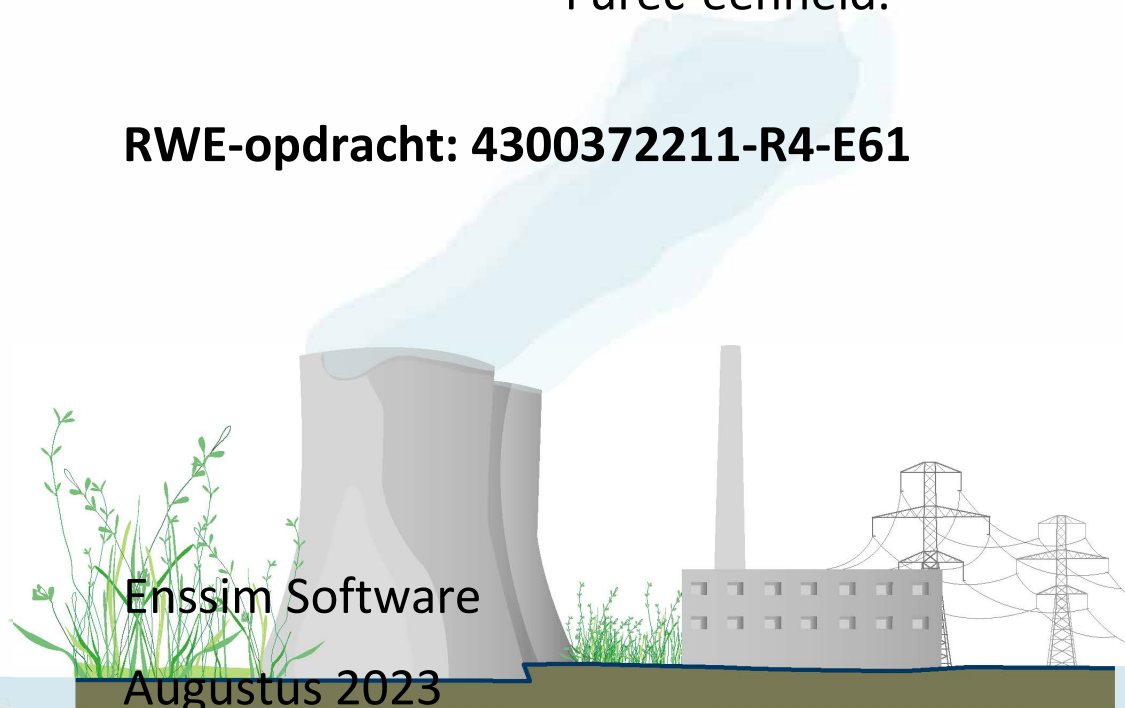


Studie naar de vangst van geurstoffen in de gaswaster
van de droogstraten voor huishoudelijk afval in de
Furec-eenheid.

RWE-opdracht: 4300372211-R4-E61



Inhoudsopgave

1 Inleiding	3
2 Uitgangspunten	4
3 Ontwerp kolompakking en bepaling vangst niet-ontwerpgeurstoffen.....	14
4 Presentatie en interpretatie resultaten	18
5 Conclusies en aanbevelingen	29
6 Externe bronnen van gegevens.	31
Bijlage A. Verwachte concentraties van geurstoffen in de drooglucht.....	32

1 Inleiding

De firma RWE ontwikkelt op dit moment het FUREC-project. Doel van dit project is het ontwerp, bouw en uitbating van een eenheid voor de verwerking van huishoudelijk afval uit de provincie Limburg die synthesegas (syngas) produceert als hoofdproduct. Het grootste deel van het geproduceerde syngas zal in de Furec-eenheid worden omgezet in waterstof (H_2). Dit product zal dienen als grondstof voor de chemische industrie die is gevestigd op het Chemelot petrochemische complex te Sittard-Geleen. De voorziene jaarproductie aan H_2 kan als groen worden aangemerkt en bedraagt per jaar circa 50 [MNm³]. Deze groene waterstof vervangt grijze waterstof die op dit moment op het Chemelot complex wordt geproduceerd middels het gebruikelijke stoomreformingproces van aardgas. De groene waterstofproductie houdt een geschatte CO₂-emissiereductie in van circa 380 [kt/a].

Er zij opgemerkt dat de waarde van de geproduceerde groene waterstof veel hoger is dan de waarde van warmte en kracht die vrijkomen bij de voor werking van het afval in de gebruikelijke AVI's (afvalverbrandingseenheden).

De FUREC-eenheid bestaat uit twee ook geografisch gescheiden hoofdonderdelen.

De eerste hiervan is een afvalvoorbehandeling voorzien op de locatie Buggenum waar ruw huishoudelijk afval wordt voorverwerkt tot droge pellets. Deze pellets worden bij voorkeur per rijnaak vervoerd naar het Chemelot complex waar ze samen met gedroogd RWZI-slib worden vergast.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van het hele Furec-proces wordt verwezen naar [1]. Deze studie richt zich op één onderdeel van het afvalvoorbehandelingssysteem en wel de gaswasser geplaatst achter de droogstraten van huishoudelijk afval. Dit apparaat dient twee doelen, te weten verwijdering van reststof en terugwinning van warmte verkregen door koeling van het drooggas. Meer informatie aangaande de gaswasser is te vinden in hoofdstuk 2.

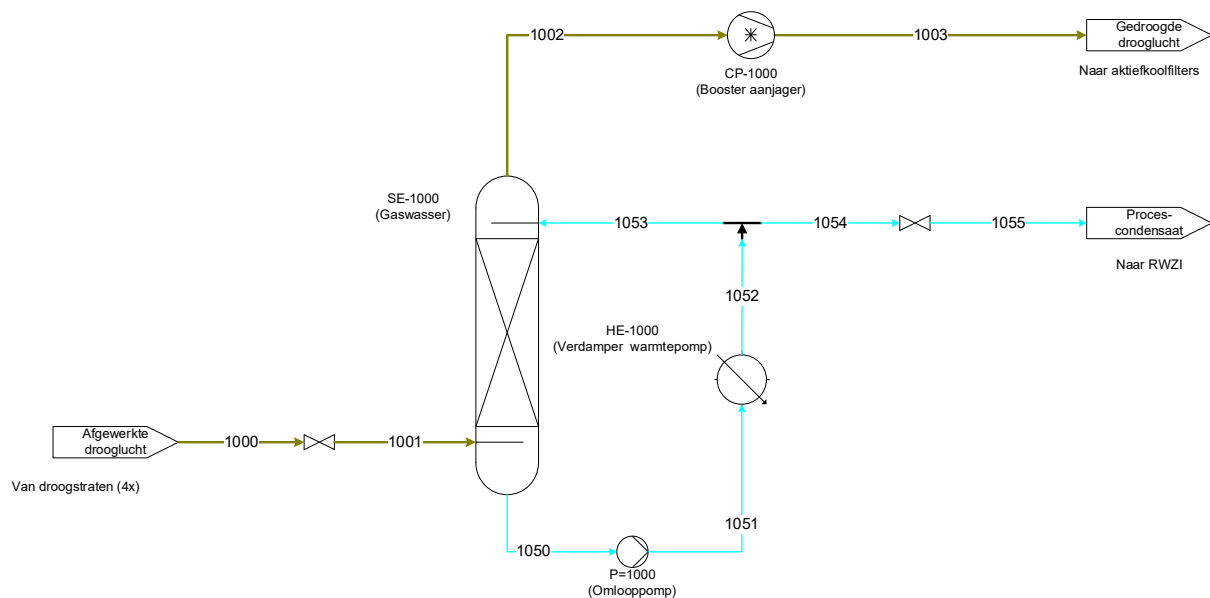
Tijdens het droogproces van huishoudelijk afval komen kleine hoeveelheden vluchtige geurstoffen vrij. Deze geurstoffen zijn divers en bestrijken een aardig deel van het spectrum van de organische chemie. Om aan de geuremissie-eisen te kunnen voldoen zal na dooggasbehandeling in de gaswasser het gewassen gas worden geleid over actiefkoolfilters. De gaswasser zal een deel van de geurstofbelading wegnemen. Op deze wijze zorgt dit apparaat ervoor dat, naast zijn koel- en droogfunctie, ook de belasting van de actiefkoolfilters afneemt.

De vraag die in dit rapport wordt beantwoord is in welke mate de geurbelasting door de gaswasser wordt verminderd. Om deze vraag te beantwoorden wordt/worden:

- in hoofdstuk 2 een wat meer gedetailleerde beschrijving van het gaswasproces gegeven;
- in hetzelfde hoofdstuk de te verwachten geurbelasting van het afgewerkte drooggas, dat wil zeggen vlak voor intrede in de gaswasser, gepresenteerd;
- in hoofdstuk 3 de gehanteerde rekenmethodiek uitgelegd;
- in hoofdstuk 4 de berekeningsresultaten gepresenteerd en geïnterpreteerd;
- tenslotte in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies en aanbevelingen weergegeven.

2 Uitgangspunten

In onderstaande afbeelding 2.1 wordt de gaswasser en het bijbehorende conceptuele processchema gepresenteerd. De systematiek voor naamcodering van apparatuur alsmede die voor stroomnummering zal niet overeenkomen met die van de later samen te stellen PFD's maar zijn die welke gebruikelijk zijn voor processimulaties in het pakket Enssim, het pakket waarmee alle berekeningen voor onderhavige studie zijn uitgevoerd.



Afbeelding 2.1

Korte procesbeschrijving

Links op de tekening komt de afgewerkte drooglucht (stromen 1000 en 1001) de gaswasser (SE-1000) binnen. Deze laatste verwerkt de drooglucht van 4 droogstraten. De gaswasser is uitgevoerd als zuivere tegenstroomkolom waarin koud water aan de top en het drooggas net boven de zomp van de kolom wordt ingevoerd. Door de toevoer van koud water zal het drooggas afkoelen en condensatie van een deel van de waterdampinhoud van dit gas plaatsvinden. De daarbij vrijkomende warmte wordt overgedragen op het waterstroom in de kolom. Het uit de kolom tredende, opgewarmde water wordt gekoeld in warmteput HE-1000 die tevens de functie vervult van verdamper van een warmtepompsysteem dat bedoeld is om de opgenomen warmte terug te voeren naar het aan de gaswasser voorgeschakelde droogproces voor afval.

Het allergrootste deel van de afgekoelde waterstroom wordt teruggevoerd naar de gaswasser. Een zeer klein deel en wel de hoeveelheid die overeenkomt met de hoeveelheid in de gaswasser gecondenseerd condensaat, wordt afgevoerd naar een RWZI (rioolwaterzuiveringsinstallatie).

De waarden van de belangrijkste procesgrootheden rondom de gaswasser volgens opgave van RWE zijn verzameld in tabel 2.1

Tabel 2.1. Waarden van de belangrijkste procesgrootheden rondom de gaswasser.

Grootheid	Eenheid	Waarde	Opmerkingen
<u>Gegevens inlaat drooglucht</u>			
Doorzet	[kg/s]	38	Waarde = 4 *9.5
Druk	[bar]	1.013	Atmosferisch
Temperatuur	[°C]	35	
Dauwpunt	[°C]	30	
<u>Verwachting uitlaat drooglucht</u>			
Temperatuur	[°C]	18	
Dauwpunt	[°C]	15	
L/G-verhouding kolom	[kg/kg]	1.67	Waarde =15.9/9.5
Inlaattemperatuur water	[°C]	15	

De in de aangevoerde drooglucht te verwachten concentraties van geurstoffen en de verhouding van deze concentraties ten opzichte van hun geurdrempelwaarde zijn te vinden in tabel A.1 in bijlage A. In deze tabel worden voor verscheidene mercaptanen aangegeven dat hun waarden onder een zekere limietwaarde liggen (waarschijnlijk de detectielimiet). In dit rapport is er van uitgegaan dat de concentraties gelijk zijn aan die limietwaarden.

De in tabel A.1 vermelde geurstoffen bestaan uit stoffen waarvan sommige goed oplosbaar zijn in water (voorbeeld alcoholen) sommige matig oplosbaar zijn en een rest dat nagenoeg volledig onoplosbaar is in water. Alle geurstoffen zijn relatief vluchtig anders zouden ze niet als gascomponenten in de drooglucht. Voorkomen. Beide effecten, oplosbaarheid in water en vluchtigheid, worden tot uitdrukking gebracht in de Henry coëfficiënt (H) van de geurstoffen in water. Deze coëfficiënt, die aangeeft hoeveel mol er van een vluchtige stof per kilogram water en bij 1 [bar] partiële druk van die stof in de bovenstaande gasfase in water oplost, is een functie die relatief sterk afhankelijk is van de temperatuur. De formule van deze functie kan algemeen als volgt worden geformuleerd:

$$H = K_0 e^{A(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{298.15})} \quad (2.1)$$

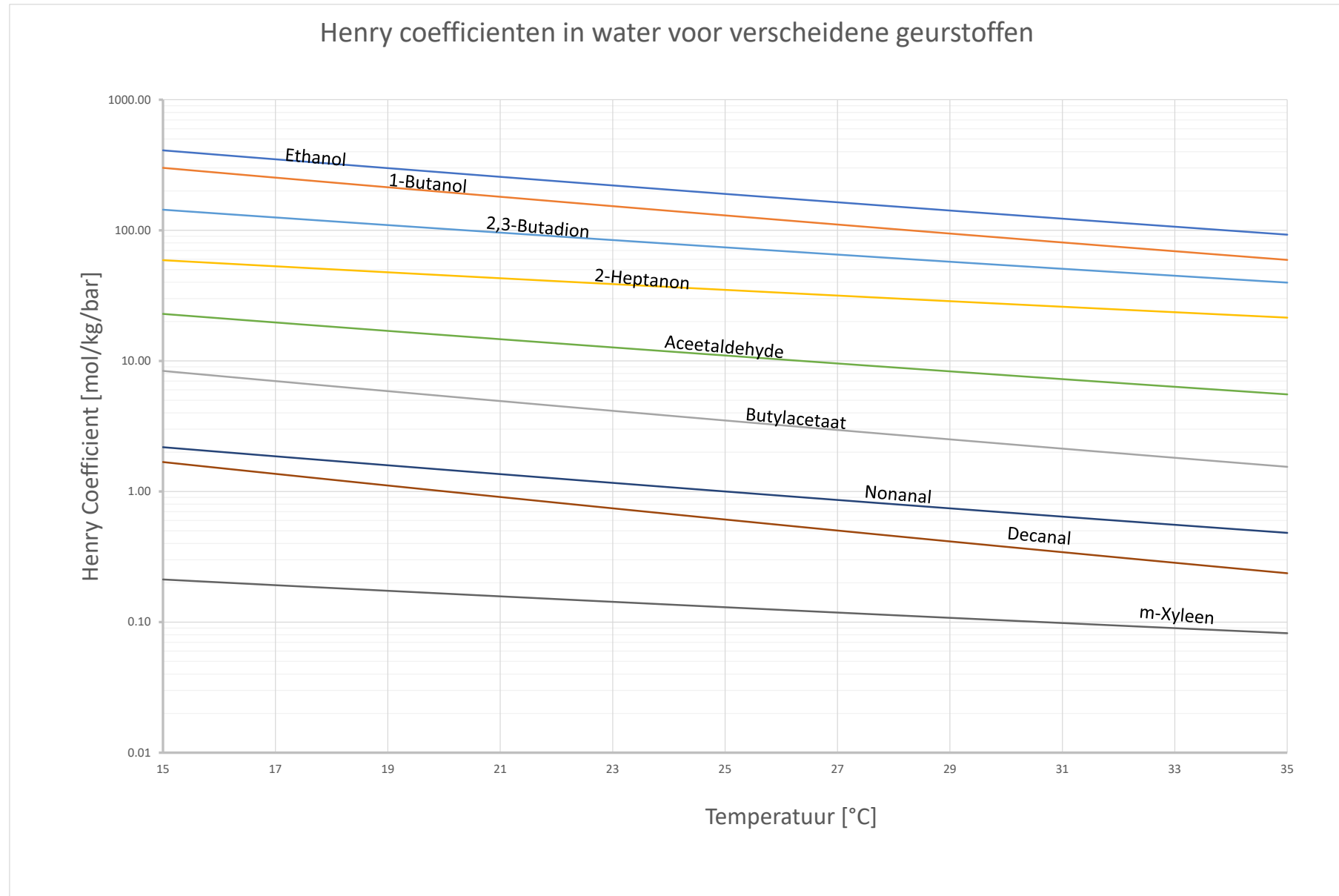
met:

- H : Henry coëfficiënt van de geurstof [mol/kg/bar];
- K_0 : experimenteel bepaalde Henry coëfficiënt van de geurstof bij 25 [°C] [mol/kg/bar];
- A : experimenteel bepaalde coëfficiënt [K];
- T_k : watertemperatuur [K]

Voor verreweg de meeste geurstoffen uit tabel A.1 zijn waarden voor K_0 en A gevonden in de literatuur, vooral in literatuurbron [2]. De gevonden waarden zijn in Enssim programmatuur verwerkt zodat voor deze stoffen voor het relevante temperatuurgebied van de gaswasser Henry coëfficiënten konden worden berekend.

Typische voorbeelden van verloop van de Henry coëfficiënt voor verschillende geurstoffen zijn weergegeven in afbeelding 2.2. Bij bestudering van deze grafiek wordt duidelijk er een groot verschil bestaat in vluchtigheid van de verschillende geurstoffen in fasenevenwicht met water en dat deze vluchtigheid sterk temperatuurafhankelijk is. (Merk op dat de y-as logaritmisch is).

Afbeelding 2.2 Henry coëfficiënten in water voor verscheidene geurstoffen



Uit de Henry coëfficiënt kan met de volgende formule eenvoudig de zogenaamde (fasenevenwichts-) verdelingscoëfficiënt tussen gas en vloeistof voor geurstof i , K_i , worden bepaald:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{1000}{p_t M_{H_2O} H_i} \quad (2.2)$$

met:

- K_i : verdelingscoëfficiënt geurstof i tussen gas- en vloeistoffase [kmol/kmol]
- y_i : molfractie geurstof in de gasfase [kmol/kmol];
- x_i : molfractie geurstof in de vloeistoffase [kmol/kmol];
- p_t : druk [bar];
- M_{H_2O} : molmassa water (18.016 [kg/kmol]);
- H_i : Henry coëfficiënt geurstof i [mol/kg/bar].

Het zijn deze verdelingscoëfficiënten die zijn gebruikt bij de absorptieberekeningen voor de bepaling van de vangst van de verschillende geurstoffen in de gaswasser. Verderop zal, als gebruikelijk in de wetenschappelijke literatuur voor absorptieprocessen, een verdelingscoëfficiënt worden aangeduid met het symbool m_i .

Zoals eerder beschreven wordt veruit het grootste deel van het waswater aan de uitlaat van de gaswasser gerecirculeerd naar dit apparaat. Dit betekent dat alle afvoer van eventueel gevangen geurstof moet plaatsvinden via de afvoer van het procescondensaat. Er kan worden bewezen in zo'n geval de maximale vangst van geurstof i wordt verkregen wanneer het systeem wordt doorgerekend als een flashtrap met één isotherme theoretische schotel werkend op een uitlaattemperatuur gelijk aan de inlaattemperatuur van het koude water aan de top van de kolom. Geen van de gegeven geurstoffen levert dan een redelijk vangstrendement op. Een aanvaardbaar vangstrendement wordt in deze situatie alleen verkregen bij de vangst van niet-vluchtige verbindingen zoals zouten (voorbeelden NaCl en NH_4Cl waarbij NaCl in de water in de praktijk meestal wordt gevormd door neutralisatie van gevangen HCl via natronloogdosering op de gaswasser).

Al in een vrij vroeg stadium van de studie is de conclusie getrokken dat geurstoffen in of rond de gaswasser moeten worden afgebroken om tot redelijke vangstrendementen te komen voor geurstoffen in het gaswassysteem. Al vrij snel is in overleg met RWE gekozen voor afbraak via natte verbranding van de geurstoffen met ozon (O_3) of waterstofperoxide (H_2O_2) in de zomp van de gaswasser en/of in de circulatielijn van het waswater. Deze opgave wierp een aantal extra ontwerpvrijheidsgraden op, te weten:

1. keuze van ontwerpgeurstof en voor deze geurstof:
 - a. keuze van ontwerpgraad van afbraak van de ontwerpgeurstof;
 - b. keuze van ontwerpvangsteffectiviteit in de gaswasser.

Ad 1. keuze van ontwerpgeurstof en voor deze geurstof.

Als ontwerpgeurstof is gekozen de stof 2,3-butadion wegens de combinatie van een gunstige Henry coëfficiënt en de zeer hoge verhouding van droogluchtconcentratie en zijn geurdrempelwaarde.

Ad a. keuze van ontwerpgraad van afbraak van de ontwerpgeurstof.

Er is, in overleg met RWE vrij arbitrair (gevoelsmatig) gekozen voor een ontwerpgraad voor afbraak van de ontwerpgeurstof van 0.98 [-].

Ad b. keuze van ontwerpvangsteffectiviteit in de gaswasser.

Er is wederom arbitrair gekozen voor een ontwerpvangsteffectiviteit van 0.98 [-] voor de ontwerpgeurstof.

Het hierboven geïntroduceerde begrip vangsteffectiviteit verdient nadere toelichting.

De grootte ontwerpvangsteffectiviteit mag niet worden verward met die van ontwerpvangstrendement. De vangsteffectiviteit is de verhouding van de in de gaswasser gevangen hoeveelheid geurstof ten opzichte van de maximaal mogelijk vangst van deze stof. De maximaal mogelijke vangst voor een gasabsorptieproces hangt af van de gasdoorzet G [kmol/s] de absorptievloeistofdoorzet [kmol/s] en de in de theorie van gasabsorptieprocessen gangbare m_i -waarde. Zoals boven reeds vermeld is deze m -waarde identiek aan de eerder besproken verdelingscoëfficiënt K_i .

Er zijn twee gevallen te onderscheiden:

$$1. \quad G > L/m_i$$

In dit geval zal de maximale opnamecapaciteit voor component i worden bepaald door de vloeistofstroom.

De ontwerpeffectiviteit, ε , wordt dan:

$$\varepsilon = \frac{x_1 - x_2}{x_1^* - x_2} \quad (2.3)$$

met:

ε : vangsteffectiviteit [-];

x_2 : vloeistofconcentratie van geurstof i aan de top van de gaswasser [kmol/kmol];

x_1 : vloeistofconcentratie van geurstof i aan de bodem van de gaswasser [kmol/kmol];

x_2^* : vloeistofconcentratie van geurstof i in evenwicht met de binnenkomende gasstroom [kmol/kmol].

In bovenstaande formule en ook in formule 2.4 hieronder wordt verondersteld dat de m_i -waarde constant blijft. Dit veronderstelt isotherme bedrijfsvoering, waar in de praktijk niet altijd aan wordt voldaan.

$$2. \quad G < L/m$$

In dit geval zal de maximale opnamecapaciteit voor geurstof i worden bepaald door de gasstroom.

De ontwerpeffectiviteit, ε , wordt dan:

$$\varepsilon = \frac{y_1 - y_2}{y_1 - y_2^*} \quad (2.4)$$

met:

- ϵ : vangsteffectiviteit [-];
 y_2 : gasconcentratie van geurstof i aan de top van de gaswasser [kmol/kmol];
 y_1 : gasconcentratie van geurstof i aan de bodem van de gaswasser [kmol/kmol];
 y_2^* : gasconcentratie van geurstof i in evenwicht met de binnenkomende vloeistofstroom [kmol/kmol].

De bovengenoemde twee situaties kunnen worden weergegeven met de stripfactor S , de verhouding van de opnamecapaciteiten van de gas-en vloeistofstromen:

$$S = \frac{mG}{L} \quad (2.5)$$

Boven besproken situaties 1. en 2. komen overeen met $S > 1$ respectievelijk $S < 1$.

Merk op dat S geheel analoog is aan de verhouding van de waterwaarden van de warmtewisselende stromen binnen warmtewisselaars (waterwaarde [kW/K] van een stroom is het product van doorzet [kg/s] en soortelijke warmte [kJ/kg/K]).

Voor de gaswasser ligt de L/G-verhouding vast. De stripfactor voor de ontwerpgeurstof blijkt duidelijk onder de waarde van 1.0 uit te komen. Een ontwerpeffectiviteit van 0.98 [-] houdt dan tevens in dat ook het vangstrendement van deze stof hoog is mits de inlaatconcentratie aan geurstof van de vloeistof voldoende laag is. Met een verwijderings-(oxidatie)graad van 0.98 [-] is aan deze laatste voorwaarde voldaan.

Voor een groot aantal vluchtige en/of zeer slecht oplosbare geurdtoffen zal de waarde van de stripfactor beduidend hoger zijn dan 1.0 [-]. Dit houdt in dat voor een kolom ontworpen voor de verwijdering van een gunstige geurstof, de verwijderingsgraad van deze stoffen zeer onvolledig zal zijn. Wel is het zo dat de verwijderingseffectiviteit van deze stoffen de waarde 1.0 [-] (100 [%]) zal benaderen, met andere woorden de vloeistofconcentraties van deze stoffen zullen (nagenoeg) in evenwicht zijn met hun binnenkomende gasconcentraties (aanliggende concentratieprofielen in de gaswasser).

In tabel 2.3 wordt weergegeven wat de theoretisch maximale vangstrendementen zijn voor de verschillende geurstoffen onder de volgende voorwaarden:

- de vangsteffectiviteit bedraagt steeds 1.0 [-] (dit betekent een oneindig hoge pakking);
- de molfracties van de geurstoffen in de vloeistofinlaat zijn alle gelijk aan 0 [kmol/kmol];
- er wordt gerekend met een gemiddelde watertemperatuur in de gaswaskolom van $(15 + 23)/2 = 19$ [°C];
- de L/G-verhouding is die welke is vermeld in tabel 2.1 (1.67 [kg/kg]);
- de extra opnamecapaciteit van de vloeistof voor geurstoffen ten gevolge van toename van doorzet door de condensatie van waterdamp op de vloeistof wordt verwaarloosd.

Tabel 2.3 Maximaal mogelijke vangstrendementen van de verschillende geurstoffen in de gaswasser (1/2)

Geurcomponent	Maximale vangstrend. [%]
Methanol	100
Ethanol	100
2_Propanol	100
1_Methoxy_2_Propanol	Geen Henry gegevens
1_Butanol	100
2_ButoxyEthanol	100
2_Ethyl_1_Hexanol	100
CycloHexanol	100
1_2_Ethanediol	100
C4H8O3_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H18O_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H20O_Alcohols	Geen Henry gegevens
EthylAcetate	33.1
ButylAcetate	27.9
C8H16O3_Esters	Geen Henry gegevens
Acetone	17.9
2_Butanone	100
3_Hydroxy_2_Butanone	100
2_Heptanone	100
2_3_Butadione	100
Acetaldehyde	80.71
Nonanal	7.54
Decanal	5.27
COS	0.123
DiChloroBenzene	1.78
2_Methyl_1_3_Dioxolane	Geen Henry gegevens
1_4_dioxane	100.00
Alfa_Pinene	0.162
Beta_Pinene	0.097
Limonene	0.320
C10H16_Terpenes	Geen Henry gegevens

Tabel 2.3 Maximaal mogelijke vangstrendementen van de verschillende geurstoffen in de gaswasser (2/2)

Geurcomponent	Maximale vangstrend. [%]
Acetonitrile	100.00
Benzene	1.010
EthylBenzene	0.765
1_2_3_TriMethylBenzene	1.29
1_2_4_TriMethylBenzene	1.29
1_3_5_TriMethylBenzene	0.855
1_Ethyl_2_MethylBenzene	1.10
1_Ethyl_3_MethylBenzene	1.10
1_Ethyl_4_MethylBenzene	0.956
PropylBenzene	0.554
Toluene	0.817
m_p_Xylene	1.006
o_Xylene	1.47
Styrene	1.92
Naphthalene	12.81
TetraHydroNaphthalene	3.59
C10H12_Aromatics	Geen Henry gegevens
C10H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H10_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H22_Aromatics	Geen Henry gegevens
Propene	0.0447
Propane	0.0086
2_MethylPropane	0.0047
Butane	0.0071
Pentane	0.0039
Nonane	0.0116
Decane	0.0010
Undecane	0.0026
Dodecane	0.0007
Tridecane	0.0021
Tetradecane	0.0042
C10H22_Alkanes	Geen Henry gegevens
C11H24_Alkanes	Geen Henry gegevens
C12H26_Alkanes	Geen Henry gegevens
C13H28_Alkanes	Geen Henry gegevens
MethylMercaptan	1.66
EthylMercaptan	1.72
1-propylMercaptan	1.56
2-PropylMercaptan	1.05
2-Methyl-1-PropylMercaptan	1.20
2-Methyl-2-PropylMercaptan	0.765
1-ButylMercaptan	1.39
2-ButylMercaptan	0.67

In tabel 2.3 komen geurstoffen voor die een rode tekstkleur bezitten. Het maximale vangstrendement van deze stoffen kon niet worden berekend omdat er voor deze stoffen in de literatuur geen Henry coëfficiënten zijn gevonden.

Het valt op dat de alcoholen en de meeste ketonen theoretisch volledig kunnen worden verwijderd. Nagenoeg alle andere componenten worden slecht tot zeer slecht gevangen. Met name de alkanen tonen een vrijwel verwaarloosbaar vangstrendement. Ook de mercaptanen, die bekend staan als zeer beruchte geurstoffen, worden slecht gevangen. De sterke geurstof 2,3 butadion, een geurstof met een zeer hoge verhouding van potentiële geuremissie ten opzichte van haar geurdrempel, wordt echter volledig verwijderd. Zoals eerder vermeld wordt in deze studie dan ook uitgegaan van genoemde geurstof als ontwerpgeurstof voor de dimensionering van de pakking van de gaswaskolom.

3 Ontwerp kolompakking en bepaling vangst niet-ontwerpgeurstoffen

In het hoofdstuk 2 (Uitgangspunten) is een aantal ontwerpgrootheden voor het ontwerp van de kolom al gegeven te weten:

- ontwerpgeurstof : 2,3-butadion;
- ontwerpeffectiviteit : 0.98 [-];
- L_G-verhouding : 1.67 [kg/kg];

Een extra ontwerpgrootheid moet hier nog worden genoemd, te weten de overdimensioneringsfactor. In deze studie bedraagt de waarde hiervan : 1.0 [-]. Er is dus niet gerekend met een veiligheidsmarge met betrekking tot dimensionering van de pakking van gaswasser.

Om de kolom en meer in het bijzonder de kolompakking te ontwerpen moeten echter nog meer ontwerpkeuzen worden gemaakt. Deze zijn voorlopig en betreffen:

- superficiële gassnelheid aan inlaat pakking : 2 [m/s]
- structuur pakking : los gestort; ,
- type pakkingelement : keramische Raschig ringen met nominale maat : 50 [mm].

Het ontwerpproces bestaat uit de volgende stappen, te weten de bepaling van:

1. de massa- en energiebalans rondom de gaswasser;
2. het aantal benodigde stofoverdrachtstrappen voor de vereiste vangst van de ontwerpgeurstof;
3. de hoogte van één stofoverdrachtstrap;
4. de totale pakkinghoogte ;
5. de drukval over de pakking en de afstand tot aan de floodinggrens.
6. vangstrendementen van de niet-ontwerpgeurstoffen.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met behulp het pakket Enssim.

Hieronder worden meer in detail ingegaan op de bovengenoemde aandachtspunten.

Stap 1. Bepaling van de massa-en energiebalans rondom de gaswaskolom.

Uitgaande van de procesgegevens vermeld in tabel 2.1 kunnen de enthalpiën van de gas- en vloeistofinlaat worden berekend. Ook kan met deze gegevens doorzet en enthalpie van het uitlaatgas van de gaswasser worden bepaald. Hieruit volgt de productie aan condensaat zodat ook de doorzet aan waswater aan de uitlaat van de gaswasser bekend is. Uit alle berekeningsresultaten kan via de energiebalans de waarde van de waswateruitlaatenenthalpie worden berekend. Uit deze waarde volgt dan tevens de uitlaatemperatuur van het waswater.

Stap 2. Bepaling van het aantal benodigde stofoverdrachtstrappen voor de gewenste vangst van de ontwerpgeurstof.

Hiertoe wordt uitgegaan van een vrij eenvoudige formule voor bepaling van het aantal stofoverdrachtstrappen bij de absorptie van stoffen die zeer verdund in gassen voorkomen en die tevens een constante m-waarde bezitten. Omdat de m-waarde van een geurstof vrij sterk afhankelijk is van de temperatuur wordt uitgegaan van het gemiddelde tussen de waterinlaat- en eerder berekende wateruitlaattertemperatuur en wordt ze bij deze gemiddelde temperatuur berekend. De formule is ontleend aan [3] en luidt als volgt:

$$N_{OG} = \frac{1}{1-S} \ln \left[(1-S) * \left(\frac{y_1 - mx_2}{y_2 - mx_2} \right) + S \right] \quad (3.1)$$

met:

N_{OG} : aantal overdrachtstrappen [-]
 S : stripfactor [-]; definitie: zie formule 2.5;
 y_1 : molaire fractie ontwerpgeurstof aan gasinlaat [kmol/kmol];
 y_2 : molaire fractie ontwerpgeurstof aan de gasuitlaat [kmol/kmol];
 x_2 : molaire fractie ontwerpgeurstof aan de vloeistofinlaat [kmol/kmol];
 m : fasenverdelingscoëfficiënt ontwerpgeurstof bij de gemiddelde watertemperatuur in de gaswaster [kmol/kmol].

Stap 3. Bepaling van de hoogte van één stofoverdrachtstrap

De algemene formule voor de berekening van de hoogte van één overdrachtstrap (voor de ontwerpgeurstof) is ontleend aan [4] en luidt voor absorptie van sterk verdunde stoffen:

$$H_{OG} = H_G + SH_L \quad (3.2)$$

met:

H_{OG} : hoogte van één stofoverdrachtstrap [m]
 H_G : hoogte van één stofoverdrachtstrap wanneer de weerstand voor stofoverdracht volledig in de gasfase zou zijn gelegen [m];
 H_L : hoogte van één stofoverdrachtstrap wanneer de weerstand voor stofoverdracht volledig in vloeistoffase zou zijn gelegen [m];
 S : stripfactor [kmol/kmol].

Voor H_G kan worden geschreven:

$$H_G = \frac{G_M}{k_g a} \quad (3.3)$$

met:

G_M : superficiële molaire gassnelheid (stroomdichtheid) in de gaswaster [kmol/m²/s];
 k_g : gaszijdige partiële stofoverdrachtscoëfficiënt [m²/s];
 a : specifiek stofoverdragend oppervlak van de pakking [m²/m³] = [1/m].

Analoog kan voor H_L worden geschreven:

$$H_L = \frac{L_M}{k_l a} \quad (3.4)$$

met:

- L_M : superficiële molaire vloeistofsnelheid (stroomdichtheid) in de gaswaster [$\text{kmol/m}^2/\text{s}$];
 k_L : vloeistofzijdige partiële stofoverdrachtscoëfficiënt [m^2/s];
 a : specifiek stofoverdragend oppervlak van de pakking [$1/\text{m}$].

De waarden van G_M en L_M volgen eenvoudig uit de molaire doorzetten van gas en vloeistof en de dwarsdoorsnede [m^2] van de gaswaster(pakking) welke laatste op zijn beurt is verkregen via de aanname van superficiële gassnelheid.

Ingewikkelder zijn de berekeningen van a , k_g en k_L . Voor deze grootheden is gebruik gemaakt van de in praktijk vaak toegepaste dimensieloze stofoverdrachtscorrelaties die zijn opgesteld door Onda en anderen en zijn gepubliceerd in het Journal of Chemical Engineering, Vol 1, No.1, 1968. [5]. Deze formules worden in dit rapport niet beschreven.

Om bovenvermelde grootheden te kunnen berekenen moet een aantal stoffeigenschappen van de geurstof en van de gas- en de vloeistoffase worden bepaald. Voor de gasfase zijn dit viscositeit [Pa.s] en dichtheid [kg/m^3]. Voor de vloeistoffase moeten naast deze grootheden ook een waarde worden bepaald van de oppervlaktespanning [N/m]. Alle genoemde grootheden worden berekend met behulp van de bestaande Enssim functionaliteit.

Ook moeten waarden van de diffusiecoëfficiënt [m^2/s] in de gas- en vloeistoffase worden bepaald. Voor de bepaling van de diffusiecoëfficiënt van de geurstof in de gasfase wordt uitgegaan van de formule van Fuller en anderen [6]. Voor de diffusiecoëfficiënt van de geurstof in de vloeistof wordt uitgegaan van de Wilke-Chang correlaties [7]. Deze laatste diffusiecoëfficiënt hangt af van temperatuur, molaire massa van het oplosmiddel, viscositeit van het oplosmiddel en de zogenaamde associatiefactor van de vloeistof. Omdat de viscositeit van het oplosmiddel sterk temperatuurafhankelijk is mag worden verwacht dat de diffusiecoëfficiënt van de geurstof in het oplosmiddel ook sterk afhankelijk is van de temperatuur.

Stap 4. Bepaling van de totale pakkinghoogte

Als H_G en H_L en H_{OG} via bovenstaand aangestipte procedure worden berekend kan de totale hoogte van de pakking, H_T [m] eenvoudig worden verkregen via de formule:

$$H_T = N_{OG} H_{OG} \quad (3.5)$$

Stap 5. Bepaling van de drukval over de pakking en de afstand tot aan de floodinggrens.

Voor de berekening van de drukval over de pakking en de floodinggrens is gebruik gemaakt van de ingebouwde Enssim functionaliteit zij het dat de hiermee samenhangende datastructuren zijn aangepast. De ingebouwde functionaliteit is volledig gebaseerd op de informatie die is te vinden in de VDI-Wärmeatlas [8].

Belangrijke grootheden die de drukval bepalen zijn naast pakkinghoogte, superficiële massastroomdichtheden voor gas- en vloeistoffase en keuze van pakking. Hetzelfde geldt voor de floodinggrens.

Stap 6. Bepaling vangstrendementen van de niet-ontwerpgeurstoffen.

Bij de bepaling van de vangstrendementen van de niet-ontwerpgeurstoffen wordt eerst volgens de methode beschreven in stap 3 de waarden van H_{OG} bepaald voor de niet-ontwerpgeurstoffen.

Uit formule 3.5 volgt dan op eenvoudige wijze voor elke van die geurstoffen het benodigd aantal overdrachtstrappen, N_{OG} . De m -waarden [kmol/kmol] van de niet-ontwerpgeurstoffen waarvoor Henry coëfficiënten zijn gevonden volgen uit formule [2.2] waarbij deze Henry-coëfficiënten weer zijn berekend bij de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de gaswasser. Voor de oxidatiegraad van alle niet-geurstoffen is aangenomen dat deze gelijk is aan die van de ontwerpgeurstof, te weten 0.98 [-] zodat de vloeistofinlaatconcentraties van deze geurstoffen 2 [%] bedraagt van hun concentraties aan de vloeistofuitlaat. De berekening wordt gestart met de aanname dat alle vloeistofinlaatconcentraties 0 [kmol/kmol] bedragen. Door de absorptieberekening op flowsheetniveau in een herhaalde substitutielus op te nemen bleek, zoals ook werd verwacht gezien de aangenomen hoge oxidatiegraad, zeer snel convergente te worden bereikt voor wat betreft vloeistofinlaat- en vloeistofuitlaatconcentraties.

Een belangrijke aanname in hoofdstuk 2 was dat de gasuitlaattemperatuur van de wasser en zijn dauwpunt 30 [°C] respectievelijk 15 [°C] bedroegen. Nu de hoogte van de pakking bekend is kan worden nagegaan of deze aannames correct waren. Tevens zijn voor de ontwerpgeurstof de concentratieprofielen in de wasser berekend. Om dit alles te onderzoeken is de gaswasser opgevat als een verdeeld systeem dat wordt beschreven door een stelsel niet-lineaire differentiaalvergelijkingen (ODE's). De toestandgrootheden (integratoren) van dit stelsel zijn :

- het lokale pakkingvolume [m³];
- de lokaal geproduceerde condensaahtoeveelheid [kg/s];
- de lokale druk [bar];
- de lokale doorzet aan gas [kg/s];
- de lokale doorzet aan waswater [kg/s];
- de lokale gasenergiestroom [kW];
- de lokale vloeistofenergiestroom [kW];
- de lokale molstroom aan waterdamp [kmol/s];
- de lokale molstroom aan geurstof in de gasfase [kmol/s];
- de lokale molstroom aan geurstof in de vloeistoffase [kmol/s].

De onafhankelijk variable is de lokale pakkingdiepte die loopt van 0 [m] (bovenkant pakking) tot een diepte gelijk aan de pakkinghoogte (bodem pakking).

De gaswasser is doorgerekend met een stapgrootte van een 1/100-deel van de pakkinghoogte.

De gebruikte oplosmethode is die van Runge-Kutta 4^{de} orde.

In de zogenaamde Algebraic-methode van het object waarmee de ODE's numeriek worden opgelost worden voor elke stap naast waarden voor de algebraïsche grootheden (zoals specifieke enthalpie en temperatuur) waarden voor de afgeleiden van alle genoemde toestandsgrootheden berekend.

Voor dit laatste zijn met name warmte- en stofoverdrachtscorrelaties van groot belang.

4 Presentatie en interpretatie resultaten

In dit hoofdstuk worden de berekeningsresultaten van de in het vorige hoofdstuk besproken rekenstappen gepresenteerd en geïnterpreteerd.

Stap 1. Bepaling van de massa- en energiebalans rondom de gaswasser.

De berekeningsresultaten zijn:

- doorzet gekoeld en gedroogd drooggas : 35.42 [kg/s];
- productie procescondensaat : 0.576 [kg/s];
- wateruitlaattemperatuur gaswasser : 23.2 [°C].

Het is duidelijk dat de recirculatiehoeveelheid aan waswater 2-3 ordes van grootte hoger is dan de productie aan procescondensaat.

Stap 2. het aantal benodigde stofoverdrachtstrappen voor de vereiste vangst van de ontwerpgeurstof;

Het aantal stofoverdrachtstrappen nodig voor de vereiste vangst van de ontwerpgeurstof bedraagt 4.56 [-]. Hierbij is uitgegaan van de gemiddelde waswatertemperatuur in de gaswasser (19.05 [°C]).

Stap 3. Bepaling van de hoogte van één stofoverdrachtstrap

De hoogte van één overdrachtstrap voor de ontwerpgeurstof bedraagt: 1.02 [m].

Stap 4. Bepaling van de totale pakkinghoogte en pakkingdiameter

De totale pakkinghoogte is 4.62 [m]. De diameter van de pakking bedraagt 5.05 [m].

De pakking is overvierkant van vorm. De atmosferische werkdruk is hiervan de belangrijkste oorzaak.

Stap 5. De drukval over de pakking en de afstand tot aan de floodinggrens.

- de drukval over de pakking heeft een waarde van 3843 [Pa];
- de floodingfactor van de pakking bedraagt 0.54 [-];
- de benattingsgraad van de pakking heeft een waarde van 66.5 [%].

De drukval over de pakking is vrij hoog. Een boosterblower zal waarschijnlijk nodig zijn voor het transport van de drooggassen. De benattingsgraad van de pakking is vrij laag. Opvoeren hiervan kan door middel van verhogen van de superfiële gassnelheid of door verhoging van de L/G-verhouding van de gaswasser. Het gevaar is dan echter dat de drukval sterk toeneemt en de afstand tot de floodinggrens te gering wordt. Wellicht levert de keuze van een andere pakking gunstiger resultaten op met betrekking tot drukval, benattingsgraad en floodingfactor.

Stap 6. Bepaling vangstrendementen van de niet-ontwerpgeurstoffen.

In tabel 4.1 worden waarden voor de volgende grootheden gepresenteerd voor de niet-ontwerpgeurstof:

- de concentratie van de geurstof in de gasuitlaat van de gaswasser [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
- het vangstrendement van de geurstof [%] ;
- de vangsteffectiviteit [%];
- herhaling kolom uit tabel 2.3: maximaal mogelijke vangstrendement [%].

Wat betreft vangstrendement kan met betrekking tot de verschillende organische groepen het volgende worden geconcludeerd:

- de meeste alcoholen worden goed tot zeer goed uitgewassen: > 95 [%] vangst;
- de ketonen worden goed uitgewassen met uitzondering van aceton: 83 [%] $<$ vangst < 95 [%] ;
- de esters worden zeer beperkt uitgewassen: circa 30 [%] vangst;
- de aldehyden worden slecht uitgewassen met uitzondering van acetaldehyde: 5 [%] $<$ vangst < 10 [%];
- de aromaten en mercaptanen worden zeer slecht uitgewassen: 1 [%] $<$ vangst < 5 [%];
- de alkenen (propeen) en de alkanen slippen nagenoeg voor 100 [%] door: < 0.1 [%] vangst.

Wat betreft vangsteffectiviteit kan worden gezegd dat voor de meeste geurstoffen de vangsteffectiviteit hoger is dan 90 [%]. Voor de meeste alcoholen is de vangsteffectiviteit hoger dan de ontwerpeffectiviteit (98 [%] voor de stof 2,3-butadion). Zoals te verwachten viel liggen de vangsteffectiviteiten van de slecht oplosbare stoffen dicht aan tegen de maximale waarde van 100 [%] die bereikt wordt in het theoretische geval van een oneindige hoge pakking zonder drukval (of bij een eindige pakkinghoogte maar met een oneindig snelle stofoverdracht). In de tabel zijn ook de maximaal mogelijke vangstrendementen gegeven in de grijs gemarkeerde, laatste kolom. De reden voor de zeer hoge vangsteffectiviteiten van de slecht oplosbare geurstoffen is het feit dat de concentratieprofielen van de geurstof in gas- en vloeistoffase aanliggen aan de gasinlaatkant. Eigenlijk houdt dit in dat voor deze geurstoffen voor de bepaling van de vangstrendementen de Henry-coëfficiënten en m-waarden zouden moeten worden bepaald horende bij de wateruitlaattertemperatuur van de wasser in plaats van uit te gaan van de gemiddelde wasvloeistoftemperatuur in de kolom. De vangstrendementen voor deze stoffen zouden dan nog wat lager moeten uitvallen. Voor de goed oplosbare geurstoffen met vangsteffectiviteiten tegen de 100 [%] zullen de concentratieprofielen aanliggen in de omgeving van de wasvloeistofinlaat. Dit houdt in dat de Henry-coëfficiënten en m-waarden voor deze stoffen zouden moeten zijn bepaald bij de waswaterinlaattertemperatuur wat tot nog wat betere vangstrendementen zou leiden.

Voor de volledigheid worden in tabel 4.2 ook de concentraties gegeven van de geurstoffen in de waswateruitlaat.

Tabel 4.3 geeft aan wat de te verwachten geuremissiefactoren zijn aan de gasuitlaat van de gaswasser. De geurfactor is de verhouding van de concentratie van de geurstof en zijn geurdrempelwaarde met dien verstande dat wanneer de waarden < 1.00 zijn (lager dan de drempelwaarde) deze worden genoteerd als 0.

Geuremissiefactoren hoger dan 1.0 zijn in tabel 4.3 gemarkeerd met een blauwe celkleur.

Na vergelijking met tabel A.1 blijkt dat:

- geen der alcoholen nog boven de geurdrempel uit te komen;
- er met uitzondering van acetaldehyde, nagenoeg geen vermindering van de geurbelasting optreedt voor de aldehyden, koolwaterstoffen (aromaten, alkanen, alkenen en terpenen) en mercaptanen;
- er een sterke vermindering van geurbelasting optreedt voor de ontwerpgeurstof.

Voor de mercaptanen zij opgemerkt dat alleen voor 2-propyl mercaptaan en 1-butylyceraptaan voldoende geurgegevens beschikbaar waren om geuremissiefactoren te berekenen. De verwachting is dat de geuremissiefactoren van de mercaptanen waarvoor de geurgegevens ontbreken hoog zullen zijn.

In afbeelding 4.1 en 4.2 worden de belangrijkste resultaten van de oplossing van het stelsel differentiaalvergelijkingen getoond.

Het blijkt dat al op de eerste helft van de pakking meer dan 90 [%] van alle waterdamp is gecondenseerd. Ongeveer vanaf dat punt is het waterdauwpunt van het afkoelende gas nagenoeg gelijk aan de watertemperatuur. De gastemperatuur daalt minder snel en komt ongeveer uit op de aangenomen waarde van 18 [°C]. De concentratieprofielen van de ontwerpgeurstof liggen (nog) niet aan aan de vloeistofinlaatzijde. Het vangstrendement van de ontwerpgeurstof is duidelijk beter dan eerder afgeschat waarbij is uitgegaan van een gemiddelde vloeistoftemperatuur (formules van hoofdstuk 3).

Tabel 4.1 Berekeningsresultaten voor de niet-ontwerpgeurstoffen aan de uitlaat van de gaswasser (1/2)

Geurcomponent	Uitlaatconc. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Vangstrendement [%]	Vangsteffectiviteit [%]	Max. vangstrendement [%]
Methanol	1.10	99.8	99.9	100
Ethanol	34.1	99.5	99.7	100
2_Propanol	0.276	99.1	99.3	100
1_Methoxy_2_Propanol	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
1_Butanol	3.99	98.7	98.9	100
2_ButoxyEthanol	0.645	98.8	98.8	100
2_Ethyl_1_Hexanol	14.3	86.3	87.1	100
CycloHexanol	2.03	97.7	97.9	100
1_2_Ethanediol	10.3	99.8	99.8	100
C4H8O3_Alcohols	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C10H18O_Alcohols	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C10H20O_Alcohols	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
EthylAcetate	67.1	32.2	96.9	33.1
ButylAcetate	173	27.1	96.9	27.9
C8H16O3_Esters	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
Acetone	72.2	17.9	99.4	17.9
2_Butanone	9.86	83.8	84.9	100
3_Hydroxy_2_Butanone	67.2	94.6	95.2	100
2_Heptanone	5.06	90.3	91.0	100
2_3_Butadione	48.1	97.6	98.0	100
Acetaldehyde	77.6	69.2	85.2	80.71
Nonanal	23.1	7.50	99.2	7.54
Decanal	31.3	5.25	99.3	5.27
COS	3.99	0.122	100.0	0.123
DichloroBenzene	64.8	1.78	99.8	1.78
2_Methyl_1_3_Dioxolane	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
1_4_dioxane	1.89	98.9	99.0	100.00
Alfa_Pinene	145	0.162	99.7	0.162
Beta_Pinene	5.99	0.0974	99.7	0.097
Limonene	362	0.320	99.7	0.320
C10H16_Terpenes	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens

Tabel 4.1 Berekeningsresultaten voor geurstoffen aan de gasuitlaat van de gaswasser (2/2)

Geurcomponent	Uitlaatconc. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Vangstrendement [%]	Vangsteffectiviteit [%]	Max. vangstrendement [%]
Acetonitrile	0.285	97.4	98.1	100.00
Benzene	24.7	1.01	99.9	1.010
EthylBenzene	104	0.765	99.8	0.765
1_2_3_TriMethylBenzene	13.8	1.29	99.7	1.29
1_2_4_TriMethylBenzene	51.3	1.29	99.7	1.29
1_3_5_TriMethylBenzene	9.91	0.855	99.7	0.855
1_Ethyl_2_MethylBenzene	9.89	1.10	99.7	1.10
1_Ethyl_3_MethylBenzene	25.7	1.10	99.7	1.10
1_Ethyl_4_MethylBenzene	14.9	0.956	99.7	0.956
PropylBenzene	4.97	0.554	99.7	0.554
Toluene	80.3	0.817	99.8	0.817
m_p_Xylene	351	1.01	99.8	1.006
o_Xylene	147	1.47	99.8	1.47
Styrene	59.8	1.92	99.8	1.92
Naphthalene	17.4	12.7	99.1	12.81
TetraHydroNaphthalene	6.75	3.59	99.6	3.59
C10H12_Aromatics	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C10H14_Aromatics	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C11H10_Aromatics	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C11H14_Aromatics	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C11H22_Aromatics	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
Propene	8.99	0.0447	99.9	0.0447
Propane	4.00	0.00860	99.9	0.0086
2_MethylPropane	21.0	0.00470	99.9	0.0047
Butane	9.00	0.00710	99.9	0.0071
Pentane	197	0.00390	99.8	0.0039
Nonane	7.00	0.0116	99.6	0.0116
Decane	24.00	0.00100	99.6	0.0010
Undecane	74.0	0.00260	99.5	0.0026
Dodecane	61.0	0.000700	99.5	0.0007
Tridecane	26.0	0.00200	99.4	0.0021
Tetradecane	14.0	0.00410	99.3	0.0042
C10H22_Alkanes	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C11H24_Alkanes	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C12H26_Alkanes	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
C13H28_Alkanes	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens	Geen Henry gegevens
MethylMercaptan	146	1.66	100.0	1.66
EthylMercaptan	6.88	1.72	99.9	1.72
1-propylMercaptan	3.94	1.56	99.9	1.56
2-PropylMercaptan	6.93	1.05	99.9	1.05
2-Methyl-1-PropylMercaptan	3.95	1.20	99.8	1.20
2-Methyl-2-PropylMercaptan	4.96	0.765	99.8	0.765
1-ButylMercaptan	16.8	1.39	99.8	1.39
2-ButylMercaptan	3.97	0.670	99.8	0.67

Tabel 4.2 Concentraties van de geurstoffen aan de wateruitlaat van de gaswasser (1/2)

Geurcomponent	Concentratie [$\mu\text{g/kg}$]
Methanol	239
Ethanol	3840
2_Propanol	15.3
1_Methoxy_2_Propanol	Geen Henry gegevens
1_Butanol	156
2_ButoxyEthanol	27.0
2_Ethyl_1_Hexanol	46.8
CycloHexanol	44.4
1_2_Ethanediol	2250
C4H8O3_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H18O_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H20O_Alcohols	Geen Henry gegevens
EthylAcetate	16.5
ButylAcetate	33.2
C8H16O3_Esters	Geen Henry gegevens
Acetone	8.12
2_Butanone	26.4
3_Hydroxy_2_Butanone	605
2_Heptanone	24.2
2_3_Butadione	1030
Acetaldehyde	90.0
Nonanal	0.969
Decanal	0.895
COS	0.00250
DiChloroBenzene	0.607
2_Methyl_1_3_Dioxolane	Geen Henry gegevens
1_4_dioxane	85.8
Alfa_Pinene	0.121
Beta_Pinene	0.00300
Limonene	0.600
C10H16_Terpenes	Geen Henry gegevens

Tabel 4.2 Concentratie van de geurstoffen aan de wateruitlaat van de gaswasser (2/2)

Geurcomponent	Concentratie [µg/kg]
Acetonitrile	5.53
Benzene	0.131
EthylBenzene	0.415
1_2_3_TriMethylBenzene	0.0932
1_2_4_TriMethylBenzene	0.346
1_3_5_TriMethylBenzene	0.0441
1_Ethyl_2_MethylBenzene	0.0567
1_Ethyl_3_MethylBenzene	0.148
1_Ethyl_4_MethylBenzene	0.0740
PropylBenzene	0.0143
Toluene	0.342
m_p_Xylene	1.85
o_Xylene	1.13
Styrene	0.606
Naphthalene	1.32
TetraHydroNaphthalene	0.130
C10H12_Aromatics	Geen Henry gegevens
C10H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H10_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H22_Aromatics	Geen Henry gegevens
Propene	0.00210
Propane	0.000178
2_MethylPropane	0.000505
Butane	0.000330
Pentane	0.00390
Nonane	0.000420
Decane	0.000124
Undecane	0.000984
Dodecane	0.000210
Tridecane	0.000275
Tetradecane	0.000300
C10H22_Alkanes	Geen Henry gegevens
C11H24_Alkanes	Geen Henry gegevens
C12H26_Alkanes	Geen Henry gegevens
C13H28_Alkanes	Geen Henry gegevens
MethylMercaptan	1.27
EthylMercaptan	0.0623
1-propylMercaptan	0.0322
2-PropylMercaptan	0.0380
2-Methyl-1-PropylMercaptan	0.0247
2-Methyl-2-PropylMercaptan	0.0198
1-ButylMercaptan	0.122
2-ButylMercaptan	0.0138

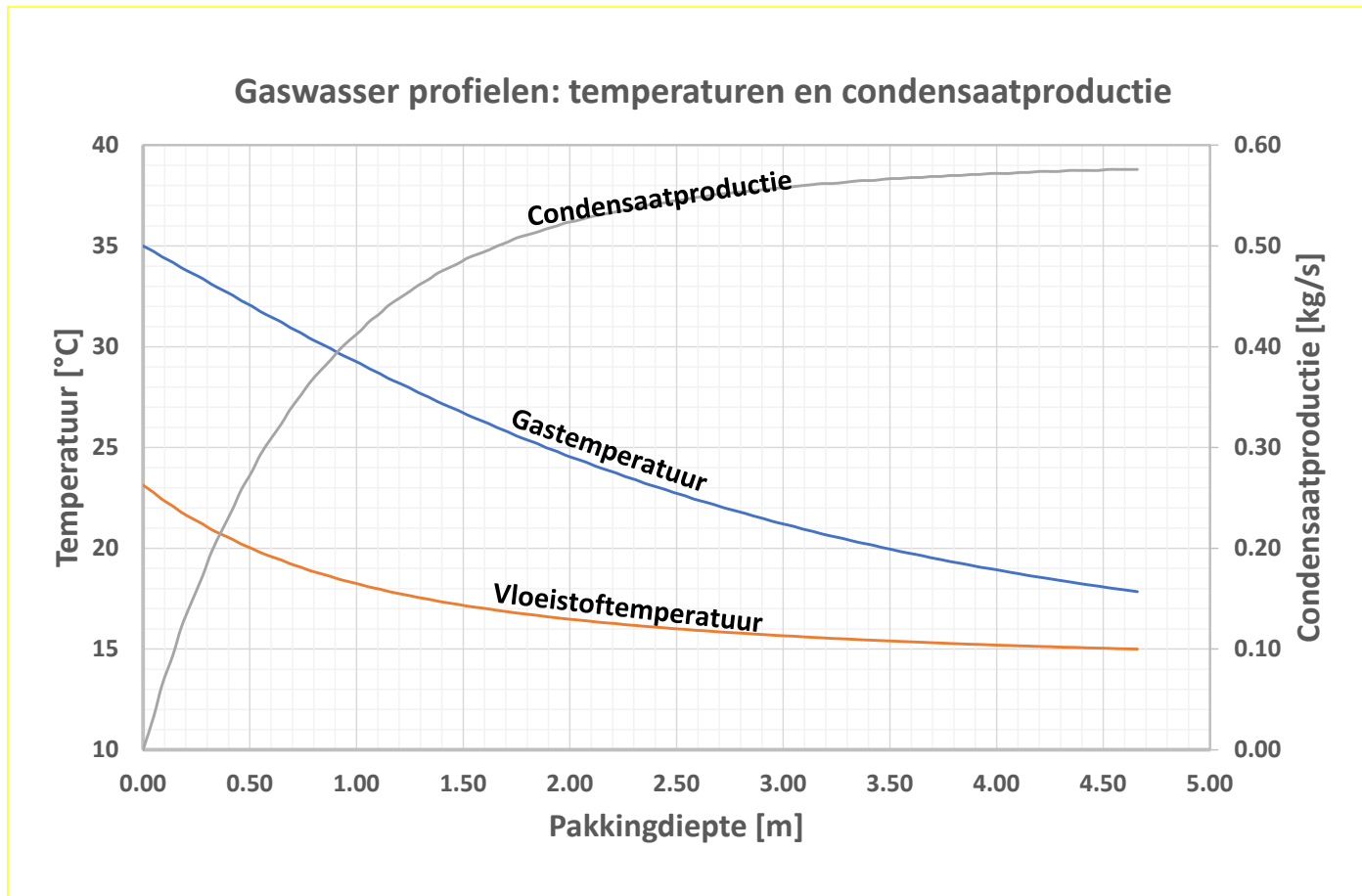
Tabel 4.3 Geurfactoren van de geurstoffen aan de gasuitlaat van de gaswasser (1/2)

Geurcomponent	Geurfactor [-]
Methanol	0
Ethanol	0
2_Propanol	0
1_Methoxy_2_Propanol	Geen Henry gegevens
1_Butanol	0
2_ButoxyEthanol	0
2_Ethyl_1_Hexanol	0
CycloHexanol	0
1_2_Ethanediol	0
C4H8O3_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H18O_Alcohols	Geen Henry gegevens
C10H20O_Alcohols	Geen Henry gegevens
EthylAcetate	0
ButylAcetate	0
C8H16O3_Esters	Geen Henry gegevens
Acetone	0
2_Butanone	0
3_Hydroxy_2_Butanone	0
2_Heptanone	0
2_3_Butadione	271
Acetaldehyde	26
Nonanal	10
Decanal	10
COS	0
DiChloroBenzene	0
2_Methyl_1_3_Dioxolane	Geen Henry gegevens
1_4_dioxane	0
Alfa_Pinene	1
Beta_Pinene	0
Limonene	2
C10H16_Terpenes	Geen Henry gegevens

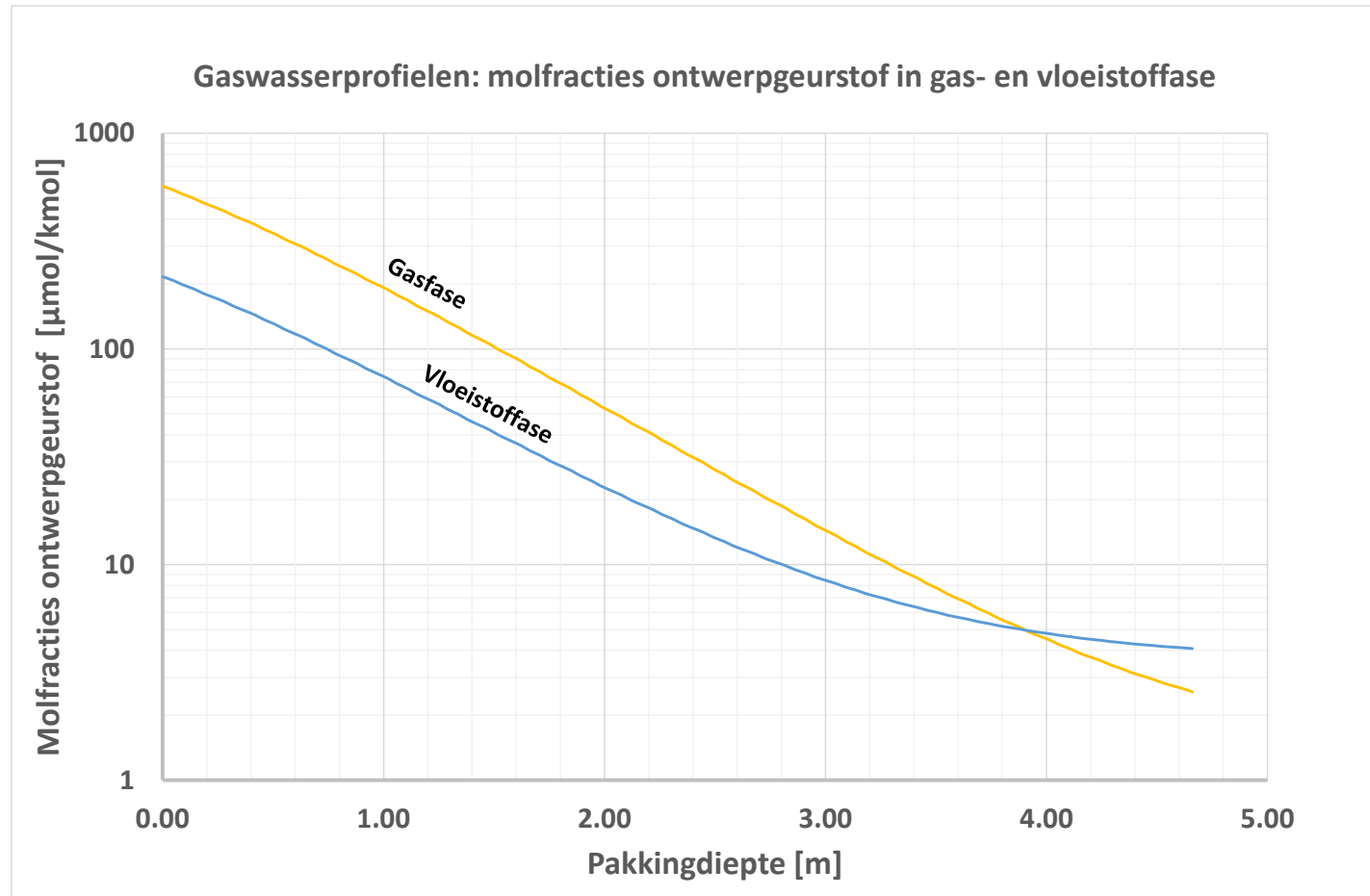
Tabel 4.3 Geurfactoren van de geurstoffen aan de gasuitlaat van de gaswasser (2/2)

Geurcomponent	Geurfactor [-]
Acetonitrile	0
Benzene	0
EthylBenzene	0
1_2_3_TriMethylBenzene	0
1_2_4_TriMethylBenzene	0
1_3_5_TriMethylBenzene	0
1_Ethyl_2_MethylBenzene	0
1_Ethyl_3_MethylBenzene	0
1_Ethyl_4_MethylBenzene	0
PropylBenzene	0
Toluene	0
m_p_Xylene	2
o_Xylene	0
Styrene	0
Naphthalene	0
TetraHydroNaphthalene	0
C10H12_Aromatics	Geen Henry gegevens
C10H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H10_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H14_Aromatics	Geen Henry gegevens
C11H22_Aromatics	Geen Henry gegevens
Propene	0
Propane	0
2_MethylPropane	0
Butane	0
Pentane	0
Nonane	0
Decane	0
Undecane	0
Dodecane	0
Tridecane	0
Tetradecane	0
C10H22_Alkanes	Geen Henry gegevens
C11H24_Alkanes	Geen Henry gegevens
C12H26_Alkanes	Geen Henry gegevens
C13H28_Alkanes	Geen Henry gegevens
MethylMercaptan	Geen OAV bekend
EthylMercaptan	Geen OAV bekend
1-propylMercaptan	Geen OAV bekend
2-PropylMercaptan	340
2-Methyl-1-PropylMercaptan	Geen OAV bekend
2-Methyl-2-PropylMercaptan	Geen OAV bekend
1-ButylMercaptan	1635
2-ButylMercaptan	Geen OAV bekend

Afbeelding 4.1 Gaswaserprofielen (1/2)



Afbeelding 4.1 Gaswaserprofielen (2/2)



5 Conclusies en aanbevelingen

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies.

Wat betreft vangstrendement kan met betrekking tot de verschillende organische groepen bij de gehanteerde L/G-verhouding van 1.67 [kg/kg] het volgende worden geconstateerd

- de meeste alcoholen worden goed tot zeer goed uitgewassen: > 95 [%] vangst;
- de ketonen worden goed uitgewassen met uitzondering van aceton: 83 [%]< vangst< 95[%] ;
- de esters worden zeer beperkt uitgewassen: circa 30 [%] vangst;
- de aldehyden worden slecht uitgewassen met uitzondering van acetaldehyde: 5[%] <vangst<10 [%];
- de aromaten en mercaptanen worden zeer slecht uitgewassen: 1[%]<vangst<5 [%];
- de alkenen (propeen) en de alkanen slippen nagenoeg voor 100 [%] door: < 0.1 [%] vangst.

Wat betreft de geurbelasting van de gastroom aan de uitlaat van de gaswasser kan het volgende worden geconcludeerd:

- geen der alcoholen komt nog boven de geurdrempel uit;
- er treedt, met uitzondering van acetaldehyde, nagenoeg geen vermindering van de geurbelasting op voor de aldehyden, koolwaterstoffen en mercaptanen;
- er is een sterke vermindering van geurbelasting voor de ontwerpgeurstof.

De berekening van gaswasserprofielen heeft aangetoond dat de aanname voor de procescondities van de gasuitlaat van de gaswasser correct waren. Deze berekeningen hebben ook aangetoond dat het vangstrendement van de ontwerpgeurstof hoger is dan berekend via de formules toegelicht in hoofdstuk 3.

De geurbelasting van de gastroom aan de uitlaat van de gaswasser is duidelijk nog te hoog om directe emissie toelaatbaar te maken. Een actiefkoolfilter geschakeld achter de gaswasser is nog steeds noodzakelijk om geuroverlast voor de omgeving te voorkomen. Wel zal de frequentie van vervanging van vol beladen actiefkool vrij sterk afnemen.

De belangrijkste resulterende dimensioneringsgegevens van de kolompakking zijn:

- totale pakkinghoogte : 4.62 [m].
- diameter pakking : 5.05 [m].

Aanbevelingen

De drukval over de gaswasser is vrij hoog. Er bestaat het vermoeden dat er types van pakking zijn die dienaangaande beter presteren.

Er is in deze studie van uitgegaan dat alleen oxidatie van geurstoffen optreedt in de recirculatielijn tussen waswateruitlaat en -inlaat. In theorie zou een betere overall oxidatiegraad kunnen worden verkregen wanneer:

- de oxidant (net name O_3) ook in de gasfase voorkomt zodat al in die fase mogelijk oxidatie voorkomt van koolwaterstoffen tot oxygenaten (zuurstofbevattende organische stoffen) die veel beter in water oplossen;

- de oxidant ook (nog) voorkomt in het waswater aan de inlaat van de gaswasser waarbij deze de in het water opgeloste koolwaterstoffen en mercaptanen snel oxideert tot oxygenaten of zelfs volledig nat verbrandt. Voorbeeld van zo'n oxidant is waterstofperoxide (H_2O_2).

6 Externe bronnen van gegevens.

[1] Slagging Behaviour Of Ashes Produced By Gasification Of Mixed Wste Streams in The Furec Wste Processing Unit, RWE-Order No : 4300371039-R4_E61

Enssim Software, January 2023

[2] NIST Webbook,

<https://webbook.nist.gov>

[3] Perry, Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition, MacGRAW-Hill 1997.

Robert H. Perry; Don W.Green

Bladzijde 14-9; Formule: 14-23.

[4] Perry, Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition, MacGRAW-Hill 1997.

Robert H. Perry; Don W.Green

Bladzijde 14-9; Formule: 14-19a.

[5] Mass Transfer Coefficients Between Gas And Liquid Phases In Packed Columns

K. Onda en anderen

Journal of Chemical Engineering of Japan,

Vol. 1, No.1, 1968.

[6] The Properties of Gases and Liquids, Fifth Edition, MacGRAW-Hill 2001

Bruce E. Poling en anderen

Bladzijde 11.10 ; Formule 11-4.4

[7] The Properties of Gases and Liquids, Fifth Edition, MacGRAW-Hill 2001

Bruce E. Poling en anderen

Bladzijde 11.10 ; Formule 11-4.4

[8] VDI-Wärmeatlas, Springer Verlag 9e-druk 2002

Hoofdstuk Lbf1 : Druckverlust und Flutpunkt in berieselter Packungen.

Bijlage A. Verwachte concentraties van geurstoffen in de drooglucht

Tabel A1. Verwachte concentraties van geurstoffen in de drooglucht (1/3)

Project		2021_WO_000193	
Code monster		E21-100	
Datum Monsternamen		27-5-2021	
Datum Analyse		7-6-2021	
Omschrijving		17u20	
CAS	Verbinding	$\mu\text{g}/\text{m}^3^{(1)}$	OAV ⁽²⁾
	Aromatische koolwaterstoffen		
71-43-2	benzeen	25	0
100-41-4	ethylbenzeen	105	0
526-73-8	1,2,3-trimethylbenzeen	14	0
95-63-6	1,2,4-trimethylbenzeen	52	0
108-67-8	1,3,5-trimethylbenzeen	10	0
611-14-3	1-ethyl-2-methylbenzeen	10	0
620-14-4	1-ethyl-3-methylbenzeen	26	0
622-96-8	1-ethyl-4-methylbenzeen	15	0
103-65-1	propylbenzeen	5	0
108-88-3	tolueen	81	0
108-38-3 / 106-42-3	m,p-xyleen	355	2
95-47-6	o-xyleen	149	0
100-42-5	styreen	61	0
91-20-3	naftaleen	20	0
-	tetrahydronaftaleen	7	0
-	$\Sigma \text{C}_{10}\text{H}_{12}$	9	0
-	$\Sigma \text{C}_{10}\text{H}_{14}$	156	0
-	$\Sigma \text{C}_{11}\text{H}_{10}$	7	0
-	$\Sigma \text{C}_{11}\text{H}_{14}$	18	0
	<i>Totaal</i>	1126	
	Cyclische koolwaterstoffen		
-	$\Sigma \text{C}_9\text{H}_{18}$	29	0
-	$\Sigma \text{C}_{11}\text{H}_{22}$	22	0
	<i>Totaal</i>	51	
	Alifatische koolwaterstoffen		
115-07-1	propeen	9	0
-	ΣC_4 alkeen	7	0
74-98-6	propaan	4	0
75-28-5	2-methylpropaan	21	0
106-97-8	butaan	9	0
78-78-4	2-methylbutaan	29	0
109-66-0	pentaan	197	0
111-84-2	nonaan	7	0
124-18-5	decaan	24	0
1120-21-4	undecaan	74	0
112-40-3	dodecaan	61	0
629-50-5	tridecaan	26	0
629-59-4	tetradecaan	14	0
-	ΣC_{10} alkaan	15	0
-	ΣC_{11} alkaan	27	0
-	ΣC_{12} alkaan	16	0
-	ΣC_{13} alkaan	35	0

Tabel A1. Verwachte concentraties van geurstoffen in de drooglucht (2/3)

	Alcoholen		
67-56-1	methanol	465	0
64-17-5	ethanol	7470	8
67-63-0	2-propanol	30	0
107-98-2	1-methoxy-2-propanol	107	0
71-36-3	1-butanol	307	3
111-76-2	2-butoxyethanol	53	0
104-76-7	2-ethyl-1-hexanol	105	0
108-93-0	cyclohexanol	88	0
107-21-1	1,2-ethaandiol	4374	0
-	Σ C ₄ H ₈ O ₃	34	0
-	Σ C ₁₀ H ₁₈ O	28	0
-	Σ C ₁₀ H ₂₀ O	31	0
	<i>Totaal</i>	13093	
	Esters		
141-78-6	ethylacetaat	99	0
123-86-4	butylacetaat	237	3
-	Σ C ₈ H ₁₆ O ₃	25	0
	<i>Totaal</i>	361	
	Ketonen		
67-64-1	aceton	88	0
78-93-3	2-butanon	61	0
513-86-0	3-hydroxy-2-butanon	1240	0
110-43-0	2-heptanon	52	2
431-03-8	2,3-butadion	2034	11298
	<i>Totaal</i>	3475	
	Aldehyden		
75-07-0	acetaldehyde	252	84
124-19-6	nonanal	25	13
112-31-2	decanal	33	11
	<i>Totaal</i>	310	
	Gehalogeneerde verbindingen		
-	dichloorbenzeen	66	0
	<i>Totaal</i>	66	
	Organische zwavelverbindingen		
463-58-1	carbonylsulfide	4	0
	<i>Totaal</i>	4	
	Ethers		
497-26-7	2-methyl-1,3-dioxolaan	88	0
123-91-1	1,4-dioxaan	162	0
	<i>Totaal</i>	249	
	Terpenen		
80-56-8	alfa-pineen	145	1
127-91-3	beta-pineen	6	0
5989-27-5	limoneen	363	2
-	Σ C ₁₀ H ₁₆	244	2
	<i>Totaal</i>	758	
	Organische stikstofverbindingen		
75-05-8	acetonitrile	11	0
	<i>Totaal</i>	11	
	Overige verbindingen		
	onbekend	21	
	<i>Totaal</i>	21	
	Totaal	20100	
(1) nat gas, 20°C, 1 atm			
Buiten meetbereik			
VVOC			
(2) OAV (Odour Activity Value): Verhouding concentratie tov geurdrempelwaarde			
geurdrempelwaarde overschreden			

Tabel A1. Verwachte concentraties van geurstoffen in de drooglucht (3/3)

Project		2021_WO_000193	
Code monster		E21-100	
Datum Monsternamen		27-5-2021	
Datum Analyse		4-6-2021	
Omschrijving		0.722222222	
Voorverdunding		2.14	
CAS	Verbinding	$\mu\text{g}/\text{m}^3^{(1)}$	OAV ⁽²⁾
74-93-1	methylmercaptaan	< 148	
75-08-1	ethylmercaptaan	< 7	
107-03-9	1-propylmercaptaan	< 4	
75-33-2	2-propylmercaptaan	7	373
513-44-0	2-methyl-1-propylmercaptaan	< 4	
75-66-1	2-methyl-2-propylmercaptaan	< 5	
109-79-5	1-butylmercaptaan	17	1654
513-53-1	2-butylmercaptaan	< 4	
(1) nat gas, 20°C, 1 atm			
Buiten meetbereik			
(2) OAV (Odour Activity Value): Verhouding concentratie tov geurdrempelwaarde			
geurdrempelwaarde overschreden			