeert de sleepmat het lek en de concentratie wordt gemeten. De maximale waarde die is gemeten (die zal optreden nabij de minimale afstand ten opzichte van de lekbron) wordt als meetwaarde voor de betreffende afstand geregistreerd.



**Figuur 4** Meetschema. Het lek bevindt zich in het centrum van de concentrische cirkels. De blauwe stippen komen overeen met de meetpunten.

<sup>1</sup> Als is aangetoond dat de nauwkeurigheid bij een hogere loopsnelheid is gewaarborgd, dan mag de loopsnelheid hoger zijn dan 3 km/h. Dit moet worden aangetoond volgens het door de Normcommissie 349 008 'Gasdistributieleidingen' vastgesteld Testprotocol bepalen loopsnelheid sleepmat in bijlage A en door een onafhankelijke derde partij.



Deze werkwijze is in drie verschillende richtingen uitgevoerd: respectievelijk meting 1, 2 en 3. Het meetschema is meerdere malen uitgevoerd.

Ad 2)

Met de stomp is, te beginnen op een afstand van 3 m, telkens om de 0,2 m een meting verricht. Zodra de gasconcentratie een stabiel niveau bereikt (in ieder geval is dit langer dan 2 seconden, zoals NEN 7249 voorschrijft), wordt die waarde als meetwaarde genoteerd. Deze procedure is ook weer uitgevoerd in drie richtingen (meting 1, 2 en 3) zoals is aangegeven in figuur 4.

Ad 3)

Met de bodemsonde is dezelfde werkwijze als de bij de stomp gevolgd.

## 2.3 Gebruikte gasdetectieapparatuur

### 2.3.1 Detectieapparatuur voor methaan

De metingen voor de methaanverspreiding zijn verricht met de volgende meetapparatuur, eigendom van Kiwa:<sup>1</sup>



Figuur 5 De IRwin van Inficon voor meting methaanconcentratie

In de IRwin wordt het methaangehalte gemeten met een infrarood sensor. De apparatuur is instelbaar op verschillende meetbereiken, o.a.:

- 1 ppm – 5% voor de modus “Bovengronds”. Deze modus wordt ingesteld wanneer wordt gemeten in combinatie met een sleepmat of stomp.
- 0,5 – 100% voor de modus “Stanggat” en “Gaszuiverheid”. Beide modi zijn te gebruiken in combinatie met een bodemsonde.

### 2.3.2 Detectieapparatuur voor waterstof

De apparatuur voor bovengronds lekzoeken van waterstof wordt in de praktijk meestal gebruikt in combinatie met waterstof als tracergas dat wordt toegevoegd aan het leidingmedium bijvoorbeeld voor het opsporen van waterlekken in een waterleiding.

<sup>1</sup> Aanvankelijk werden de metingen gestart met de Goliath van Esders. Echter bleek dat de accu moest worden gerepareerd. Daarom is met de IRwin gemeten.



Voor het meten van de waterstofconcentraties bij de tests is gebruik gemaakt van de Hunter H2 van de firma Esders. De Hunter H2 werkt met een halfgeleidersensor en heeft een meetbereik van 0 – 5% H<sub>2</sub>. Tot 1000 ppm wordt de meetwaarde in ppm aangegeven, daarboven in %<sup>1</sup>.



Figuur 6 De Hunter H2 van Esders. Midden met sleepmat.

Een extra meting voor de verspreiding van waterstof is verricht met de Sensistor XRS 9012 met 8612 sleepmat ("surface probe").

De Sensistor 9012 xrs geeft geen meetwaarden in ppm, maar alleen een sterker of zwakker akoestisch signaal en meer of minder lampjes die aanflitsen naarmate de waterstofconcentratie hoger of lager wordt. De gevoeligheid is in te stellen van laagste gevoeligheid (niveau 1, onderste lampje) naar hoogste gevoeligheid (niveau 10, t/m bovenste lampje). Er wordt geadviseerd om de gevoeligheid op niveau 8 te zetten voor normaal gebruik. Bij een groot lek wordt een lage gevoeligheid ingesteld. Op een aantal meetpunten is de lekidindicatie vergeleken met de ppm-waarde die de Hunter H2 meet, zie het tabelletje in figuur 7. Ondergrens meetbereik is 0,7 ppm. De Sensistor 9012 XRS wordt vooral gebruikt voor bovengronds lekzoeken met waterstof als tracergas. Het meetprincipe is gebaseerd op een halfgeleider palladium sensor die specifiek reageert op waterstof.



Led-indicaties ppm waarden bij verschillende gevoeligheden

| Ingestelde gevoeligheid | Led nr. | ppm-waarde |
|-------------------------|---------|------------|
| 5                       | 1       | 3,1        |
| 8                       | 8       | 3,1        |
| 5                       | 6       | 10,2       |
| 5                       | 8       | 9,2        |
| 3                       | 4       | 97         |
| 2                       | 5       | 10.018     |

In Bijl. III: bijv. G5; L6 betekent:  
Gevoeligheid 5, Lampjes t/m 6



Figuur 7 Sensistor XRS 9012. Links de concentratie-indicatie met led lampjes. Hoe hoger de concentratie, des te meer lampjes gaan branden Rechts met bijbehorende sleepmat 8612.

<sup>1</sup> De Hunter H2 reageert ook op methaan; volgens opgave van de fabrikant is de weergegeven meetwaarde voor waterstof ca. 0,1 tot 0,3 maal de meetwaarde voor methaan (dit is overigens in het kader van dit onderzoek niet geverifieerd). Met andere woorden: bij het meten van 100 ppm CH<sub>4</sub> geeft de Hunter H2 een meetwaarde van 10 – 30 ppm H<sub>2</sub> aan.



## 3 Meetresultaten praktijktests

### 3.1 Algemeen

Na de start van het doseren gaat het gas zich in de grond verspreiden en duurt het een aantal dagen voordat een stabiele toestand is bereikt.

Op 3 juni 2020 is gestart met doseren van 50 l/h methaan via het lekbuisje in het proefveld. Deze hoeveelheid is ingesteld met de MFC's. De druk die bij dit debiet werd gemeten in het lekbuisje bedroeg 8,9 mbar.

Op 11 juni 2020 is de verspreiding van het methaanlek gemeten met sleepmat en stolpsonde. De neerslag in de week van 3 t/m 10 juni 2020 bedroeg 34,5 mm.

Op 12 juni 2020 is gemeten met de bodemsonde. Dicht bij het lek is de modus "Stanggat" gebruikt (meetbereik 0 – 100%) en verder van het lek af de modus "bovengronds lekzoeken" (meetbereik 1 ppm – 5%); dit laatste om ook de lage concentratieniveaus verder van het lek met voldoende nauwkeurigheid te kunnen meten.

Na afloop van de metingen op 12 juni is de methaan uit de grond verdreven door gedurende een aantal dagen perslucht te doseren via het lekbuisje, waarin de druk 26 mbar bedroeg gedurende het spoelen. Na 5 dagen spoelen werd met de bodemsonde nagenoeg geen methaan meer in de bodem aangetroffen.

Op 29 juni 2020 werd begonnen met het doseren van waterstof, waarbij de druk in het lekbuisje 8,8 mbar bedroeg, wat nagenoeg gelijk was aan de druk bij het doseren van methaan. Deze druk werd bereikt door de MFC op de juiste waarde in te stellen. Via omrekening is bepaald dat het debiet van het gedoseerde waterstof 120,2 l/h bedroeg, dus bijna 2,5 x zo hoog als bij de dosering van methaan.

Gedurende ruim een week is waterstof gedoseerd alvorens de metingen zijn verricht. Op 6 juli 2020 zijn de metingen voor de verspreiding van waterstof uitgevoerd, eerst met de Hunter H2 en vervolgens met de Sensistor.

Alle meetwaarden zijn opgenomen in de bijlagen. Daarbij moet worden opgemerkt dat niet bij alle meetseries alle meetwaarden nabij de bron zijn ingevuld. Juist dichtbij de bron heersen de hoogste concentraties. Bij het uitvoeren van de metingen was ervan uitgegaan dat de absolute waarden van die hoge concentraties dichtbij de bron voor de resultaten niet van belang zou zijn. Bij het bepalen van gemiddelde meetwaarden voor meetseries is alleen met de daadwerkelijk gemeten concentraties gerekend.

In de hiernavolgende paragrafen zijn de meetresultaten grafisch weergegeven. In alle grafieken zijn de meetresultaten van zowel de methaanverspreiding als de waterstofverspreiding opgenomen, om de directe vergelijking te tonen.

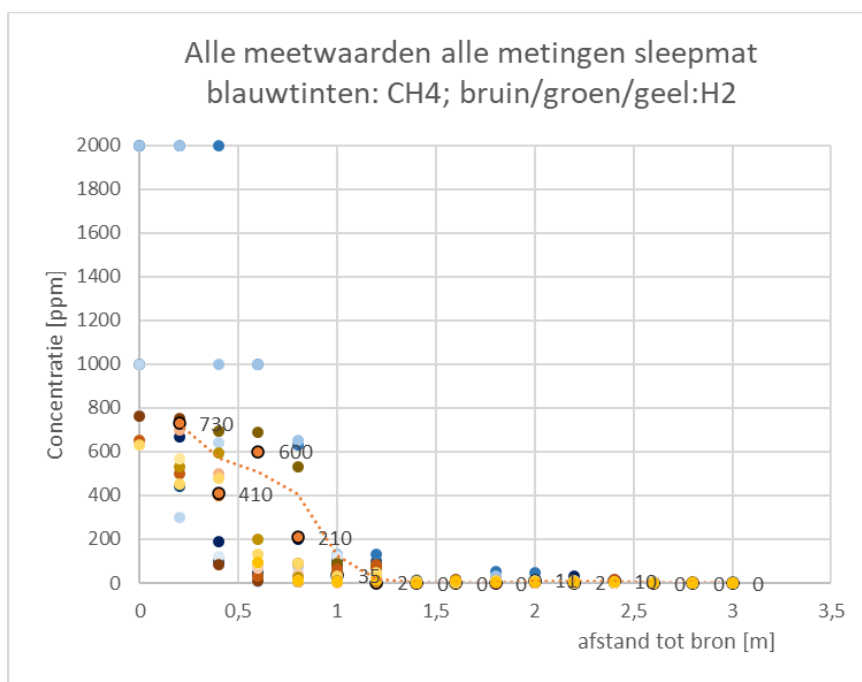
Per meetmethode zijn meerdere metingen uitgevoerd. Bij een aantal metingen met de sleepmat is per spoor op dezelfde afstand van het lek de heenweg en de terugweg gelopen. Die meetwaarden horen dan bij dezelfde meting, waarbij wel onderscheid wordt gemaakt tussen de metingen op respectievelijk de heenweg (h) en de terugweg (t). In de grafische weergaven kunnen dan de meetwaarden afzonderlijk worden weergegeven, dan wel per afstand vanaf de bron worden gemiddeld.

Ook met de stolp en met de bodemsonde zijn meerdere metingen uitgevoerd. Deze metingen kunnen afzonderlijk worden weergegeven, dan wel kan het gemiddelde van de metingen worden genomen.

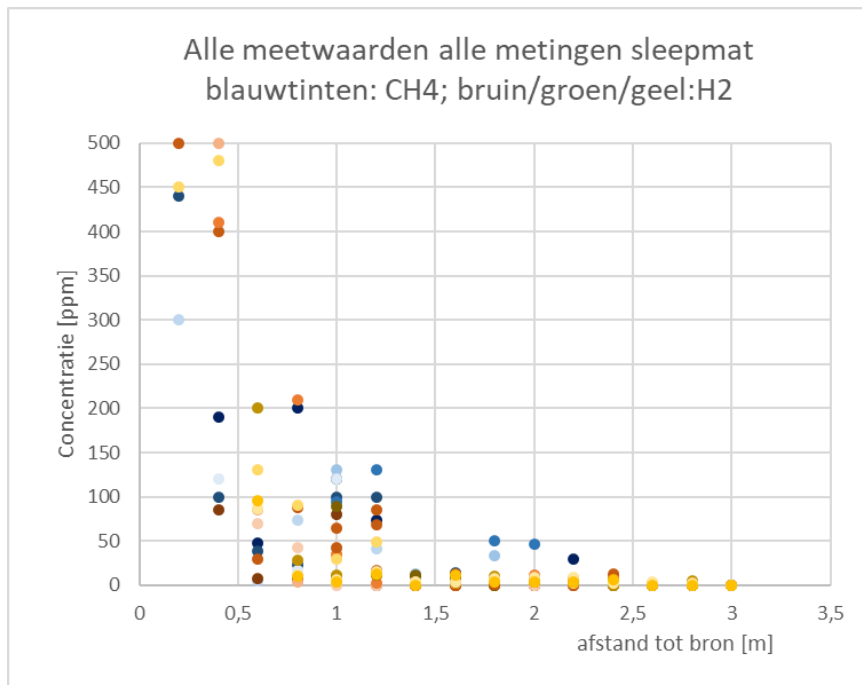
De meetresultaten met de Sensistor zijn in een aparte paragraaf weergegeven.



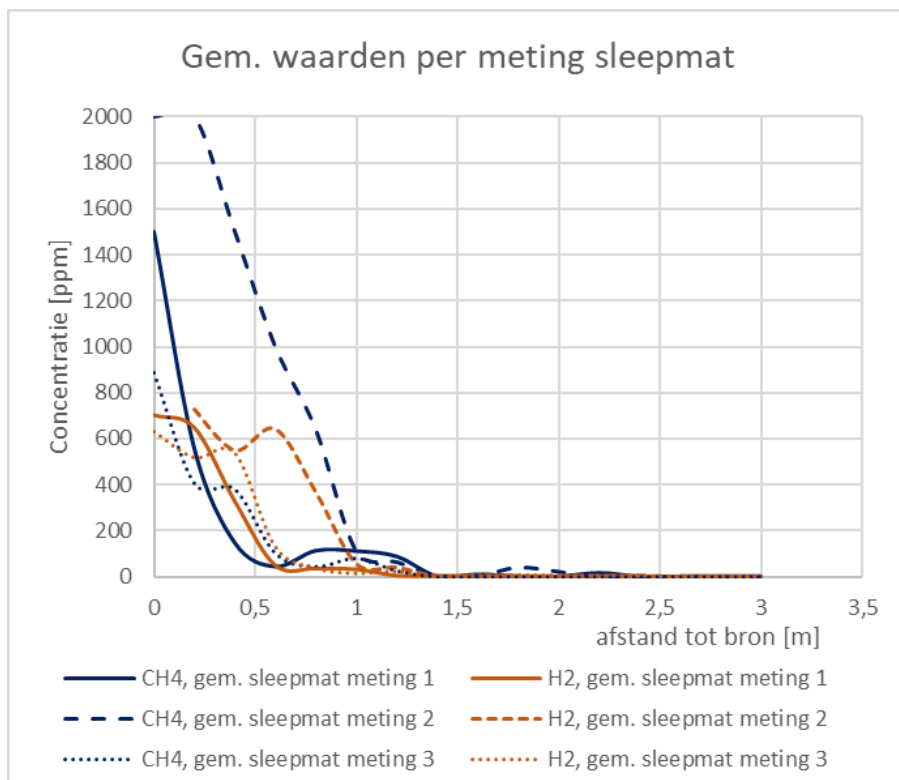
### 3.2 Meetwaarden sleepmat



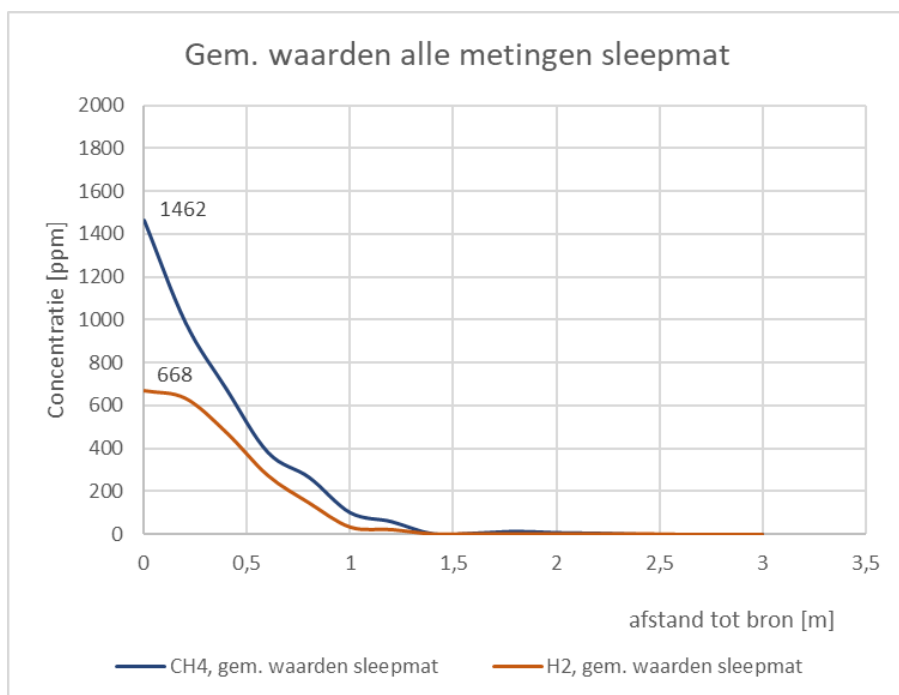
**Figuur 8** Meetpunten met de sleepmat. Max. waarde vert. as 2000 ppm. Van één meetserie (2a) met waterstof zijn de meetwaarden en een trendlijn van het gemiddelde van twee opeenvolgende meetwaarden weergegeven



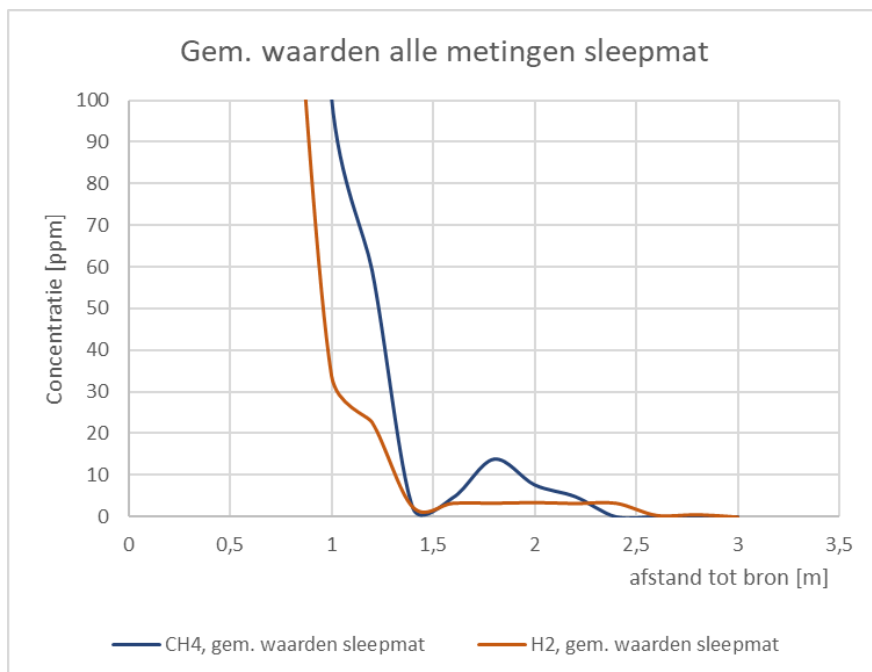
**Figuur 9** Meetpunten met de sleepmat. Max. waarde vert. as 500 ppm. Met deze schaal zijn de verder van de lekbron gelegen punten beter af te lezen. Meetwaarden > 500 ppm vallen buiten de grafiek.



*Figuur 10 Metingen met sleepmat met gemiddelde waarden per meetserie*

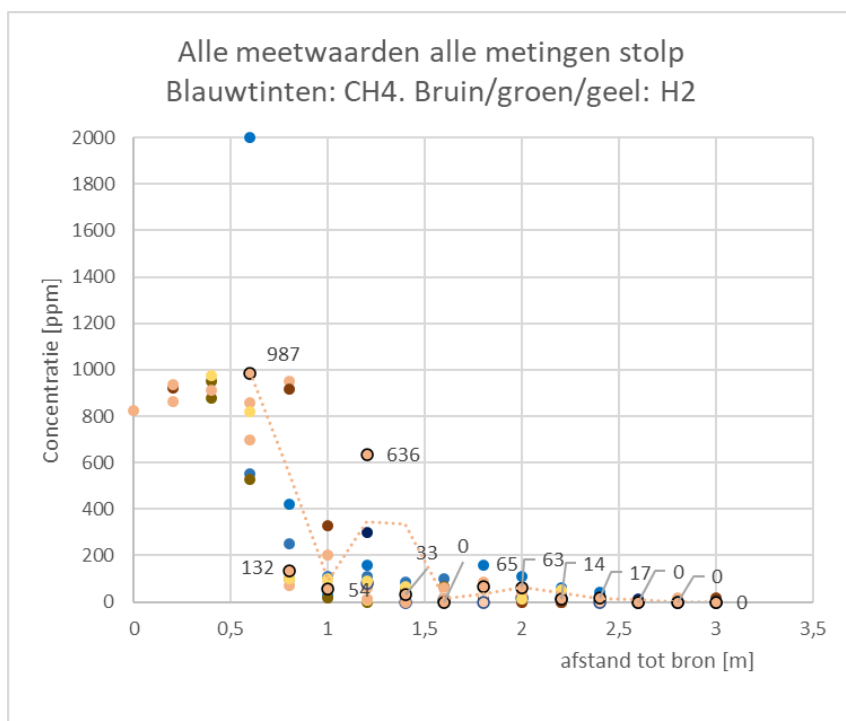


*Figuur 11 Metingen met sleepmat met gemiddelde waarden van alle metingen*

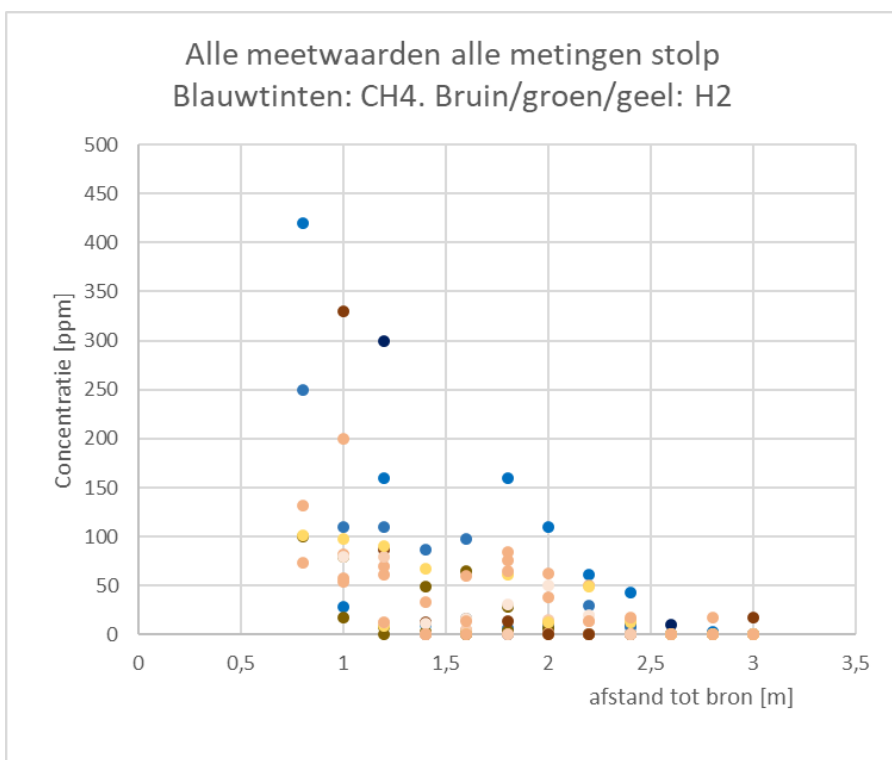


*Figuur 12 Zelfde als figuur 11 maar met kleinere schaal. Bij grens van gemiddelde waarde van 10 ppm is de verspreiding voor CH<sub>4</sub> = 1,9 m en voor H<sub>2</sub> = 1,3 m*

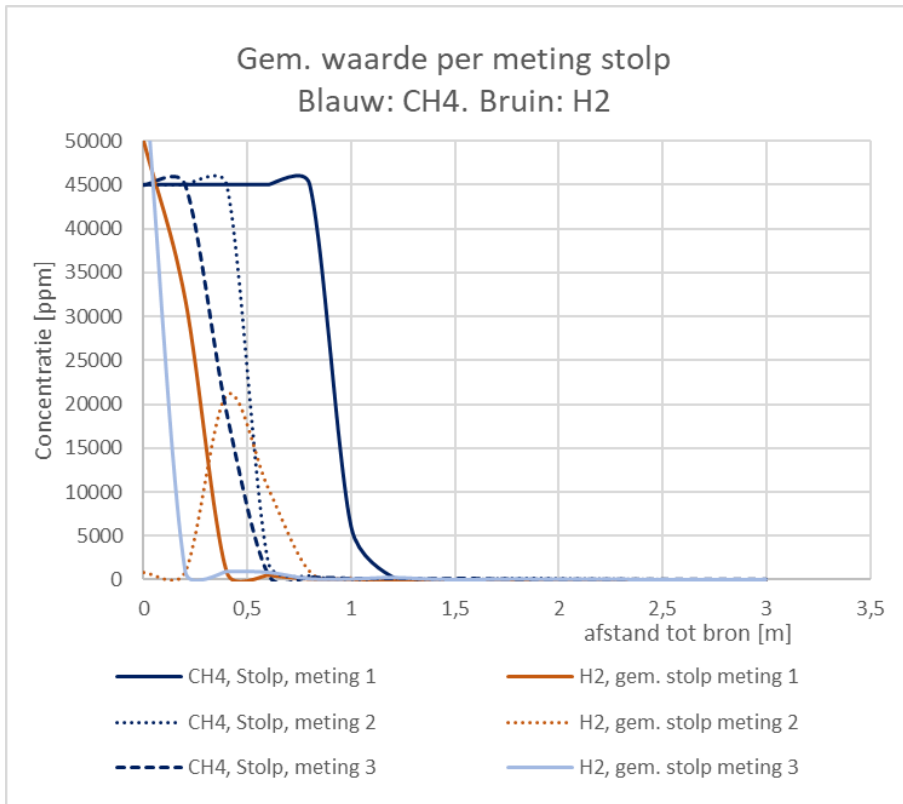
### 3.3 Meetwaarden stolp



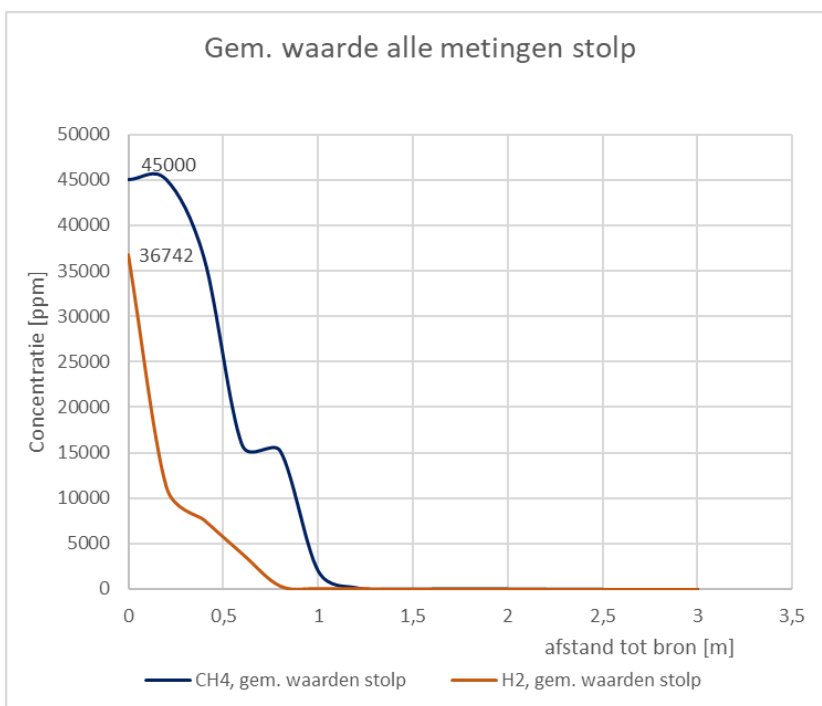
*Figuur 13 Meetpunten met de stolp. Max. waarde vert. as 2000 ppm. Van één meetserie (3c) zijn de meetwaarden en een trendlijn van het gemiddelde van twee opeenvolgende meetwaarden weergegeven*



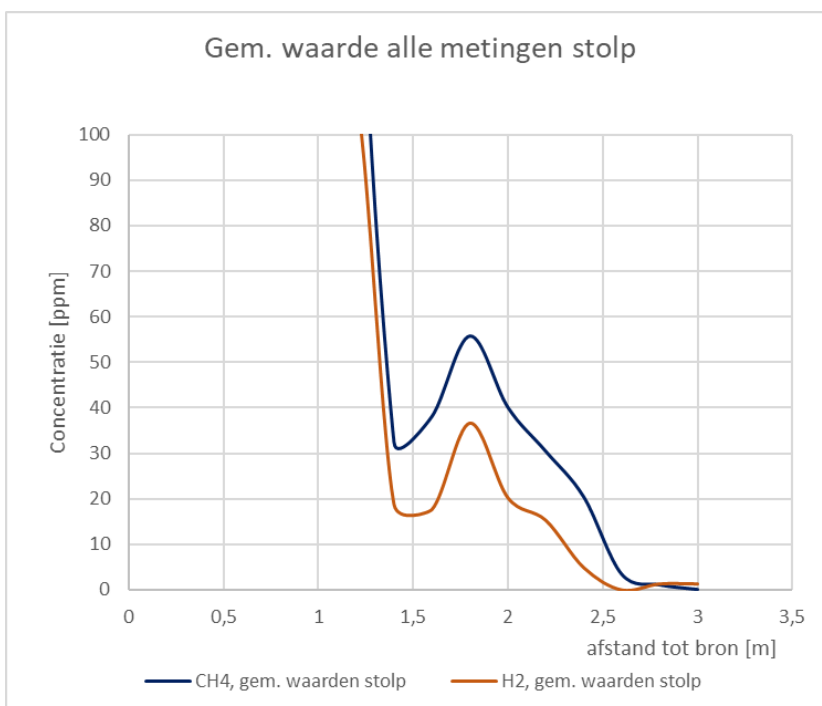
**Figuur 14** Meetpunten met de stolp. Max. waarde vert. as 500 ppm  
Met deze schaal zijn de verder van de lekbron afgelegen punten beter af te lezen. Meetwaarden > 500 ppm vallen buiten de grafiek.



**Figuur 15** Metingen met de stolp met gemiddelde waarden per meetserie



Figuur 16 Metingen met stolp met gemiddelde waarden van alle metingen

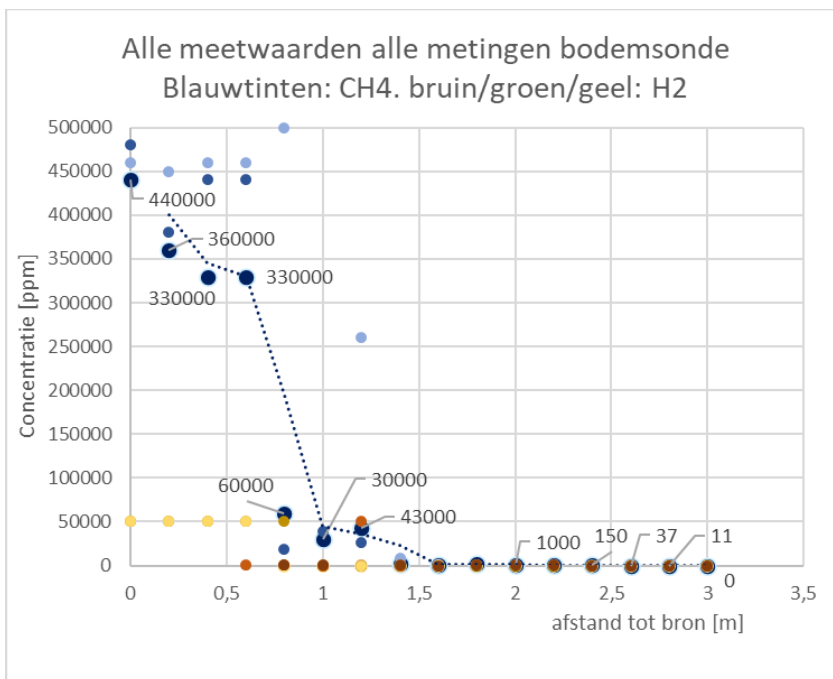


Figuur 17 Zelfde als Figuur 16 maar met kleinere schaal. Bij grens van gemiddelde waarde van 10 ppm is de verspreiding voor CH<sub>4</sub> = 2,5 m en voor H<sub>2</sub> = 2,3 m

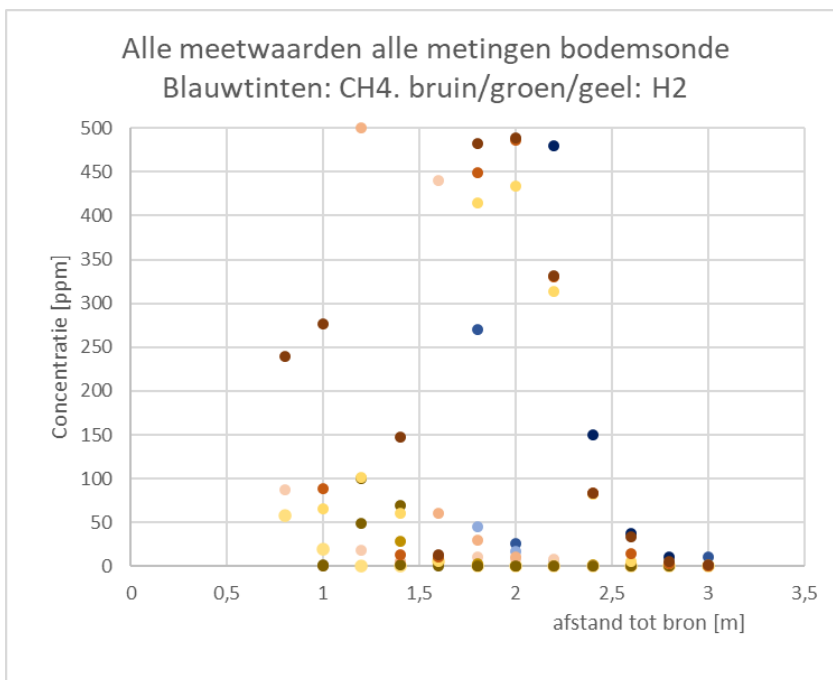
Opmerking: de oorzaak voor de lokale piek bij 1,8 m afstand moet worden gezocht in inhomogeniteit van de bodem. Lekgas zoekt ondergronds zijn weg via de minste weerstand zoals door bijvoorbeeld scheurtjes in de bodem.



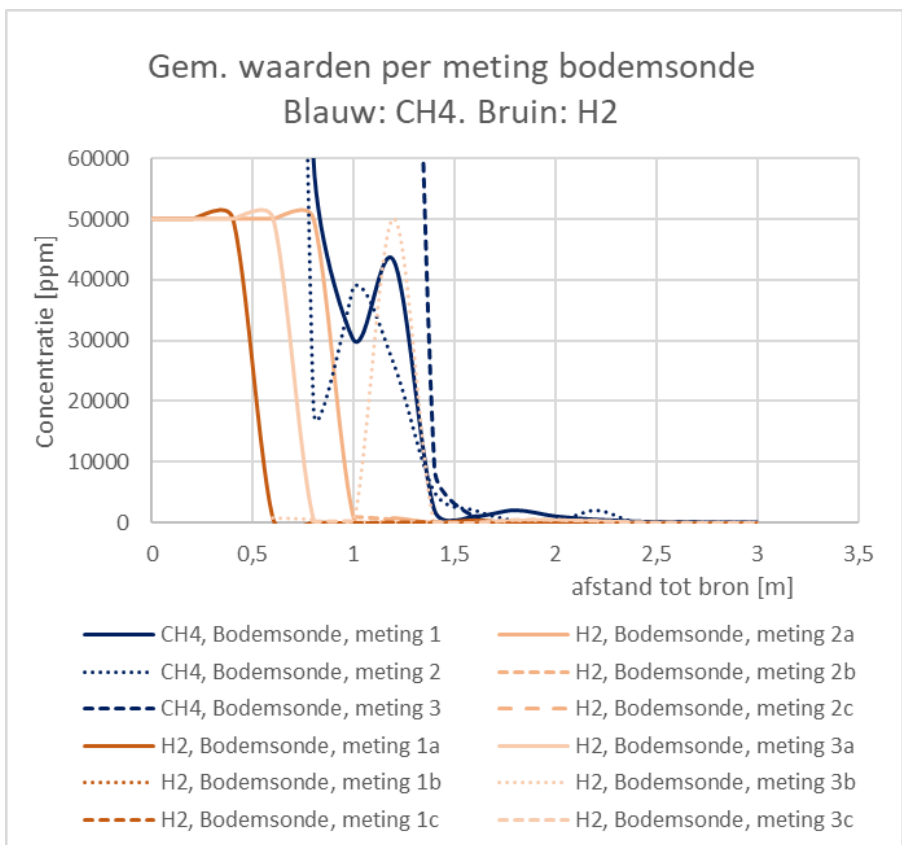
### 3.4 Meetwaarden bodemsonde



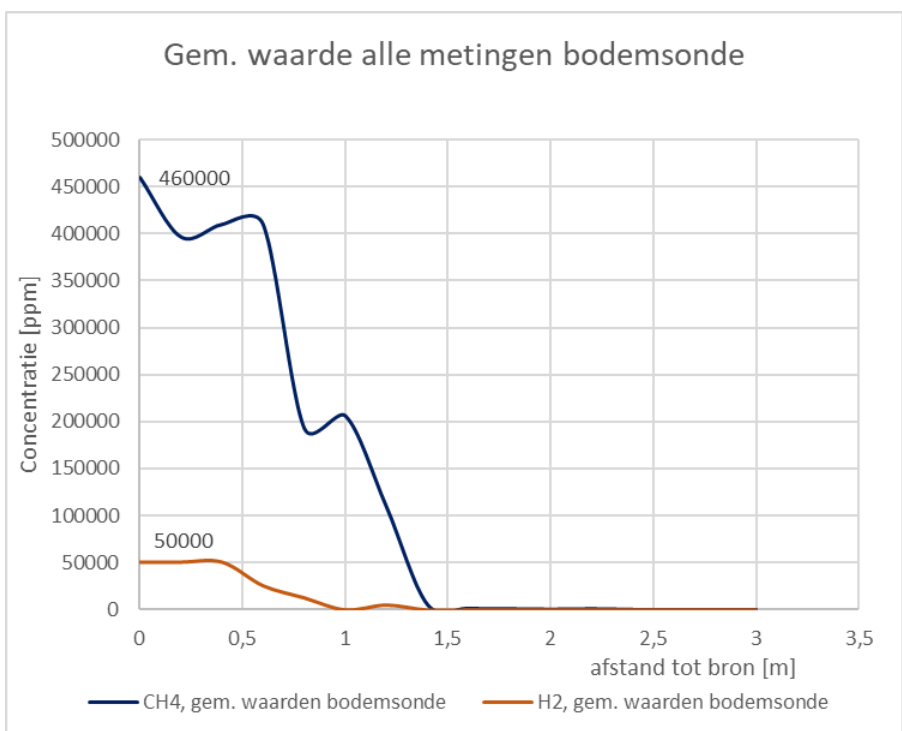
**Figuur 18** Meetpunten met de bodemsonde. Max. waarde vert. as 500000 ppm. (=50 vol%) Van meetserie 1 (methaan) zijn meetwaarden en een trendlijn van het gemiddelde van twee opeenvolgende meetwaarden weergegeven. NB. Max meetwaarde waterstofmeter = 5%



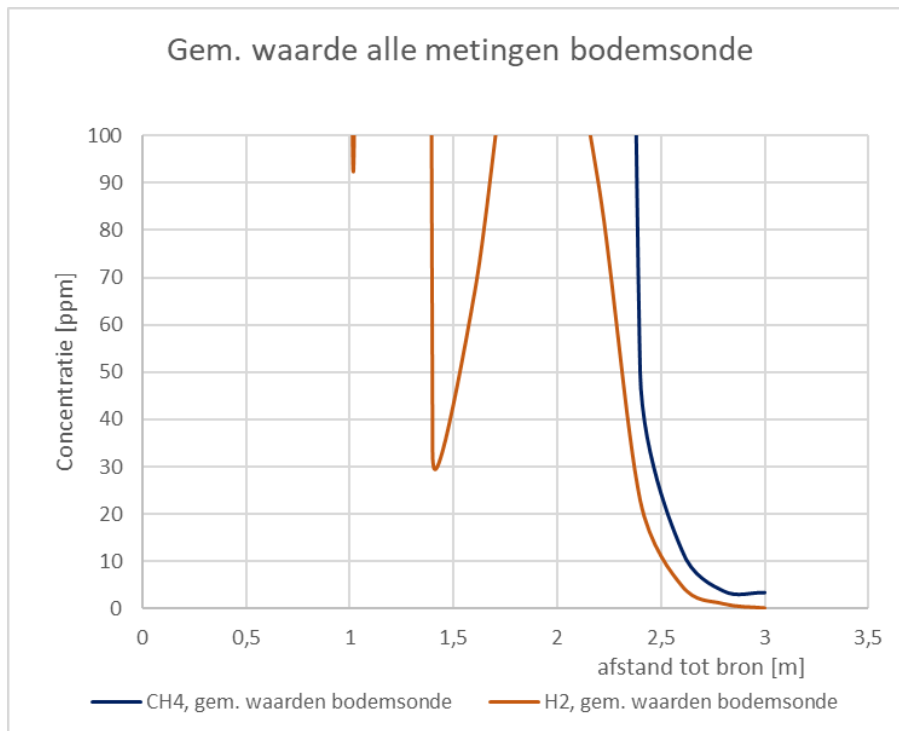
**Figuur 19** Meetpunten met de bodemsonde. Max. waarde vert. as 500 ppm. Met deze schaal zijn de verder van de lekbron afgelegene punten beter af te lezen. Meetwaarden > 500 ppm vallen buiten de grafiek.



**Figuur 20** Metingen met de bodemsonde met gemiddelde waarden per meetserie. Meetwaarden > 60000 ppm vallen buiten de grafiek



**Figuur 21** Metingen met de bodemsonde met gemiddelde waarden van alle metingen. NB Max meetwaarde waterstofmeter = 5%



*Figuur 22 Zelfde als figuur 21 maar met kleinere schaal. Bij grens van gemiddelde waarde van 10 ppm is de verspreiding voor CH<sub>4</sub> = 2,6 m en voor H<sub>2</sub> = 2,5 m*

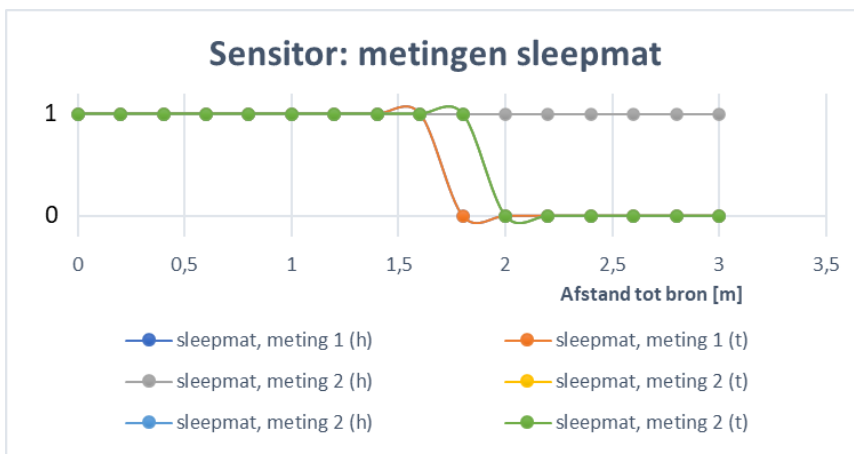
### 3.5 Meetresultaten met de Sensistor.

Om een vergelijking te maken met de meetresultaten met de Hunter H2 van Esders is ook gemeten met een ander fabricaat waterstofdetector, de Sensitor XRS 9012. De waterstofmetingen met de Sensistor zijn op een andere manier grafisch uitgewerkt omdat die geen meetwaarden hebben opgeleverd, alleen een detectieaanduiding van een aantal led-lampjes bij een bepaalde ingestelde gevoeligheid. Omdat het verband tussen die detectieaanduidingen en de concentratie niet is gegeven, wordt deze als volgt weergegeven in de grafiek:

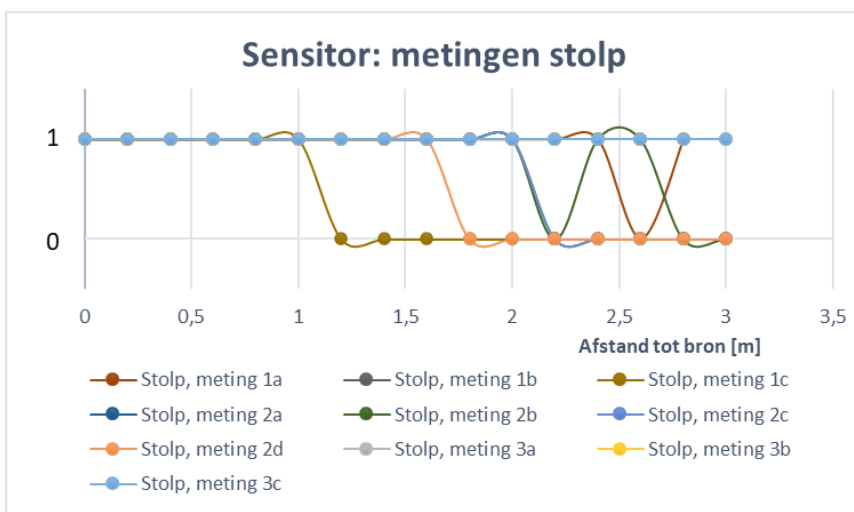
1. wel een detectie: Meting heeft een waarde 1, ongeacht welke aanduiding qua ingestelde gevoeligheid en aantal lampjes dat aanflitst.
2. geen detectie: Meting heeft een waarde 0.

De meetpunten uit 1 meetserie zijn met een lijn verbonden omdat veel meetpunten over elkaar heen vallen in deze weergave.

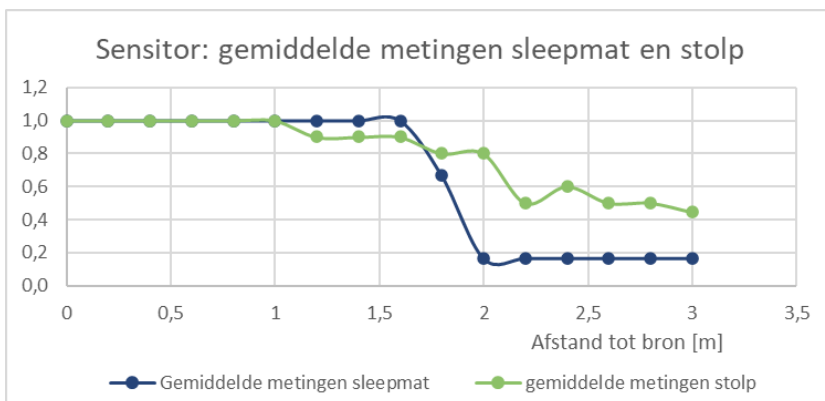
Met de Sensistor zijn alleen metingen uitgevoerd in combinatie met de sleepmat en met de stolp.



*Figuur 23 Metingen Sensistor met de sleepmat. Wel detectie = 1; geen detectie = 0*



*Figuur 24 Metingen Sensistor met de sleepmat. Wel detectie = 1; geen detectie = 0*



*Figuur 25 Sensistor Gemiddelde waarden alle metingen met sleepmat en stolp. Voor 1 meting geldt: wel detectie = 1; geen detectie = 0*

In Figuur 25 zien we dat gemiddeld gesproken op een afstand > ca 1,7 m, met de stolp vaker waterstof wordt gedetecteerd dan met de sleepmat.

### **Vergelijking meetresultaten van de Sensistor XRS 9012 en de Hunter H2.**

In de figuren in paragraaf 3.6.2 is per meetmethode weergegeven het percentage van de waarnemingen met een meetwaarde > 0. Ook voor de Hunter H2 is die rubricering



gemaakt. Daarmee kunnen de resultaten van de metingen met de Sensitor en de Hunter H2 met elkaar worden vergeleken.

Zoals is te zien in figuur 27 en figuur 28 in die paragraaf is het aantal waarnemingen waarbij een meetwaarde  $> 0$  wordt gemeten bij de Sensitor iets groter dan bij de Hunter H2. Dat is echter geen consistent beeld op basis waarvan conclusies kunnen worden getrokken of het ene apparaat nu gevoeliger reageert dan het andere. De resultaten van de meetseries per apparaat variëren ook nogal sterk.

## **3.6 Beschouwing meetresultaten**

### **3.6.1 Vergelijking per meetmethode**

Voor de vergelijking tussen verspreiding van methaan en waterstof, zijn de meetresultaten vergeleken die zijn verkregen met de IRwin voor de meting van de verspreiding van methaan en de Hunter H2 voor de metingen van waterstof. Dit omdat de Sensitor geen meetwaarden geeft.

De conclusies per meetmethode op grond van de metingen in de bijlagen I en II, grafisch weergegeven in de paragrafen 3.2, 3.3 en 3.4, zijn als volgt.

#### **Meetresultaten sleepmat:**

Bij zowel methaan als bij waterstof is de spreiding van de meetwaarden groot bij gebruik van de sleepmat. Bij waterstof zijn er ook meetseries waarbij nagenoeg geen waterstof is gedetecteerd. De meetwaarden voor methaan liggen gemiddeld een stuk hoger dan bij waterstof, ondanks het feit dat het lekdebiet van waterstof bijna 2,5 maal groter is dan van methaan.

#### **Meetresultaten stomp:**

Over het gehele bereik liggen de meetwaarden bij de stomp hoger dan bij de sleepmat. Dat is ook wel logisch omdat bij een stomp langer op één plek wordt gemeten (minimaal 2 seconden) en een sleepmat altijd valse lucht aanzuigt terwijl een stomp een klein stukje van de bodem afsluit waardoor alleen lucht via de bodem wordt aangezogen.

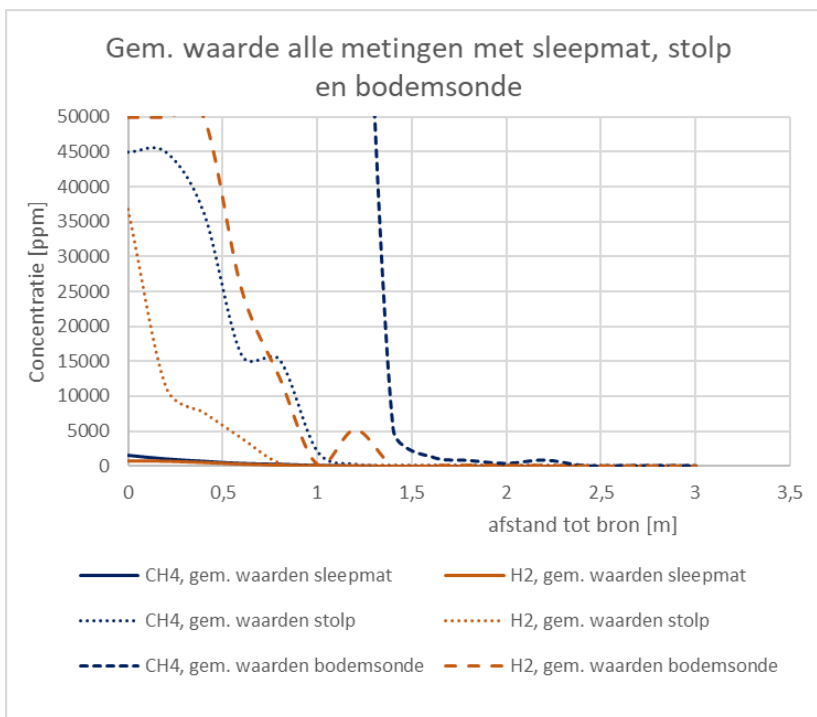
Wat de relatieve niveaus betreft zien we hetzelfde beeld als bij de sleepmat: grote spreiding van resultaten en de meetwaarden voor methaan liggen gemiddeld een stuk hoger dan bij waterstof.

#### **Meetresultaten bodemsonde:**

Over het gehele bereik liggen de meetwaarden bij de bodemsonde hoger dan bij de stomp en de sleepmat (wat niet verrassend is). Wat de relatieve niveaus betreft zien we hetzelfde beeld als bij de stomp en de sleepmat: grote spreiding van resultaten en de meetwaarden voor methaan liggen gemiddeld een stuk hoger dan bij waterstof.

Bovengenoemde resultaten zijn grafisch weergegeven in één grafiek in figuur 26.

De verklaring voor de spreiding in de meetresultaten moet worden gezocht in variërende windsnelheid, oneffenheden in het bodemoppervlak en inhomogeniteiten van de bodem.

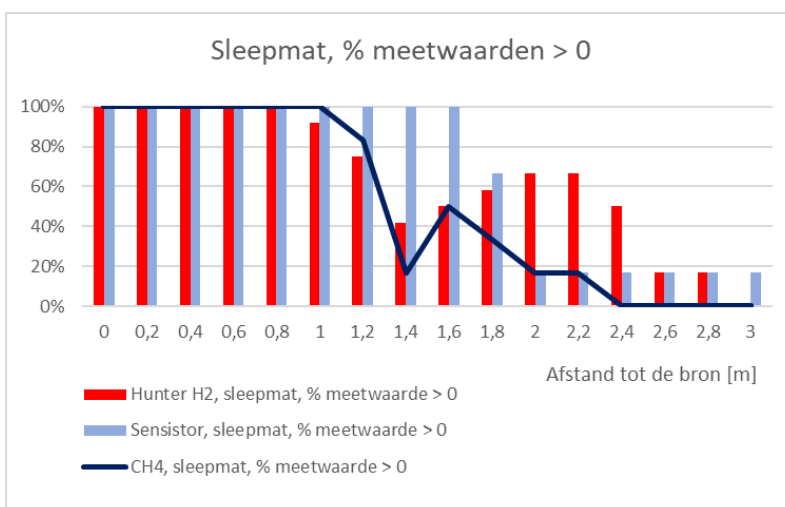


Figuur 26 Metingen met gemiddelde waarden per meetmethode. Meetwaarden > 50000 ppm vallen buiten de grafiek

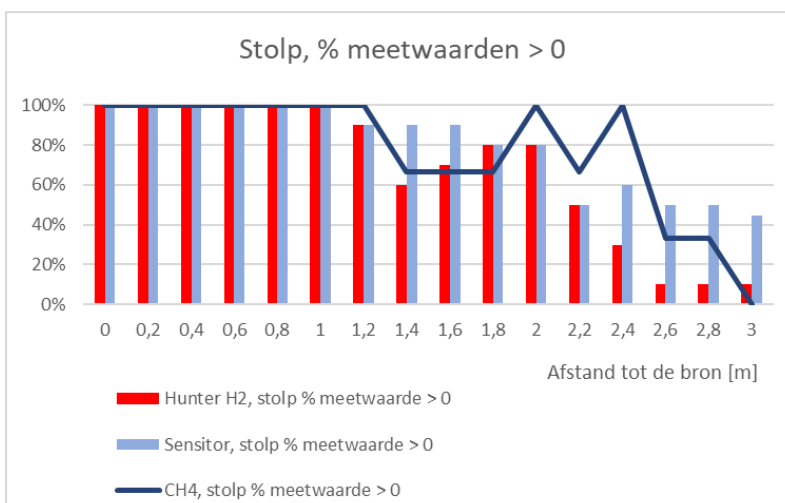
### 3.6.2 Vergelijking op basis van kans op een meetwaarde > 0

Niet alleen de relatie tussen de absolute meetwaarde en de afstand tot de lekbron, is interessant, ook van belang is het gegeven binnen welke afstand er sowieso een detectiewaarde wordt gevonden om de lekzoeker op het spoor te brengen van een lekkage.

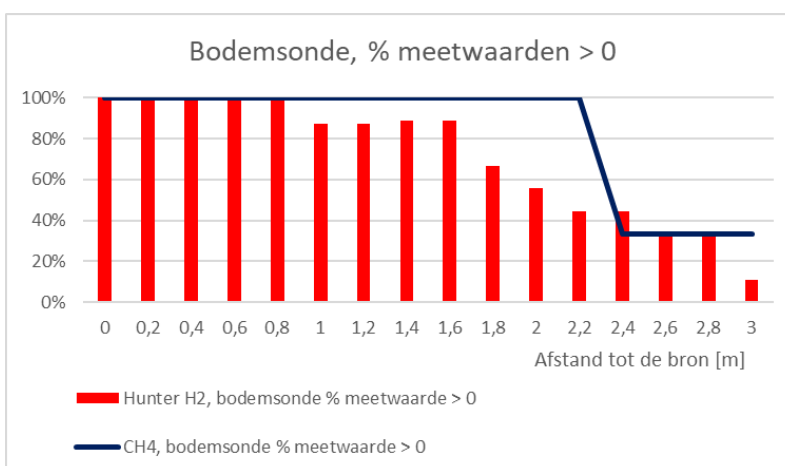
In de hiernavolgende figuren is per meetmethode weergegeven het percentage van de waarnemingen waarbij de meetwaarde > 0 is, in relatie tot de afstand vanaf de bron. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de meetresultaten met methaan, gemeten met de IRwin, en de meetresultaten met waterstof, waarbij de metingen met de Hunter H2 en met de Sensistor apart zijn weergegeven.



Figuur 27 Vergelijking % van aantal waarnemingen met meetwaarde > 0 tussen CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub>, gemeten met de sleepmat.



**Figuur 28** Vergelijking % van aantal waarnemingen met meetwaarde > 0 tussen CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub>, gemeten met de stolp.



**Figuur 29** Vergelijking % van aantal waarnemingen met meetwaarde > 0 tussen CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub> (metingen met de Hunter H2), gemeten met de bodemsonde. (NB van de Sensor zijn geen meetresultaten met de bodemsonde)

De voorgaande figuren wijzen het volgende uit:

- Voor alle drie de meetmethoden geldt dat op  $\leq 1$  m vanaf de bron:
  - Bij methaan bij alle metingen een meetwaarde > 0 is gevonden
  - Bij waterstof was dit op een enkele meting na, ook het geval
- Bij gebruik van de sleepmat tussen 1 – 3 m vanaf de bron:
  - Bij waterstof een grotere kans is om een meetwaarde > 0 is te vinden dan bij methaan. Bij metingen tussen 2,4 en 3 m is wel waterstof in een aantal metingen aangetroffen, maar geen methaan.
- Bij gebruik van de stolp tussen 1 – 3 m vanaf de bron is de kans om op een bepaalde afstand een meetwaarde > 0 te vinden voor methaan iets groter dan voor waterstof.
- Bij gebruik van de bodemsonde geldt dat bij een afstand  $\leq 2,2$  m:
  - Bij methaan bij alle metingen een meetwaarde > 0 is gevonden
  - Bij waterstof niet bij alle metingen een meetwaarde > 0 is gevonden
- Bij gebruik van de bodemsonde een afstand tussen 2,2 – 3 m is de kans om op een bepaalde afstand een meetwaarde > 0 te vinden voor methaan en waterstof ongeveer even groot.



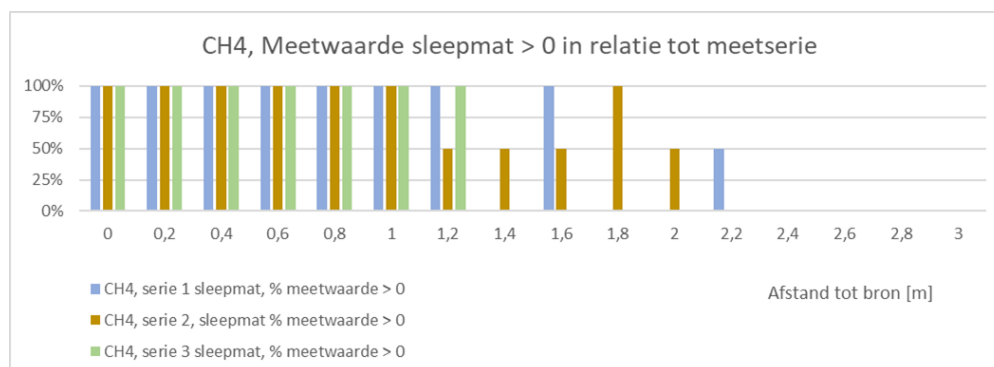
### 3.6.3 Vergelijking van de resultaten per meetserie

In deze paragraaf wordt nagegaan of de kans om een meetwaarde  $> 0$  te vinden, verschilt per meetserie, ofwel de richting ten opzichte van de lekbron van waaruit de metingen zijn uitgevoerd: zie figuur 4 in paragraaf 2.2. Hierbij zijn alleen de metingen met de sleepmat beschouwd.

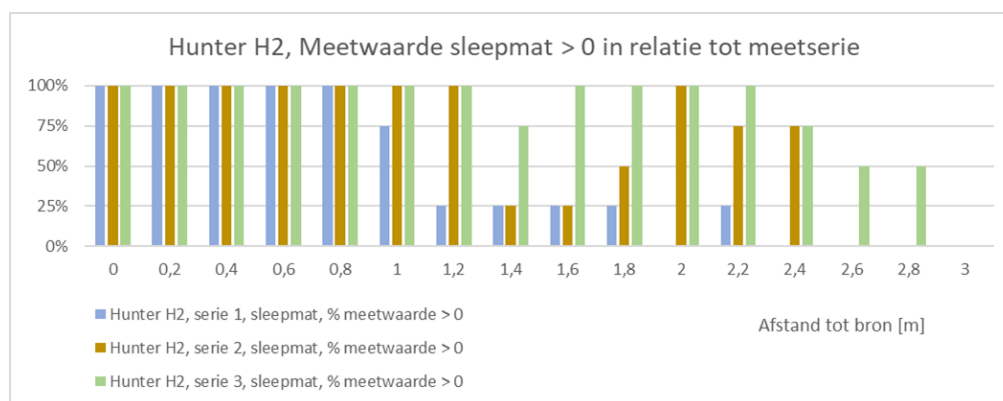
In figuur 10 in paragraaf 3.2 is al onderscheid per meetserie gemaakt, waarbij de gemiddelde meetwaarde van de meetserie als uitgangspunt is genomen. Daar is al een onderscheid per meetserie gemaakt.

In de hiernavolgende figuren is per meetapparaat en per meetserie het percentage waarnemingen op een bepaalde afstand weergegeven.

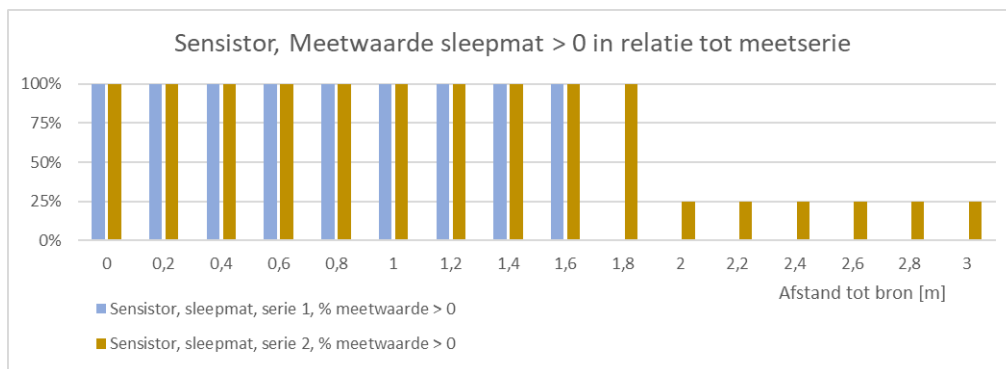
Tenslotte zijn per meetserie de percentages met een meetwaarde  $> 0$  van alle waarnemingen ( $\text{CH}_4$  en  $\text{H}_2$ , zowel van de Hunter als de Sensistor) weergegeven.



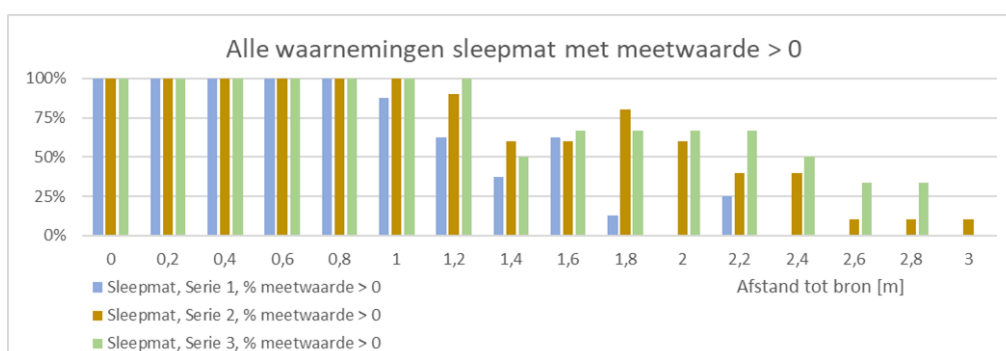
**Figuur 30** Vergelijking tussen de 3 meetseries van % van aantal waarnemingen met een meetwaarde  $> 0$  voor methaan, gemeten met de sleepmat. NB. Per meetserie zijn 2 metingen uitgevoerd.



**Figuur 31** Vergelijking tussen de 3 meetseries van % van aantal waarnemingen met een meetwaarde  $> 0$  voor waterstof, gemeten met de Hunter H2, gemeten met de sleepmat. NB. Per meetserie zijn 4 metingen uitgevoerd.



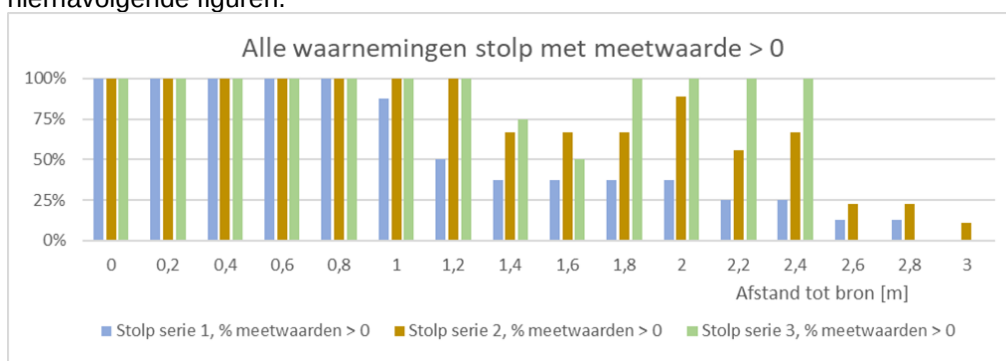
**Figuur 32** Vergelijking tussen 2 meetseries<sup>1</sup> van % van aantal waarnemingen met een meetwaarde > 0 voor waterstof, gemeten met de Sensistor met sleepmat,. NB. Voor meetserie1 zijn 2 metingen uitgevoerd en voor meetserie 2 zijn 4 metingen uitgevoerd.



**Figuur 33** Vergelijking % van alle waarnemingen met een meetwaarde > 0 tussen de 3 meetseries, gemeten met de sleepmat.

Uit de figuren is af te leiden dat bij afstand > 1 m vanaf de bron, meetserie 1 een lager % waarnemingen met een meetwaarde > 0 geeft dan de meetseries 2 en 3.

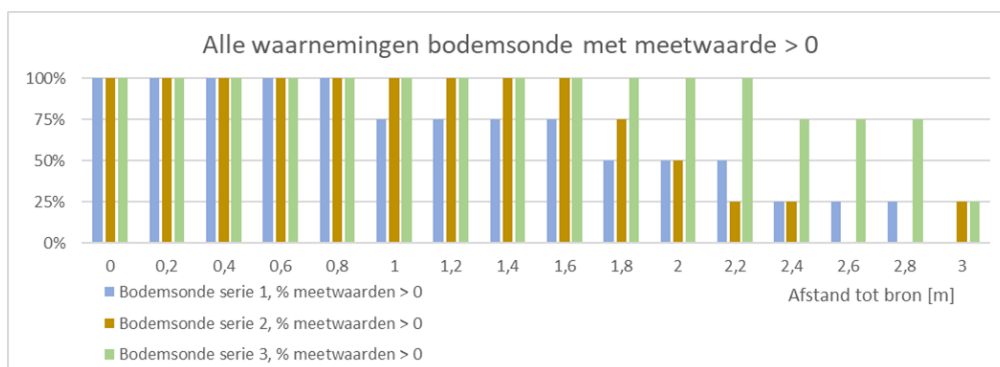
Ook voor de meting met de stolp en met de bodemsonde zijn alle meetwaarden bij elkaar opgeteld om de vergelijking tussen de drie meetseries te maken. Zie de hiernavolgende figuren.



**Figuur 34** Vergelijking % van alle waarnemingen met een meetwaarde > 0 tussen de 3 meetseries, gemeten met de stolp.

We zien in figuur 34 bij meting met de stolp een analoog beeld als bij de sleepmat: bij afstand > 1 m vanaf de bron, geeft meetserie 1 een lager % waarnemingen met een meetwaarde > 0 dan de meetseries 2 en 3.

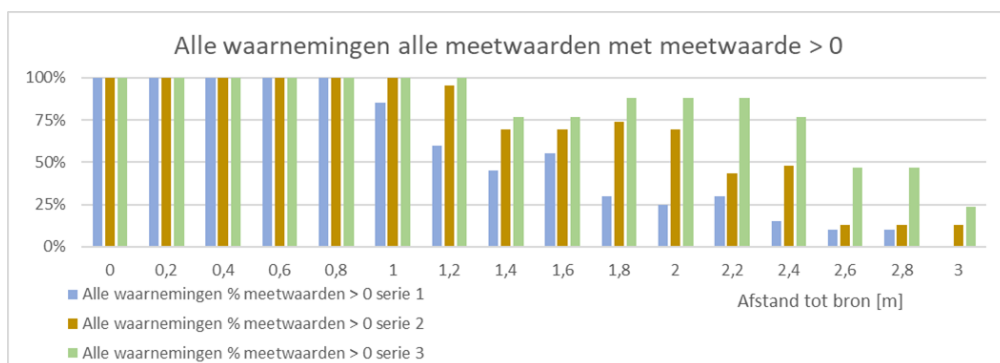
<sup>1</sup> Meetserie 3 kon niet worden voltooid doordat het slecht weer werd.



**Figuur 35** Vergelijking % van alle waarnemingen met een meetwaarde > 0 tussen de 3 meetseries, gemeten met de bodemsonde. (NB Met de Sensor is niet i.c.m. de bodemsonde gemeten)

Bij gebruik van de bodemsonde is de kans op detectie van gas bij meetserie 3 groter dan bij meetserie 1 en 2.

In figuur 36 zijn alle waarnemingen verwerkt van alle meetmethoden:



**Figuur 36** Vergelijking % van alle waarnemingen met een meetwaarde > 0 tussen de 3 meetseries, gemeten met de sleepmat, stolp en bodemsonde.

In deze figuur zien we ook dat de meetserie 1 op een afstand > 1 m vanaf de lekbron een lagere kans heeft op een meetwaarde >0

De oorzaak voor de verschillen moet worden gezocht in de verschillen in samenstelling, dichtheid en/of vochtgehalte van de grond.



## 4 Resultaten modelberekening

Voor de verspreiding van aardgas en waterstof in de droge bodem is een modelberekening uitgevoerd waarvan de resultaten zijn opgenomen in dit hoofdstuk. Deze modelberekening aan een lekkende gasleiding in een zandbodem laat zien dat er weinig verschil is tussen de verdeling van aardgas en waterstof in de bodem. Wel zal er bij dezelfde gatgrootte en druk, ongeveer 2,6 maal zoveel waterstof uit een lek stromen.



*Figuur 37 Doorsnede van droge bodem*

### 4.1 Vergelijking tussen lekkage van waterstof en aardgas

Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) zijn twee berekeningen gedaan aan de debiet-, druk en concentratieverdeling van het gas rondom een lek. Dit is gedaan bij een aardgaslek en bij een waterstoflek. De berekeningen zijn gedaan bij dezelfde randvoorwaarden en het betreft de berekening van de stationaire evenwichtssituatie, wanneer een lek lange tijd aanwezig is.

### 4.2 Drie effecten spelen een rol

Aardgas en waterstof zijn twee verschillende gassen. Voor de berekening zijn er drie eigenschappen relevant, waarin de gassen van elkaar verschillen. Dit betreft de dichtheid, de viscositeit en de diffusiecoëfficiënt. Deze eigenschappen zijn strikt genomen ook nog afhankelijk van de temperatuur en druk en van de mengverhouding met lucht. De berekeningen zijn gedaan voor een temperatuur van 10 °C. Diffusiecoëfficiënten, die in de vakliteratuur worden gegeven, betreffen de diffusie van het gas (waterstof of methaan) in een overmaat lucht. Voor gebruik bij een stroming in de bodem, moeten deze waarden nog worden gecorrigeerd voor de porositeit van de bodem. In de berekening is uitgegaan van een porositeit van 40%. Deze waarde geldt voor zandgrond bestaande uit ronde korrels van homogene grootte. Dit is een situatie die in de praktijk veel voorkomt.

Fysisch gezien spelen er drie verschillende verschijnselen een rol bij de verspreiding van gas in de bodem:

- Transport (convectie) ten gevolge van de drukgradiënt
- Transport (convectie) ten gevolge van het dichtheidsverschil ten opzichte van de (omringende) lucht
- Transport (diffusie) ten gevolge van de concentratiegradiënt

Het relatieve belang varieert met de locatie. Dicht bij het lek overheerst het effect van convectie ten gevolge van de drukgradiënt. Op iets grotere afstand wordt convectie



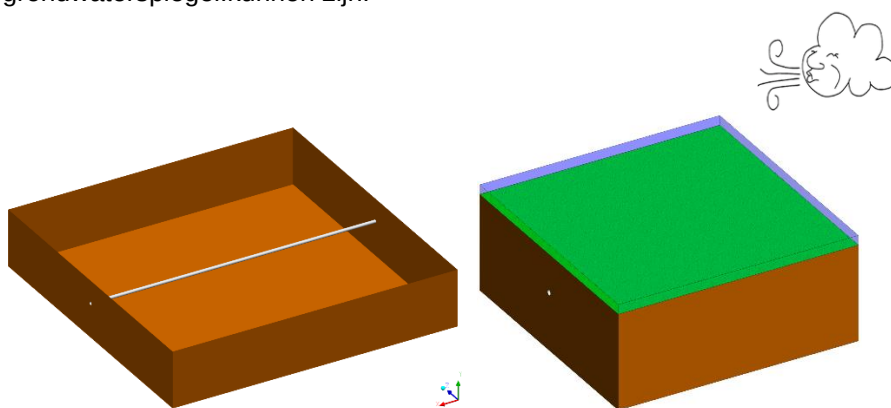
door dichtheidsverschil relatief iets belangrijke en op grote afstand van het lek is diffusie meer dominant.

Het effect van de korrelgrootte is verwerkt in de waarde van de permeabiliteit  $k$  van de bodem. Hiervoor is de waarde  $k = 10^{-11} \text{ m}^2$  gebruikt. Deze waarde geldt voor een bodem van fijn zand. Overigens is in het gebied waar convectie belangrijker is dan diffusie, het verspreidingspatroon niet erg afhankelijk van de permeabiliteit. Naarmate het zand grover is, neemt de permeabiliteit toe en wordt het effect van stijfkracht (iets) belangrijker en het effect van diffusie minder belangrijk.

### 4.3 Aanpak

Het aardgaslek is gemodelleerd als een debietbron van  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  gepositioneerd op een ondoorlatende buis in de bodem. De buis heeft een diameter van  $0,11 \text{ m}$  uitwendig en  $0,10 \text{ m}$  inwendig en ligt  $0,8 \text{ m}$  beneden maaiveld. Het lek ligt aan de zijkant van de buis.

Het totale rekendomein is een vierkante bak van  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  ( $L \times B \times H$ ). De zijkanten van het rekendomein zijn ondoordringbaar voor gas en lucht. Hetzelfde geldt voor de bodem. De ondoorlaatbare bodem zou in de praktijk de grondwaterspiegel kunnen zijn.



*Figuur 38: Schematische weegave van het rekendomein*

De bovenste  $0,05 \text{ m}$  van de bak is gevuld met lucht. Voor de numerieke stabiliteit is er een kleine instroom van lucht gemodelleerd ( $0,01 \text{ m/s}$ ). Tevens wordt hierdoor het op maaiveld ontsnappende gas weggeblazen, zodat de concentratie van gas in lucht laag blijft en er effectief diffusie van gas in het domein lucht optreedt.

Er is gerekend met een rond gaatje van  $0,25 \text{ mm}^2$  oppervlak. Aan de uitstroomzijde is een kleine halfbolvormige holte (diameter  $5 \text{ mm}$ ) aangebracht. Het blijkt dat een druk van  $133 \text{ mbar(g)}$  nodig is om een lekkage van  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  te genereren.<sup>1</sup>

Vanwege de aanname dat er een halfbolvormige holte rondom de lekopening ontstaat, heeft de exacte diameter van het gaatje naar verwachting weinig of geen invloed op het verspreidingspatroon. Het beïnvloedt wel de druk in de leiding bij een gegeven debiet.

NB. Berekeningen zijn uitgevoerd voordat het testprotocol in detail is vastgelegd. Op basis van het fysische model mag worden aangenomen dat het berekende stromingspatroon (in het gebied waar convectie overheerst, d.i. binnen ca.  $\frac{1}{2} \text{ m}$  afstand van het lek) niet veel verandert als het lekdebiet een factor 2 groter of kleiner is. In eerste orde veranderen de lokale snelheden met eenzelfde factor. In het gebied

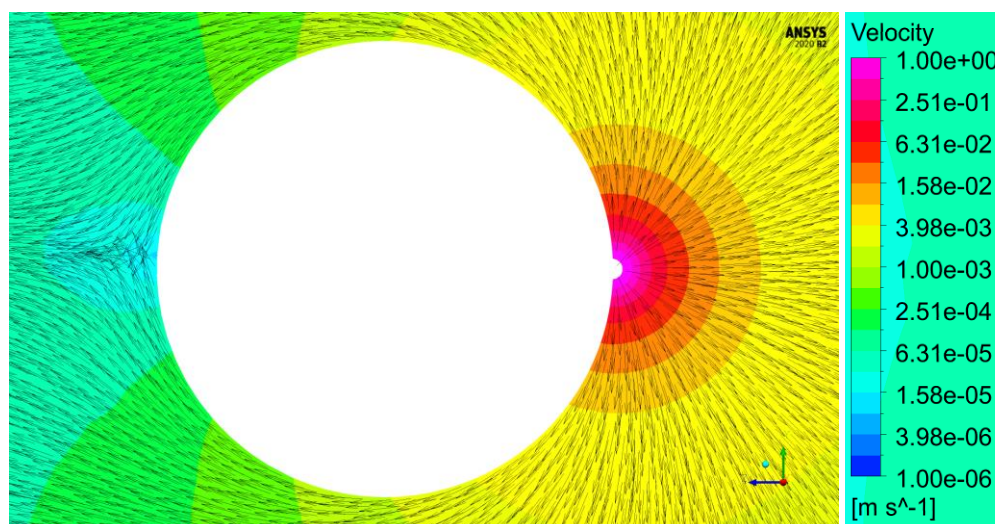
<sup>1</sup> De diameter van het lekgaatje en van de halfbolvormige holte en de daaruit voortvloeiende benodigde druk zijn puur gegevens voor de modellering. Als grotere diameters zouden zijn gekozen dan is de benodigde druk ook lager. Het gaat er in het model om dat het resultaat van die keuzes een lekdebiet van  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  oplevert.



waar diffusie overheerst, zullen de concentratiegradiënten evenredig veranderen. Concreet betekent dit bijvoorbeeld dat de 'grenslaag' direct onder het maaiveld (waar de concentratie van relatief hoog naar nul gaat), evenredig dunner worden. Qua veiligheid (ophoping in ondergrondse holtes) zijn de stromingssnelheden relevant, niet de concentratieverdeling.

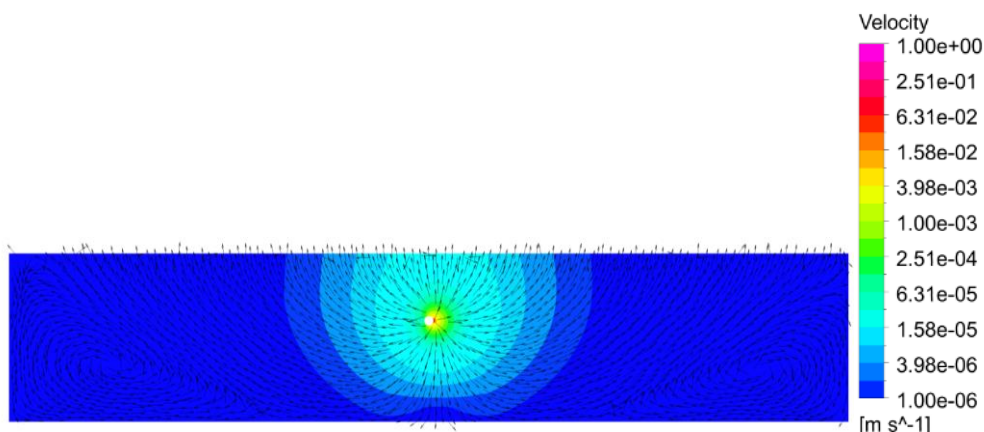
#### 4.4 Resultaten

Het blijkt dat het gas in alle richtingen rondom de lekopening gelijkmatig uitstroomt (zie figuur 39).

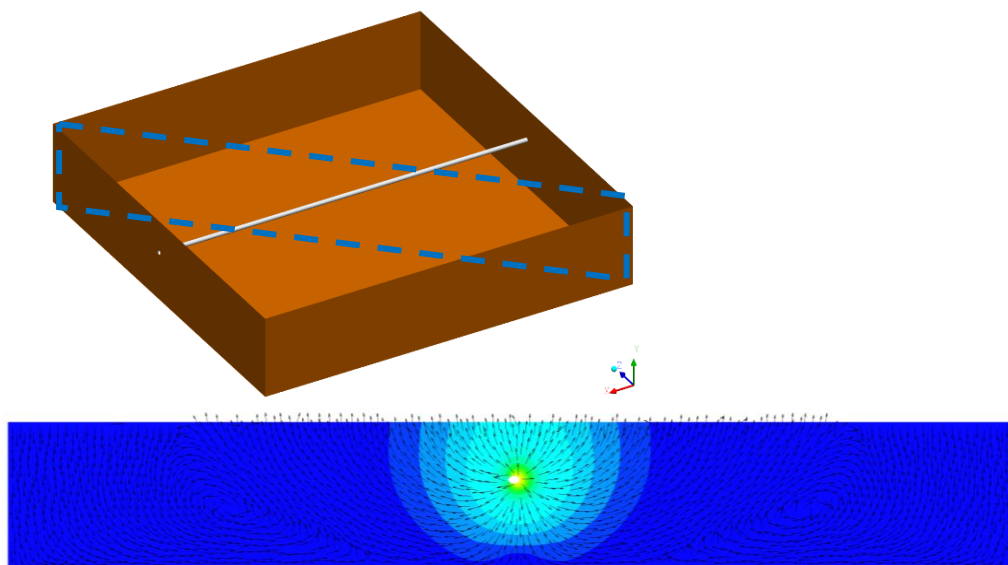


*Figuur 39 Stromingspatroon aardgas in de nabijheid van het lek.  
NB De grote witte cirkel is de doorsnede van de buis, en aan de rechterzijde van de buis is de plaats van het lek te zien.*

Als we verder uitzoomen, zien we dat de buis zelf weinig invloed heeft op het overall stromingspatroon. Het patroon lijkt sterk op een patroon van een puntbron, zonder buis in de nabijheid.



*Figuur 40 Stromingspatroon aardgas over de totale doorsnede van het rekendomein  
NB. De kleine gele cirkel is de buisdoorsnede.*

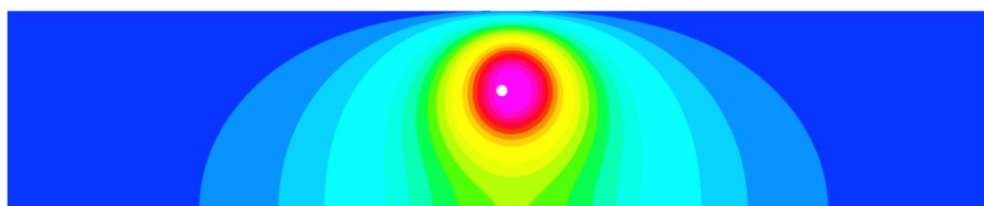
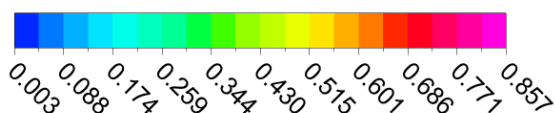


*Figuur 41 Stromingspatroon aardgas over de totale doorsnede over de diagonaal. NB. De kleine gele cirkel is de buisdoorsnede*

Voor de verspreiding van het gas in de bodem is vooral de gasconcentratie interessant. In figuur 42 is de methaanconcentratie<sup>1</sup> weergegeven. De methaanconcentratie is het hoogst direct nabij het lek (85,7 vol%) en neemt af tot praktisch nul (0,3 vol%). Dit geeft aan dat het domein voldoende groot is, zodat de randen de ontwikkeling van de totale 'gasbel' in de bodem niet beïnvloeden. De situering van het lek aan de zijkant van de buis zorgt voor een kleine verschuiving van de 'gasbel'. Het middelpunt van de bel valt niet exact samen met de locatie van het lek.

Het effect van de stijgkracht van het lichtere methaan op de concentratieverdeling is gering. De kern van de bel ligt op dezelfde hoogte als het lek. Er is ook geen sprake van een stijgende pluim van gas in de grond.

CH<sub>4</sub>.Molar Fraction



*Figuur 42 Concentratieverdeling van methaan. NB. De kleine witte cirkel is de buisdoorsnede.*

Figuur 43 geeft de concentratieverdeling weer op 5 cm onder maaiveld. De concentratieverdeling exact op maaiveld geeft geen goede indicatie van de

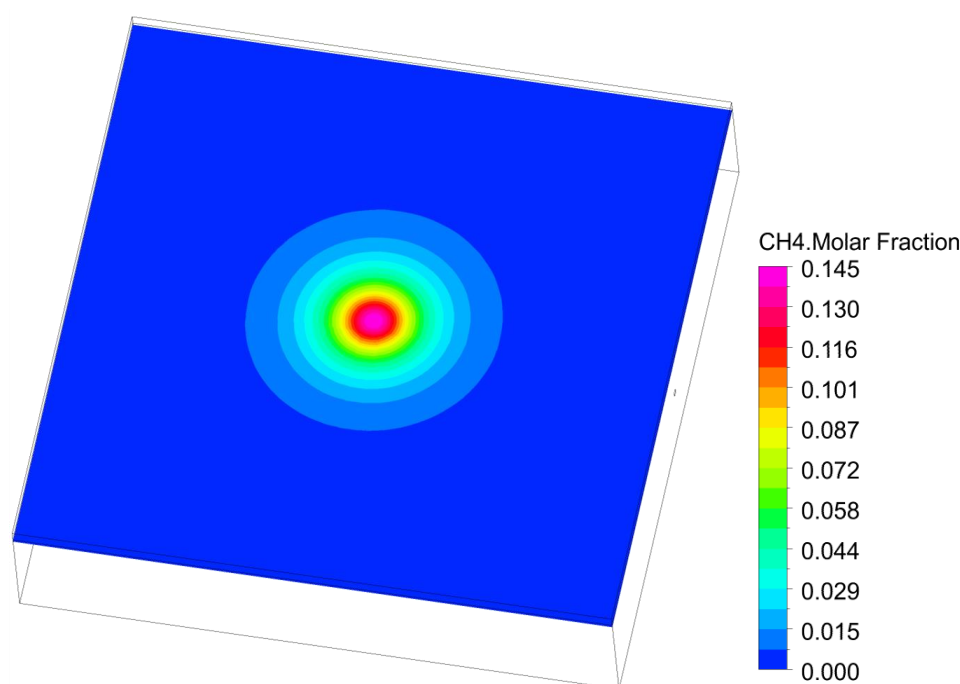
<sup>1</sup> In de berekening is het lekgas gemodelleerd als een kunstmatig gas met een dichtheid van 0.833 kg/m<sup>3</sup> en viscositeit van aardgas. De concentraties zijn teruggerekend uit een methaangehalte van 86 vol%.



gasverdeling, want daar wordt de verdeling overheerst door het toevallige gedrag van de luchtstroming direct boven het maaiveld. Op 5 cm diepte is de concentratie verdeling vrijwel cirkelvormig.

Ter toelichting:

De concentratie van gas in de bodem gaat richting nul naarmate je dichter bij het maaiveld komt. Op het maaiveld is de concentratie gelijk aan de concentratie in de lucht en dus vrijwel nul. De concentratie onder het maaiveld wordt beïnvloed door (tegenstroomse) diffusie van lucht in de bodem. Het gasdebiet is evenredig met de concentratie gradiënt. (Een eventuele sleepmat meting zal de berekende verdeling overigens lokaal een beetje verstoren)

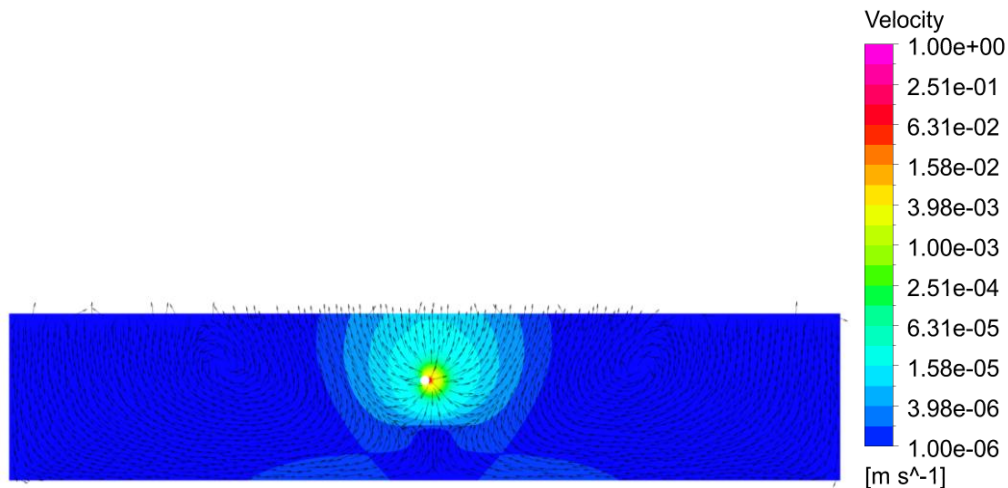


*Figuur 43 Concentratieverdeling van methaan, in een vlak 5 cm onder maaiveld. De diameter van de buitenste lichtblauwe cirkel (contour van 0,75 mol% CH<sub>4</sub>) is ca. 4 m. Nb: Het aanzicht is schuin van boven, waardoor de cirkelvormige verdeling enigszins afgeplat is weergegeven*

Uit nadere beschouwing van de rekenresultaten blijkt dat op 5 cm diepte het gastransport wordt overheerst door diffusie. Het diffusietransport is ca 20 maal zo groot als het convectieve transport. Op deze diepte, loodrecht boven het lek zijn de transportfluxen voor diffusie en convectie  $660 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectievelijk  $39 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Dus diffusie overheerst.

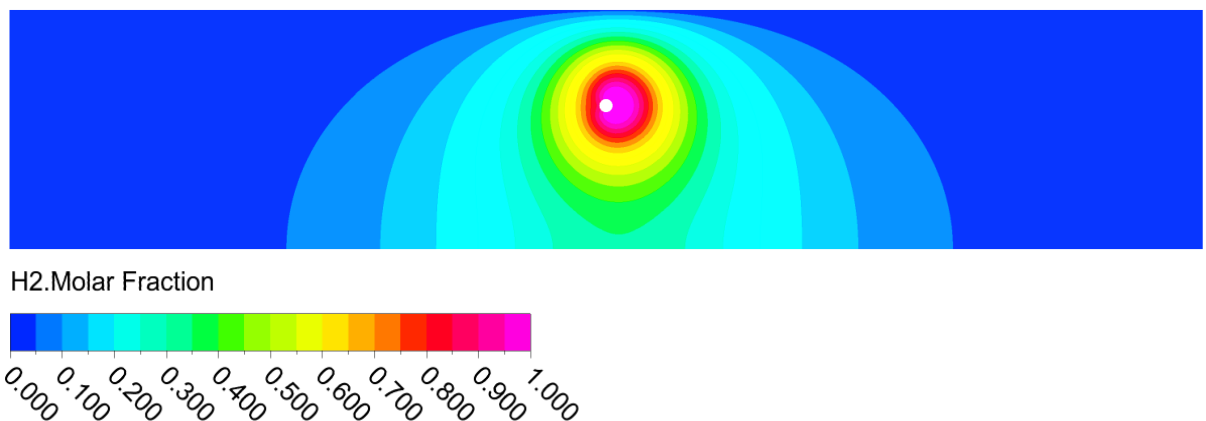
#### 4.5 Waterstof verspreidt zich in de bodem op dezelfde wijze als aardgas

De berekening is herhaald met waterstof als lekkend gas. Bij dezelfde geometrie en druk (133 mbar(g)) blijkt nu het lekdebiet  $0,261 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $= 6,53 \text{ mg/s}$ ). Dit is in overeenstemming met de vuistregel dat de volumestroom waterstof 2 à 3 keer zo groot is als die van aardgas, bij dezelfde omstandigheden van druk en geometrie. Alle debieten (fluxen) in de bodem zijn dan ook navenant groter.



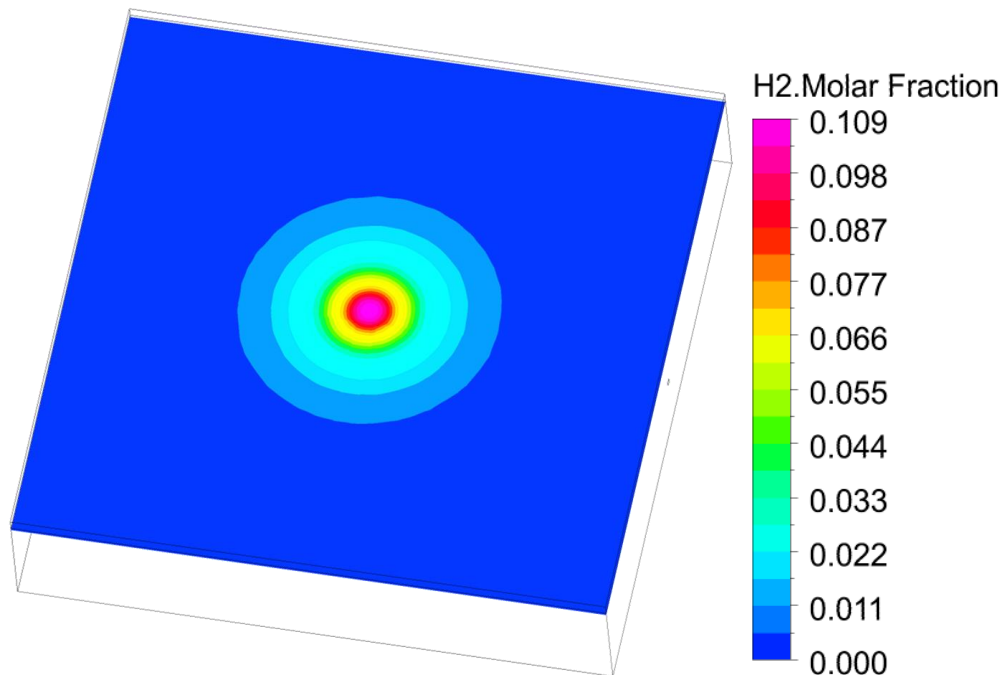
*Figuur 44 Snelheidsverdeling van waterstof*  
*NB. De kleine gele cirkel is de buisdoorsnede*

Uit de vergelijking van *Figuur 41* met *Figuur 44* blijkt dat ondanks de hogere volumestroom het gebied waar de snelheden groter dan 2 mm/s zijn, zich bij waterstof minder diep uitstrekt dan bij aardgas. Dit is waarschijnlijk niet alleen het gevolg van de grotere stijgkracht van waterstof, maar vooral het gevolg van de grotere diffusiecoëfficiënt. Dit is echter niet in detail nagegaan. Ook hier is de concentratieverdeling wellicht instructiever dan de snelheidsverdeling. Dit is hieronder weergegeven.



*Figuur 45 Concentratieverdeling van waterstof.*  
*NB. De kleine witte cirkel is de buisdoorsnede*

Een vergelijking van *figuur 42* met *figuur 45* laat zien dat het verspreidingspatroon niet wezenlijk anders is. De horizontale verschuiving van het hart van de '(waterstof)gasbel' ten opzicht van het lek is ongeveer hetzelfde en er is, net zo min als bij aardgas, een zichtbare verschuiving in de hoogte. Ook is er geen sprake van een opstijgende gaspluim in de bodem.

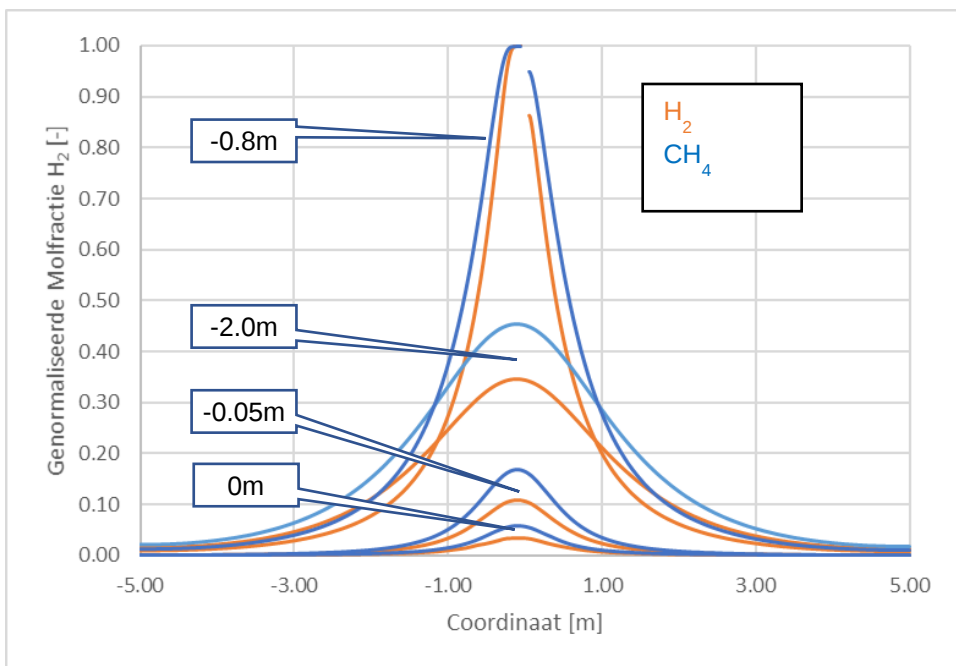


*Figuur 46 Concentratieverdeling van waterstof op 5 cm diepte. De diameter van de buitenste lichtblauwe cirkel (contour van 0,55 mol% H<sub>2</sub>) is ca. 4 m. Nb: Het aanzicht is schuin van boven, waardoor de cirkelvormige verdeling enigszins afgeplat is weergegeven*

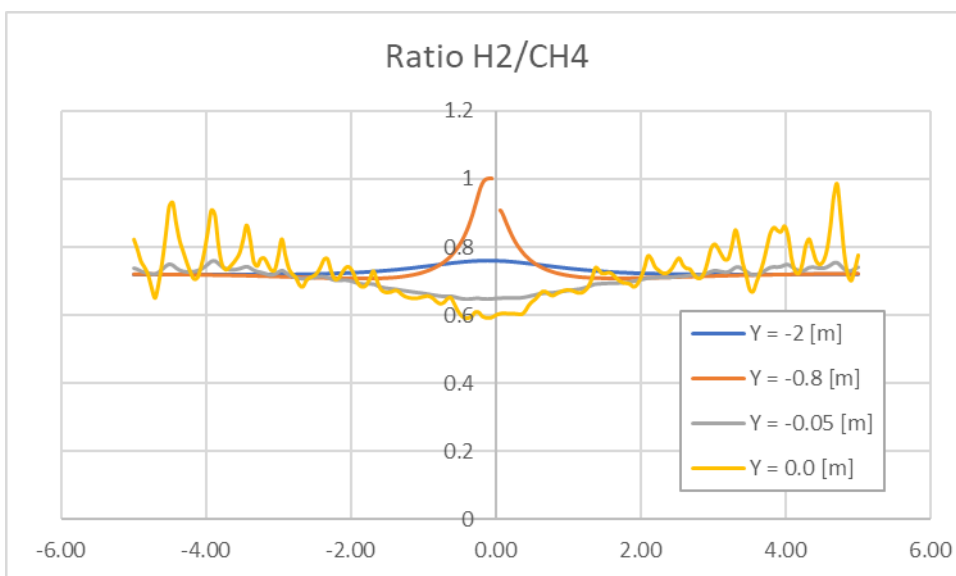
Ook de verschillen in horizontale verspreiding zijn gering. De concentratie op 5 cm diepte loodrecht boven het lek is lager dan bij methaan. Dit is het gevolg van de hogere diffusiecoëfficiënt, waardoor de concentratiegradiënt in de bodem minder groot is. Dit wordt bevestigd als we kijken naar de verhouding van de diffusie flux ten opzichte van de convectieve flux. Bij waterstof is deze verhouding 150. Op deze locatie zijn de fluxen  $2220 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  respectievelijk  $14,4 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

De maximale volume flux (op 5 cm diepte, loodrecht boven het lek) is 3,3 maal zo groot als bij aardgas. Dit is dus iets hoger dan de factor 2,6 die op grond van het hogere lekvolumedebiet te verwachten was. Blijkbaar is de verspreiding ter hoogte van het maaiveld iets meer geconcentreerd boven het lek bij waterstof dan bij aardgas. Het verschil is echter klein.

Dat de verspreiding van waterstof weinig verschilt van de van aardgas, kan ook worden geïllustreerd aan de hand van de onderstaande figuur 47. Hier zijn de genormaliseerde concentraties van de beide gassen met elkaar vergeleken. De normering is gedaan op basis van de maximale concentratie in het domein (dus de concentratie ter plaatse van de lekopening).



**Figuur 47** Genormeerde concentratie van  $H_2$  (oranje) en  $CH_4$  (blauw) concentratie over horizontale lijn in een vlak loodrecht op de buis ter plaatse van het lek. Concentratie bij de lekopening is voor beide gassen genormeerd op 1



**Figuur 48** Relatieve genormeerde verhouding  $H_2/CH_4$  concentratie over horizontale lijn in een vlak loodrecht door de buis ter plaatse van het lek. De ruis in de lijn op 0 m diepte is het gevolg van de deling van twee zeer lage concentraties op elkaar

#### 4.6 Geringe verschillen in verspreiding tussen aardgas en waterstof

De verschillen tussen verspreiding van waterstof en aardgas bij een lek in de droge zandgrond zijn gering. Ondanks de relatief grote verschillen in dichtheid, viscositeit en diffusiecoëfficiënt is het patroon van verspreiding ongeveer hetzelfde. Het grootste verschil wordt veroorzaakt door het verschil in volumedebiet. Bij eenzelfde druk en gatgrootte stroomt er qua volume circa 2,6 maal zoveel waterstof uit een gaatje in een leiding als aardgas. De concentratieverdeling van waterstof ter hoogte van het



lek is iets meer gepiekt dan van aardgas. Ter hoogte van het maaiveld (en 5 cm daaronder) is daar nauwelijks meer verschil te constateren. In het grootste deel van het gebied is de verhouding tussen de genormeerde concentratie  $H_2/CH_4$  tussen de 0,65 en 0,75.

#### Toelichting

De weergegeven concentratiecurves zijn genormeerd op de concentratie in de onmiddellijk nabijheid van het lek. Dat is 100%  $H_2$  bij waterstof en 83%  $CH_4$  bij aardgas. In figuur 48 staat de relatieve genormeerde verhouding van de  $H_2/CH_4$  concentratie op verschillende dieptes, uitgezet tegen de afstand t.o.v. de lekbron. Op 5 cm diepte is die verhouding ca 0,7. Aangezien de lekgrootte van waterstof 2 à 3 maal zo groot is als die van aardgas, zou je verwachten dat, aangezien de verspreiding niet veel verschil vertoont, ook die ratio in die orde van grootte zou liggen. De vraag dient zich aan op welke wijze die ratio is genormaliseerd. Het is lastig om het beknopt uit te leggen, dit is complexe stromingstechnische materie. Er is slechts een indirecte relatie tussen concentratie en stroming (flux). De concentratie verdeling zou voor aardgas en waterstof zelfs exact hetzelfde kunnen zijn terwijl de volumeflux van waterstof 2x zo groot is. Dit is het geval als de diffusie coëfficiënt en de viscositeit van aardgas versus waterstof met dezelfde factor (bijvoorbeeld een factor 2) zouden verschillen en de dichtheid van beide gassen hetzelfde zou zijn. In werkelijkheid hebben de relatieve verhouding van de diffusie coëfficiënt en de viscositeit niet dezelfde waarde. Uiteraard verschillen de dichtheden ook, maar dit laatste is klaarblijkelijk, zoals de modelberekeningen uitwijzen, van ondergeschikt belang in deze situatie.

Met behulp van deze CFD-berekeningen wordt een gedetailleerd inzicht verkregen in de (theoretische) verspreiding van lekkend gas in de poreuze bodem. Als vuistregel kan worden gehanteerd dat het volumedebiet (volume flux) van waterstof op iedere plaats in de bodem 2 à 3 maal zo groot is als van aardgas.

In de praktijk zijn er natuurlijk nog andere complicerende omstandigheden, zoals capillair water, scheurtjes en obstakels in de bodem en andere vormen van bodemgelaagdheid en homogeniteit.

Een nadere onderzoek naar het effect van dit soort complicaties is nuttig om een nog beter inzicht te krijgen in de risico's van gaslekkage in de bodem. De hier gepresenteerde berekening doen vermoeden dat er in dat opzicht geen wezenlijke verschillen tussen aardgas en waterstof zullen zijn.

#### 4.7 Vergelijking met resultaten praktijkproeven

Uit de modelberekening blijkt dat er bij dezelfde gatgrootte van het lek en bij dezelfde voordruk, ongeveer 2,6 maal zoveel waterstof dan aardgas uit een lek zal stromen. Deze factor 2,6 wijkt niet veel af de factor die bij de praktijkproeven ontstond toen bij het laten lekken van waterstof uit het lekbuisje, dezelfde druk in het lekbuisje werd aangehouden als bij methaan het geval was geweest (NB die factor was  $20,2 \text{ [l/h]} / 50 \text{ [l/h]} = 2,4$ ).

Een vergelijking tussen de resultaten van de praktijkproeven en de modelleringsresultaten is niet zomaar te maken. Bij de praktijkmetingen wordt actief gas aangezogen en wordt er 'valse lucht' vanaf het maaiveld bijgemengd. Dit geldt zeker voor de sleepmat en de stolp en in mindere mate ook voor de sonde. Voor de praktijkproeven kan een waarde van 10 ppm als grens voor de verspreidingsbreedte worden gekozen. Gezien de grote spreiding in de gemeten waarden bij de praktijkproeven worden de resultaten vergeleken met:

- voor de concentratie op maaiveldhoogte: figuur 11 en figuur 16
- voor de verspreiding op maaiveldhoogte figuur 12 en figuur 17.
- voor de concentratie op 5 cm diepte: figuur 21
- voor de verspreiding in de bodem: figuur 22.



Voor de modelberekening is een lekgruote van  $0,1 \text{ m}^3/\text{h} \approx 100 \text{ l/h}$  aardgas gebruikt. Voor de praktijkproeven is dat de helft daarvan,  $50 \text{ l/h}$ . Dat maakt het lastig om de gemeten waarden 1 op 1 te vergelijken met de resultaten van de modelberekening.

In *Figuur 43* en *Figuur 46* is te zien dat in de modelberekening het gebied met concentraties van  $5000 \text{ ppm}$  zich tot ca  $4 \text{ m}$  afstand van het lek uitstrekt. De sleepmat, de stolp en de bodemsonde geven een veel kleinere cirkel met deze concentratie. De sleepmat meet dus (waarschijnlijk) niet de concentratie op  $5 \text{ cm}$  diepte maar een soort gemiddelde tussen concentratie op nog mindere diepte, de omgevingslucht en het gas dat vanuit grotere diepte diffundeert.

Ondanks deze verschillen zijn de resultaten in één tabel gezet. Voor de vergelijking is het van belang dat de resultaten in de modelberekening worden uitgedrukt in molfractie en in de praktijkberekening met volumeprocent. Bij een gasmengsel is de molfractie vrijwel gelijk aan de volumefractie. In de tabel is de molfractie uitgedrukt in volumeprocent. Voor de waarden op maaiveldhoogte zijn zowel de waarden voor de sleepmat als voor de stolp gegeven, aangegeven als [waarde sleepmat / waarde stolp]. De meetwaarden voor de concentratie boven de bron uit de grafieken van de praktijkproeven (*figuur 11*, *figuur 16* en *figuur 11* en *figuur 16*) zijn ook omgerekend van  $\text{ppm}$  naar volumeprocenten.

*Tabel 1 Vergelijking resultaten praktijkproeven en modelberekening*

| Resultaat                  | Verspreidings-breedte (afstand tot aan bron) op maaiveld-hoogte [m] | Concentratie boven bron op maaiveld-hoogte [%] | Verspreidings-breedte (afstand tot aan bron) op geringe diepte [m] | Concentratie boven bron in de bodem op geringe diepte [%] |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| CH <sub>4</sub> , model    | 4 m op 5 cm diepte bij contour van 0,75 mol% CH <sub>4</sub>        | 5%                                             | 4 m op 5 cm diepte bij contour van 0,75 mol% CH <sub>4</sub>       | 17%                                                       |
| CH <sub>4</sub> , praktijk | 1,9 m / 2,5 m bij contour van gem.10 ppm                            | 0,15% / 4,5%                                   | 2,6 m bij contour van gem.10 ppm                                   | 46%                                                       |
| H <sub>2</sub> , model     | 4 m op 5 cm diepte bij contour van 0,55 mol% H <sub>2</sub>         | 3%                                             | 4 m op 5 cm diepte bij contour van 0,55 mol% H <sub>2</sub>        | 11%                                                       |
| H <sub>2</sub> , praktijk  | 1,3 m / 2,3 m bij contour van gem.10 ppm                            | 0,07% / 3,7%                                   | 2,5 m bij contour van gem.10 ppm                                   | 5%*)                                                      |

\*) 5% is de bovenste waarde van het meetbereik van de Hunter H2.

In de tabel zien we dat de meetwaarden van de stolp voor zowel de verspreiding als de concentratie, iets beter overeenkomen met de modelberekening. Dat is ook wel logisch: met de stolp wordt minder “valse” lucht aangezogen dan met de sleepmat.

Zowel in de modelsimulatie als bij de praktijkproeven liggen de concentraties over het hele verspreidingsgebied vlak boven en vlak onder het maaiveld, voor waterstof onder die van methaan. Dit ondanks dat het volumedebiet waterstof ca  $2,5$  maal zo groot is als dat van aardgas.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Uit de modelberekening en de praktijkproeven blijkt het volgende:

- Lekgrootte: Bij eenzelfde gatgrootte van een lek, is de verhouding tussen het lekdebiet van waterstof en aardgas bij gelijke voordruk:
    - Model: 2,6
    - Praktijkproeven: 2,4
  - Verspreiding van waterstof en aardgas
    - Model: de verschillen zijn gering.
    - Praktijkproeven: verschillen zijn gering. Verspreiding bij aardgas iets groter dan bij waterstof<sup>1</sup>.
  - Concentratieverdeling van waterstof:
    - Model:
      - Ter hoogte van het lek is de concentratie van waterstof iets meer gepiekt dan van aardgas.
      - Ter hoogte van het maaiveld (en 5 cm daaronder) is nauwelijks meer verschil te constateren.
      - In het grootste deel van het gebied is de verhouding tussen de genormeerde concentratie  $H_2/CH_4$  tussen de 0,65 en 0,75. Anders gezegd: Bij een gegeven lek grootte van  $H_2$  resp.  $CH_4$  is over het hele verspreidingsgebied een redelijk constante verhouding tussen de concentratie van  $H_2$  en  $CH_4$ .<sup>2</sup>
    - Praktijkproeven:
      - Op maaiveldhoogte bij waterstof iets meer gepiekt bij stolpmetingen. Bij meting met de sleepmat is dit effect niet zichtbaar.
      - In de bodem vlak onder het maaiveld kon een eventueel verschil niet worden nagegaan vanwege de beperking van het meetbereik van de waterstofmeetapparatuur.
      - De concentraties over het hele verspreidingsgebied vlak boven en vlak onder het maaiveld, liggen voor waterstof onder die van methaan, met een  $H_2/CH_4$  -verhouding van:
        - ca. 0,4 tot 0,7 bij de sleepmat;
        - ca. 0,02 tot 0,8 bij de stolp;
        - ca. 0 tot 0,12 bij de bodemsonde.
- Deze verhoudingen vertonen derhalve veel meer variatie dan de genormeerde verhouding  $H_2/CH_4$  tussen de 0,65 en 0,75. Oorzaak is de grote spreiding in de meetresultaten van de praktijkmetingen.

De verschillen tussen de modelberekeningen en de praktijkproeven kunnen als volgt worden verklaard. De modelberekeningen zijn gebaseerd op verspreiding in de droge bodem. Bij de praktijkproeven zijn er complicerende omstandigheden, zoals capillair water, scheurtjes en obstakels in de bodem en andere vormen van bodemgelaagdheid en homogeniteit. Die zijn ook oorzaak van de grote spreiding van de meetresultaten van de praktijkproeven.

<sup>1</sup> De spreiding in de meetresultaten is groot. Een betrouwbare kwantificering van het verschil in verspreidingsbreedte is daarom niet te geven.

<sup>2</sup> NB. Debiet is evenredig met de concentratiegradiënt en de diffusiecoëfficiënt. Concentratie op zichzelf zegt niets over het debiet. Als het verspreidingspatroon hetzelfde is, zijn echter ook de gradiënten ongeveer hetzelfde en dan is de volumestroom van  $H_2$  dus ca 3x zo groot als bij aardgas.



Kijkend naar de resultaten van zowel de modelberekeningen als de praktijkproeven zijn de hoofdconclusies ten aanzien van een lek van waterstof dan wel aardgas:

- er is weinig verschil in de grootte van het verspreidingsgebied;
- er is wel een duidelijk verschil in de hoogte van de gemeten concentraties. Over het hele verspreidingsgebied is de concentratie voor waterstof lager dan voor aardgas.

## 5.2 Aanbevelingen

Ten aanzien van de klassering van lekindicaties in NEN 7244-9 verdient het aanbeveling om voor waterstof de volgende zaken te overwegen:

- De afstanden voor de verschillende lekindicatieklassen voor waterstof gelijk te kiezen als bij aardgas
- Lagere, nog nader te bepalen grenzen te kiezen voor de concentraties die de lekindicatieklassen begrenzen. Een eerste indicatie hiervoor is dat die grenzen voor de lekindicatieklassen voor waterstof op ca 50 - 70% liggen van de grenzen die voor aardgas gelden.<sup>1</sup>
- Wanneer sprake is van bijmenging van waterstof bij aardgas dan wordt aanbevolen om een CH<sub>4</sub>-detector te hanteren met een evenredig aangescherpte detectie grens (dus 80% van de waardes voor aardgas).<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> de overweging hierbij is dat de lekdebieten van H<sub>2</sub> bij eenzelfde concentratie met sleepmat-meting ca 2 à 3 zo groot zijn als bij CH<sub>4</sub>. Als H<sub>2</sub> weglekt in ondergrondse holtes (kruipruimtes) zal bij gelijkblijvende ventilatie daar, de concentratie navenant hoger worden.

<sup>2</sup> Lekzoeken met H<sub>2</sub>-detector wordt voor deze situatie ontraden, tot eventueel aanvullend onderzoek aantoont dat daarmee voldoende gevoeligheid/selectiviteit wordt behaald.



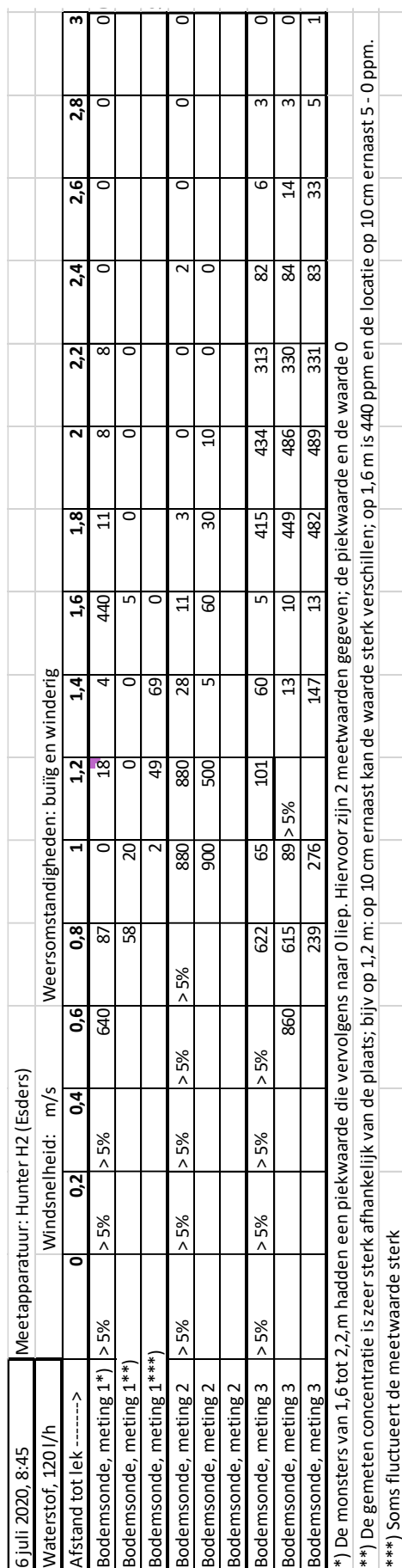
# I Meetwaarden methaan: IRwin

| Meetapparatuur: Inficon Irwin            |                             |            | Weersomstandigheden: Droog. 's Morgens heeft het geregent |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
|------------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|------------|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|-----|-----|-----|----|
| Methaan, 50l/h                           |                             |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
| Afstand tot lek ----->                   | 0                           | 0,2        | 0,4                                                       | 0,6        | 0,8        | 1      | 1,2    | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2     | 2,2     | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3  |
| sleepmat, meting 1 (h) *                 | 0,10%                       | 670        | 190                                                       | 47         | 200        | 120    | 73     | 0     | 4     | 0     | 0     | 29      | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 1 (t) *                 | 0,20%                       | 440        | 100                                                       | 38         | 23         | 100    | 100    | 0     | 14    | 0     | 0     | 0       | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 2 (h)                   | 0,20%                       | 0,20%      | 0,20%                                                     | 0,10%      | 630        | 94     | 130    | 0     | 0     | 50    | 46    | 0       | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 2 (t)                   | 0,20%                       | 0,20%      | 0,10%                                                     | 0,10%      | 650        | 130    | 0      | 13    | 10    | 33    | 0     | 0       | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 3 (h)                   | 0,10%                       | 300        | 640                                                       | 5          | 73         | 41     | 41     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 3 (t)                   | 770                         | 510        | 120                                                       | 200        | 16         | 120    | 11     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0   | 0   | 0   | 0  |
|                                          |                             |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
| Stolp, meting 1                          | > 4,5% (max)                | > 4,5% (m) | > 4,5% (m)                                                | > 4,5% (m) | > 4,5% (m) | 0,60%  | 300    | 0     | 0     | 0     | 2     | 0       | 10  | 10  | 0   | 0  |
| Stolp, meting 2                          | > 4,5% (max)                | > 4,5% (m) | > 4,5% (m)                                                | 0,20%      | 420        | 28     | 160    | 10    | 16    | 160   | 110   | 61      | 43  | 0   | 3   | 0  |
| Stolp, meting 3                          | > 4,5% (max)                | > 4,5% (m) | 1,90%                                                     | 550        | 250        | 110    | 110    | 87    | 98    | 7     | 8     | 30      | 8   | 0   | 0   | 0  |
|                                          |                             |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
| 12 juni 2020 8:00                        | Weersomstandigheden: Droog. |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
|                                          |                             |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |
| Bodemsonde, meting 1                     | 44%                         | 36%        | 33%                                                       | 33%        | 6,00%      | 3,00%  | 4,30%  | 0,20% | 0,10% | 0,20% | 0,10% | 480     | 150 | 37  | 11  | 0  |
| Bodemsonde, meting 2                     | 48%                         | 38%        | 44%                                                       | 44%        | 1,90%      | 3,90%  | 2,60%  | 0,50% | 0,20% | 270   | 26    | 0,20%   | 0   | 0   | 0   | 10 |
| Bodemsonde, meting 3                     | 46%                         | 45%        | 46%                                                       | 46%        | 50,00%     | 55,00% | 26,00% | 0,90% | 0,10% | 45    | 17    | 500,00% | 0   | 0   | 0   | 0  |
| *) sleepmat: meting heen en meting terug |                             |            |                                                           |            |            |        |        |       |       |       |       |         |     |     |     |    |



## II Meetwaarden waterstof: Hunter H2

| 6 juli 2020, 8:45      |  | Meetapparatuur: Hunter H2 (Esders)      |       |       |       |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |
|------------------------|--|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|
| Waterstof, 120 l/h     |  | Weersomstandigheden: builig en winderig |       |       |       |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |
| Afstand tot lek -----> |  | Windsnelheid: m/s                       |       |       |       |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |
|                        |  | 0                                       | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8 | 1   | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2  | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3  |
| sleepmat, meting 1 (h) |  | 760                                     | 750   | 85    | 8     | 7   | 80  | 0   | 10  | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 1 (t) |  | 650                                     | 500   | 400   | 30    | 88  | 10  | 16  | 0   | 13  | 8   | 0  | 6   |     |     |     |    |
| sleepmat, meting 1 (t) |  |                                         | 700   | 500   | 85    | 3   | 35  |     |     | 0   |     |    |     |     |     |     |    |
| sleepmat, meting 1 (t) |  |                                         |       |       | 70    | 42  |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |
| sleepmat, meting 2 (h) |  |                                         | 730   | 410   | 600   | 210 | 35  | 2   | 0   | 0   | 0   | 11 | 2   | 10  | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 2 (t) |  |                                         |       | 694   | 690   | 530 | 89  | 12  | 11  | 9   | 0   | 3  | 8   | 0   |     |     |    |
| sleepmat, meting 2 (h) |  |                                         |       |       |       |     | 65  | 69  | 0   | 0   | 4   | 3  | 6   | 13  |     |     |    |
| sleepmat, meting 2 (t) |  |                                         |       |       |       |     | 42  | 85  | 0   | 0   | 1   | 7  | 0   | 6   |     |     |    |
| sleepmat, meting 3 (h) |  | 630                                     | 450   | 480   | 130   | 91  | 30  | 49  | 4   | 2   | 5   | 3  | 2   | 3   | 0   | 0   | 0  |
| sleepmat, meting 3 (t) |  |                                         | 530   | 593   | 200   | 28  | 12  | 12  | 1   | 2   | 10  | 3  | 3   | 0   | 2   | 5   | 0  |
| sleepmat, meting 3 (h) |  |                                         | 570   |       | 87    | 12  | 6   | 15  | 3   | 3   | 8   | 9  | 9   | 2   | 3   | 2   | 0  |
| sleepmat, meting 3 (t) |  |                                         |       |       | 96    | 10  | 4   | 13  | 0   | 11  | 4   | 3  | 3   | 6   | 0   | 0   | 0  |
| Stolp, meting 1        |  | 5%                                      | 3,20% | 880   | 530   | 100 | 80  | 0   | 3   | 4   | 4   | 6  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| Stolp, meting 1        |  |                                         |       | 950   |       |     | 18  | 8   | 49  | 65  | 28  | 13 |     |     |     |     |    |
| Stolp, meting 1        |  |                                         |       |       |       |     | 82  | 61  | 0   | 16  |     |    |     |     |     |     |    |
| Stolp, meting 1        |  |                                         |       |       |       |     |     | 9   |     |     |     |    |     |     |     |     |    |
| Stolp, meting 2        |  | 826                                     | 865   | 20000 | 860   | 950 | 200 | 70  | 0   | 60  | 84  | 2  | 0   | 0   | 0   | 17  | 0  |
| Stolp, meting 2        |  |                                         | 923   | 22000 | 20000 | 915 | 330 | 87  | 13  | 0   | 14  | 0  | 0   | 0   | 1   | 0   | 17 |
| Stolp, meting 2        |  |                                         |       |       |       |     | 79  | 13  | 11  | 16  | 31  | 50 | 20  | 0   | 0   | 0   | 0  |
| Stolp, meting 2        |  |                                         |       |       |       |     |     | 79  | 0   | 5   | 0   | 15 | 14  |     | 0   |     | 0  |
| Stolp, meting 3        |  | 59400                                   | 937   | 913   | 700   | 73  | 57  | 12  | 0   | 14  | 76  | 38 | 50  | 15  | 0   | 0   | 0  |
| Stolp, meting 3        |  |                                         |       | 977   | 821   | 101 | 98  | 90  | 67  | 0   | 61  | 13 | 49  | 13  | 0   | 0   | 0  |
| Stolp, meting 3        |  |                                         |       |       | 987   | 132 | 54  | 636 | 33  | 0   | 65  | 63 | 14  | 17  | 0   | 0   | 0  |





### III Meetindicaties waterstof: Sensistor

| Meetapparaat: Sensistor XRS 9012 (Leak Control) met surface probe 8612 |                        | Weersomstandigheden: buig, winderig |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 6 juli 2020, 8:45                                                      | Waterstof, 120 l/h     | 0                                   | 0,2    | 0,4    | 0,6   | 0,8   | 1      | 1,2    | 1,4    | 1,6    | 1,8    | 2      | 2,2    | 2,4    | 2,6    | 2,8     | 3       |
|                                                                        | sleepmat, meting 1 (h) | G5;L10                              | G5;L10 | G5;L10 | G4;L6 | G5;L1 | G8;L10 | G8;L10 | G8;L7  | G8;L1  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0       |
|                                                                        | sleepmat, meting 1 (t) |                                     |        |        |       | G5;L5 | G8;L0  | G8;L0  | G8;L2  | G8;L5  |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 1 (t) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 1 (t) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 2 (h) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 2 (t) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 2 (h) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | sleepmat, meting 2 (t) |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 1        | G3;L5                               | G2;L1  | G2;L6  | G2;L2 | G2;L3 | G2;L1  | G2;L1  | G5;L0  | G5;L0  | G8;L0  | G8;L7  | G8;L10 | G8;L1  | 0      | G8;L7   |         |
|                                                                        | Stolp, meting 1        |                                     | G5;L8  | G2;L2  | G4;L4 | G2;L2 | G2;L2  | G10;L0 | G5;L10 | G5;L10 | G8;L1  | G8;L0  |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 1        |                                     | G3;L3  | G2;L2  | G2;L6 | G8;L0 | G5;L2  |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 1        |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 2*)      | G3;L1                               | G3;L2  | G3;L3  | G3;L3 | G1;L2 | G5;L10 | G8;L10 | G8;L3  | G6;L5  | G10;L0 | G10;L6 | G10;L0 | G10;L0 | G10;L0 | G10;L0  |         |
|                                                                        | Stolp, meting 2        | G3;L2                               | G3;L1  | G3;L2  | G3;L2 | G1;L1 | G3;L4  | G4;L5  | G8;L10 | G6;L0  | G10;L0 | G10;L4 | G10;L0 | G10;L0 | G10;L0 | G10;L0  |         |
|                                                                        | Stolp, meting 2        |                                     |        |        |       | G3;L4 | G6;L7  | G4;L7  | G8;L10 | G10;L0 | G10;L0 | G10;L0 |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 2        |                                     |        |        |       |       | G6;L10 | G5;L7  | G8;L0  | G10;L0 |        |        |        |        |        |         |         |
|                                                                        | Stolp, meting 3        | G3;L4                               | G3;L5  | G3;L4  | G3;L6 | G5;L5 | G8;L0  | G8;L5  | G5;L5  | G10;L0 | G4;L4  | G4;L2  | G4;L3  | G5;L4  | G8;L6  | G10;L10 | G6;L5   |
|                                                                        | Stolp, meting 3        |                                     | G3;L2  | G3;L4  | G3;L6 | G5;L8 | G8;L0  | G3;L5  | G8;L3  | G5;L6  | G4;L4  | G4;L1  | G5;L3  | G5;L2  | G10;L6 | G10;L10 | G10;L10 |
|                                                                        | Stolp, meting 3        |                                     |        |        | G3;L2 | G5;L3 | G5;L4  | G3;L8  | G5;L3  | G10;L0 | G4;L2  | G4;L2  | G8;L2  | G8;L7  | G8;L3  | G10;L10 | G6;L1   |
|                                                                        | Stolp, meting 3        |                                     |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |

Zie verklaring  
aanduiding  
meetwaarden in  
paragraaf 2.3.2

\*) 7 juli wind is toegenomen