



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Warmte, pluimstijging en depositie bij **brand**

Advies voor de uitbreiding van Pluimradar

Warmte, pluimstijging en depositie bij brand

Advies voor de uitbreiding van Pluimradar

RIVM-briefrapport 2024-0034

Colofon

© RIVM 2024

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2024-0034

M. van der Linden (auteur), RIVM
E. Kooi (auteur), RIVM
M. de Bode (auteur), RIVM

Contact:

Patrick Heezen
Milieu-incidenten, Veiligheid en Security
patrick.heezen@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van het reguliere programma 45 DCC 2023, programma onderdeel 45.1 CBRN-respons organisatie, Productnummer OG 0.6: Innovatie en kennisontwikkeling

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Warmte, pluimstijging en depositie bij brand.

Advies voor de uitbreiding van Pluimradar.

Bij grote branden komen schadelijke stoffen vrij die in de omgeving kunnen terechtkomen. Deze stoffen kunnen schadelijk zijn voor de gezondheid, bijvoorbeeld als iemand er veel van inademt. Ook kunnen ze op de bodem en oppervlakken terechtkomen waarna mensen ermee in contact kunnen komen. De brandweer meet daarom op verschillende plaatsen in de omgeving van het ongeval de concentraties van schadelijke stoffen. De Milieuongevallen Dienst (MOD) van het RIVM kan hierbij helpen.

Het is belangrijk de metingen op de juiste plaats te doen. Met Pluimradar, een online tool, kan snel worden berekend waar concentraties schadelijke stoffen in de lucht relatief hoog zijn. De tool berekent ook waar relatief veel gevaarlijke stoffen op de bodem terechtkomen. Deze informatie is nodig om omwonenden en hulpverleners goed te kunnen adviseren bij een brand.

Het RIVM stelt voor Pluimradar uit te breiden met een berekening van de 'pluimstijging'. Rook stijgt namelijk op door de warmte. Dat heeft invloed op de rookconcentraties in de omgeving en op de hoeveelheid stoffen die neerdalen op de bodem. Bij een brand in een gebouw is een extra berekening nodig omdat niet alle rook opstijgt. Dit komt omdat een deel van de rook rond het gebouw blijft hangen en afkoelt. Het RIVM heeft uitgezocht hoe dat verschijnsel in de tool kan worden meegenomen.

De gebruiker van Pluimradar moet nu bij branden nog zelf opgeven hoe hoog de rookpluim komt. Vanaf de grond is dat lastig in te schatten. Door de uitbreiding van Pluimradar hoeft de gebruiker dit niet meer te doen. De tool wordt op dit moment aangepast naar een nieuwe versie en wordt daarna beschikbaar gesteld.

De MOD en Adviseurs Gevaarlijke Stoffen (AGS'en) van de brandweer gebruiken de tool Pluimradar. Het RIVM heeft Pluimradar ongeveer 10 jaar geleden samen met het KNMI ontwikkeld.

Kernwoorden: Pluimradar, pluimstijging, MOD, brand, schadelijke stoffen, incidenten, depositie, gebouwen

Synopsis

Heat, plume rise and deposition as a result of fires.

Recommendation to expand Pluimradar

Large fires are accompanied by the release of harmful substances which may end up in the surrounding area. These substances can be harmful to health, for example when people inhale too much of them. People may also come into contact with them if they are deposited onto the soil and other surfaces. This is why the fire brigade measures concentrations of harmful substances in various areas near the site of the incident. RIVM's Environmental Incident Service (*Milieuongevallendienst*, MOD) can assist with this.

It is important that the measurements are taken in the right locations. Pluimradar (Plume Radar) is an online tool that makes it possible to quickly model where there are likely to be relatively high concentrations of harmful substances in the air. The tool also models where relatively large amounts of harmful substances are likely to be deposited onto the soil. This information is necessary to be able to advise local residents and first responders properly in the event of a fire.

RIVM now proposes to expand Pluimradar with 'plume rise modelling'. The heat generated by the fire causes the ensuing smoke to rise. This affects the smoke concentrations in nearby areas, as well as the amounts of harmful substances deposited onto the soil. In the case of a fire inside a building, additional modelling is needed, because not all of the smoke will rise: part of the smoke will envelop the building and cool down. RIVM has investigated how this phenomenon can be included in the tool.

At present, Pluimradar users need to enter the altitude to which the smoke plume rises after a fire manually. This is difficult to estimate from ground level. Expanding Pluimradar means the user no longer has to do this. The tool is being modified at the moment and will be released when ready.

The Pluimradar tool is used by the MOD and Hazardous Materials Officers employed by the fire brigade. It was developed jointly by RIVM and the Royal Netherlands Meteorological Institute around 10 years ago.

Keywords: Pluimradar, plume rise, MOD, fire, harmful substances, incidents, deposition, buildings

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 13

- 1.1 Over dit rapport — 13
- 1.2 Achtergrondinformatie over Pluimradar — 13

2 Deelonderzoek warmte en pluimstijging — 15

- 2.1 Inleiding en leeswijzer — 15
- 2.2 Vragen uit onderzoeksvoorstel — 15
- 2.3 Huidige rekenmodellen — 15
 - 2.3.1 Pluimradar 1 — 15
 - 2.3.2 NPK-Puff — 16
 - 2.3.3 JRodos — 17
- 2.4 Mogelijke implementatie pluimstijging in Pluimradar 2 — 17
- 2.5 Invoerparameters voor NPK-Puff — 17
 - 2.5.1 Relevante parameters — 17
 - 2.5.2 Parameter: type brand — 19
 - 2.5.3 Parameter: brandsnelheid — 20
 - 2.5.4 Parameter: verbrandingswarmte — 22
 - 2.5.5 Parameter: convectieve warmtefractie — 22
 - 2.5.6 Parameter: convectieve warmteflux — 23
 - 2.5.7 Samenvatting convectieve warmteflux als invoerparameter voor het berekenen van pluimstijging — 31
- 2.6 Alternatieven voor de rekenwijze uit NPK-Puff — 32
 - 2.6.1 Inleiding — 32
 - 2.6.2 Correctieterm van Mills — 32
 - 2.6.3 Pluimstijgingsmodel van Carter — 34
 - 2.6.4 Pluimstijgingmodel van Zonato — 35
 - 2.6.5 Vergelijking van Briggs, Mills, Carter en Zonato — 36
 - 2.6.6 Invloed van gebouwen — 37
 - 2.6.7 Inschatten effectieve bronhoogte door de gebruiker — 39
- 2.7 Samenvatting en aanbevelingen — 40
 - 2.7.1 Directe invoer van bronhoogte — 41
 - 2.7.2 Berekenen van de pluimstijging met NPK-Puff — 41
 - 2.7.3 Wijzigingen in NPK-Puff — 41
 - 2.7.4 Verdeling van massa over de lijwervelpluim en de bovenliggende pluim — 42
 - 2.7.5 Bevordering van terugkoppeling voor validatie — 42
 - 2.7.6 Waarschuwingen voor onrealistische waarden — 42

3 Deelonderzoek depositie — 43

- 3.1 Inleiding en leeswijzer — 43
- 3.2 Vragen uit onderzoeksvoorstel — 43
- 3.3 Relevante stoffen en deeltjesgrootte — 43
 - 3.3.1 Deeltjesgrootteverdelingen — 44
- 3.4 Droge depositie — 46
 - 3.4.1 Fysische processen — 46
 - 3.4.2 Typische depositiesnelheden — 50
 - 3.4.3 Modelleren in NPK-Puff en Pluimradar 1 — 52
 - 3.4.4 Samenvatting droge depositie — 54

3.5	Natte depositie — 55
3.5.1	Fysische processen — 55
3.5.2	Typische depositiesnelheden — 57
3.5.3	Modellering in NPK-Puff en Pluimradar 1 — 58
3.5.4	Samenvatting natte depositie — 59
3.6	Samenvatting en aanbevelingen — 59
4	Literatuur — 61
5	Bijlage 1 Droge depositie in NPK-Puff — 65
6	Bijlage 2 Inzichten uit windtunnelexperimenten van Hall et al. — 69
7	Bijlage 3 Gevoeligheidsanalyse met de NNM gebouwmodule — 71
7.1	Inleiding — 71
7.2	Opzet van de gebouwmodule en invoerparameters voor de gevoeligheidsanalyse — 71
7.2.1	Invoerwaarden voor meteoparameters en ruwheidslengte — 73
7.2.2	Invoerwaarden voor gebouwkenmerken — 74
7.2.3	Brandkenmerken — 74
7.2.4	Invoerwaarden voor emissiekenmerken — 75
7.3	Resultaten — 76
7.3.1	Resultaten op hoofdlijnen — 76
7.3.2	Vergelijking van de berekende pluimhoogte met de correlaties van Briggs en Mills — 78
7.3.3	Invloed van invoerparameters op de uitkomsten — 79
7.4	Conclusies — 85
7.5	Aanbeveling: massafractie in lijwervelpluim — 86

Samenvatting

Dit rapport beschrijft twee deelonderzoeken die tot doel hadden de advisering van de Milieuongevallen Dienst (MOD) met betrekking tot de verspreiding van schadelijke stoffen bij branden te verbeteren. Met de uitkomsten van deze deelonderzoeken wil het RIVM de applicatie Pluimradar verbeteren. Pluimradar is een online tool die gebruikt wordt door de MOD en de Adviseurs Gevaarlijke Stoffen (AGS'en) van de brandweer om een snelle indruk te krijgen van de rookpluim na een brand. De tool geeft de verspreiding van de pluim door de lucht en de neerslag van de stofdeeltjes op de grond. Deze inschatting kan bijvoorbeeld helpen bij het aansturen van meetploegen voor het verrichten van metingen.

Het eerste deelonderzoek betreft de warmte die vrijkomt bij verschillende branden en de invloed daarvan op de hoogte die de rookpluim bereikt. Het tweede deelonderzoek gaat over de depositie van schadelijke stoffen: voor welke stoffen wordt de depositie gemeten en hoe kan de depositie van die stoffen goed berekend worden? De deelonderzoeken zijn los van elkaar uitgevoerd en worden afzonderlijk besproken.

Deelonderzoek warmte en pluimstijging

Het doel van dit deelonderzoek was uit te zoeken hoeveel warmte er vrijkomt bij verschillende soorten branden en hoe de daarmee samenhangende pluimstijging goed gemodelleerd kan worden. De onderliggende onderzoeksvragen zijn opgenomen in paragraaf 2.2. De belangrijkste uitkomsten van dit deelonderzoek zijn:

- Ruwweg kunnen branden ingedeeld worden in drie typen:
 - a. Buitenbranden: branden in de open buitenlucht.
 - b. Zuurstofbeperkte branden: branden in een gebouw dat nog grotendeels intact is.
 - c. Uitslaande branden: branden waarbij de omhulling van het gebouw beschadigd is geraakt zodat rook en vlammen naar buiten komen.
- De energie die bij verbranding vrijkomt, wordt voor een deel omgezet naar convectieve warmte. De convectieve warmteflux (in MW) is een belangrijke parameter voor pluimstijging en hangt af van meerdere variabelen zoals de grootte van de brand, de eigenschappen van de brandstoffen en de beschikbaarheid van zuurstof. Bij een brand zijn die variabelen vaak niet of niet goed bekend. Als gevolg daarvan kan de convectieve warmteflux niet nauwkeurig berekend worden. Wel kan de grootteorde ingeschat worden op basis van enkele ruwe kenmerken van de brand.
- Er is een voorstel uitgewerkt om de grootteorde in te schatten (Tabel 2.12, pagina 31). Vanuit pragmatisch oogpunt is gekozen om met drie type branden te werken. De gebruiker geeft aan of er sprake is van een buitenbrand, een uitslaande brand of een zuurstofbeperkte (of smeulende) gebouwbrand. Voor een buitenbrand moet de gebruiker verder kiezen tussen een brand van ontvlambare vloeistoffen, een standaard brand of een

smeulende brand. Voor een uitlaande brand moet de gebruiker kiezen tussen een standaard brand of een bovengemiddeld intensieve brand. Voor alle drie typen branden moet de gebruiker ook een inschatting geven van het brandoppervlak. Tezamen geeft dat een ruwe inschatting van de convectieve warmteflux.

- De pluimstijging hangt vooral af van de convectieve warmteflux, de windsnelheid en de stabiliteit van de atmosfeer. De formules van Briggs (Figuur 2.1, pagina 16) vormen een goed uitgangspunt voor de pluimhoogte die bereikt kan worden. Deze formules zijn al geïmplementeerd in NPK-Puff, het luchtverspreidingsmodel dat in Pluimradar wordt gebruikt. De correctie van Mills geeft een verdere verfijning, maar in het licht van verschillende onzekerheden, is de toegevoegde waarde daarvan beperkt. De correctie van Mills wordt daarom niet overgenomen.
- Bij een gebouwbrand kan een deel van de emissie gevangen worden in wervels rond het gebouw. Dat deel ondergaat veel minder pluimstijging dan het deel dat niet wordt ingevangen. Het is dus beter om met twee pluimen te rekenen: een deel dat aan de grond blijft hangen en een deel dat stijgt onder invloed van warmte. De massaverdeling hangt af van het ontwikkelingsstadium van de brand. Er is een voorstel gedaan voor deze massaverdeling (Tabel 2.13, pagina 39). Deze massaverdeling kan worden opgenomen in Pluimradar.
- Voor een automatische berekening van de pluimhoogte moet de gebruiker na update van Pluimradar het brandoppervlak, het type brand en eventueel ook de intensiteit van de brand invoeren. De benodigde meteorogegevens zijn al beschikbaar in NPK-Puff.

Deelonderzoek depositie

Het doel van dit deelonderzoek was uit te zoeken voor welke schadelijke stoffen die vrijkomen bij branden de depositie berekend moet kunnen worden en hoe deze depositie goed berekend kan worden, opdat op basis daarvan Pluimradar mogelijk verder verbeterd kan worden. De onderliggende onderzoeksvragen zijn opgenomen in paragraaf 3.2. De belangrijkste antwoorden van dit deelonderzoek zijn:

- De MOD doet vooral onderzoek naar depositie van polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), dioxines en zware metalen.
- De hierboven genoemde stoffen worden in depositie voornamelijk aangetroffen als stofgebonden componenten.
- Voor de depositiesnelheid van deeltjes is de deeltjesgrootte van belang. De deeltjesgrootte van de (fijn)stofgebonden componenten die bij verbranding ontstaan is typisch 0,1-1 μm . De droge depositiesnelheid voor dit soort deeltjes varieert van 10^{-4} tot $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, afhankelijk van deeltjesgrootte en lokale omstandigheden.
- Het depositiemodel dat wordt gebruikt in Pluimradar (en het onderliggende model NPK-Puff) is ontwikkeld voor gassen. De depositiesnelheid die het model berekent is typisch $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dit ligt dus binnen de spreiding van depositiesnelheden die verwacht worden voor stofgebonden componenten die bij verbranding ontstaan.

- Het relatieve beeld van de ruimtelijke spreiding van (droge) depositie, lijkt niet erg gevoelig te zijn voor de gekozen deeltjesgrootte (voor fijn stof). De huidige modellering in Pluimradar is goed genoeg voor deze toepassing. Bij brand kunnen ook grotere deeltjes vrijkomen, bijvoorbeeld grote roetvlokken of macroscopische deeltjes die ontstaan door verpulvering van (gebouw)materialen. Voor deze deeltjes is de modellering van Pluimradar niet geschikt.
- De manier waarop natte depositie in NPK-Puff berekend wordt, sluit aan bij de modellen in de literatuur. Ook de waarden van rekenparameters komen goed overeen met wat in de literatuur is gevonden. Pluimradar heeft op dit punt dan ook geen aanpassing.

Belangrijkste conclusies en aanbevelingen

Op basis van de resultaten uit het eerste deelonderzoek is een voorstel gedaan voor de uitbreiding van Pluimradar. Deze uitbreiding betreft het berekenen van de pluimstijging met de formules van Briggs. Voor gebouwbranden wordt aanbevolen om te rekenen met twee pluimen: één pluim die stijgt en één die in de lijwervel van het gebouw afkoelt en daardoor op grondhoogte blijft. Uit het tweede deelonderzoek volgen geen aanbevelingen die leiden tot het aanpassen van Pluimradar.

Naar verwachting worden deze wijzigingen geïmplementeerd in een nieuwe versie van Pluimradar (geplande release: 2024).

1 Inleiding

1.1 Over dit rapport

Dit rapport beschrijft twee deelonderzoeken die tot doel hadden de advisering van de Milieugevallen Dienst (MOD) met betrekking tot de verspreiding van schadelijke stoffen bij branden te verbeteren. Het eerste deelonderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 2 en gaat over de warmte die vrijkomt bij verschillende soorten branden en de invloed van warmte op stijging van de rookpluim. Het tweede deelonderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 3 en gaat over depositie van schadelijke stoffen: voor welke stoffen wordt de depositie gemeten in geval van een brand en hoe kan de depositie van die stoffen goed worden berekend? De twee deelonderzoeken staan los van elkaar.

Met de uitkomsten van het onderzoek wil RIVM de applicatie Pluimradar verbeteren (zie hieronder voor informatie over Pluimradar). De doelgroep van dit onderzoek is de MOD. Er wordt daarom verondersteld dat de lezer enige voorkennis heeft over de rekenmodellen die binnen de MOD worden gebruikt.

In het project is literatuuronderzoek uitgevoerd. Dit is aangevuld met informatie verkregen via interviews met enkele medewerkers van de MOD.

1.2 Achtergrondinformatie over Pluimradar

Pluimradar is een webapplicatie waarmee de verspreiding en depositie van schadelijke stoffen snel kan worden berekend [1, 2]. Deze applicatie wordt gebruikt bij milieu-incidenten zoals branden en lekkages van gevaarlijke stoffen. De gebruiker hoeft slechts een beperkt aantal gegevens in te voeren, zoals de bronlocatie, de effectieve bronhoogte en de verwachte emissieduur. Pluimradar moet eenvoudig in gebruik zijn zodat het in het veld snel kan worden toegepast.

De actuele versie van Pluimradar ten tijde van schrijven (2023) is Pluimradar 1. Aanbevelingen in dit rapport worden naar verwachting geïmplementeerd in een nieuwe versie van Pluimradar (geplande release: 2024). Onderstaande opmerkingen zijn van toepassing op zowel Pluimradar 1 als de nieuwe versie van Pluimradar, in dit rapport aangeduid als Pluimradar 2.

Enkele aandachtspunten voor het gebruik van Pluimradar zijn:

- Pluimradar berekent de verspreiding voor een brand met constante karakteristieken (zoals pluimhoogte, of bronterm). Ook met de in dit verslag voorgestelde aanpassingen blijft dit het geval. Als de karakteristieken van de brand sterk veranderen, bijvoorbeeld door het uitslaan van een gebouwbrand of door blusacties, is de berekende pluim mogelijk niet meer representatief voor de brand. In dat geval kan het beste een nieuwe run worden gedaan.
- Pluimradar gaat altijd uit van een bronterm van dezelfde omvang. De resultaten zijn daarom altijd kwalitatief. Het is

mogelijk om te zien waar concentraties (in de lucht of op de grond) relatief hoog of relatief laag zijn. Deze schaal, van 'hoog' tot 'laag', is altijd hetzelfde, ongeacht de omvang van de brand. Het is daarom met Pluimradar niet mogelijk om een uitspraak te doen over de absolute concentraties.

Voor berekeningen met Pluimradar wordt het verspreidingsmodel NPK-Puff [1, 3] gebruikt. NPK-Puff is ontwikkeld om de verspreiding van radionucliden te kunnen berekenen. In Pluimradar wordt verspreiding van deeltjes berekend als een emissie van het nuclide cesium-137 (Cs-137), omdat het radioactief verval van dit nuclide verwaarloosbaar is tijdens de duur van een brand (te weten: uren tot dagen). Daarmee geeft het model een voldoende betrouwbaar beeld van verspreiding en depositie.

NPK-Puff kan stand-alone worden gebruikt maar is ook ingebed in het "decision support" systeem JRodos [4]. In het geval van een radiologisch incident maken de stralingsdeskundige modellers van de Ongevalsorganisatie Straling (OOS) gebruik van JRodos.

2 Deelonderzoek warmte en pluimstijging

2.1 Inleiding en leeswijzer

In dit hoofdstuk wordt het deelonderzoek warmte en pluimstijging uitgewerkt. Eerst worden de vragen uit het onderzoeksvoorstel gegeven (paragraaf 2.2). Daarna wordt een korte beschrijving gegeven van de huidige rekenmodellen (paragraaf 2.3) en van de wijze waarop pluimstijging kan worden geïmplementeerd in Pluimradar 2 (paragraaf 2.4). Eén optie is om het model voor pluimstijging uit NPK-Puff te gebruiken in Pluimradar 2. Hiervoor zijn aanvullende invoerparameters nodig. Deze worden besproken in paragraaf 2.5. Alternatieven voor dit pluimstijgingsmodel worden besproken in paragraaf 2.6. Tot slot wordt in paragraaf 2.7 een samenvatting gegeven van het onderzoek, en zijn enkele aanbevelingen opgenomen.

2.2 Vragen uit onderzoeksvoorstel

In dit deelonderzoek wordt uitgezocht hoeveel warmte er vrijkomt bij verschillende soorten branden en hoe de daarmee samenhangende pluimstijging goed gemodelleerd kan worden. Het betreft de volgende stappen:

1. Een lijst opstellen van standaard typen branden. Bijvoorbeeld enkele representatieve typen, zoals gebouwbranden en buitenbranden (open fires).
2. Voor elk type brand nagaan welke parameter(s) bepalend is (zijn) voor de vrijkomende warmte.
3. Een schatting (interval) geven voor de grootte van deze parameters en een voorstel doen voor de default waarde voor de verdere warmteberekening.
4. Nagaan hoe warmte en pluimstijging samenhangen. Beoordelen of de berekening van pluimstijging in NPK-Puff en JRodos voldoende aansluit bij de actuele kennis.
5. Een geschikte invoerwijze voorstellen voor NPK-Puff en JRodos.
6. Bepalen welke aanvullende invoerparameters er nodig zijn in de user interface van Pluimradar 2, en of er aanvullende uitvoer gewenst is.¹

2.3 Huidige rekenmodellen

2.3.1 *Pluimradar 1*

Op dit moment is er in Pluimradar 1 geen manier om de pluimstijging te berekenen. In plaats daarvan wordt de effectieve bronhoogte ingevoerd. Voor een stof die vrijkomt door bijvoorbeeld verdamping uit een plas is de effectieve bronhoogte 0 meter. Bij een brand is de effectieve bronhoogte van een rookpluim de hoogte die de pluim bereikt na warmte- en impulsstijging, gemeten vanaf de grond tot het midden van de pluim. De gebruiker moet deze hoogte zelf inschatten.

¹ Als bijvoorbeeld de warmte wordt ingevoerd, dan kan het nuttig zijn om de resulterende pluimhoogte voor de gebruiker van Pluimradar 2 zichtbaar te maken, zodat hij/zij het resultaat kan beoordelen.

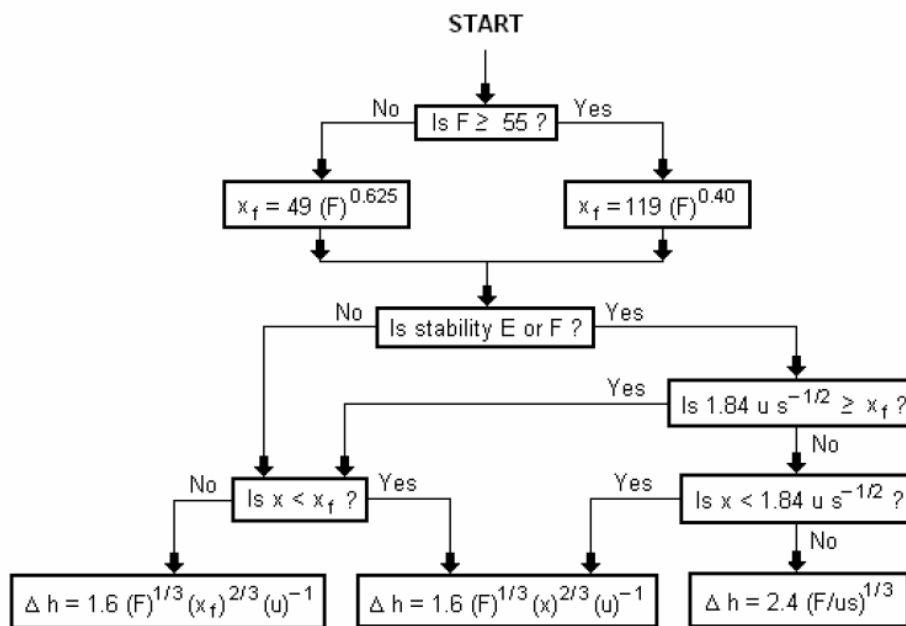
2.3.2 NPK-Puff

In NPK-Puff zijn formules opgenomen voor het berekenen van pluimstijging. De gebruiker moet zelf de warmte die vrijkomt bij een brand (in MW) invullen (het gaat hier om de convectieve warmteflux, Q_{conv} , zie paragraaf 2.5.6 voor toelichting).

De gebruikte formules zijn opgesteld door Briggs in de jaren 1960 en 1970. De formules gelden voor schoorstenen. Het stroomschema in Figuur 2.1 vat de formules samen. De pluimstijging hangt dus af van:

- De *buoyancy factor*, F . Deze is evenredig met de convectiewarmte: F (in m^4/s^3) = $8,8 \times Q_{\text{conv}}$ (in MW). Een grotere convectiewarmte betekent meer stijging.
- De windsnelheid u . Sterkere wind betekent minder pluimstijging.
- De atmosferische stabiliteit (klasse A t/m F). Bij klasse E en F (stabiel) is minder pluimstijging verwacht.

LOGIC DIAGRAM FOR BRIGGS' EQUATIONS TO CALCULATE THE RISE OF A BUOYANT PLUME



Δh = plume rise, in m
 F = buoyancy factor, in m^4/s^3
 x = downwind distance from plume source, in m
 x_f = downwind distance from plume source to point of maximum plume rise, in m
 u = windspeed at actual stack height, in m/s
 s = stability parameter, in s^{-2}

Figuur 2.1 Stroomschema voor de formules van Briggs voor pluimstijging uit schoorstenen, figuur overgenomen uit Beychok (2005) [5].

Pluimstijging wordt in NPK-Puff berekend met de subroutine PlumeRise. De pluimstijging wordt hier iteratief berekend. Op tijdstap 0 is de hoogte gelijk aan de fysieke hoogte van de bron. Vervolgens wordt op iedere tijdstap berekend welke afstand een *puff* aflegt in de richtingen x , y en

z, als gevolg van de meteorologische parameters ter plaatse en de warmte.

2.3.3 JRodos

In JRodos kan de gebruiker een convectieve warmteflux Q_{conv} opgeven, waarna de pluimstijging met het model NPK-Puff wordt berekend, zoals beschreven in paragraaf 2.3.2 hierboven.

JRodos kent daarnaast de optie *wildfire*, voor grootschalige (natuur)branden. Invoerparameters zijn onder andere de duur en de locatie van de brand (er kan een gebied worden ingevoerd op de kaart) en de intensiteit. De optie *wildfire* werkt niet met NPK-Puff wordt daarom hier niet verder uitgewerkt.

2.4 Mogelijke implementatie pluimstijging in Pluimradar 2

Een optie voor Pluimradar 2 is om de formules van Briggs, voor pluimstijging uit schoorstenen, te gebruiken. Deze formules staan al in NPK-Puff (zie paragraaf 2.3.2). Er zijn dus geen wijzigingen nodig in NPK-Puff, alleen in Pluimradar.

Om te bepalen of het haalbaar is om de formules van Briggs te gebruiken, moeten de volgende vragen worden beantwoord:

1. De gebruiker moet in dit geval niet de effectieve bronhoogte invoeren, maar de convectieve warmteflux van de brand. Is het realistisch om dit te verwachten?
2. De formules van Briggs zijn voor schoorstenen. Met deze rekenwijze wordt de pluimstijging bij buitenbranden en branden in een gebouw waarschijnlijk overschat. De formules zijn niet bedoeld voor de grote pluimen die ontstaan bij branden met veel vloeistof [6]. Hoe groot is de fout die wordt gemaakt? Indien nodig, kan dit (relatief eenvoudig) worden gecorrigeerd?

Deze twee vragen zullen in de komende paragrafen verder worden onderzocht.

2.5 Invoerparameters voor NPK-Puff

De huidige versie van NPK-Puff heeft één invoerparameter nodig: de convectiewarmte van de brand, in MW. Het is niet realistisch om dit tijdens een brand vast te stellen, ook niet voor experts van het RIVM. Dit zal dus door Pluimradar 2 moeten worden uitgerekend, op basis van enkele andere parameters, die de gebruiker wel zelf kan inschatten:

- Het type brand (bijv. binnen of buiten).
- De omvang (het oppervlak) van de brand.
- Een ruwe inschatting van de brandsterkte, zoals smeulend/normaal/intensief.

2.5.1 Relevante parameters

In deze paragraaf wordt een korte beschrijving van de relevante parameters gegeven. Dit zijn de parameters die kunnen worden meegenomen in Pluimradar 2. De beschrijving van de parameters is gebaseerd op een recent RIVM rapport (Kooi en Laheij, 2021 [7]).

Verschillende branden kunnen uiteenlopende karakteristieken hebben. Denk hier aan verschillen tussen branden binnen in opslagloodsen en buiten in de open lucht. Het kan daarom nuttig zijn om enkele 'standaard' **typen branden** te definiëren. De parameters die de brand beschrijven zullen voor ieder type brand een andere waarde hebben, en kunnen ook variëren tijdens het verloop van één brand (door blusacties, het instorten van een gebouw, het openscheuren van containers, e.d.). Het type brand wordt besproken in paragraaf 2.5.2.

De **brandsnelheid** \dot{m} beschrijft de snelheid waarmee materialen verbranden, in $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. De brandsnelheid hangt af van het materiaal en andere parameters, zoals de beschikbaarheid van zuurstof en de wijze waarop materialen zijn verpakt of opgeslagen. Vanwege de grote afhankelijkheid van opslagcondities worden brandsnelheden ook vaak gegeven per oppervlak, in $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ of $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Dit wordt besproken in paragraaf 2.5.3.

De warmte die bij volledige verbranding van een brandstof vrijkomt heet de **verbrandingswarmte** (*ideal heat of combustion*, $\Delta H_{\text{volledig}}$, eenheid $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$). Typische waarden voor de verbrandingswarmte bij volledige verbranding zijn gegeven in paragraaf 2.5.4. Bij echte branden is de verbranding niet volledig (een deel van de potentiële verbrandingsenergie komt door suboptimale verbrandingscondities niet vrij). Hier wordt rekening mee gehouden.

Slechts een deel van de verbrandingswarmte gaat naar convectie (*convective heat*) en is daarmee relevant voor pluimstijging. Om hier rekening mee te houden is de parameter χ_{conv} , de **convectieve warmtefractie**, gedefinieerd. Deze fractie is afhankelijk van de omstandigheden, zoals de omvang van de brand. Typische waarden zijn gegeven in paragraaf 2.5.5. Voor branden binnen een gebouw gaat bovendien een deel van de warmte die vrijkomt verloren aan opwarming van het gebouw. De convectieve warmte van de emissie is dus lager dan de convectieve warmte die ontstaat bij de verbranding. In dit onderzoek wordt dit **warmteverlies aan het gebouw** verdisconteerd in de parameter χ_{conv} .

Bovenstaande parameters kunnen worden gebruikt om de **convectieve warmteflux** Q_{conv} (in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) te berekenen²:

$$Q_{\text{conv}} = \dot{m} \times \Delta H_{\text{volledig}} \times \chi_{\text{conv}}$$

In paragraaf 2.5.6 worden waarden voor Q_{conv} berekend uit typische waarden voor brandsnelheid, verbrandingswarmte, convectieve warmtefractie en fractie warmteverlies aan gebouw. De berekende waarden worden vergeleken met waarden uit de literatuur. In de literatuur is niet altijd eenvoudig op te maken of de auteurs met "warmteproductie" (in het Engels "heat production") de "volledige warmteproductie" (Q_{volledig}), de bruto "convectieve-warmteproductie" (zonder warmteverlies aan het gebouw) of de netto "convectieve warmteflux" (Q_{conv}) (met warmteverlies aan gebouw) bedoelen.

² Opwarming van de rook kan in de praktijk ook plaatsvinden door de zon [8] maar dit is buiten scope van dit onderzoek.

In paragraaf 2.5.7 zijn de voorgestelde waarden van de parameters samengevat.

2.5.2 *Parameter: type brand*

Voor het vaststellen van typen branden kan bijvoorbeeld worden aangesloten bij een studie van de Health & Safety Laboratory (HSL) uit 2010 [9]. De auteurs onderscheiden verschillende soorten branden (zie ook Figuur 2.2). Daarnaast zijn in de lijst hieronder nog enkele andere studies beschreven die dit type brand beschrijven.

- **Buitenbrand:** bijvoorbeeld van verpakte chemicaliën, brandstof, autobanden, afval [9]. Andere studies die dergelijke branden beschrijven zijn bijvoorbeeld:
 - Grattan, 2003 [6]: grote oliebrand, buiten.
 - Webster et al., 2011 [8]: over de brand bij Buncefield.
 - Markatos et al. 2009 [10] en Argyropoulos et al., 2010 [11]: brandende olietanks (gemodelleerd als plasbrand), gebaseerd op Buncefield.
 - Achtemeier et al., 2011 [12]: beheerbranden (gecontroleerde natuurbranden, in het Engels: *prescribed burns*).
- **Brand in gebouwen:** bijvoorbeeld van opslagloodsen (o.a. chemicaliënopslag), vuurwerk, anorganische meststoffen. In de HSL-studie wordt onderscheid gemaakt tussen **ontwikkelde branden** (*well-developed fire*) en **zuurstofbepaalde branden** (*ventilation controlled fire*) [9]. Andere studies die dergelijke branden beschrijven zijn bijvoorbeeld:
 - Miles et al., 1993 [13]: brand in een opslaggebouw, met deuren en ventilatieopeningen.
 - Ingason et al., 2010 [14]: industriële branden, met name opslaggebouwen. De nadruk van dit document ligt op de verspreiding van de brand.
 - Byström, 2017[15]: branden in compartimenten. Dit document gaat met name over brandontwikkeling;
 - Staffansson, 2010 [16]: diverse gebouwbranden, brandontwikkeling-scenario's.
 - Vigne et al., 2019 [17]: rookpluimen in gebouwen (brand in gebouw met groot volume).

Daarnaast noemt de HSL-studie nog **brand tijdens transport** van verpakte chemicaliën, brandstof of bulkchemicaliën. Omdat deze buiten plaatsvinden zijn deze hier niet apart opgenomen. De HSL-studie beschrijft ook enkele andere soorten branden die interessant kunnen zijn. Hieronder vallen bijvoorbeeld asbestbranden, bosbranden en branden waarbij biologische reagentia vrij kunnen komen (brand van composterende materialen, rioolslib, materiaal uit slachthuizen). De karakteristieken die dergelijke branden bijzonder maken lijken niet relevant voor Pluimradar.

Samengevat wordt in het verdere onderzoek gekeken naar:

- Buitenbranden.
- Ontwikkelde gebouwbranden.
- Zuurstofbepaalde gebouwbranden.

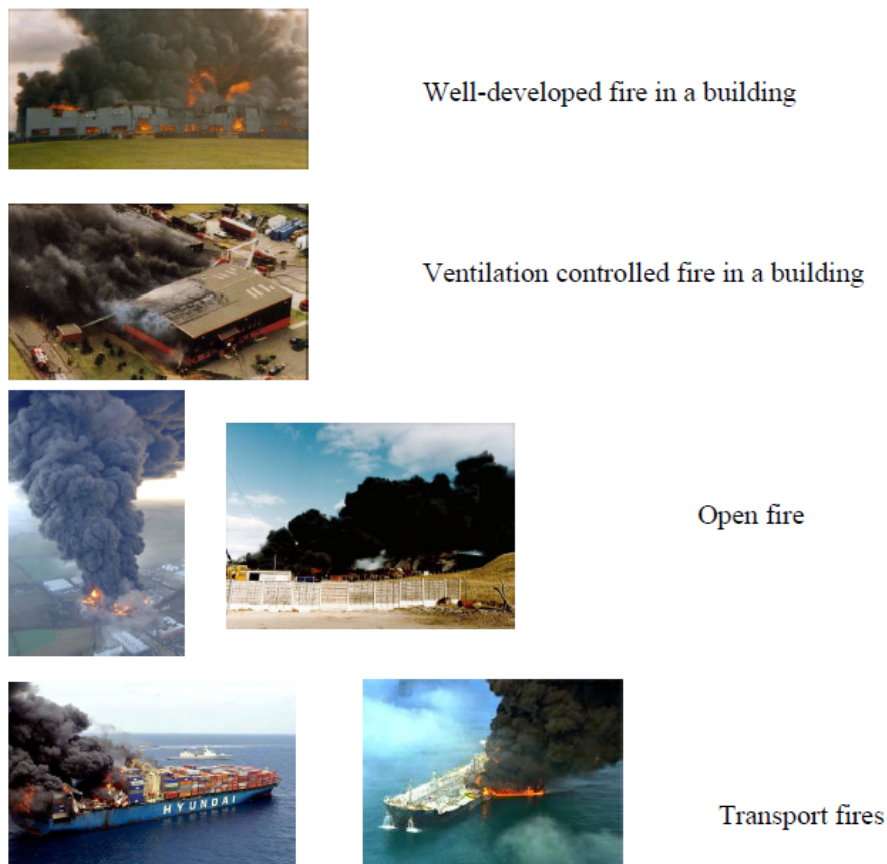


Figure 7 Types of fires

Figuur 2.2 Verschillende typen branden volgens HSL. *Figuur overgenomen uit [9].*

2.5.3

Parameter: brandsnelheid

De brandsnelheid per oppervlak hangt vooral af van de brandstof, de geometrie van de brand (2-dimensionaal of 3-dimensionaal) en de hoeveelheid zuurstof die beschikbaar is voor de brand (dit hangt ook af van de geometrie: een open stapel hout brandt anders dan een compacte stapel). Voor vaste stoffen zoals hout geldt nog dat deze gedurende de brand kunnen verkolen, wat leidt tot een lagere brandsnelheid. Daardoor is het moeilijk om geschikte kengetallen te geven. Bij beperkte zuurstoftoevoer wordt de brandsnelheid bepaald door de zuurstoftoevoer.

In Tabel 2.1 zijn brandsnelheden gegeven voor buitenbranden. De getallen in deze tabel hebben betrekking op de verbranding van ontvlambare vloeistoffen zoals benzine en olie in een plasbrand. De waarden voor brandsnelheid per oppervlak variëren van 0,05 tot 0,08 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Smeulende branden worden besproken in paragraaf 2.5.6.

Tabel 2.1 Brandsnelheden voor buitenbranden.

Omschrijving	Brandsnelheid [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	Bron
Experiment: plasbrand benzine (197 m ²)	0,0826	[14]
Experiment: plasbrand aceton/ethanol (70/30) (197 m ²)	0,0823	[14]
Plasbrand (transport)	0,050	[9]
Tankput (of tank met kapot dak)	0,050	[9]
Oliebrand (Buncefield, 20 tanks). Uit geschatte totale brandsnelheid 381,3 kg·s ⁻¹ en een oppervlak van 4.500 m ²)	0,085	[8, 9]

In de literatuur is verder nog een brandsnelheid gevonden voor een oliebrand: 0,044 m³·s⁻¹ (1000 vaten per uur) is gegeven als de "upper limit for a single fire" [6]. Met een dichtheid van ~850 kg·m⁻³ komt dit neer op een snelheid van 37 kg·s⁻¹. Hiervoor is echter geen oppervlak bekend.

In Tabel 2.2 zijn brandsnelheden weergegeven voor branden in gebouwen. De hoogste waarde in deze tabel heeft betrekking op een opslaggebouw voor meubels. Mogelijk was hier sprake van stapeling van meubels of opslag in rekken. Bij de brand in een opslagtank met intact dak (brandsnelheid 0,012 kg·m⁻²·s⁻¹) was de zuurstoftoevoer waarschijnlijk beperkt.

Tabel 2.2 Brandsnelheden voor brand in gebouwen.

Zuurstoftoevoer	Stof	Brandsnelheid [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	Bron
Niet beperkt	Meubels (berekende waarde)	0,12	[14]
Niet beperkt	Organische vloeistoffen (typische waarden)	0,05 – 0,1	[18]
Niet beperkt	Vaste organische stoffen, plastics (typische waarden)	0,02 – 0,05	[18]
Niet beperkt	Stoffen in PGS 15-opslag, met ADR-klasse 3 (en 2)	0,1	[19]
Niet beperkt	Stoffen in PGS 15-opslag, met uitzondering van ADR-klasse 3 (en 2)	0,025	[19]
Beperkt	PGS 15	(zie berekening)	[19]
Beperkt (intact dak)	Chemicaliën	0,012	[9]

Voor branden met beperkte zuurstoftoevoer wordt de brandsnelheid bepaald door de zuurstoftoevoer en niet door de aanwezige brandbare materialen. Om deze reden zijn er geen gemiddelde waarden beschikbaar voor de brandsnelheid van dergelijke branden. De huidige rekenmethode voor PGS-15-opslagen gaat uit van een beperkte ventilatievoud wanneer de deuren gesloten zijn [19]. Een aanname bij deze methode is dat zuurstoftoevoer alleen via het ventilatiesysteem

plaatsvindt, en dat er geen sprake meer is van een zuurstofbeperkte brand in een later stadium, wanneer ramen bezwijken en er scheuren ontstaan in de constructie.

Een rekenvoorbeeld voor een brand in een PGS-15-opslag [19] geeft een brandsnelheid van $0,003 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ bij een ventilatievoud van 4 per uur en $0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ bij een ventilatievoud van 8 per uur. Hierbij is gerekend met de zuurstofbehoefte van de voorbeeldstof uit de PGS-15-rekenmethodiek [19] en een loods van 10 m hoog.

Een samenvatting van realistische brandsnelheden is gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Brandsnelheden voor verschillende soorten branden.

Zuurstoftoevoer	Materiaal	Brandsnelheid [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
Niet beperkt	Ontvlambare vloeistoffen	0,05 tot 0,1
	Overige materialen	0,02 tot 0,05
Beperkt	Alle brandstoffen	0,003 tot 0,005

2.5.4

Parameter: verbrandingswarmte

De verbrandingswarmte bij volledige verbranding is afhankelijk van het materiaal. Typische waarden zijn $30\text{-}50 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ voor organische vloeistoffen en gassen en $15\text{-}30 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ voor hout en plastics [7]. Een overzicht is ook gegeven in het proefschrift van Staffansson (2010) [16].

Zoals besproken in paragraaf 2.5.1 is de werkelijke verbrandingswarmte ($\Delta H_{\text{effectief}}$) lager dan de verbrandingswarmte bij volledige verbranding vanwege suboptimale verbrandingscondities. Hiervoor geldt:

$$\Delta H_{\text{effectief}} = \chi_{\text{effectief}} \times \Delta H_{\text{volledig}}$$

waarin $\chi_{\text{effectief}}$ de verbrandingsefficiëntie (*combustion efficiency*) is. De verbrandingsefficiëntie is 90% als er een overmaat van zuurstof beschikbaar is voor de brand, en 30% als de brandstof verkoold is of er weinig zuurstof beschikbaar is.

In dit onderzoek is alleen de verbrandingswarmte bij volledige verbranding relevant, omdat de convectieve warmtefractie (zie volgende paragraaf) gedefinieerd is ten opzichte van de verbrandingswarmte bij volledige verbranding.

2.5.5

Parameter: convectieve warmtefractie

De fractie van de verbrandingsenergie die naar warmte gaat, hangt af van de omstandigheden. De fractie neemt doorgaans toe met grootte van de brand, omdat dan een groter deel van de stralingswarmte geabsorbeerd wordt door rookgassen (CO_2 en H_2O). In [7] is vermeld dat de fractie van de verbrandingsenergie die omgezet wordt in warmte (χ_{conv}) ruwweg varieert van 0,36 tot 0,60.

In bovenstaande schatting (0,36 tot 0,60) zijn warmteverliezen aan het gebouw (opname van warmte door bouwmaterialen) nog niet meegenomen. In het beginstadium van de brand kan het verlies van

warmte aan het gebouw volgens [7] wel 90% bedragen. Ten tijde van een zuurstofbeperkte brand is het warmteverlies volgens [7] 60 tot 90%. Bij een uitslaande brand neemt het warmteverlies aan het gebouw verder af tot ongeveer 30%.

Realistische waarden voor de convectieve warmtefractie (inclusief warmteverliezen aan het gebouw) zijn samengevat in Tabel 2.4:

Tabel 2.4 Waarden voor de convectieve warmtefractie voor verschillende branden.

Type brand	Stadium van de brand	Warmteverlies aan gebouw	Fractie convectieve energie voor pluimstijging
Buitenbrand	-	0%	0,36 tot 0,6
Brand in gebouw	Uitslaande brand	30%	0,25 tot 0,42
	Zuurstofbeperkt	60%	0,14 tot 0,24

2.5.6 Parameter: convectieve warmteflux

Uiteindelijk is de relevante parameter voor pluimstijging de hoeveelheid convectieve warmte die in de brand ontstaat, d.w.z. de convectieve warmteflux (Q_{conv}). In paragraaf 2.5.6.1 wordt deze berekend op basis van de voorgestelde parameters in paragraaf 2.5.3 t/m 2.5.5. In paragraaf 2.5.6.2 worden waarden voor Q_{conv} uit de literatuur gegeven. Ten slotte wordt in paragraaf 2.5.6.3 besproken hoe Q_{conv} kan worden geschat op basis van de hoogte van de vlammen.

2.5.6.1 Berekend

De convectieve warmteflux per oppervlak kan worden berekend met de formule uit paragraaf 2.5.1:

$$Q_{conv} = \dot{m} \times \Delta H_{effectief} \times \chi_{conv}$$

Waarbij de waarden voor brandsnelheid, verbrandingswarmte en convectieve warmtefractie uit respectievelijk Tabel 2.3, paragraaf 2.5.4 en Tabel 2.4 worden gebruikt.

Het resultaat voor buitenbranden is weergegeven in Tabel 2.5. Bij buitenbranden is de zuurstoftoevoer onbeperkt en is er ook geen warmteverlies aan het gebouw. Het verschil tussen de berekende ondergrens en bovengrens is een factor 6 tot 8 (in de tabel aangegeven als de marge). Het logaritmisch gemiddelde ligt op een logaritmische schaal halverwege de onder- en bovengrens en wordt beschouwd als de meest representatieve waarde binnen de bandbreedte.

Tabel 2.5 Berekende convectieve warmteflux per oppervlak voor buitenbranden van verschillende materialen (onbeperkte zuurstoftoevoer en geen warmteverliezen aan gebouw).

Materiaal	Convectieve warmteflux [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$]			Marge (factor)
	Ondergrens	Log. gem.	Bovengrens	
Ontvlambare vloeistoffen	0,54	1,27	3,00	5,6
Overige materialen	0,11	0,31	0,90	8,3

Het resultaat voor een uitslaande brand in een gebouw is weergegeven in Tabel 2.6. Bij een uitslaande brand is de zuurstoftoevoer enigszins beperkt en is er ook enig warmteverlies aan het gebouw.

Tabel 2.6 Berekende convectieve warmteflux per oppervlak voor uitslaande gebouwbranden van verschillende materialen. Er is sprake van enigszins beperkte zuurstoftoevoer en enig warmteverlies aan het gebouw.

Materiaal	Convectieve warmteflux [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$]			Marge (factor)
	Ondergrens	Log. gem.	Bovengrens	
Ontvlambare vloeistoffen	0,38	0,89	2,10	5,6
Overige materialen	0,08	0,22	0,63	8,3

Het resultaat voor een zuurstofbeperkte brand in een gebouw is weergegeven in Tabel 2.7. In deze situatie is de zuurstoftoevoer, en daarmee de brandsnelheid, beperkt en is het warmteverlies aan het gebouw substantieel.

Tabel 2.7 Berekende convectieve warmteflux per oppervlak voor zuurstofbeperkte gebouwbranden van verschillende materialen. Er is sprake van beperkte zuurstoftoevoer en substantieel warmteverlies aan het gebouw.

Materiaal	Convectieve warmteflux [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$]			Marge (factor)
	Ondergrens	Log. gem.	Bovengrens	
Ontvlambare vloeistoffen	0,013	0,028	0,060	4,6
Overige materialen	0,006	0,015	0,036	5,6

2.5.6.2 Direct uit literatuur

In een deel van de beschouwde literatuur zijn waarden gevonden voor warmteproductie [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$] bij branden, door de auteurs al berekend op basis van gegevens van de brand. Waarden voor buitenbranden zijn samengevat in Tabel 2.8. Tabel 2.9 geeft een overzicht van de warmteproductie voor (materiaal)branden in een gebouw. Bij deze branden zijn dus specifieke materialen betrokken. Tabel 2.10 geeft enkele kengetallen voor branden in gebouwen zoals huizen en kantoren, in het algemeen. Tabel 2.11 geeft waarden voor zuurstofbeperkte gebouwbranden.

Opmerking

Het is niet in alle gevallen duidelijk of de auteurs de volledige warmteproductie (Q_{volledig}) of de convectieve warmteflux (Q_{conv})

bedoelen, waarbij $Q_{\text{conv}} = Q_{\text{volledig}} \times \chi_{\text{conv}}$. In de derde kolom van de tabel is Q_{conv} gegeven, op basis van de volgende redeneringen:

- Als de auteurs Q_{conv} geven, is dit overgenomen.
- Als de auteurs Q_{volledig} geven, is Q_{conv} berekend met een waarde van $\chi_{\text{conv}} = 0,36 - 0,60$ (voor buitenbranden), $\chi_{\text{conv}} = 0,25 - 0,42$ (voor uitslaande gebouwbranden) of $\chi_{\text{conv}} = 0,14 - 0,24$ (voor zuurstofbeperkte gebouwbranden).
- In sommige gevallen is $Q_{\text{effectief}}$ gegeven ($= Q_{\text{volledig}} \cdot \chi_{\text{effectief}}$). In dat geval wordt eerst Q_{volledig} berekend en vervolgens Q_{conv} , zoals hierboven beschreven.
- Als het onduidelijk is wat de auteurs bedoelen, is in de derde kolom een range gegeven van de minimale Q_{conv} ($= Q_{\text{artikel}} \times 0,36, 0,25$ of $0,14$, afhankelijk van de brand) en de maximale Q_{conv} ($= Q_{\text{artikel}}$).

Tabel 2.8 Informatie over warmteproductie, voor buitenbranden

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
Buitenbrand, vloeibare brandstoffen	600 kW·m ⁻² , dit is "buoyancy of fumes (including heat losses)", dus Q_{conv} en niet Q_{volledig}	0,6	[9]
Tankput, plasbrand, brandstoffen	1200 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	1,2	[9]
Opslagtank, kapot dak, brandstoffen	1200 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	1,2	[9]
Transport, bulk brandstoffen	1200 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	1,2	[9]
Plasbrand 197 m ² , benzine	640 MW (Q_{volledig}), gebaseerd op berekeningen met $\Delta H_{\text{volledig}}$ en verbrandingsefficiëntie van 90%.	1,3 - 2,2	[14]
Plasbrand 197 m ² , benzine	621-659 MW (Q_{volledig}), gebaseerd op plasbrandexperimenten en berekeningen zoals hierboven	1,3 - 2,2	[14]
Plasbrand 197 m ² , mengsel aceton/ethanol	390 MW (Q_{volledig}), gebaseerd op berekeningen met $\Delta H_{\text{volledig}}$ en verbrandingsefficiëntie van 93%.	0,77 - 1,3	[14]
Plasbrand 197 m ² , mengsel aceton/ethanol	365-422 MW (Q_{volledig}), gebaseerd op plasbrandexperimenten	0,72 - 1,4	[14]

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
	en berekeningen zoals hierboven		
Plasbrand op dak opslagtank met ruwe olie	1 MW·m ⁻² , dit is de berekende Q_{volledig} minus de fractie die naar straling gaat. D.w.z., dit is Q_{conv} .	1	[10]
Plasbrand op dak opslagtank met diesel	1,3 MW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	1,3	[10]
Plasbrand op dak opslagtank met kerosine	1,2 MW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	1,2	[11]
Oliebrand, 20 tanks (Buncefield)	16,8 GW, berekend op basis van $\Delta H_{\text{volledig}}$. Schatting oppervlak Buncefield bunds [9]: 150x150 m ² , waarvan 1/5 ^e tanks. Gerekend met totale oppervlak van bund en oppervlak van tanks.	0,27 -2,2	[8]
Buitenbrand, opslag van verpakte chemicaliën	300 kW·m ⁻² , dit is "buoyancy of fumes (including heat losses)", dus Q_{conv} en niet Q_{volledig}	0,3	[9]
Afvalopslag (geen deponie)	300 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	0,3	[9]
Autobanden	300 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven) Opm.: brandsnelheid neemt af in de tijd	0,3	[9]
Transport, algemene goederen, verpakte chemicaliën	300 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	0,3	[9]
Opslag van anorganische meststoffen	15 MW effectieve warmteproductie (dus Q_{conv} , niet Q_{volledig}), cirkelvormige brand met 20 m diameter (314 m ²)	0,05	[9]

Voor buitenbranden worden dus de volgende waarden gevonden voor de convectiewarmte:

- Voor ontvlambare vloeistoffen tussen 0,27 en 2,22 MW·m⁻², en veelal rond de 1 MW·m⁻².

- Voor overige stoffen, behalve anorganische meststoffen, $0,3 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Voor anorganische meststoffen $0,05 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$.

De waarden voor ontvlambare vloeistoffen passen binnen de eerder berekende marge ($0,5$ tot $3 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, zie Tabel 2.5), en de 'gemiddelde waarde' uit de literatuur ($1 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$) komt redelijk goed overeen met het eerder berekende logaritmische gemiddelde $1,27 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$.

De waarde voor overige stoffen (behalve anorganische meststoffen) is nagenoeg identiek aan het logaritmisch gemiddelde dat eerder voor overige producten is berekend ($0,31 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, zie Tabel 2.5).

Tabel 2.9 Informatie over warmteproductie, voor materiaalbranden in een gebouw. In sommige gevallen is Q_{conv} berekend uit Q_{volledig} . Hiervoor is een waarde voor de convectieve warmtefractie χ_{conv} gebruikt van $0,25$ tot $0,42$.

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$]	Bron
Opslagtank, intact dak, brandstof	$300 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, "buoyancy of fumes", dus Q_{conv} en niet Q_{volledig}	$0,3$	[9]
Plasbrand, $\sim 1 \text{ m}^2$, n-heptaan, experimenten, in groot, intact gebouw	$2150 - 2661 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, waarschijnlijk Q_{volledig}	$0,54 - 2,7$	[17]
Brand in groot opslaggebouw, cellulose in rekken	$8,5 \text{ MW}$ na enkele minuten. Onduidelijk of het Q_{conv} of Q_{volledig} is. Waarschijnlijk 4 m^2 .	$0,53 - 2,1$	[13]
Brand in opslag, echte incidenten, schattingen	<ul style="list-style-type: none"> • $8-9 \text{ GW}$, $> 10.000 \text{ m}^2$, meubels • $6-7 \text{ GW}$, 8.500 m^2, PVC-afval • $16-21 \text{ GW}$, 17.000 m^2, verf • $11-22 \text{ GW}$, 2.000 m^2, ethanol • $5-13 \text{ GW}$, $5-10.000 \text{ m}^2$, magnesium Onduidelijk of het Q_{conv} of Q_{volledig} is.	<ul style="list-style-type: none"> • Meubels: $0,2 - 0,9$ • PVC-afval: $0,2 - 0,8$ • Verf: $0,2 - 1,2$ • Ethanol: $1,4 - 11$ • Magnesium: $0,1 - 1,3$ 	[14]
Matrassen, experimenten	$31 - 228 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ (gemiddelde warmteproductie in 180 s). Onduidelijk of het Q_{conv} of Q_{volledig} is.	$0,01 - 0,23$	[16]

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
Div. materialen, in opslag	<ul style="list-style-type: none"> Houten pallets: 1.400-17.000 kW·m⁻², afhankelijk van hoogte (0,46 – 4,9 m) Benzine: 3.300 kW·m⁻² Diesel: 2.000 kW·m⁻² Methanol: 740 kW·m⁻² Polymeren (diverse soorten en verpakkingen, stapels in kartonnen dozen tot 4,6 m): 1.400-14.200 kW·m⁻² Waarschijnlijk Q_{volledig} .	<ul style="list-style-type: none"> Pallets: 0,4 – 7 Benzine: 0,8 – 1,4 Diesel: 0,5 – 0,8 Methanol: 0,2 – 0,3 Polymeren: 0,4 – 6 	[16]

Tabel 2.10 Informatie over warmteproductie, voor ontwikkelde gebouwbranden (niet zuurstofbeperkt). In sommige gevallen is Q_{conv} berekend uit Q_{volledig} . Hiervoor is een waarde voor de convectieve warmtefractie χ_{conv} gebruikt van 0,25 tot 0,42.

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
Opslaggebouw, ontwikkeld (veel ventilatie, ingestort dak), cellulosehoudend materiaal	0,01 MW·m ⁻³ , buoyancy of fumes (including heat losses) dus Q_{conv} en niet Q_{volledig} . Eigen aanname hoogte = 10 m.	0,1	[9]
Gebouw (100·30 m ²), ontwikkelde brand	1.5 – 3.9 GW. Onduidelijk welke warmte dit is.	0,13 – 1,3	[14]
Gebouwen algemeen (huizen, kantoren), bij grootste brandoppervlak	250 kW·m ⁻² , ruwe schatting. Er is waarschijnlijk rekening gehouden met verbrandingsefficiëntie (60-70%?).	0,06 – 0,25	[16, 20]
Bibliotheek, theater. Bij grootste brandoppervlak	500 kW·m ⁻² (zelfde beschrijving als hierboven)	0,13 – 0,5	[16, 20]

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
Gemiddelde woning (lage vuurbelasting)	0,25 MW·m ⁻² "potentieel brandvermogen", dit is waarschijnlijk Q_{volledig} of $Q_{\text{effectief}}$ ($\chi_{\text{effectief}} = 0,9$)	0,22 – 0,25	[21]
Gemiddeld bedrijfsgebouw (hoge vuurbelasting)	0,5 MW·m ⁻² per m stapelhoogte, zelfde omschrijving als hierboven. Eigen aanname: 3 m stapelhoogte	1,4 – 1,5	[21]

Tabel 2.11 Informatie over warmteproductie, voor zuurstofbeperkte gebouwbranden ("ventilation controlled"). In sommige gevallen is Q_{conv} berekend uit Q_{volledig} . Hiervoor is een waarde voor de convectieve warmtefractie χ_{conv} gebruikt van 0,14 tot 0,24.

Type brand	Informatie	Convectieve warmteflux [MW·m ⁻²]	Bron
Opslaggebouw, intact, weinig zuurstoftoevoer en geen tot weinig vlammen buiten	2 kW·m ⁻² , dit is "buoyancy of fumes (including heat losses)", dus Q_{conv} en niet Q_{volledig}	0,002	[9]
Gebouw met ventilatieopening	Maximale warmteproductie (kW): $\sim 1500 \times A \times \sqrt{H}$, met A [m ²] het oppervlak en H [m] de hoogte van de ventilatieopeningen. Aanname: na flashover en bij volledige verbranding van zuurstof, dus Q_{volledig} en niet Q_{conv} Eigen aannames: $H = 1$ m, $A = 10$ m ² en oppervlak van brand 100 m ² .	0,02 – 0,04	[16]

De waarden voor de convectieve warmteflux in Tabel 2.9 en Tabel 2.10 lopen sterk uiteen.

- Voor (materiaal)branden in gebouwen varieert de berekende convectieve warmte van 0,01 tot 11 MW·m⁻². Zonder drie uitschieters (ethanol, pallets en polymeren) is het maximum 2,7 MW·m⁻². Opvallend is dat de waarden voor ontvlambare

vloeistoffen niet zichtbaar hoger is dan de waarden voor andere materialen.

- De laagste waarde heeft betrekking op matrassen (zonder beddengoed). De warmteflux is sterk afhankelijk van het soort materiaal.
- De gevonden waarden voor (materiaal)branden in gebouwen zijn aanmerkelijk hoger dan de eerder gevonden waarden voor buitenbranden, en ook duidelijk hoger dan de waarden die in paragraaf 2.5.6.1 werden berekend voor uitslaande branden. Mogelijk speelt opslag-/stapelhoogte hierin een rol (waarbij moet worden opgemerkt dat stellages kunnen instorten tijdens de brand). Het is ook mogelijk dat de schaal van de (materiaal)branden in gebouwen kleiner was.
- Voor branden in algemene gebouwen (Tabel 2.10) varieert de waarde van 0,06 tot 1,3 MW·m⁻², waarbij de hoogste waarde een uitschieter is.

Voor zuurstofbeperkte gebouwbranden (Tabel 2.11) is beperkte informatie beschikbaar. De zuurstoftoevoer is bepalend, en deze is sterk afhankelijk van de situatie. De laagste gevonden waarde is 0,002 MW·m⁻², de hoogste ~0,04 MW·m⁻² (na flashover).

Er is weinig informatie gevonden over smeulende branden. In een hoofdstuk over smeulende branden in het SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [22] staat dat de 'heat release rate' van smeulende branden 0,01 - 0,03 MW·m⁻² bedraagt. Het is onduidelijk of dit de totale verbrandingsenergie betreft (Q_{volledig}) of de convectieve warmte (Q_{conv}).

2.5.6.3 Schatting op basis van vlamhoogte

Een andere optie om de warmte die vrijkomt bij een brand in te schatten, is om de hoogte van de vlammen te bepalen. De hoogte van de vlammen is afhankelijk van de warmte. Het HSL-rapport [9] geeft de volgende correlatie (deze lijkt gebaseerd op werk van Heskestad in 1983):

$$h_{\text{vlam}} \sim 2,85 \times Q_{\text{conv}}^{0,4}$$

Waarin:

- h_{vlam} : de vlamhoogte [m],
- Q_{conv} : de convectieve warmteflux [MW].

Andere correlaties (met vergelijkbare vorm $h_{\text{vlam}} \sim Q^{0,4}$) zijn bijvoorbeeld gegeven in Ingason et al. (2010) [14] en een rapport van ADMLC [23].

Een voordeel van deze correlatie is dat er geen informatie nodig is over de omvang van de brand of de soort materialen die erbij betrokken zijn. Een nadeel is dat het schatten van de vlamhoogte lastig kan zijn. In sommige gevallen zullen vlammen niet zichtbaar zijn (bijvoorbeeld vanwege de rook of omdat sprake is van een gebouwbrand). Daarnaast kunnen bij gebouwbranden ook stellages branden, waardoor er geen eenduidige vlamhoogte is. Deze optie wordt daarom niet verder uitgewerkt.

2.5.7 *Samenvatting convectieve warmteflux als invoerparameter voor het berekenen van pluimstijging*

Voor buitenbranden bieden de waarden uit de literatuur in combinatie met berekende waarden op basis van fysische parameters voldoende houvast. Voor ontvlambare vloeistoffen is de convectieve warmteflux ongeveer $1 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$. Voor overige stoffen is die waarde $0,3 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, tenzij het een smeulende brand betreft. Voor een smeulende brand wordt een waarde van $0,02 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ voorgesteld. Dit is het gemiddelde van de warmteproductie bij smeulende branden die in het SFPE Handbook of Fire Protection Engineering is vermeld (zie paragraaf 2.5.6.2).

Voor een uitslaande brand binnen een gebouw geeft de literatuur zeer uiteenlopende waarden voor de convectieve warmteflux. Dit heeft waarschijnlijk te maken met zeer uiteenlopende omstandigheden binnen het gebouw, de fase waarin de brand zich bevindt, en mogelijk ook met onzekerheden in de metingen en berekeningen. Door stapeling kan de warmteproductie per eenheid oppervlak hoger zijn dan bij een buitenbrand. Het voorstel is daarom om voor een gebouwbrand hogere waarden te hanteren dan voor een buitenbrand (waarde binnenbrand = $1,5 \times$ waarde buitenbrand, voor de standaardbrand en intensieve brand).

Voor een zuurstofbeperkte brand geeft de literatuur onvoldoende inzichten. Daarom wordt een voorstel gedaan op basis van de verwachting dat de brandsnelheid $0,003$ tot $0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ bedraagt (berekend volgens de rekenmethodiek voor PGS15-inrichtingen, zie paragraaf 2.5.3). De warmteproductie ligt dan ergens tussen $0,006$ en $0,06 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, met $0,02 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ als meest representatieve gemiddelde waarde. Deze waarde wordt ook gebruikt voor smeulende branden in een gebouw.

De voorgestelde parameters zijn samengevat in Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Samenvatting van de voorgestelde waarden voor de convectieve warmteflux voor verschillende branden.

Type brand	Nuance	Convectiewarmteproductie [$\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$]
Buitenbrand	Ontvlambare vloeistoffen	1
	Overige materialen (standaard brand)	0,3
	Smeulende brand	0,02
Ontwikkelde gebouwbrand (uitslaande brand)	Intensieve brand (ontvlambare vloeistoffen of hoge stapeling)	1,5
	Standaard brand	0,5
Zuurstofbeperkte gebouwbrand	-	0,02
Smeulende brand binnen gebouw	-	0,02

2.6 Alternatieven voor de rekenwijze uit NPK-Puff

2.6.1 Inleiding

NPK-Puff berekent op dit moment pluimstijging met formules van Briggs (zie Figuur 2.1), die ooit ontwikkeld zijn voor schoorstenen. Voor branden met een groot oppervlak zijn deze formules minder geschikt; deze pluim is immers veel breder dan een pluim die uit een schoorsteen komt. In deze paragraaf worden daarom enkele alternatieven of correcties voor de formules van Briggs besproken:

- Paragraaf 2.6.2: een correctieterm voor plasbranden, van Mills.
- Paragraaf 2.6.3: het pluimstijgingsmodel van Carter.
- Paragraaf 2.6.4: het pluimstijgingsmodel van Zonato.

Deze drie methoden zijn allen ontwikkeld voor buitenbranden. Een vergelijking van deze drie alternatieven en het model van Briggs, is gegeven in paragraaf 2.6.5.

In paragraaf 2.6.6 wordt besproken hoe de pluimstijging bij gebouwbranden kan worden gemodelleerd. Bij deze branden zal de lijwervel van het gebouw invloed hebben op de pluim. Daarnaast worden in paragraaf 2.6.7 enkele richtlijnen gegeven voor het direct inschatten van de effectieve bronhoogte door de gebruiker.

2.6.2 Correctieterm van Mills

Mills heeft in 1987 een formule geïntroduceerd die gebruikt kan worden om de maximale pluimstijging, zoals berekend met formules van Briggs, te corrigeren voor de omvang van een plasbrand. Deze term wordt gebruikt in het softwarepakket EFFECTS [24] en heeft de volgende vorm:

$$h_{\text{Mills}} = [(h_{\text{Briggs}})^3 - (\frac{D}{2\gamma})^3]^{1/3} - \frac{D}{2\gamma}$$

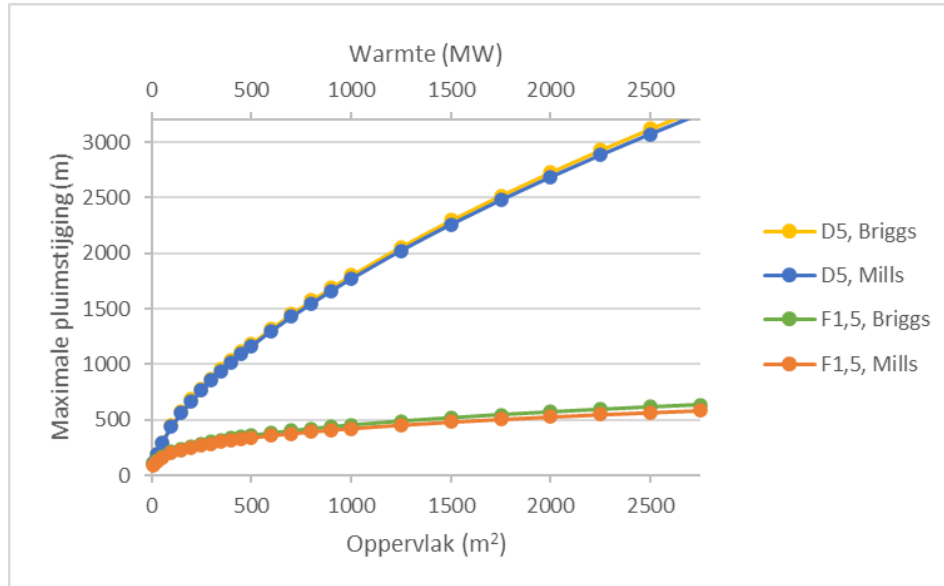
Waar:

- h_{Briggs} : de pluimstijging volgens Briggs [m],
- D : de diameter van de brand [m],
- γ : deze parameter beschrijft de verdunning van de stijgende pluim met lucht. Wanneer de overige parameters de eenheden zoals hierboven hebben, is de waarde $\gamma = 0,6$.

NPK-Puff heeft slechts 1 nieuwe parameter nodig, namelijk de diameter van de brand. De diameter kan worden berekend uit het oppervlak van de brand, wat door de gebruiker van Pluimradar 2 kan worden geschat en opgegeven.

Het effect van deze correctieformule is weergegeven in Figuur 2.3. Berekeningen zijn gedaan voor weertype D (windsnelheid $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en F (windsnelheid $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), bij een temperatuur van 10°C . Verder is aangenomen dat de gemiddelde convectieve warmteflux per oppervlak gelijk is aan $1,0 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, de voorgestelde waarde voor een buitenbrand

met ontvlambare vloeistoffen. Voor deze berekeningen is aangenomen dat de windsnelheid op iedere hoogte gelijk is³.



Figuur 2.3 Maximale pluimstijging, voor weertype D (windsnelheid $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en F (windsnelheid $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), berekend met formules van Briggs en de correctieformule van Mills voor branden van verschillende oppervlakken. Convectieve warmteflux: $1,0 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$. Zie tekst voor beschrijving.

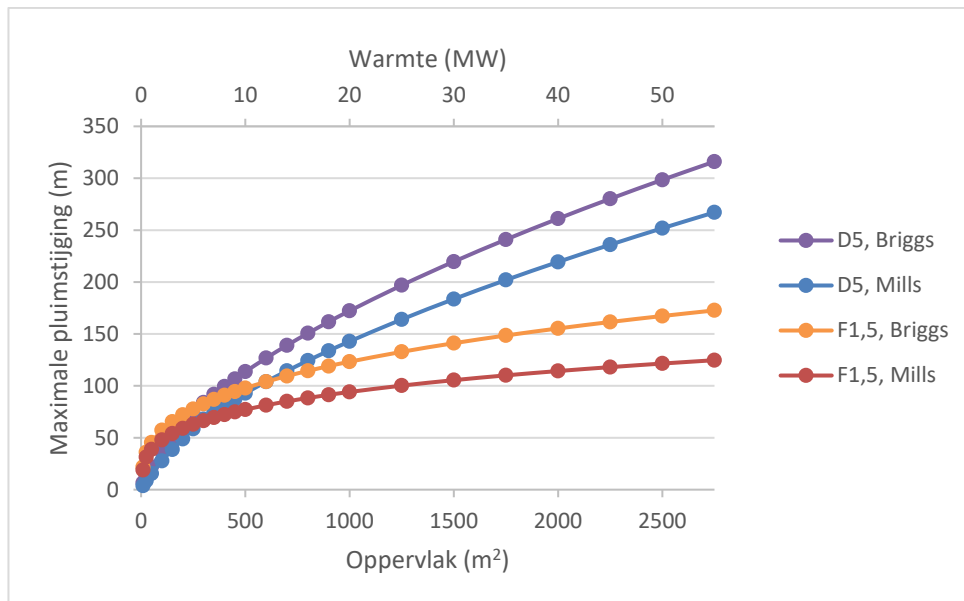
Deze en andere berekeningen laten zien:

- De verschillen tussen Briggs en Mills nemen toe met toenemende windsnelheid.
- Voor A-D nemen de verschillen tussen Briggs en Mills toe met afnemend brandoppervlak, voor E-F juist met toenemend brandoppervlak.
- De verschillen blijven klein.

Voor branden met lage warmteproductie, dat wil zeggen zuurstofbeperkte of smeulende branden, is het effect van de correctieformule groter, zie Figuur 2.4. Hierbij is gerekend met een gemiddelde convectieve warmteflux van $0,02 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, de voorgestelde waarde voor een smeulende brand. Voor weerklasse D (windsnelheid $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) is het effect van de correctie 5-10%. Voor weerklasse F (windsnelheid $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) loopt het verschil op tot ongeveer 35% bij de grootste getoonde brand in Figuur 2.4.

De verschillen tussen Briggs en Mills (typisch 5-10%, in bepaalde gevallen tot ongeveer 35%) zijn klein vergeleken met de grote variatie in convectieve warmteflux bij verschillende branden. Het is daarom de vraag of het zinvol is om de correctieformule van Mills te implementeren in NPK-Puff. De huidige modellering in NPK-Puff (formules van Briggs) geeft vergelijkbare resultaten.

³ Het is ook mogelijk om wel rekening te houden met variatie in windsnelheid op verschillende hoogtes door iteratief te rekenen. Dit resulteert in verminderde pluimstijging – bij toenemende hoogte neemt de windsnelheid toe en dus de pluimstijging iets af.



Figuur 2.4 Maximale pluïmstijging, voor weertype D (windsnelheid $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en F (windsnelheid $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), berekend met formules van Briggs en de correctieformule van Mills voor branden van verschillende oppervlakken. Convectieve warmteflux: $0,02 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$. Zie tekst voor beschrijving.

2.6.3

Pluïmstijgingsmodel van Carter

Dit model is ontwikkeld door Carter in 1989 voor plasbranden in de buitenlucht. Het staat beschreven in het artikel van Fisher [25]. Het model van Carter is gebaseerd op eerdere modellen van Moore, waarbij de pluïmstijging wordt afgeleid van de *buoyancy* van de rookgassen. De pluïmstijging is:

$$h_{\text{Carter}} = \frac{A}{u_{10}} \cdot (Q_{\text{conv}} \cdot x_{\text{eff}}^2 (x_{\text{eff}} + 27 \cdot D))^{1/4}$$

Waar:

- h_{Carter} : de pluïmstijging volgens het model van Carter [m],
- Q_{conv} : de convectieve warmteflux [MW],
- D : de diameter van de brand [m],
- u_{10} : de windsnelheid op 10 m hoogte [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- x_{eff} : een effectieve afstand (zie hieronder) [m],
- A : wanneer de overige parameters de eenheden hebben zoals hierboven, krijgt deze parameter waarde $A = 2,25$.

De effectieve afstand x_{eff} is gegeven door:

$$x_{\text{eff}} = x \cdot \frac{x_t}{\sqrt{x^2 + x_t^2}}$$

Waar:

- x : de daadwerkelijke afstand vanaf de bron [m],
- x_t : een lengteschaal [m]:

$$x_t = x_s \cdot \frac{x_n}{\sqrt{x_s^2 + x_n^2}}$$

De parameter x_s is afhankelijk van de meteorologische condities:

$$x_s = 120 \cdot \frac{u_{10}}{\sqrt{\Gamma}}$$

Waar:

- Γ : de potentiële temperatuurgradiënt [K (100 m)^{-1}].

De aan NPK-Puff geleverde meteorologische gegevens bevatten informatie over de temperatuur op verschillende hoogtes. Hieruit zou deze temperatuurgradiënt Γ gehaald kunnen worden.

De parameter x_n is afhankelijk van de brand:

$$x_n = 19,2 \cdot (100 + h_{\text{vlam}})$$

Waar:

- h_{vlam} : de vlamhoogte [m].

De gebruiker moet dus naast de convectieve warmteflux en de omvang van de brand ook de vlamhoogte invoeren. Dit is niet altijd eenvoudig (zie paragraaf 2.5.6.3). Dat maakt deze methode in de praktijk minder snel toepasbaar dan die van Briggs en Mills.

2.6.4

Pluimstijgingmodel van Zonato

Dit empirische model is ontwikkeld door Zonato in 1993, gebaseerd op kleinschalige plasbrandexperimenten in een windtunnel. Het model is beschreven in een formule met vergelijkbare vorm als die van Briggs, Mills en Carter, staat beschreven in een artikel van Fisher [25]. De maximale pluimstijging is:

$$h_{\text{Zonato}} = B \cdot Q_{\text{conv}}^{0,26} \cdot D^{0,63} \cdot u_{10}^{-0,5}$$

Waar:

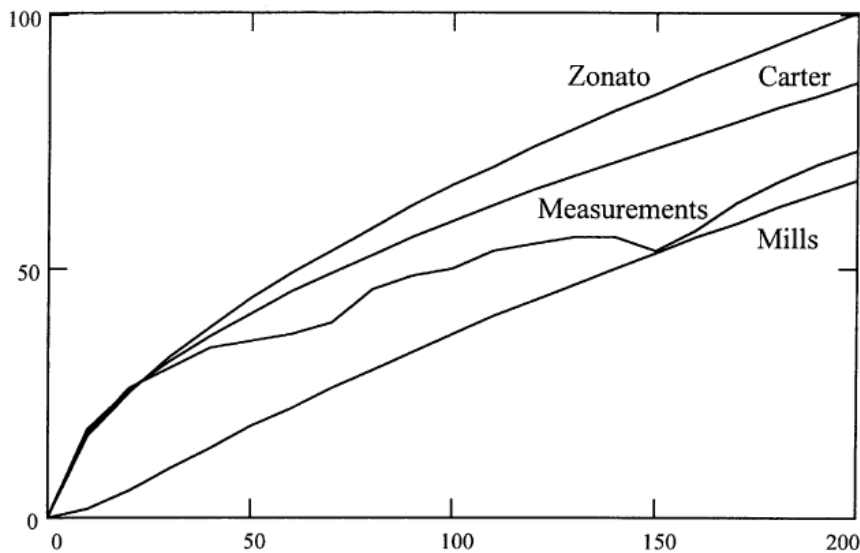
- h_{Zonato} : de pluimstijging volgens het model van Zonato [m],
- Q_{conv} : de convectieve warmteflux [MW],
- D : de diameter van de brand [m],
- u_{10} : de windsnelheid op 10 m hoogte [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- B : een empirische parameter. Wanneer de overige parameters de eenheden hebben zoals hierboven beschreven, krijgt deze parameter waarde $B = 25,3$.

De formule geldt voor afstanden groter dan 45 keer de diameter van de brand. Met uitzondering van de windsnelheid zijn er geen meteorologische parameters in de methode van Zonato. Verder blijkt uit bovenstaande formule dat de pluimstijging toeneemt met toenemende diameter van de brand bij gelijke Q_{conv} . Dat wil zeggen, Zonato voorspelt dat de pluimstijging groter is wanneer de totale warmte wordt 'uitgesmeerd' over een groter oppervlak. Om deze reden raden wij het gebruik van het model van Zonato af.

2.6.5 *Vergelijking van Briggs, Mills, Carter en Zonato*

In de literatuur zijn vergelijkingen gevonden van de pluimstijgingsmodellen van Briggs, Carter en Zonato en de correctieterm van Mills.

In het artikel van Fisher [25] wordt de pluimstijging van een plasbrandexperiment (294 m^2) vergeleken met de modellen van Zonato, Carter en Mills, zie Figuur 2.5. Het experiment is uitgevoerd bij windsnelheid (op 10 m hoogte) van $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, bij neutrale atmosfeer. De auteurs concluderen dat op grotere afstanden van de brand de twee theoretische modellen (Carter en Mills) de pluimstijging beter beschrijven dan het empirische model van Zonato.

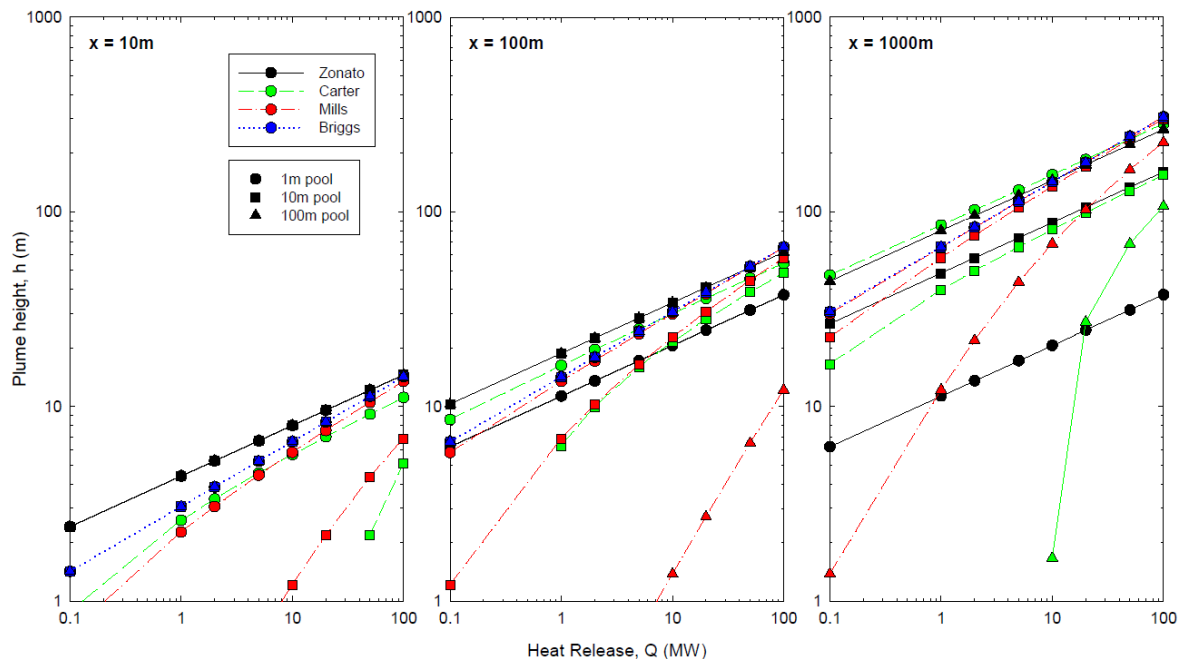


Figuur 2.5 Vergelijking van de modellen van Zonato, Carter en Mills met de experimenteel waargenomen pluimstijging van een 294 m^2 plasbrand. De waarden op de horizontale en verticale as (afstand tot de brand en de hoogte van de pluim) zijn beide in meters. Figuur overgenomen uit Fisher et al. (2001) [25].

In het rapport van de Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee (ADMLC) [23] wordt de berekende pluimstijging volgens Mills, Carter en Zonato vergeleken met het model van Briggs (zie Figuur 2.6). Deze vergelijking is voor een windsnelheid van $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. In het ADMLC-rapport [23] wordt het volgende opgemerkt:

- De methode van Briggs is onafhankelijk van het brandoppervlak.
- De methode van Carter en Mills geven beide lagere pluimstijging wanneer het brandoppervlak toeneemt, zoals logischerwijs kan worden verwacht (warmte per oppervlak neemt dan af). De methode van Zonato laat het tegenovergestelde zien. Dit komt omdat in het model van Zonato de pluimstijging groter wordt naarmate de diameter van de brand toeneemt bij gelijke convectieve warmteflux (zie paragraaf 2.6.4).
- Bij een brand met klein oppervlak [m^2] en grote convectieve warmteflux [MW] geven de modellen van Carter en Mills vergelijkbare resultaten als die van Briggs. In Figuur 2.6 zijn dit de datapunten "1 m pool" (cirkels) bij heat release = 100 MW.

Met toenemende afstand ($x = 10 \text{ m}$, 100 m , 1000 m) wordt het verschil tussen deze drie modellen kleiner. De overeenkomst met het model van Zonato wordt echter groter met toenemende afstand.



Figuur 2.6 Berekende pluimstijging h als functie van convectieve warmteflux Q_{conv} voor drie afstanden vanaf de bron ($x = 10$, 100 en 1000 m) voor de modellen van Zonato, Carter, Mills en Briggs (kleuren), voor plasbranden van drie verschillende groottes (vormen). Zie verder de tekst voor beschrijving. Figuur overgenomen uit [23].

Pluimradar wordt gebruikt bij grote branden (hoge Q_{conv}) en op afstanden van minimaal een kilometer van de brand. Dat wil zeggen, met name de rechterfiguur van Figuur 2.6 is interessant, bij de hoogst getoonde Q_{conv} en voor de branden van 10 m en 100 m . Mills en Briggs zijn hier vrijwel identiek. Zonato wijkt iets af, Carter geeft een lagere pluimstijging.

De modellen van Carter en Zonato lijken niet geschikt voor toepassing in Pluimradar 2: voor de methode van Carter is namelijk ook informatie over de vlamhoogte nodig (deze is niet altijd beschikbaar), terwijl de methode van Zonato aanneemt dat de hoogte van de pluim toeneemt met toenemend brandoppervlak (bij gelijke Q_{conv}). Voor de correctieformule van Mills geldt dat de gecorrigeerde hoogte voor branden zonder zuurstofbeperking typisch minder dan 10% lager is dan de hoogte berekend met formules van Briggs. Dit ligt naar verwachting ruim binnen de grote onzekerheden in de berekening van de convectieve warmteflux.

2.6.6 Invloed van gebouwen

Gebouwen creëren wervels in het windveld rond het gebouw. Als een emissie plaatsvindt vanuit het gebouw of dichtbij het gebouw, dan wordt de verspreiding beïnvloed door die wervels. In het bijzonder kan een

deel van de emissie ingevangen worden in de lijwervel (in het Engels: 'recirculation zone') achter het gebouw. Voor reguliere emissies zijn modellen beschikbaar die de gebouwinvloed bepalen, zoals de gebouwmodule van het Nieuw Nationaal Model ([41], [42]) dat in Nederland gebruikt wordt voor luchtkwaliteitsberekeningen. Voor gebouwbranden hebben Hall en Spanton in 2003 een review uitgevoerd van de beschikbare kennis in de literatuur [43]. De belangrijkste bevindingen uit deze review zijn beschreven in Bijlage 2.

De gebouwmodule van het Nieuw Nationaal Model is gebruikt om te onderzoeken welk deel van de emissie bij een gebouwbrand in de lijwervel van het gebouw terecht komt. Deze gevoeligheidsanalyse is beschreven in Bijlage 3. Mede op basis van de gevoeligheidsanalyse worden de volgende aanbevelingen gedaan voor NPK-Puff:

- De massafractie die in de lijwervel wordt ingevangen kan ook bij gebouwbranden significant zijn. Daarom wordt aanbevolen om voor gebouwbranden twee pluimen te modelleren in NPK-Puff: één voor het deel van de emissie dat in de lijwervel wordt ingevangen (hierna 'lijwervelpluim') en één voor de resterende massa die niet wordt ingevangen (hierna 'bovenliggende pluim').
- De twee pluimen ontwikkelen zich simultaan. De concentratie- en depositiebijdragen van de twee pluimen worden daarom bij elkaar opgeteld.
- In de lijwervel van een gebouw zal rook afkoelen. Voorzichtigheidshalve kan aangenomen worden dat de rook in de lijwervel afkoelt tot omgevingstemperatuur. Dat betekent dat de lijwervelpluim geen pluimstijging ondergaat. De benadering van de lijwervelpluim is dus conservatief (de rook blijft op leefniveau).
- Het deel van de rook dat niet in de lijwervel wordt ingevangen, behoudt zijn warmte. De invloed van het gebouw op de pluimstijging is voor dit deel van de emissie beperkt. De hoogte van de bovenliggende pluim wordt berekend door NPK-Puff, op basis van de gegevens van de brand (omvang, betrokken materialen), zoals voor branden in de open buitenlucht.
- De massafractie die in de lijwervel wordt ingevangen is met name afhankelijk van de windsnelheid (waarbij de fractie toeneemt met toenemende windsnelheid). Deze massafractie zou dan door NPK-Puff berekend kunnen worden nadat de meteogegevens zijn ingelezen. Daarvoor moet NPK-Puff worden uitgebreid met coderegels voor de massafractie als functie van windsnelheid (en eventueel andere relevante parameters). Zonder die uitbreiding kunnen vaste massafracties gebruikt worden (niet afhankelijk van de windsnelheid of andere parameters), zolang de exacte verhouding tussen de twee pluimen minder belangrijk is dan de richtingen waarin de pluimen zich verspreiden. In Tabel 2.13 is een voorstel voor de massafracties weergegeven.

Tabel 2.13 Voorstel voor de massaverdeling in Pluimradar 2

Type brand	Massafractie lijwervelpluim	Massafractie bovenliggende pluim
Zuurstofbeperkte gebouwbrand	40%	60%
Ontwikkelde gebouwbrand (uitslaand)	10%	90%

2.6.7

Inschatten effectieve bronhoogte door de gebruiker

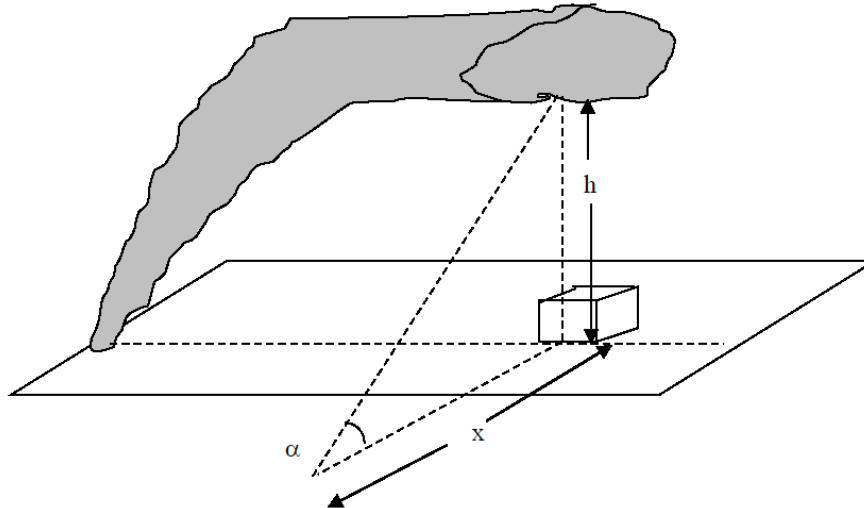
Op dit moment moet de gebruiker van Pluimradar 1 zelf de effectieve bronhoogte schatten en invoeren. Een voordeel hiervan is dat informatie over de omvang van de brand en de materialen die hierbij betrokken zijn niet nodig is. Ook onzekerheden rond de warmte die typisch vrijkomt bij een dergelijke brand en de mate van pluimstijging bij deze warmteflux zijn niet meer van belang.

Een groot nadeel van het zelf inschatten van de hoogte is dat dit voor de gebruiker lastig kan zijn, onder meer omdat de hoogte toeneemt met afstand en omdat het perspectief vanuit sommige gezichtshoeken niet goed is. Daarnaast is de pluim niet altijd zichtbaar ('s nachts). Een ander nadeel van het direct invoeren van de hoogte is dat het proces van pluimstijging niet expliciet wordt gemodelleerd.

Op dit moment wordt in de praktijk de pluimhoogte vaak geschat aan de hand van hoge objecten die in of onder de pluim staan, zoals schoorstenen of hoogspanningsmasten. Het HSL-rapport [9] (hoofdstuk 3 van dat rapport) geeft een aantal andere methoden voor het inschatten van de hoogte. Hieronder worden drie van deze methoden besproken (metingen met RADAR/LIDAR of met drones zijn niet verder besproken).

Ten eerste kan (overdag) de hoogte van de pluim mogelijk worden geschat aan de hand van de hoogte van bepaalde soorten wolken of met behulp van kennis over de menglaaghoogte. Gebruikers van Pluimradar (Adviseurs Gevaarlijke Stoffen, AGS'en) beschikken over enige meteorologische kennis, en kunnen mogelijk inschattingen maken aan de hand van de menglaaghoogte. In andere gevallen zal waarschijnlijk alleen door de veiligheidsmeteorologen van het KNMI een goede inschatting kunnen worden gemaakt, en dan waarschijnlijk enkel in bepaalde situaties.

Een tweede optie besproken in het HSL-rapport [9] is om in het veld de hoek (α) tot de bovenkant van de pluim en de afstand tot een locatie hieronder (x) te meten of in te schatten, en vervolgens de hoogte uit te rekenen ($h = x \tan \alpha$), zie Figuur 2.7. Apparatuur voor landmetingen zou hiervoor kunnen worden ingezet. Deze methode is afhankelijk van voldoende tijd en expertise in het veld.



Figuur 2.7 Berekenen van pluimhoogte m.b.v. trigonometrie. Figuur overgenomen uit [9].

De derde manier wordt fotogrammetrie genoemd. Voor deze methode zijn twee of meer foto's nodig van de brand en pluim, gemaakt van verschillende locaties maar op hetzelfde tijdstip. Door (computer)analyse van de foto's kan de pluimhoogte worden berekend. Hiervoor moeten de foto's wel aan een aantal eisen voldoen. Zo moeten ze een bepaald aantal gezamenlijke objecten bevatten en moet er minstens een afstand op de foto bekend zijn (bijvoorbeeld een gebouwhoogte). De methode werd ten tijde van het schrijven van het HSL-rapport onderzocht. Een beperkende factor bij grote pluimstijging bleek de resolutie van de gebruikte camera('s), waardoor pluimhoogtes boven 50 m niet goed konden worden ingeschat. Daarnaast hadden de onderzoekers tot 2 uur nodig om de resultaten te analyseren.

Het is mogelijk dat de methode sinds de publicatie van het HSL-rapport (in 2010) verder is ontwikkeld. Om nuttig te zijn voor Pluimradar 2 zal de methode binnen enkele minuten een antwoord moeten geven, zonder gebruik te maken van specialistische fotografische apparatuur of aparte software voor analyse.

Voor alle methoden om de hoogte te schatten geldt dat de methode enkel nuttig is als deze snel en in het veld kan worden toegepast. Dat lijkt op dit moment niet het geval te zijn.

2.7 Samenvatting en aanbevelingen

Uit voorgaande paragrafen blijkt dat de module voor pluimstijging in NPK-Puff met beperkte aanpassingen kan worden gebruikt in Pluimradar 2. De pluimstijging wordt dan berekend op basis van karakteristieken van de brand (type en omvang). De gebruiker moet deze karakteristieken invoeren en hoeft dus geen schatting meer te maken van de effectieve pluimstijging. Voor gebouwbranden kan rekening worden gehouden met de invloed van het gebouw: een deel van de rookpluim wordt in de lijwervel gevangen en ondergaat geen pluimstijging.

Hieronder worden de verschillende aanbevelingen verder uitgewerkt.

2.7.1 *Directe invoer van bronhoogte*

De gebruikers van Pluimradar 1 willen ook de optie voor directe invoer van de effectieve bronhoogte behouden in Pluimradar 2. Het gebruik hiervan kan worden ondersteund. Dit kan bijvoorbeeld door duidelijker uit te leggen wat wordt bedoeld met effectieve bronhoogte of door richtlijnen op te stellen voor het goed inschatten van de hoogte.

2.7.2 *Berekenen van de pluimstijging met NPK-Puff*

Om de rekenwijze van NPK-Puff (formules van Briggs) te kunnen gebruiken moet de gebruiker het volgende invoeren (tussen haakjes de voorgestelde waarden van Tabel 2.12):

1. De soort brand (3 opties). Bij twee van deze opties volgt een verdere nuanciering. Voor elk soort brand heeft Pluimradar 2 een door de MOD vastgestelde waarde voor een typische convectieve warmteflux per oppervlak.
 - a. Buiten:
 - Ontvlambare vloeistoffen (1,0 MW·m⁻²)
 - Standaard brand (0,3 MW·m⁻²)
 - Smeulende brand (0,02 MW·m⁻²)
 - b. Gebouw (uitslaand):
 - Intensieve brand (1,5 MW·m⁻²)
 - Standaard brand (0,5 MW·m⁻²)
 - c. Gebouw (zuurstofbeperkt of smeulend) (0,02 MW·m⁻²)
2. Schatting van het brandoppervlak (dient door de gebruiker te worden ingevoerd, in m²).

Uiteindelijk geeft dit een convectieve warmteflux in MW die als input kan dienen voor de pluimstijgingsmodule van NPK-Puff.

Opgemerkt wordt dat schatten van het brandoppervlak lastig kan zijn; de brand is een dynamisch proces wat in oppervlakte kan veranderen en zich kan verplaatsen.

2.7.3 *Wijzigingen in NPK-Puff*

NPK-Puff berekent de pluimstijging met behulp van formules die ontwikkeld zijn voor schoorstenen (Briggs). Aanbevolen wordt om deze toe te passen in Pluimradar 2. Zoals beschreven in paragraaf 2.6 zijn voor buitenbranden enkele alternatieven beschikbaar, namelijk de correctieformule van Mills en de modellen van Carter en Zonato. Het model van Carter heeft meerdere invoerparameters nodig en is daarom ingewikkeld in gebruik, het model van Zonato bevat een vreemde correlatie tussen brandomvang en pluimstijging, en het model van Mills lijkt sterk op dat van Briggs zodat het gebruik hiervan niet tot sterk andere uitkomsten zal leiden. Daarom wordt aanbevolen om deze alternatieve modellen (voorlopig) niet te implementeren in NPK-Puff.

Opgemerkt wordt dat alle beschouwde modellen ontwikkeld zijn voor schoorstenen of plasbranden en dat op dit moment nog niet duidelijk is hoe toepasselijk deze modellen zijn voor bijvoorbeeld gebouwbranden. Het is belangrijk dat de gebruikers van Pluimradar 2 zich hiervan bewust zijn en eventuele onrealistische berekeningen niet gebruiken (zie ook de aanbevelingen in paragraaf 2.7.5).

2.7.4 *Verdeling van massa over de lijwervelpluim en de bovenliggende pluim*

Voor gebouwbranden moet rekening worden gehouden met de gebouwinvloed. Uit paragraaf 2.6.6 blijkt dat de pluimstijging van de bovenliggende pluim in redelijke benadering berekend kan worden met de formules van Briggs. De pluim die in de lijwervel wordt ingevangen, moet apart worden gemodelleerd. Deze lijwervelpluim verliest zijn warmte in de lijwervel en beweegt zich daarna verder op grondniveau. Voor deze pluim wordt dus geen pluimstijging gemodelleerd ($Q_{\text{conv}} = 0$ MW). De fractie van de rookgassen die zich in de bovenliggende pluim bevindt is afhankelijk van parameters zoals de windsnelheid en de gebouwhoogte. Om de berekeningen simpel te houden wordt voorgesteld om een vaste waarde te gebruiken voor de massa in de bovenliggende pluim: 60% voor een zuurstofbeperkte gebouwbrand en 90% bij een ontwikkelde gebouwbrand (uitslaande brand), zie Tabel 2.13.

2.7.5 *Bevordering van terugkoppeling voor validatie*

Het is wenselijk dat de door NPK-Puff berekende (maximale) pluimstijging wordt gegeven als output voor de gebruikers van Pluimradar 2 (dit vergt aanpassingen in NPK-Puff). De gebruiker kan dan de berekening valideren aan de hand van observaties (/foto's). Opgemerkt wordt dat NPK-Puff voor iedere rekenstap de pluimstijging berekent, er is dus niet één hoogte die tijdens de hele run gelijk blijft. Er moet nog worden nagedacht over de beste manier om de berekende pluimstijging te presenteren aan de gebruiker. Eén waarde voor de afgevlakte pluimhoogte heeft de voorkeur.

Voor de MOD kan het nuttig zijn om gegevens over deze validatie te ontvangen. Zo kan een overzicht worden gemaakt van de berekende pluimstijging, de invoergegevens die gebruikt zijn voor de berekening, en foto's en gegevens van de brand (zoals de geschatte omvang en de soort materialen, eventueel achteraf bepaald). Dit overzicht kan verder worden aangevuld met literatuurgegevens over pluimstijging bij grote branden. Op basis van dit overzicht kan in de toekomst worden bepaald of aanpassingen van de rekenwijze in NPK-Puff nodig zijn en/of dat de waarden van de parameters moeten worden bijgesteld.

2.7.6 *Waarschuwingen voor onrealistische waarden*

Er moet rekening worden gehouden met het feit dat bepaalde informatie mogelijk niet beschikbaar is tijdens de brand (aanwezigheid van bepaalde materialen), of lastig in te schatten (de omvang). Te ruwe schattingen kunnen leiden tot onrealistische waarden. Wellicht is het mogelijk om een aantal waarschuwingen in te bouwen in Pluimradar 2, voor als de berekende convectieve warmteflux onrealistisch groot of klein wordt. Dit kan waarschijnlijk het beste worden afgestemd met enkele gebruikers van Pluimradar.

3 Deelonderzoek depositie

3.1 Inleiding en leeswijzer

In dit hoofdstuk wordt het deelonderzoek depositie uitgewerkt. Eerst worden de vragen uit het onderzoeksvoorstel beschreven (paragraaf 3.2). Daarna worden de stoffen besproken die relevant zijn voor depositie (paragraaf 3.3). Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten depositie: droge depositie (altijd relevant) en natte depositie (bij neerslag). Deze worden hier apart behandeld in respectievelijk paragraaf 3.4 en paragraaf 3.5. In iedere paragraaf wordt eerst de wetenschappelijke achtergrond besproken, daarna de huidige implementatie in Pluimradar 1 en NPK-Puff, en vervolgens worden aanbevelingen gedaan. Tot slot wordt in paragraaf 3.6 een samenvatting gegeven van het onderzoek, en zijn enkele aanbevelingen opgenomen.

3.2 Vragen uit onderzoeksvoorstel

In dit deelonderzoek wordt uitgezocht voor welke schadelijke stoffen die vrijkomen bij branden de depositie berekend moet kunnen worden en hoe deze depositie goed berekend kan worden. Het betreft de volgende stappen:

1. Bepalen voor welke stoffen de depositie berekend moet kunnen worden.
2. Bepalen hoe deze stoffen vrijkomen; (bijvoorbeeld gasvormig, als ongebonden aerosol (druppel of vast deeltje) of gebonden aan (fijn) stof.
3. Bepalen wat de verschillen zijn in de depositiemodellering voor gasvormige nucliden, (ungebonden) aerosolen en stofgebonden nucliden in NPK-Puff en JRodos.
4. Bepalen hoe de natte en droge depositie voor de relevante stoffen goed berekend kunnen worden in NPK-Puff en in JRodos.

3.3 Relevante stoffen en deeltjesgrootte

Bij een brand komen een groot aantal verschillende stoffen vrij, zowel gasvormige als (fijn)stofgebonden componenten. Voor dit onderzoek wordt gekeken naar een selectie van deze stoffen. In overleg met een onderzoeksleider van de MOD is gekozen voor polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), dioxines en zware metalen. Voor deze drie stofgroepen worden door de MOD vaak luchtstof- en depositiemetingen gedaan.

Stoffen uit deze drie stofgroepen kunnen allen voorkomen als stofgebonden componenten [26]. PAK's en dioxines kunnen daarnaast ook voorkomen als gassen (losse moleculen). De fractie PAK's en dioxines die gebonden is aan deeltjes hangt af van het type PAK/dioxine. Hier is onderzoek naar gedaan in studies over PAK's en dioxines in 'reguliere' luchtvervuiling (dus niet als gevolg van branden). Voor PAK's geldt bijvoorbeeld dat de gasvormige fractie hoger is voor PAK's met een laag molecuulgewicht [27] en lage hydrofobiciteit [28]. Voor dioxines kan de fractie die gebonden is aan deeltjes variëren van bijna 0% tot bijna 100%, afhankelijk van het dioxine, de tijd van het jaar en de locatie (dat wil zeggen: weersomstandigheden en

luchtvervuiling) [29]. Er lijkt een correlatie te zijn tussen het kookpunt van de stof en de stofgebonden fractie [30]. Uit een studie naar depositie van gasvormige en stofgebonden dioxines blijkt dat voor 13 van de 17 beschouwde dioxines meer dan 95% stofgebonden is [31].

De stofgebonden fractie PAK's en dioxines zal toenemen wanneer het totale oppervlak van de deeltjes toeneemt [32]. Bij branden is dit oppervlak hoog vanwege het grootte aantal deeltjes. Daarom kan worden aangenomen dat de relevante stoffen met name stofgebonden zijn.

3.3.1 *Deeltjesgrootteverdelingen*

Voor depositie van deeltjes is de deeltjesgrootte een belangrijke parameter. Bij een brand komen twee soorten deeltjes vrij [33]. De eerste zijn deeltjes die ontstaan bij volledige of onvolledige verbranding. De andere soort zijn deeltjes die ontstaan door mechanische processen (verpulvering, kleine explosies).

De grootte van de deeltjes varieert van enkele nanometers tot meerdere centimeters. Deeltjes met een grootte tot ongeveer 10 µm worden fijn stof genoemd [34]. Grotere deeltjes worden grof stof genoemd. Onder grof stof vallen bijvoorbeeld grote roetvlokken of deeltjes ontstaan uit de dakbedekking (polyurethaan, asbest, aluminium) door mechanische processen bij gebouwbranden [33].

Dit onderzoek gaat over deeltjes (en gassen) die mee worden gevoerd door de rookpluim. De huidige modellering in NPK-Puff (en dus ook Pluimradar 1) is ontwikkeld voor fijn stof. Onderstaande beschrijving richt zich daarom voornamelijk op fijn stof. Grof stof zal, gezien de grotere massa van de deeltjes, dichter bij de bron deponeren, waardoor de verspreiding hiervan minder relevant is. Hierbij zijn wel enkele belangrijke uitzonderingen, zoals scherven van zonnepanelen⁴.

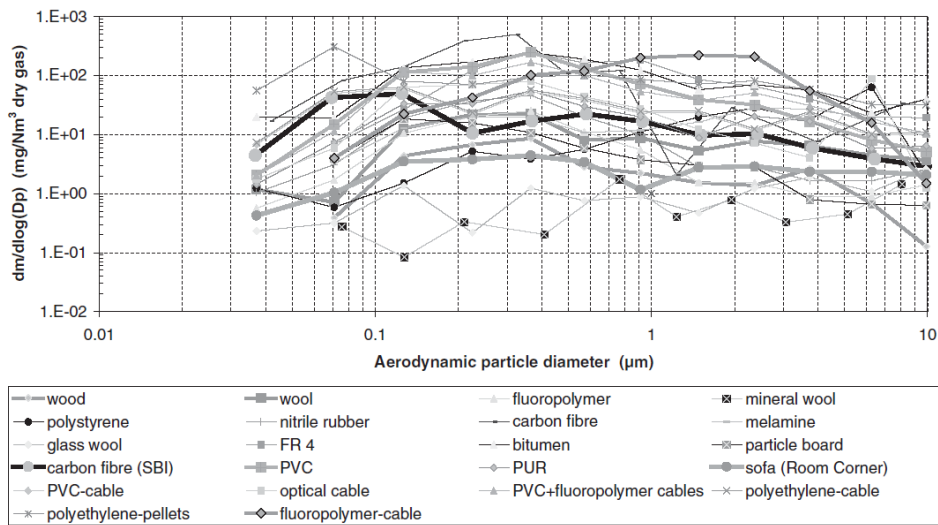
Op dit moment doet de MOD geen metingen van deeltjesgrootteverdelingen bij branden. Informatie over deze verdelingen is daarom uit de literatuur gehaald.

Deeltjesgrootteverdelingen bij branden zijn o.a. onderzocht door Hertzberg en Blomqvist [36]. In deze studie zijn 24 verschillende materialen verbrand die voorkomen in gebouwen. Vervolgens zijn de geproduceerde deeltjes onderzocht. De deeltjesgrootteverdelingen waren vergelijkbaar voor de verschillende materialen. De deeltjesgrootteverdelingen zijn weergegeven in Figuur 3.1 (voor massa van deeltjes) en Figuur 3.2 (voor het aantal deeltjes).

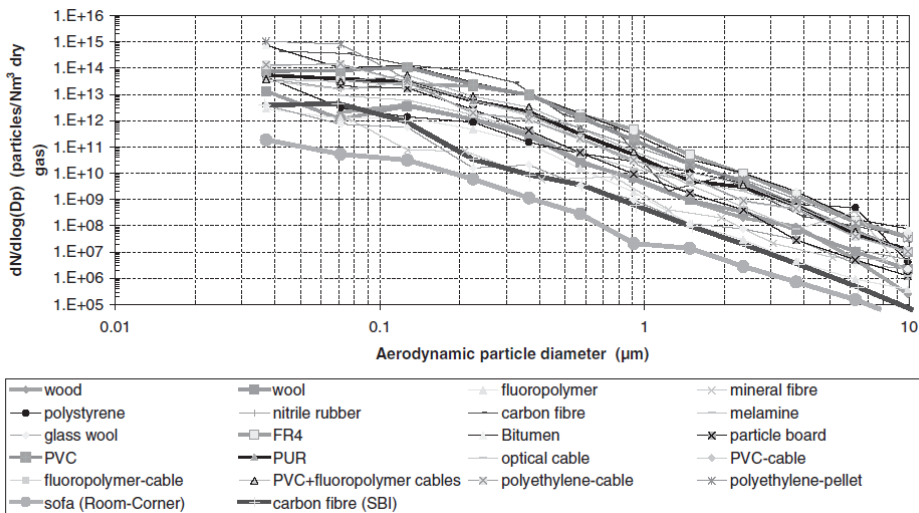
Uit de massa-deeltjesgrootteverdeling blijkt dat voor de meeste materialen er een maximum is bij deeltjes met aerodynamische diameter rond 0,1 – 0,3 µm. Ook is er bij sommige materialen een grote bijdrage van deeltjes tussen 5 – 10 µm.

⁴ Wanneer zonnepanelen betrokken zijn bij een brand kunnen zonnecelscherven ontstaan van meerdere centimeters groot, die vanwege hun eigenschappen (dun en licht) op grote afstand van de brand kunnen terecht komen (honderden meters tot kilometers) [35]. Dergelijke scherven zijn vanwege hun vorm niet goed te modelleren in NPK-Puff.

Wanneer wordt gekeken naar het aantal deeltjes ligt het maximum bij de kleinste detecteerbare deeltjes (~30 nm diameter). De auteurs merken daarnaast op dat a) er waarschijnlijk ook veel nog kleinere deeltjes zijn gevormd, en b) dat de metingen op korte afstand en kort na het starten van de branden zijn verricht, en dat de kleinere deeltjes kunnen agglomereren: 'oudere' aerosolen hebben volgens de auteurs vooral groottes tussen 0,1 – 1 µm.



Figuur 3.1 Deeltjesgrootteverdeling (massa) bij branden van verschillende soorten materialen. Beide assen zijn logaritmisch. Figuur overgenomen uit [36].



Figuur 3.2 Deeltjesgrootteverdeling (aantal) bij branden van verschillende soorten materialen. Beide assen zijn logaritmisch. Figuur overgenomen uit [36].

Een vergelijkbaar soort studie is uitgevoerd door Underwriter Laboratories in 2010 [37]. Uit deze experimenten bleek dat de gemiddelde deeltjesgrootte bij een brand tussen 0,04 en 0,15 µm (afhankelijk van het materiaal), en dat meer dan 99% van de geproduceerde deeltjes < 1 µm zijn.

Deeltjesgrootteverdelingen bij beheerbranden (gecontroleerde natuurbranden) zijn bepaald door Radke *et al.* [38]. Metingen zijn gedaan in de pluim (dus op hoogte). Ook in dit onderzoek domineren de kleinste deeltjes wanneer wordt gekeken naar het aantal: voorbij ruwweg $0,3 \mu\text{m}$ neemt het aantal per volume-eenheid snel af. Wanneer wordt gekeken naar het volume (tevens massa) is er juist ook een grote bijdrage te zien van grotere deeltjes ($10 - 50 \mu\text{m}$).

3.4 Droge depositie

3.4.1 Fysische processen

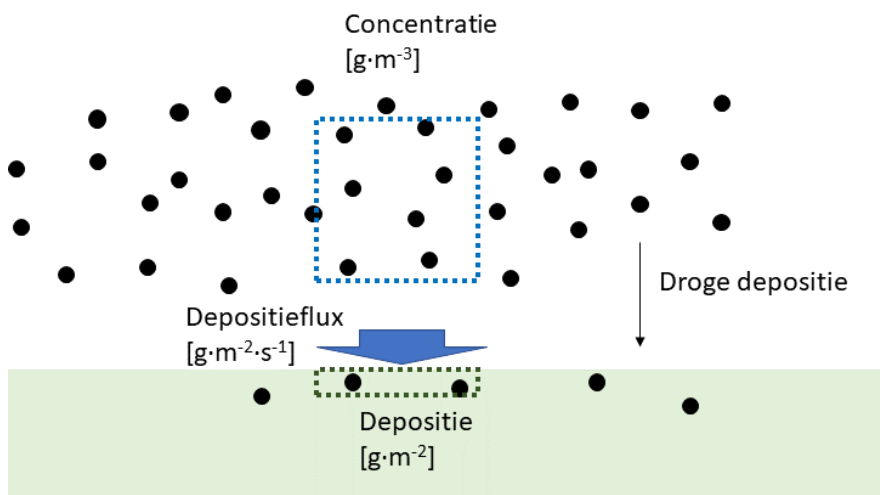
In modellen voor droge depositie wordt op ieder tijdstip de droge depositieflux berekend (de hoeveelheid stof die per oppervlak en per tijdseenheid deponert). Voor zowel gassen als deeltjes kan droge depositie als volgt worden beschreven [33, 39]:

$$D = C \times v_d$$

Waarin:

- D : de depositieflux [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$],
- C : de luchtconcentratie (in de buurt van de grond) [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],
- v_d : de depositiesnelheid [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

De depositiesnelheid is dus de verhouding tussen de depositieflux en de concentratie, en is de effectieve snelheid waarmee de deeltjes deponeren, zie ook Figuur 3.3. De concentratie C volgt uit het gebruikte verspreidingsmodel (of uit metingen). Deze paragraaf richt zich daarom op de depositiesnelheid v_d .



Figuur 3.3 Schematische weergave van droge depositie. Getoond zijn de concentratie in de lucht (blauw gestippeld vierkant, in $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en de depositieflux op een oppervlak (dikke pijl, in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). De depositiesnelheid is de verhouding tussen deze twee. De totale depositie op de grond (groen gestippeld vierkant, in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) is afhankelijk van de tijd waarin het proces plaatsvindt.

Voor gassen hangt de depositiesnelheid af van chemische interacties met het oppervlak (en is dus afhankelijk van het gas én van het oppervlak).

Voor deeltjes zijn er meerdere fysische processen die een rol spelen. Kleine deeltjes ($< 0,1 \mu\text{m}$) vertonen Brownse beweging en kunnen zich alle kanten op verspreiden – ze gedragen zich wat dat betreft als gassen. Grotere deeltjes ($> 1 \mu\text{m}$) zullen ook sedimenteren, en de depositiesnelheid is dan vooral afhankelijk van de deeltjesgrootte. Deeltjes tussen $0,1$ en $1 \mu\text{m}$ zijn lastig te beschrijven volgens [39].

In beschrijvingen van processen tijdens depositie wordt meestal niet gekeken naar de depositiesnelheid maar naar de depositieweerstand R :

$$v_d = \frac{1}{R}$$

De hierop volgende beschrijving van weerstanden is grotendeels gebaseerd op de beschrijving uit Hall en Spanton (2016) [33]. De processen die hieronder zijn beschreven kunnen verder worden opgesplitst in deelprocessen, en zo nauwkeuriger (maar ook complexer) worden beschreven (zie bijvoorbeeld [40]). De wat simpelere beschrijving uit [33] is voldoende om globaal de belangrijkste fysische processen te begrijpen.

Pluimradar wordt vooral gebruikt om te bepalen waar deeltjes deponeren. De tekst over depositie van gassen is ter kennisgeving. In de literatuur zijn methoden beschikbaar waarmee de depositie van gassen gedetailleerder bepaald wordt.

De totale depositieweerstand R kan worden onderverdeeld in een aantal verschillende weerstanden, zie ook Figuur 3.4. Voor gassen is R som van de volgende weerstanden:

- $R_{\text{aerodynamisch}}$: transport van het molecuul door de menglaag, door turbulente diffusie, tot dicht op het oppervlak.
- $R_{\text{dunnelaag}}$: diffusie door de dunne luchtdaag direct boven het oppervlak.
- $R_{\text{oppervlak}}$: de weerstand van het oppervlak zelf.

De parameter $R_{\text{aerodynamisch}}$ is afhankelijk van de atmosferische stabiliteit en de ruwheidslengte van de omgeving (typische waarden zijn gegeven in [41]).

Voor **gassen** is de som van $R_{\text{aerodynamisch}}$ en $R_{\text{dunnelaag}}$ ruwweg omgekeerd evenredig met de frictiesnelheid u^* (die afhangt van de windsnelheid en de ruwheidslengte). De oppervlakteweerstand $R_{\text{oppervlak}}$ varieert voor gassen van nagenoeg 0 (geen weerstand, voor reactieve of sterk oplosbare gassen) tot nagenoeg oneindig (voor niet-reactieve gassen, zoals edelgassen). Voor reactieve gassen ($R_{\text{oppervlak}} = 0$) is de depositiesnelheid ruwweg evenredig met de windsnelheid. Voor edelgassen ($R_{\text{oppervlak}} \approx \infty$) is de depositiesnelheid bij benadering 0.

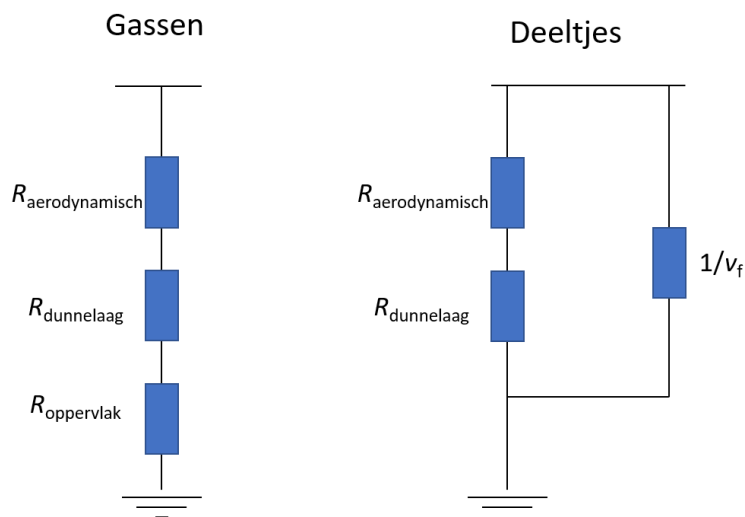
Voor **deeltjes** is de oppervlakteweerstand $R_{\text{oppervlak}} = 0$; zodra deze deeltjes op het oppervlak komen worden ze hier permanent gebonden. Voor deeltjes is de depositiesnelheid daarnaast ook afhankelijk van de sedimentatiesnelheid (v_f , [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]), als gevolg van de zwaartekracht. Voor grote deeltjes domineert deze bijdrage. De sedimentatiesnelheid is afhankelijk van de deeltjesgrootte en dichtheid. Dit wordt beschreven

met de aerodynamische diameter, de diameter van een bolvormig deeltje met dichtheid $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ dat dezelfde sedimentatiesnelheid heeft als het echte deeltje (dat dus een andere vorm, grootte en dichtheid kan hebben). De totale depositiesnelheid voor deeltjes is daarom ook afhankelijk van de aerodynamische diameter, zie Figuur 3.5.

De depositiesnelheid van deeltjes kan als volgt worden uitgedrukt [42]:

$$v_d = \frac{1}{R_{\text{aerodynamisch}} + R_{\text{dunnelaag}}} + v_f$$

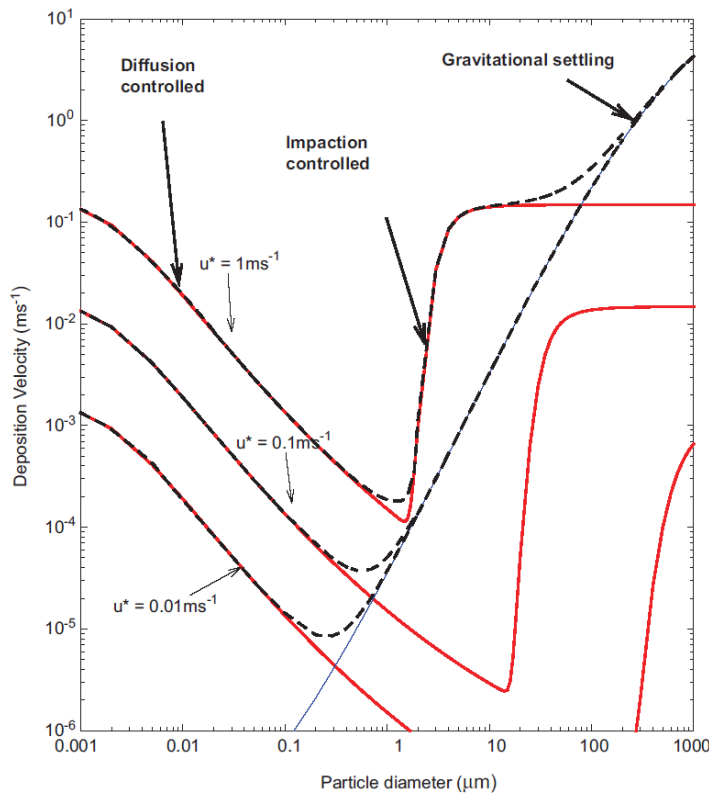
In NPK-Puff wordt een iets andere uitdrukking gebruikt, zie paragraaf 3.4.3.



Figuur 3.4 Schematische weergave van de verschillende weerstanden voor gassen (links, drie weerstanden in serie) en deeltjes (rechts, twee weerstanden in serie en een derde weerstand ($1/v_f$) in parallel). De depositiesnelheid is omgekeerd evenredig met de totale weerstand.

Om de droge depositiesnelheid te bepalen moeten de volgende parameters dus bekend zijn:

- Voor gassen: oppervlakteweerstand $R_{\text{oppervlak}}$ (stofeigenschap en karakteristieken van de omgeving) en frictiesnelheid u^* (lokale omstandigheden).
- Voor deeltjes: de frictiesnelheid u^* (lokale omstandigheden), plus de grootte en dichtheid (stofeigenschappen). Hoe groter de deeltjes, hoe belangrijker de stofeigenschappen (want bij benadering is v_d dan gelijk aan v_f).



Figuur 3.5 Depositiesnelheid als functie van **aerodynamische** diameter. De blauwe lijn toont de sedimentatiesnelheid (zwaartekracht). De rode lijnen geven de depositiesnelheid als gevolg van diffusieprocessen (voor drie verschillende waarden van de frictiesnelheid u^*). De zwarte gebroken lijnen geven de totale depositiesnelheid door de drie verschillende waarden van u^* . Figuur overgenomen uit Hall en Spanton (2016) [33].

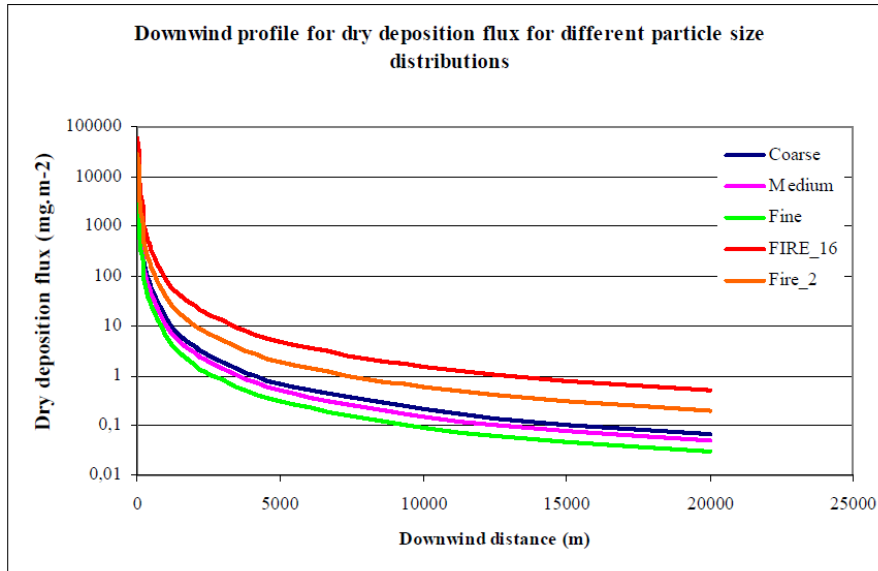
3.4.1.1 Invloed van deeltjesgrootteverdeling

Zoals besproken in paragraaf 3.3.1 is de depositiesnelheid van deeltjes afhankelijk van de grootte.

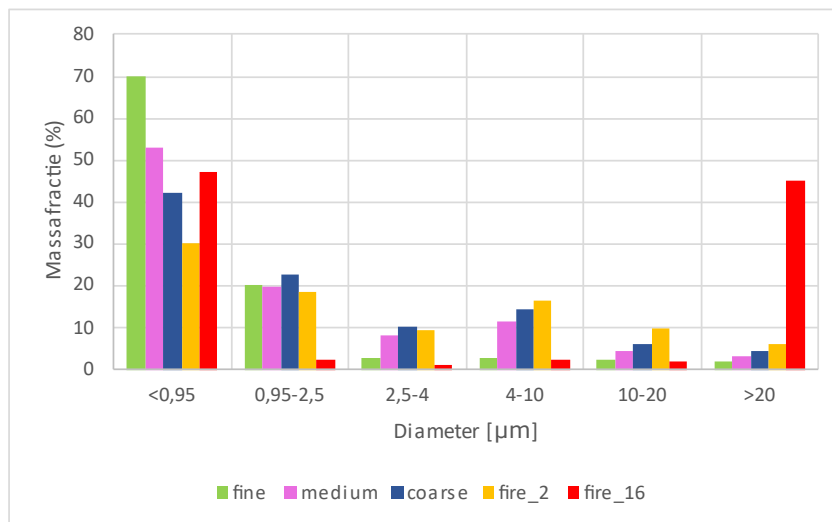
Meesters [43] heeft de droge depositie van vijf verschillende deeltjesgroottedistributies berekend, zie Figuur 3.6 voor de door Meesters berekende depositie en Figuur 3.7 voor de gebruikte deeltjesgrootteverdelingen. Bij deze berekeningen is geen rekening gehouden met pluimstijging (de emissiehoogte was 0,5 m en de convectieve warmteflux 0 MW).

Uit de resultaten blijkt dat de depositieflux op een bepaalde afstand sterk afhankelijk is van de deeltjesgrootteverdeling. Echter varieert de vorm van de curve weinig (voor afstanden >1000 m). De *relatieve* afname van de depositie bij toenemende afstand van de brand is dus volgens dit onderzoek niet sterk afhankelijk van de deeltjesgrootteverdeling. Dit betekent dat het gebruik van verschillende deeltjesgrootteverdelingen in Pluimradar weinig effect zal hebben op de resultaten (op afstanden >1000 m). In Pluimradar worden namelijk kwalitatieve resultaten gegeven: de depositie is op een bepaalde locatie bijvoorbeeld een factor 1000 hoger dan op een andere locatie. Voor het bepalen van de absolute depositie moet de bronterm van de emissie

bekend zijn. Dit is bij branden meestal niet het geval. Ook voor Pluimradar 2 zal daarom enkel de relatieve depositie worden berekend.



Figuur 3.6 Droge depositie ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) als functie van afstand voor vijf verschillende deeltjesgrootteverdelingen (Coarse, Medium, Fine, FIRE_16 en FIRE_2). De y-as is logaritmisch. Figuur overgenomen uit Meesters [43]. Zie voor informatie over de deeltjesgrootteverdelingen Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Deeltjesgrootteverdelingen gebruikt in Figuur 3.6. De distributies Coarse, Medium en Fine zijn de standaardverdelingen in OPS, de distributies Fire_2 en Fire_16 zijn lognormale deeltjesgrootteverdelingen, met gemiddelde diameter $1\ \mu\text{m}$ en verschillende standaarddeviaties (bij Fire_16 is bijna de helft van de massa te vinden in deeltjes met diameter $>20\ \mu\text{m}$). Opmerking: de totale massafractie voor de verdeling Fire_2 telt volgens tabel 22 van Meesters [43] op tot 90% (niet 100%). Dit is hier niet gecorrigeerd.

3.4.2 Typische depositiesnelheden

In deze paragraaf worden typische depositiesnelheden samengevat. Zoals besproken in paragraaf 3.4.1 is de depositiesnelheid afhankelijk

van een groot aantal factoren, zoals de windsnelheid en de deeltjesgrootte (voor deeltjes) of reactiviteit (voor gassen).

Tabel 3.1 geeft een overzicht van depositiesnelheden. Voor PAK's en dioxines is gekeken naar zowel gassen als deeltjes. Deze stoffen kunnen zich verspreiden in beide vormen, al wordt bij branden verwacht dat de verspreiding in deeltjesvorm verreweg de belangrijkste is. Stofgebonden PAK's hebben hogere depositiesnelheden dan gasvormige PAK's, en deponeren daarom dichterbij de brand [28]. Voor dioxines worden ook hogere depositiesnelheden gerapporteerd voor deeltjes dan voor gassen [29, 32].

Samengevat lijkt een redelijke depositiesnelheid voor de relevante stoffen 10^{-4} - 10^{-2} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wanneer de rookpluim ook grotere deeltjes (grof stof) bevat, met depositiesnelheden tot ordegrrootte $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, is de depositie lastiger te modelleren [44]. De lokale omstandigheden (zoals de lijwervel van het gebouw) spelen dan een grote rol. Gezien de hoge depositiesnelheid zijn deze deeltjes op grote afstand van de brand minder belangrijk. Deze deeltjes zijn daarom niet opgenomen in de tabel.

Tabel 3.1 Overzicht van typische depositiesnelheden gerapporteerd in de literatuur.

Beschrijving	Depositiesnelheid [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Bron
Deeltjes met grootte 1 - 10 μm . Waarde gebruikt door het RIVM (incl. functiegroep Deskundigen Chemische Incidenten van de MOD), gebaseerd op rapport NRPB-R182 van de National Radiation Protection Board (NRPB).	10^{-3} - 10^{-2}	[43]
Deeltjes met aerodynamische diameter 0,1 tot 10 μm , voor $u^* = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zie Figuur 3.5 van dit document.	10^{-4} - 10^{-2}	[33]
Deeltjes met diameter 1 - 10 μm , voor verschillende meteorologische omstandigheden en ruwheidslengtes	10^{-4} - 10^{-2}	[41]
Gassen, o.a. CO_2 , NO_x en SO_2 , voor verschillende oppervlakken	10^{-4} - 10^{-2}	[45]
Gemiddelde depositiesnelheid, voor stofgebonden dioxines, gebruikt in een studie naar luchtvervuiling in San Francisco. De fractie stofgebonden dioxines en deeltjesgrootteverdelingen zijn onbekend, daarom wordt niet gerekend met een specifiek dioxine.	$1,43\cdot 10^{-3}$ (gemiddelde uit drie studies, range: $4\cdot 10^{-4}$ - $6\cdot 10^{-3}$)	[32]
Depositiesnelheid (gas en deeltjes) van dioxines, uit een studie naar luchtvervuiling in China.	$4,2\cdot 10^{-3}$ (gassen: $1\cdot 10^{-4}$)	[29]

Beschrijving	Depositiesnelheid [m·s ⁻¹]	Bron
Depositie van PAK's, uit een studie naar luchtvervuiling in India en Nepal. De waarde is gemiddeld over 15 PAK's (gassen en deeltjes tot ongeveer 4 µm).	3,7·10 ⁻³	[46]
Depositiesnelheden van verschillende PAK's (gemiddeld), uit een studie naar luchtvervuiling in Taiwan. PAK's met laag molecuulgewicht (vooral gasvormig) deponeren langzamer dan PAK's met een hoog molecuulgewicht (vooral deeltjes). Hier gegeven waarden zijn uitersten uit de studie.	Uitersten: <ul style="list-style-type: none"> • Laag molecuulgewicht: 7·10⁻⁵ • Hoog molecuulgewicht: 2,2·10⁻² 	[27]
Berekende depositiesnelheden voor PAK's met verschillende deeltjesgroottes, voor een studie naar luchtvervuiling in Mumbai	<ul style="list-style-type: none"> • <0,4 µm: 4·10⁻⁵ • 0,4-1,1 µm: 3,7·10⁻⁴ • 1,1-3,3 µm: 2,83·10⁻³ • 3,3- 9,0 µm: 2,72·10⁻² 	[47]

3.4.3 Modelling in NPK-Puff en Pluimradar 1

In NPK-Puff zijn twee stukken code voor droge depositie: een stuk voor gassen en een stuk voor deeltjes. In Pluimradar 1 en JRodos worden de gasformules worden gebruikt.⁵

Het gasmodel dat in Pluimradar 1 gebruikt wordt bestaat uit verschillende weerstanden die gesommeerd worden tot één totale weerstand R (gelijk aan de inverse depositiesnelheid), zoals beschreven in paragraaf 3.4.1. De parameters $R_{aerodynamisch}$ en $R_{dunnelaag}$ zijn afhankelijk van de meteorologische omstandigheden en de omgeving (ruwheidslengte). De parameter $R_{oppervlak}$ wordt in de documentatie van Pluimradar 1 'canopy'-weerstand genoemd, en heeft een waarde van 500 s·m⁻¹ [1]. Dit is de standaardwaarde die in NPK-Puff wordt gebruikt om aerosolen te modelleren⁶. Indien nodig kan deze waarde worden aangepast om een andere depositiesnelheid te krijgen. Hiervoor moet de input file van NPK-Puff worden aangepast.

De formule voor deeltjesdepositie bestaat uit twee termen, de sedimentatiesnelheid en de verschillende weerstanden in de luchtlagen. Hiervoor wordt in NPK-Puff een iets andere uitdrukking gebruikt dan die in paragraaf 3.4.1, namelijk:

$$v_d = \frac{1}{R_{aerodynamisch} + R_{dunnelaag} + \sum R_{overig}} + v_f$$

Waarbij $\sum R_{overig}$ de som is over drie verschillende weerstanden die volgen uit Brownse beweging en de traagheid van de deeltjes, en de interceptie van de deeltjes aan het oppervlak. Dit is gebaseerd op artikelen van Slinn en Slinn (1980) [48] en Slinn (1982) [49].

⁵ Slechts een aantal (stralings)modelleers zijn voldoende bekend met de code om in NPK-Puff de deeltjescode te gebruiken.

⁶ In NPK-Puff wordt dus geen rekening gehouden met hoe $R_{oppervlak}$ afhangt van het soort oppervlak.

Om de deeltjescode te gebruiken moet de gebruiker een verdeling opgeven van grootte en dichtheid van de deeltjes.

3.4.3.1 Voorbeeldberekeningen

Om te onderzoeken tot welke depositiesnelheden het gasmodel en deeltjesmodel in NPK-Puff typisch leiden, zijn een aantal voorbeeldberekeningen gedaan.

Als eerste zijn berekeningen gedaan met het gasmodel (de defaultoptie, met $R_{\text{oppervlak}} = 500 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$). Hierbij is gekeken naar twee verschillende weersomstandigheden, de typische 'extremen' van het Nederlands weer:

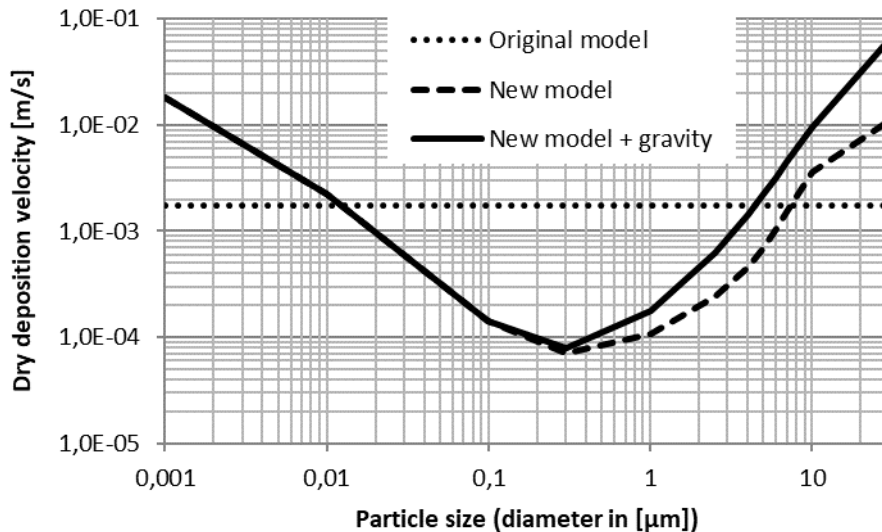
- Stabiël weer: 17 januari 2016 20:00 tot 18 januari 2016 06:00, Pasquill-Giffordklasse: F-G, windsnelheid: 1 tot $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dit is een moment waarbij er een sneeuwdek ligt en de lucht daarom extra makkelijk afkoelt en stabiël wordt. Dit is dus een extreme casus voor de stabiliteit.
- Onstabiël weer: 2015-Jun-6 12:00 – 20:00, Pasquill-Giffordklasse A-C, windsnelheid: $3,5 - 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dit is een dag met 81% zonneschijn, zonder neerslag maar met een lichtelijk bewolkt begin vanwege een klein buitje dat 5 juni viel. Aan het begin van de dag is het mogelijk dat er hier en daar wat neutrale condities voorkomen.

In beide gevallen is geen sprake van neerslag, zodat enkel is gekeken naar droge depositie. De resultaten zijn gegeven in Tabel 3.2. Uit deze resultaten blijkt dat de depositiesnelheid niet sterk afhankelijk is van de meteorologische omstandigheden. Een typische waarde voor de depositiesnelheid (met de code voor gassen) ligt in de orde van grootte $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dit is in goede overeenstemming met de typische depositiesnelheden in paragraaf 3.4.2.

Tabel 3.2 Totale depositiesnelheden uit NPK-Puff, met het gasmodel ($R_{\text{oppervlak}} = 500 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$), voor twee verschillende weersituaties, voor een simulatie van 1 uur. De berekende depositiesnelheid varieert licht tijdens de run, daarom is een range van waarden gegeven

Weer	Depositiesnelheid ($\times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Stabiël	1,61 – 1,87
Onstabiël	1,89 – 1,92

Verder is gekeken naar de berekende depositiesnelheden voor deeltjes van verschillende grootte. Hierbij is gebruik gemaakt van eerdere berekeningen, toen het effect van deeltjesgrootte op depositie werd geïmplementeerd in NPK-Puff. De resultaten zijn gegeven in Figuur 3.8. De berekeningen zijn gedaan voor deeltjes met een dichtheid van $1,93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. De depositiesnelheid berekend met het gasmodel (defaultoptie) ligt redelijk middenin de verwachte range van depositiesnelheden voor deeltjes (volgens paragraaf 3.4.2 ruwweg variërend van 10^{-4} tot $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).



Figuur 3.8 Droge depositiesnelheid voor deeltjes van verschillende grootte. In deze figuur is "original model" het gasmodel, "new model" en "new model + gravity" zijn het depositiemodel voor deeltjes, respectievelijk zonder en met de sedimentatiesnelheid. Figuur en berekeningen: Jasper Tomas, RIVM (25 september 2018).

Tot slot is verder onderzocht hoe de depositie afhangt van de parameter $R_{oppervlak}$ in het gasmodel van NPK-Puff. Deze analyse is te vinden in Bijlage 1.

3.4.4 Samenvatting droge depositie

De stoffen waarvan de depositie gemeten wordt, te weten polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), dioxines en zware metalen, komen bij een brand typisch vrij als deeltjes (of gebonden aan deeltjes) en niet als gassen. De deeltjesgrootteverdeling lijkt redelijk onafhankelijk van de stof. Gemeten naar aantallen hebben hele kleine deeltjes ($< 1 \mu\text{m}$) de overhand, gemeten naar volume of massa zijn juist de grotere kleine deeltjes ($10\text{-}50 \mu\text{m}$) relevant.

De totale droge depositiesnelheid van deeltjes van deze grootte kan variëren tussen 10^{-4} en $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, afhankelijk van grootte en lokale omstandigheden (zoals het weer). Vergelijkbare depositiesnelheden zijn ook gevonden voor PAK's en dioxines in de literatuur. De depositiesnelheid van deze stoffen hangt af van de soort verbinding, de omgeving, de meteo, en of de verbinding gasvormig is of gebonden aan deeltjes. Voor branden worden met name stofgebonden PAK's en dioxines verwacht, deze hebben over het algemeen een wat hogere depositiesnelheid dan gasvormige verbindingen.

Standaard wordt in NPK-Puff (en JRodos en Pluimradar 1) gerekend met een depositiemodel voor gassen. Voor aerosolen, zoals het rekennuclide dat voor Pluimradar 1 wordt gebruikt (Cs-137), geeft dit een typische depositiesnelheid van $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wat het midden houdt van de depositiesnelheid voor deeltjes volgens de literatuur (tussen 10^{-4} en $10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Uit eerdere OPS-berekeningen blijkt dat de relatieve depositie op verschillende afstanden (>1000 m van de brand) niet sterk afhangt van de deeltjesgrootteverdeling. Aangezien Pluimradar alleen relatieve concentraties geeft als resultaat, lijkt het opgeven van een deeltjesgrootteverdeling op dit moment dus niet van toegevoegde waarde. Het depositiemodel voor gassen geeft een goede beschrijving van de depositie.

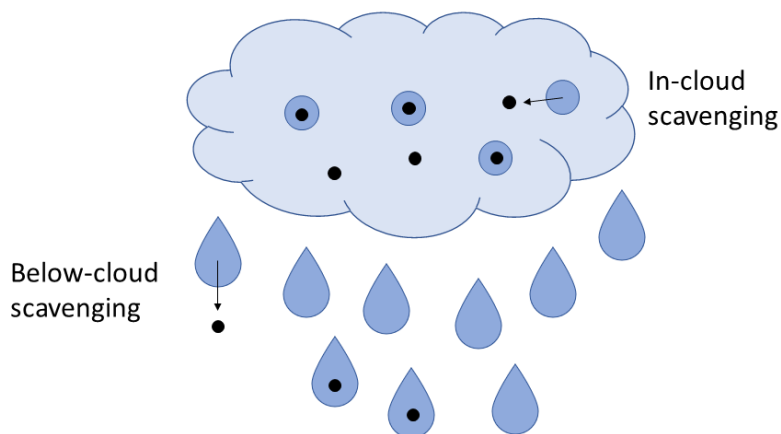
3.5 Natte depositie

3.5.1

Fysische processen

In deze paragraaf worden kort de belangrijkste fysische processen van natte depositie besproken. Gedetailleerde beschrijvingen zijn o.a. te vinden in artikelen van Zannetti [39], Underwood [41] en Sportisse [50].

Bij natte depositie komen de stoffen terecht in regendruppels, die vervolgens op de grond vallen⁷. Hierdoor neemt de concentratie in de lucht af. Het proces wordt in het Engels ook wel *scavenging* genoemd. Bij natte depositie wordt onderscheid gemaakt tussen processen die plaatsvinden in een regenwolk (*rainout*, *in-cloud scavenging* of *nucleation scavenging*) en processen die plaatsvinden onder een regenwolk (*washout*, *below-cloud scavenging* of *impaction scavenging*). Dit is weergegeven in Figuur 3.9. Er zijn meer gegevens over *below-cloud* dan over *in-cloud scavenging* [50]. In een aantal van de beschouwde documenten wordt daarom specifiek gesproken over *washout*. Om verwarring te voorkomen zal in dit document alleen de term (*below-cloud*) *scavenging* worden gebruikt.



Figuur 3.9 Natte depositie als gevolg van processen in een regenwolk (*in-cloud scavenging*) en onder een regenwolk (*below-cloud scavenging*).

Omdat de relevante stoffen voor dit onderzoek met name vrijkomen als deeltjes, zal de nadruk in dit onderzoek liggen op natte depositie van deeltjes. In de modellen voor natte depositie wordt aangenomen dat deeltjes opgenomen worden in regendruppels door botsingen, met een snelheid die o.a. afhankelijk is van de deeltjesgrootte en de regenintensiteit. Dit proces is cumulatief; de deeltjes komen niet meer vrij uit de regendruppel.

⁷ Natte depositie door de depositie van kleine regeldruppeltjes uit mist wordt hier niet verder uitgewerkt

Voor gassen is er sprake van een evenwicht tussen de stof in oplossing en de stof in gasfase (wet van Henry). Dit evenwicht is afhankelijk van de oplosbaarheid van het gas in de druppel, en stelt zich snel in. Daarom is (bij benadering) alleen de concentratie van het gas vlak boven de grond belangrijk [33].

Zannetti [39] geeft de volgende uitdrukking voor de natte depositieflux, onder een regenwolk:

$$W = \int_0^{\infty} \Lambda(z, t) c(x, y, z, t) dz$$

Waarin:

- W : natte depositieflux [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
- $\Lambda(z, t)$: de *below-cloud scavenging* coëfficiënt op hoogte z en tijdstip t [s^{-1}],
- $c(x, y, z, t)$: de concentratie op locatie (x, y, z) en tijdstip t [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].

De concentratie c kan worden berekend met een verspreidingsmodel. Voor deeltjes kan de concentratie verschillend zijn voor deeltjes van verschillende grootte. De *below-cloud scavenging* coëfficiënt Λ is afhankelijk van de deeltjesgrootte, het regentempo en de grootte van de regendruppels [41].

Wanneer de stof in kwestie een constante concentratie heeft tussen 0 en H meter hoog (H kan bijvoorbeeld de hoogte van de menglaag zijn), kan de volgende uitdrukking worden gegeven voor de natte depositiesnelheid:

$$v_n = \frac{W}{c(x, y, 0, t)} = \bar{\Lambda} H$$

Waar:

- v_n : natte depositiesnelheid [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- $\bar{\Lambda}$: de gemiddelde *below-cloud scavenging* coëfficiënt [s^{-1}].

In de volgende paragraaf worden typische waarden gegeven voor de natte depositiesnelheid en *below-cloud scavenging* coëfficiënt.

Zannetti [39] geeft ook een tweede uitdrukking voor de natte depositiesnelheid:

$$v_n = w_{r,0} \times p_o$$

Waar:

- $w_{r,0}$: de *below-cloud scavenging* ratio, de concentratie van de stof in regendruppels op grondniveau gedeeld concentratie van de stof in de lucht op grondniveau⁸ [-],
- p_o : het regentempo [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

⁸ Een andere gebruikte definitie van de *below-cloud scavenging* ratio is de verhouding tussen de concentratie van de stof in regendruppels op grondniveau en de gemiddelde concentratie van de stof in de kolom van lucht waar de regendruppel door valt [41].

De *below-cloud scavenging* ratio kan volgens Zannetti worden geschat uit experimentele gegevens.

De *below-cloud scavenging* ratio $w_{r,0}$ en *below-cloud scavenging* coëfficiënt $\bar{\Lambda}$ zijn dus aan elkaar gerelateerd via:

$$w_{r,0} = \frac{\bar{\Lambda} H}{p_o}$$

Hierbij moet worden opgemerkt dat een gemeten *below-cloud scavenging* ratio ($w_{r,0}$) het gemiddelde is van veel verschillende regenbuien [41]. Deze parameter wordt daarom met name gebruikt voor stoffen die altijd in de lucht aanwezig zijn (luchtvervuiling). De *below-cloud scavenging* coëfficiënt geldt meestal voor een specifieke regenbui.

Sportisse gaat in zijn reviewartikel [50] in op de invloed van het regentempo, de grootte van regendruppels (en variatie daarin), en de deeltjesgrootte op de *below-cloud scavenging* coëfficiënt. Ook wordt de volgende parametrisatie besproken:

$$\Lambda = A \times p_0^B$$

Waarbij het regentempo meestal wordt gegeven in $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Sportisse geeft ook typische waarden voor de parameters A en B , voor verschillende deeltjesgroottes (en deeltjesgrootteverdelingen).

Underwood [41] en Sportisse [50] bespreken beide *in-cloud scavenging*. Dit proces kan ook worden beschreven door middel van een *scavenging* coëfficiënt.

3.5.2 Typische depositiesnelheden

In de literatuur zijn waarden gevonden voor de *scavenging* coëfficiënt en *scavenging* ratio (met name *below-cloud*). Deze zijn samengevat in:

- Tabel 3.3: waarden voor de *below-cloud scavenging* coëfficiënt.
- Tabel 3.4: waarden voor de *in-cloud scavenging* coëfficiënt.
- Tabel 3.5: waarden voor de *scavenging* ratio, voor dioxines. Deze waarden komen uit studies over luchtvervuiling.

Tabel 3.3 Typische waarden voor de *below-cloud scavenging* coëfficiënt.

Beschrijving	Below-cloud scavenging coëfficiënt [s^{-1}]	Bron
Typische waarde voor aerosolen, bij $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen	$4\cdot 10^{-4}$	[51]
Beste schatting voor deeltjes met diameter 1-10 μm , bij $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen	<ul style="list-style-type: none"> • 1 μm: $4\cdot 10^{-5}$ • 10 μm: $4\cdot 10^{-4}$ 	[41]
Conservatieve waarde voor deeltjes met diameter 1-10 μm , bij $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen	$4\cdot 10^{-4}$	[41]
Gemeten waarden, voor 5 en 10 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen, en deeltjes met diameter $\sim 0,1\text{-}8 \mu\text{m}$	$1\cdot 10^{-4} - 1,5\cdot 10^{-3}$	[50]

Beschrijving	Below-cloud scavenging coëfficiënt [s^{-1}]	Bron
Waarden voor verschillende deeltjes en gassen, bij $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen. De referentie geeft overzichtstabellen van de parameters A en B voor de parametrisatie $\Lambda = A \times p_0^B$.	<ul style="list-style-type: none"> Min: $4,8 \cdot 10^{-7}$ Max: $5 \cdot 10^{-4}$ De laagste waarden is voor organische (jodium)verbindingen.	[50]

Tabel 3.4 Typische waarden voor de in-cloud scavenging coëfficiënt.

Beschrijving	In-cloud scavenging coëfficiënt [s^{-1}]	Bron
Verwachte waarde (voor deeltjes)	$3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4}$	[41]
Waarde voor deeltjes, bij $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ regen (berekend met de parametrisatie $\Lambda = A \times p_0^B$)	$4,2 \cdot 10^{-4}$	[50]

Tabel 3.5 Typische waarden voor de scavenging ratio (below-cloud).

Beschrijving	Below-cloud scavenging ratio [-]	Bron
Experimenteel bepaalde waarden voor dioxines (gas en deeltjes), voor twee steden in China. De waarde hangt af van de tijd van het jaar.	$1 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$	[29]
Experimenteel bepaalde waarden voor dioxines (gas en deeltjes). De waarde is afhankelijk van het dioxine.	$9,1 \cdot 10^4 - 9 \cdot 10^5$	[30]

Samenvattend lijkt een *scavenging* coëfficiënt van (typische orde) 10^{-4} s^{-1} redelijk, voor zowel *in-cloud* als *below-cloud*. De *scavenging* ratio die is gevonden voor dioxines ($\sim 10^5$) kan worden omgerekend naar de *below-cloud scavenging* coëfficiënt. Hierbij wordt aangenomen dat het regentempo $p_0 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (ongeveer $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) en de hoogte $H = 10^3 \text{ m}$. Dit geeft:

$$\bar{\Lambda} = \frac{w_{r,0} \times p_0}{H} = \frac{10^5 \times 3 \times 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{10^3 \text{ m}} = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Deze waarde komt overeen met de waarden voor de *scavenging* coëfficiënt in Tabel 3.3 en Tabel 3.4.

3.5.3 Modelling in NPK-Puff en Pluimradar 1

In NPK-Puff wordt dezelfde parametrisatie gebruikt als beschreven in paragraaf 3.5.1, namelijk:

$$\Lambda = A \times p_0^B$$

Met de volgende waarden [52]:

- A : $1,11 \cdot 10^{-5}$ (in de menglaag) of $7,0 \cdot 10^{-5}$ (boven de menglaaghoogte),
- B : 1 (regentempo $\leq 1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) of 0,8 (regentempo $> 1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

In de documentatie van Pluimradar 1 [1] wordt de parameter A de uitregencoëfficiënt genoemd.

Bij een regentempo van $1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ geeft dit de volgende waarden voor de *scavenging* coëfficiënt:

- In de menglaag (*below-cloud*): $1,11\cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,
- Boven de menglaaghoogte (*in-cloud*): $7,0\cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Deze waarden voor de *scavenging* coëfficiënt zijn in overeenstemming met de waarden in paragraaf 3.5.2.

3.5.4 *Samenvatting natte depositie*

De manier waarop in NPK-Puff natte depositie wordt berekend sluit aan bij de in de literatuur beschreven modellen. Ook de waarden van rekenparameters komen goed overeen met wat in de literatuur is gevonden, voor zowel de *scavenging* coëfficiënt als voor de *scavenging* ratio. Er is op dit moment dus geen reden om de modelleerwijze voor Pluimradar 2 aan te passen.

3.6 **Samenvatting en aanbevelingen**

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat de nu voor Pluimradar 1 gebruikte depositiemodellen een goede beschrijving geven van de droge en natte depositie na branden. Op dit moment wordt daarom aanbevolen om de modellering en gebruikte parameters niet aan te passen. Wat betreft depositie blijft Pluimradar 2 dus gelijk aan Pluimradar 1.

Voor bepaalde situaties kan het toch wenselijk zijn om andere modellen of parameters te gebruiken (bijvoorbeeld wanneer men wil kijken naar enkel de depositie van één soort deeltje of gas, met een depositiesnelheid die sterk afwijkt van de typische waarde die nu wordt gehanteerd). In dat geval zal contact moeten worden gezocht met de modelleers van het RIVM.

4 Literatuur

1. G. Geertsema, et al., *PLUIMRADAR: Een snelle indruk van de verspreiding van stoffen door de lucht*, KNMI-Publicatie 234, 2018.
2. RIVM. *Pluimradar*. Beschikbaar via <https://www.rivm.nl/ongevallen-en-rampen/milieuongevallen/pluimradar>. (Geraadpleegd 18-01-2024).
3. P.A.M. Uijt de Haag, G.T. Geertsema, F.C. Kroonenberg, en F.J. Aldenkamp, *Invoering van het luchtverspreidingsmodel NPK-PUFF, versie 1.0, voor toepassing in de NPK-organisatie*, RIVM rapport nr. 610057008, 1998.
4. A. Wengert, *JRodas: An off-site emergency management system for nuclear accidents*, Karlsruhe Institute for Technology (KIT), 2017.
5. M.R. Beychok, *Fundamentals of Stack Gas Dispersion*, 2005 (4th Edition).
6. K.B. McGrattan, *Smoke Plume Trajectory Modeling*. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2003. **8**(4): p. 367-372.
7. E. Kooi en G. Laheij, *Review of the Dutch calculation method to assess off-site risks for chemical warehouse fires*, 2021-0120, 2021.
8. H.N. Webster, et al., *Using plume rise schemes to model highly buoyant plumes from large fires*. *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2011: p. 220-224.
9. J. Wilday, et al., *Assessing Source Terms During Major Incidents*, Health & Safety Laboratory FP/10/17, 2010.
10. N.C. Markatos, C. Christolis, en C. Argyropoulos, *Mathematical modeling of toxic pollutants dispersion from large tank fires and assessment of acute effects for fire fighters*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009. **52**(17): p. 4021-4030.
11. C.D. Argyropoulos, et al., *Modelling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere*. *Atmospheric Environment*, 2010. **44**(6): p. 803-813.
12. G.L. Achtemeier, et al., *Modeling Smoke Plume-Rise and Dispersion from Southern United States Prescribed Burns with Daysmoke*. *Atmosphere*, 2011. **2**(3).
13. S.D. Miles, et al., *Modelling the Environmental Consequences of Fires in Warehouses*. *Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium*, 1993: p. 1221-1232.
14. H. Ingason, H. Tuovinen, en A. Lönnemark, *Industrial fires - an overview. Brandforsk project 601-071*, SP Technical Research Institute of Sweden, report 2010:17, 2010.
15. A. Byström. *Compartment Fire Temperature: Calculations and Measurements*. PhD thesis. 2017.
16. L. Staffansson. *Selecting design fires*. PhD thesis. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, 2010.
17. G. Vigne, et al., *Review and validation of the current smoke plume entrainment models for large-volume buildings*. *Fire Technology*, 2019. **55**(3): p. 789-816.

18. B. Karlsson en J.G. Quintiere, *Enclosure fire dynamics*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
19. RIVM, *Handleiding Risicoberekeningen Bevi Versie 4.3*, 2021.
20. NEN-EN 1991-1-2+C3, *Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand, en nationale bijlage.*, 2019.
21. Brandweeracademie, *Basisprincipes van brandbestrijding*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid, 2020.
22. G. Rein, *Smoldering Combustion*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition*. 2016, Springer.
23. Atmospheric dispersion modelling liaison committee (ADMLC), *Annual report 2003/2004, including modelling of atmospheric dispersion from fires and review of past work funded by ADMLC.*, ADMLC-R3,
24. H. Boot en S. Ruiz Pérez, *Modelling of the plume rise phenomenon due to warehouse or pool fires considering penetration of the mixing layer*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020. **65**: p. 104109.
25. B.E.A. Fisher, E. Metcalfe, I. Vince, en A. Yates, *Modelling plume rise and dispersion from pool fires*. Atmospheric Environment, 2001. **35**(12): p. 2101-2110.
26. M.G. Mennen, et al., *Verspreiding van stoffen bij branden: een verkennende studie*, RIVM-rapport 609022031/2009, 2009.
27. H.L. Sheu, et al., *Dry deposition velocities of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of traffic intersections*. Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology, 1996. **31**(9): p. 2295-2311.
28. A.A. Meharg, J. Wright, H. Dyke, en D. Osborn, *Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dispersion and deposition to vegetation and soil following a large scale chemical fire*. Environmental Pollution, 1998. **99**(1): p. 29-36.
29. J. Zhu, et al., *Atmospheric Deposition of Polychlorinated Dibenzop-dioxins and Dibenzofurans in Two Cities of Northern China*. Aerosol and Air Quality Research, 2017. **17**(8): p. 2027-2040.
30. R. Lohmann en K.C. Jones, *Dioxins and furans in air and deposition: A review of levels, behaviour and processes*. Science of The Total Environment, 1998. **219**(1): p. 53-81.
31. M.D. Cohen, et al., *Modeling the Atmospheric Transport and Deposition of PCDD/F to the Great Lakes*. Environmental Science & Technology, 2002. **36**(22): p. 4831-4845.
32. R. Allen en D. Yee, *Estimated Atmospheric Deposition Fluxes of Dioxins in the San Francisco Estuary*, San Francisco Estuary Institute Contribution No. 661, 2012.
33. D.J. Hall en A.M. Spanton, *Dispersion of Fire Plumes in the Atmosphere*, in *Toxicology, Survival and Health Hazards of Combustion Products*. 2016, The Royal Society of Chemistry. p. 139-171.
34. M. Dijkema, et al., *GGD-richtlijn medische milieukunde: Luchtkwaliteit en gezondheid*, RIVM-rapport 2018-0016, 2018.
35. N.W. van Veen, et al., *Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen*, RIVM-rapport 2022-0103, 2022.
36. T. Hertzberg en P. Blomqvist, *Particles from fires—a screening of common materials found in buildings*. Fire and Materials, 2003. **27**(6): p. 295-314.

37. T. Fabian, et al., *Firefighter Exposure to Smoke Particulates (EMW-2007-FP-02093)*, 2010.
38. L.F. Radke, et al., *Airborne monitoring and smoke characterization of prescribed fires on forest lands in western Washington and Oregon*, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-251. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1990.
39. P. Zannetti, *Dry and Wet Deposition*, in *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*, P. Zannetti, Editor. 1990, Springer US: Boston, MA. p. 249-262.
40. M.L. Wesely en B.B. Hicks, *A review of the current status of knowledge on dry deposition*. Atmospheric Environment, 2000. **34**(12): p. 2261-2282.
41. Atmospheric dispersion modelling liaison committee (ADMLC), *Annual Report 1998/99 including "Review of Deposition Velocity and Washout Coefficient" and "Review of Flow and Dispersion in the Vicinity of Groups of Buildings"*, NRPB-R322, 2001.
42. L. Zhang, S. Gong, J. Padro, en L. Barrie, *A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module*. Atmospheric Environment, 2001. **35**(3): p. 549-560.
43. J. Meesters, *Predicting the dispersion and deposition of particles released in a fire*, Minor Research Project: Toxicology & Environmental Health Report 261. RIVM, 2011.
44. D.J. Hall, V. Kukadia, S. Walker, en G.W. Marsland, *Deposition of large particles from warehouse fire plumes—a small-scale wind tunnel model study*. Journal of Hazardous Materials, 1998. **59**(1): p. 13-29.
45. G.A. Sehmel, *Particle and gas dry deposition: A review*. Atmospheric Environment (1967), 1980. **14**(9): p. 983-1011.
46. J. Dotel, et al., *Determination of dry deposition velocity of polycyclic aromatic hydrocarbons under the sub-tropical climate and its implication for regional cycling*. Environmental Pollution, 2020. **261**: p. 114143.
47. S.K. Sahu, G.G. Pandit, en V.D. Puranik, *Dry Deposition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Associated with Atmospheric Particulate Matters in an Urban Site, Mumbai, India*. Aerosol and Air Quality Research, 2008. **8**(4): p. 437-446.
48. S.A. Slinn en W.G.N. Slinn, *Predictions for particle deposition on natural waters*. Atmospheric Environment (1967), 1980. **14**(9): p. 1013-1016.
49. W.G.N. Slinn, *Predictions for particle deposition to vegetative canopies*. Atmospheric Environment (1967), 1982. **16**(7): p. 1785-1794.
50. B. Sportisse, *A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides*. Atmospheric Environment, 2007. **41**(13): p. 2683-2698.
51. Ministerie van VROM. *Methods for the calculation of physical effects ('Gele boek')*. Publicatiereeks gevaarlijke stoffen 2. 2005.
52. J.M. Tomas, V. Peereboom, A. Kloosterman, en A. van Dijk, *Detection of radioactivity of unknown origin: Protective actions based on inverse modelling*. Journal of Environmental Radioactivity, 2021. **235-236**: p. 106643.

53. D.J. Hall en A.M. Spanton *A review of models for dispersion following fires*. Atmospheric Dispersion Liaison Group, 2005.
Annual report 2003/2004.
54. *Het Nieuwe Nationaal Model – model voor de verspreiding van luchtverontreiniging uit bronnen voor korte afstanden*, R98/306, 1998.
55. R.D.A. Scholten, J.J. Erbrink, en A.v. Melle, *Deelrapport IV – beschrijving rekenmodule voor de invloed van een gebouw op de verspreiding van een rookpluim*, 1998.
56. E.S. Kooi en R. van Loon, *NNM Gebouwmodule - Beschrijving en analyse van de NNM gebouwmodule ten behoeve van de implementatie in OPS-ST*, 2024-0031, 2024.

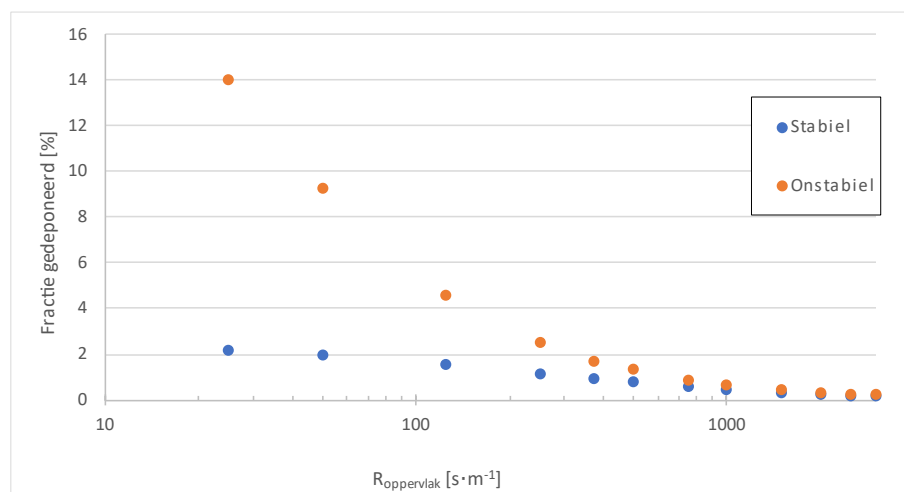
5 Bijlage 1 Droge depositie in NPK-Puff

In deze bijlage is een nadere analyse beschreven van de modellering van droge depositie in NPK-Puff. De depositiesnelheid is afhankelijk van weersomstandigheden en locatie. Daarom is altijd gekeken naar alle depositie van een wolk en het eindpunt van 1 uur.

In plaats van naar depositiesnelheid wordt in deze analyse gekeken naar de gedeponeerde fractie, dat wil zeggen: het percentage dat een pluim verliest door depositie gedurende een uur.

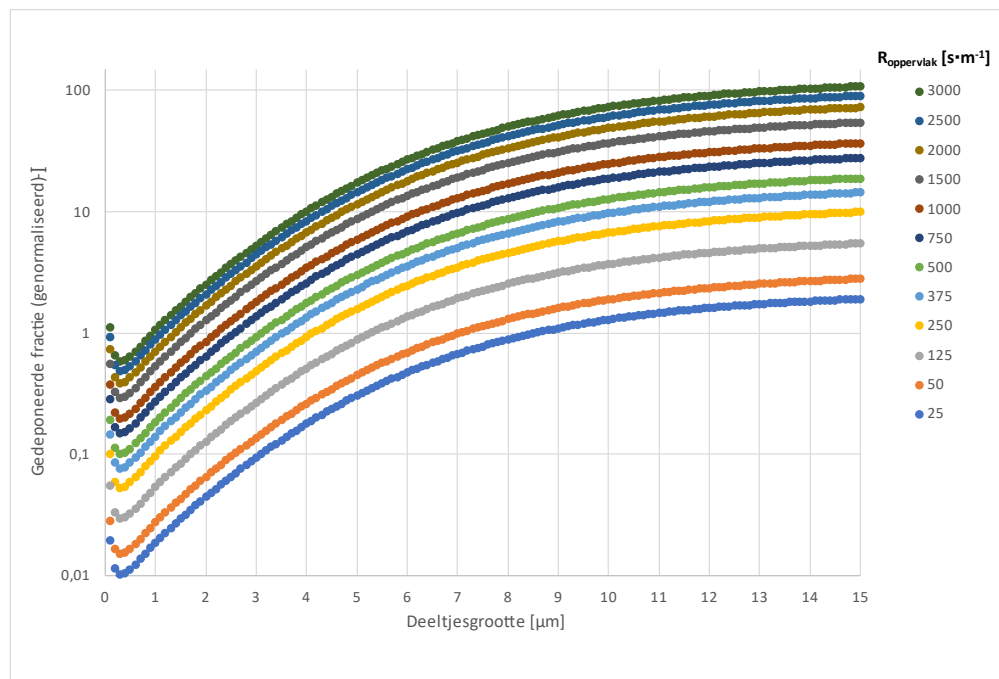
In een eerste analyse is gekeken naar de code met betrekking tot gasdepositie in NPK-Puff. Hierbij wordt gewerkt met de drie weerstanden zoals beschreven in paragraaf 3.4.1, waarbij de $R_{\text{aerodynamisch}}$ en de $R_{\text{dunnelaag}}$ afhankelijk zijn van het weer en dynamica. De $R_{\text{oppervlak}}$ (in NPK-Puff R_c of 'canopy'-weerstand genoemd) beschrijft de interactie tussen het deeltje en het oppervlakte waaraan het zich moet hechten, en is dus stofafhankelijk. In de analyse is onderzocht hoe de mate van depositie afhangt van de waarde van de parameter $R_{\text{oppervlak}}$. Hiervoor is $R_{\text{oppervlak}}$ gevarieerd tussen 25 tot $3000 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ (de defaultwaarde gebruikt om aerosolen te modelleren is $R_{\text{oppervlak}} = 500 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$). De berekeningen zijn gedaan bij de weersituaties beschreven in paragraaf 3.4.3.1.

In Figuur 5.1 is de gedeponeerde fractie gegeven voor verschillende waarden van $R_{\text{oppervlak}}$, voor stabiel en onstabiel weer. Bij stabiele condities is er minder depositie dan bij onstabiele condities (het verschil is een factor 1,3 tot 6,5). Bij grotere weerstand ($R_{\text{oppervlak}}$) is het verschil tussen de twee weertypen kleiner. Dit komt omdat de mate van depositie in dat geval met name afhangt van de waarde $R_{\text{oppervlak}}$, en de relatieve bijdragen van de weersafhankelijke $R_{\text{aerodynamisch}}$ en de $R_{\text{dunnelaag}}$ aan de totale depositieweerstand klein zijn.

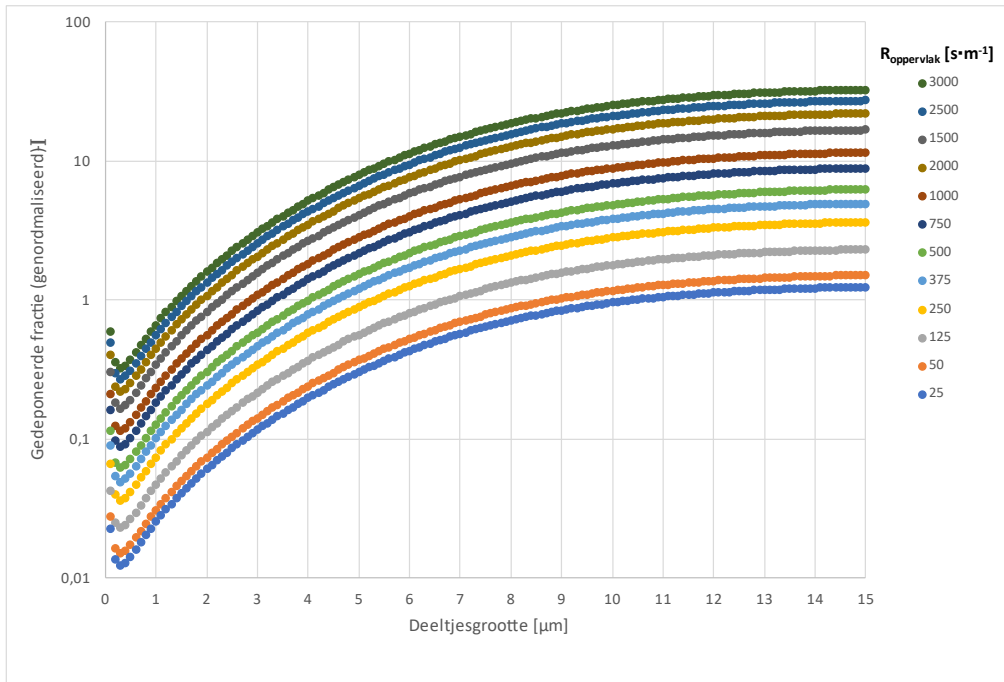


Figuur 5.1 De droge depositie (als percentage van de pluim) als functie van de parameter $R_{\text{oppervlak}}$ (R_c in NPK-Puff) bij twee verschillende weersituaties, voor een simulatie van 1 uur en een lozing in de eerste tijdstap. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van de formules voor gassen in NPK-Puff.

In een volgende stap zijn simulaties gedaan met de deeltjescode uit NPK-Puff. Berekeningen zijn gedaan met verschillende deeltjesgroottes (0,1 tot 30 μm , in stappen van 0,1 μm) voor verschillende waarden van $R_{\text{oppervlak}}$ (25 tot 3000 $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$). Resultaten zijn gegeven in Figuur 5.2 (voor onstabiel weer) en Figuur 5.3 (voor stabiel weer). Deze resultaten zijn genormaliseerd met de resultaten uit Figuur 5.1 voor gassen. Het verloop van depositiefractie (y-as) als functie van deeltjesgrootte (x-as) is voor de gebruikte weerstanden ($R_{\text{oppervlak}}$) steeds hetzelfde; alleen de hoogte verschilt. De depositiefractie is het kleinst als de deeltjesgrootte een waarde heeft tussen 0,3 en 0,6 μm . Verder blijkt dat voor deeltjes tot ongeveer 5 μm de gedeponeerde fractie voor de meeste waarden van $R_{\text{oppervlak}}$ minder dan een orde van grootte verschilt van de resultaten gegeven van het gasmodel.

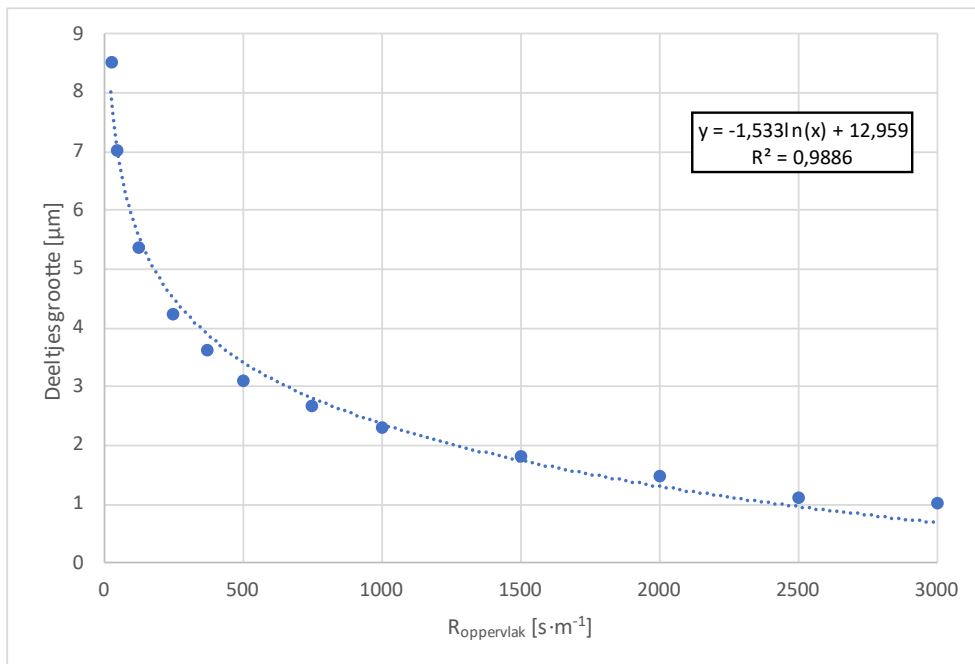


Figuur 5.2 De gedeponeerde fractie als functie van de deeltjesgrootte voor verschillende waarden van $R_{\text{oppervlak}}$ (R_c in NPK-Puff) bij onstabiel weer. De resultaten zijn genormaliseerd met de resultaten uit Figuur 5.1. Een waarde >1 betekent dat de deeltjes meer deponeren dan gas, een waarde <1 betekent het tegenovergestelde.



Figuur 5.3 Zoals Figuur 5.2 maar voor stabiele condities.

Een 'samenvatting' van deze resultaten is gegeven in Figuur 5.4 (voor onstabiel weer). Deze figuur laat zien welke deeltjesgrootte hetzelfde depositiegedrag vertoont (in de deeltjescode van NPK-Puff) met een gas gemodelleerd met een bepaalde waarde van $R_{\text{oppervlak}}$.



Figuur 5.4 Zie tekst voor beschrijving. De figuur geldt voor onstabiel weer.

De informatie uit Figuur 5.4 kan worden gebruikt om de deeltjesgrootte te vertalen naar een $R_{\text{oppervlak}}$. Dit kan gebruikt worden om de code voor gasdepositie in NPK-Puff aan te passen voor casussen waarbij vooral

grote deeltjes of juist vooral kleine deeltjes verwacht worden. Een gas met $R_{\text{oppervlak}}$ van $25 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ heeft dezelfde depositiesnelheid als deeltjes van $8,5 - 10,5 \text{ }\mu\text{m}$, terwijl een $R_{\text{oppervlak}}$ van $3000 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ overeenkomt met deeltjes tussen $1,0$ en $1,4 \text{ }\mu\text{m}$ ⁹.

⁹ In dit geval komt een waarde van $R_{\text{oppervlak}}$ ook overeen met deeltjes kleiner dan $0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Dit blijkt ook uit Figuur 6.2: de (genormaliseerde) deponerende fractie is daar >1 voor kleine deeltjes en $R_{\text{oppervlak}} = 3000 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$.

6 Bijlage 2 Inzichten uit windtunnelexperimenten van Hall et al.

In een review van de literatuur over pluimstijging bij branden [53] wordt aangegeven dat de pluimstijging berekend kan worden met de 'dimensionless buoyancy flux'. Een veelgebruikte formule voor deze parameter is:

$$F^* = \frac{F}{u_{\text{ref}}^3 \cdot L}$$

waarin F^* de dimensieloze buoyancy flux is, F , de (niet-dimensieloze) buoyancy flux in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-4}$, u_{ref} de windsnelheid op referentiehoogte in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ en L een karakteristieke lengtemaat van het gebouw zoals de gebouwhoogte (H) of -breedte (W), in m. De buoyancy flux is voor warme rookgassen bij benadering gelijk aan $8,5 \cdot qh$, met qh de convectieve warmte in MW.

Verder wordt in de literatuur ook de 'lift-off parameter' gebruikt. Deze is gedefinieerd als:

$$L_p = \frac{g \cdot h \cdot \Delta\rho / \rho_a}{u_*^2}$$

met g de zwaartekrachtsconstante (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), h de diepte van de wolk (in m), $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil tussen lucht en rookwolk (in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ_a de dichtheid van lucht bij omgevingstemperatuur (in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) en u_* de wrijvingsweerstand van lucht (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

De RIVM review van de methode voor het berekenen van omgevingsrisico's van PGS15-opslagen [7] bevat een samenvatting wanneer wel of niet pluimstijging verwacht kan worden. Deze samenvatting is gebaseerd op observaties van David Hall tijdens windtunnel experimenten en zijn review van de literatuur over pluimstijging bij branden [53]. De samenvatting is hieronder vertaald naar het Nederlands:

- Als een gebouwstructuur grotendeels intact is, zal de hoeveelheid vrijkomende warmte beperkt zijn en zal de resulterende rookpluim waarschijnlijk dicht bij grondniveau blijven (geen duidelijke opstijging vanaf de grond). Sterk stijgende rookpluimen zijn alleen waarschijnlijk als er sprake is van grotendeels onbeperkte ventilatie (en een navenant hoge emissie van warmte) als gevolg van gedeeltelijke instorting van de gebouwstructuur.
- Er is geen duidelijk "lift-off" criterium beschikbaar dat onderscheidt of rookpluimen al dan niet van de grond opstijgen. In plaats daarvan is er een geleidelijke overgang.
- Voor emissies met een beperkt stijgvormogen kan de pluim in twee delen uiteenvallen: een deel in de recirculatiezone wordt ingevangen, mengt, afkoelt en daarna neutraal verder voortbeweegt, en een ander deel dat niet in de lijwervel terecht

- komt, of aan de lijwervel ontsnapt, en voldoende drijfvermogen heeft om op te stijgen.
- Voor compacte lozingen, bijvoorbeeld uit één of enkele openingen, is het lift-off criterium van Briggs ($L_p > 29$) een goede indicator voor afnames van de concentraties op grondniveau met minimaal een factor 10. Voor volledige pluimstijging is het criterium ongeveer een orde van grootte groter (dus $L_p > 10 \times 29$).
 - Als alternatief voor het lift-off criterium van Briggs ($L_p > 29$) kan een dimensieloze buoyancy flux parameter, $F \cdot (u_{ref}^3 \cdot H)^{-1}$, worden gebruikt, waarin F de buoyancy flux is, u_{ref} de windsnelheid op gebouwhoogte en H de gebouwhoogte.
 - Voor compacte emissies beginnen de grondconcentraties te verminderen als de dimensieloze buoyancy flux, $F \cdot (u_{ref}^3 \cdot H)^{-1}$, groter is dan 0,02. Verminderingen van een factor 10 beginnen op te treden als de dimensieloze buoyancy flux rond 0,11 ligt (gelijk aan $L_p = 29$). Als de dimensieloze buoyancy flux groter is dan 1, zal de rookpluim bijna volledig van de grond opstijgen.
 - Als de emissie meer verspreid over een gebouw naar buiten komt, zal een groter deel van de emissie worden ingesloten in de lijwervel achter het gebouw. Als gevolg daarvan kan de pluimstijging sterk worden beperkt. Voor verspreide emissies kunnen concentraties op grondniveau ten opzichte van compacte releases een factor 100 hoger zijn.
 - Het opstijgen van de pluim kan daarom niet in een eenvoudige parameter worden gevat. In plaats daarvan moet rekening worden gehouden met alle karakteristieken van de emissie.
 - De effecten van de windrichting en de vorm van het gebouw kunnen de concentraties in het nabije veld aan de grond tot een orde van grootte veranderen. De laagste grondconcentraties in het nabije veld treden op als de lange zijde van het gebouw 30° naar de wind is gericht. In het verre veld worden concentraties op grondniveau, pluimhoogten en maximale concentraties nauwelijks beïnvloed door de vorm en de oriëntatie van het gebouw.

Er zijn dus veel parameters die de verspreiding van rookgassen vanuit een gebouw beïnvloeden. Het effect van een gebouw is dat concentraties aan de grond hoger zijn. De invloed van een gebouw neemt onder andere toe met de grootte van het gebouw en de windsnelheid. Voor een voldoende groot gebouw kan het effect tot op kilometers afstand relevant (merkbaar, meetbaar) zijn. Bij kleine obstakels (zoals containers) is het effect doorgaans beperkt.

7 Bijlage 3 Gevoeligheidsanalyse met de NNM gebouwmodule

7.1 Inleiding

Het Nieuw Nationaal Model [54] is de voorgeschreven rekenmethode voor Nederlandse luchtkwaliteitsberekeningen. Deze methode bevat ook een onderdeel waarin de invloed van een eventueel gebouw in de buurt van de bron op de luchtverspreiding wordt bepaald. Deze "gebouwmodule" is in de jaren '80 en '90 van de vorige eeuw door KEMA ontwikkeld. De gebouwmodule is beschreven in Deelrapport IV van het Paarse Boekje [55] en, in meer detail, in een recent RIVM rapport [56].

De gebouwmodule gaat ervan uit dat er door toedoen van de gebouwinvloed twee pluimen ontstaan:

- De "lijwervelpluim" heeft betrekking op het deel van de emissie dat eerst in de lijwervel van het gebouw wordt ingevangen, en zich vervolgens op grondhoogte verder verplaatst.
- De "bovenliggende pluim" heeft betrekking op het resterende deel van de emissie dat boven de lijwervel blijft. Deze pluim kan vanaf het uitstroompunt stijgen onder invloed van warmte of impuls.

RIVM heeft de code van de NNM gebouwmodule omgezet naar Visual basic. Met die code kunnen in Excel batchgewijs uitkomsten berekend worden. Deze Excel tool is gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse van de hoogte van de bovenliggende pluim en de massafractie van de lijwervelpluim. De gevoeligheidsanalyse bestaat uit een Monte-Carlo simulatie met ruim 87.000 runs, waarin de weersomstandigheden, gebouwenkenmerken en brandkenmerken zijn gevarieerd. Het resultaat wordt beschreven in de volgende paragrafen.

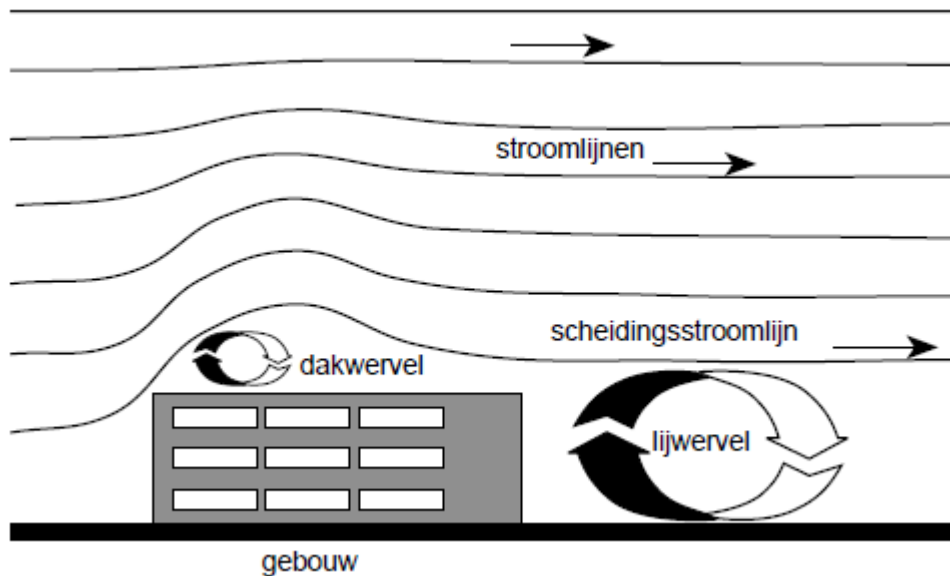
Een beperking van de NNM gebouwmodule is dat de hoogte van de bovenliggende pluim berekend wordt op basis van correlaties voor neutraal weer.

7.2 Opzet van de gebouwmodule en invoerparameters voor de gevoeligheidsanalyse

De gebouwmodule berekent allereerst de hoogtes van verschillende stroomlijnen rond het gebouw. Deze hoogtes hangen af van meteokenmerken zoals windsnelheid en fluctuaties in de wind, en van gebouwkenmerken zoals de lengte, breedte en hoogte van het gebouw. Emissies op of nabij het gebouw worden beïnvloed door deze stroomlijnen. In het bijzonder kan een deel van de emissie ingevangen worden in de lijwervel achter het gebouw.

De gebouwmodule gaat ervan uit dat er twee pluimen ontstaan: de lijwervelpluim en de bovenliggende pluim (zie voorgaande paragraaf). De massaverdeling over de twee pluimen hangt af van de positie van het uitstroompunt ten opzichte van de stroomlijnen en van de snelheid en warmte van de uitstroming. Voor beide pluimen berekent de gebouwmodule de effectieve beginhoogte en beginwaarden voor de

Gaussische dispersiecoëfficiënten ($\sigma_{y,0}$ en $\sigma_{z,0}$). Kort gezegd hangen ook deze parameters af van de meteo-, gebouw- en emissiekenmerken.



Figuur 7.1 Stroomlijnen rond een gebouw volgens de NNM gebouwmodule. Figuur overgenomen uit [55].

De NNM gebouwmodule gebruikt de volgende invoerparameters om de gebouwinvloed en de beginkenmerken van de twee pluimen te berekenen:

Tabel 7.1 Invoerparameters van de NNM gebouwmodule

Nr	Parameter	Label	Eenheid
1	Omgevingstemperatuur	Tamb	°C
2	Windsnelheid op 10 m hoogte	U_10	m·s ⁻¹
3	Wrijvingssnelheid	USTER	m·s ⁻¹
4	Windrichting	WINDHOEK	graden
5	Turbulentie-intensiteit in laterale richting	TURBIY	-
6	Turbulentie-intensiteit in verticale richting	TURBIZ	-
7	Variatie van de windsnelheid in laterale richting	sigma_vs	m·s ⁻¹
8	Variatie van de windsnelheid in verticale richting	sigma_w	m·s ⁻¹
9	Ruwheidslengte van de omgeving	z_0	m
10	X-coördinaat van het midden van het gebouw	XCENTR	m
11	Y-coördinaat van het midden van het gebouw	YCENTR	m
12	Hoogte van het gebouw	H	m
13	Lengte van de lange zijde van het gebouw	ZYLANG	m
14	Lengte van de korte zijde van het gebouw	ZYKORT	m

Nr	Parameter	Label	Eenheid
15	Hoek van de lange zijde van het gebouw ten opzichte van de oost-west-lijn (tegen de klok in)	HOEKLANG	graden
16	X-coördinaat van het uitstroompunt	XPYP	m
17	Z-coördinaat van het uitstroompunt	YPYP	m
18	Hoogte van het uitstroompunt	HPYP	m
19	Inwendige diameter van de uitlaat	DI	m
20	Uitwendige diameter van de uitlaat	DU	m
21	Volumedebiet van de emissie	QNM3	$\text{N}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
22	Warmte van de emissie	QH	MW
23	Massadebiet van de verontreiniging	QEMIS	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
24	Verticale uitstroomsnelheid	WS	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

In de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar twee outputs van de gebouwmodule:

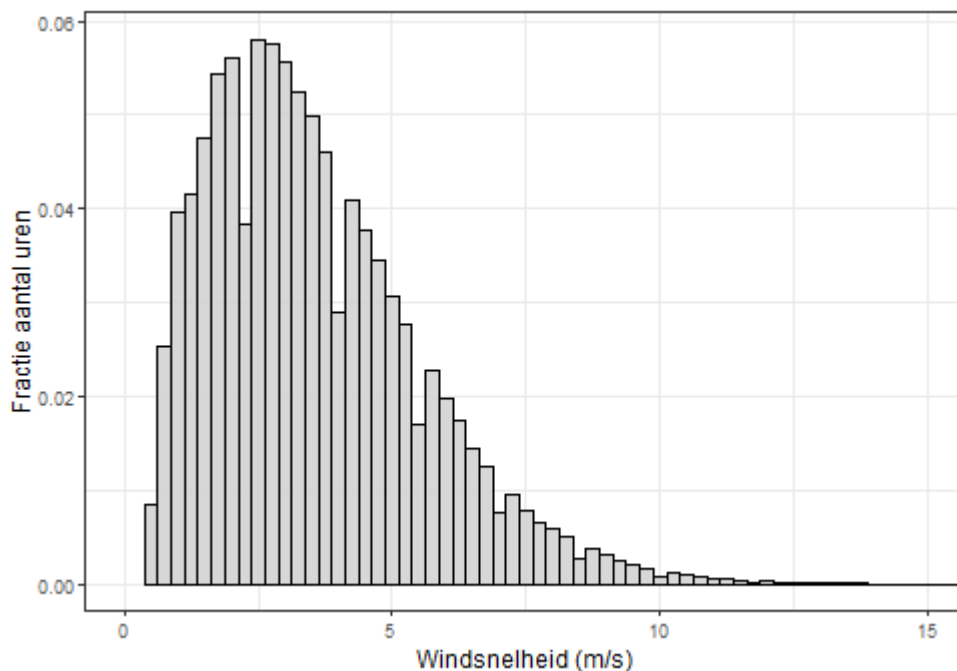
- De hoogte van de bovenliggende pluim na initiële pluimstijging.
- De massaverdeling tussen de lijwervelpluim en de bovenliggende pluim.

Overige output parameters werden voor deze studie minder relevant geacht, maar zijn eventueel nog wel beschikbaar.

7.2.1

Invoerwaarden voor meteoparameters en ruwheidslengte

De eerste 8 parameters in Tabel 7.1 zijn meteogegevens. Om hiervoor realistische waarden te krijgen is een analyse gedaan van uurlijkse meteogegevens over de periode 2012 t/m 2021. In totaal betreft dit ruim 87.000 uren. De gegevens hebben betrekking op de regio Midden-Nederland en gelden voor een ruwheidslengte van 0,25 m.



Figuur 7.2 Verdeling van windsnelheid over de periode 2012 t/m 2021

De verdeling van windsnelheid (op 10 m hoogte) over de sample periode is weergegeven in Figuur 7.2. De figuur laat zien dat windsnelheden tussen 2 en 4 m·s⁻¹ het vaakst voorkomen.

De verschillende meteoparameters van de gebouwmodule hangen onderling samen. Daarom is ervoor gekozen om voor de gevoeligheidsanalyse uit te gaan van onderling samenhangende waarden voor individuele uren. Per uur zijn verschillende gebouwkenmerken (zie paragraaf 7.2.2) en brandkenmerken (zie paragraaf 7.2.3) toegevoegd. Op deze manier zijn ruim 87.000 branden met verschillende karakteristieken gesimuleerd.

De ruwheidslengte is voor de gevoeligheidsanalyse minder relevant en is in alle runs gelijkgesteld aan 0,25 m.

7.2.2 *Invoerwaarden voor gebouwkenmerken*

De parameters 10 t/m 15 in Tabel 7.1 hebben betrekking op het gebouw. Het middelpunt van het gebouw (XCENTR en YCENTR) is niet relevant voor de analyse. Voor de overige parameters is per run een random waarde bepaald, met de volgende restricties:

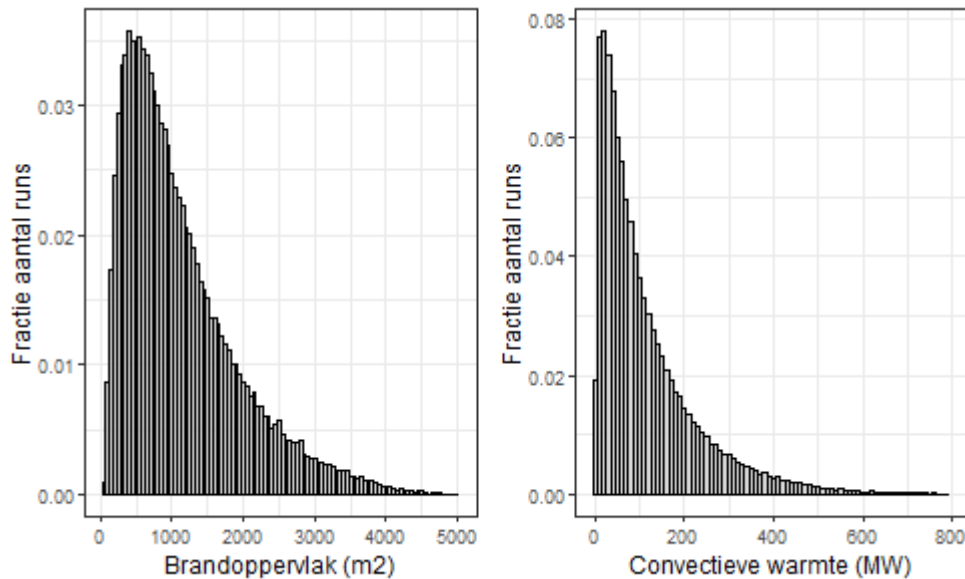
- De lengte en breedte van het gebouw zijn per run onafhankelijk van elkaar gekozen, elk op basis van een uniforme verdeling tussen 20 m en 80 m.
- De gebouwhoogte is per run random gekozen, op basis van een uniforme verdeling tussen 6 en 20 m.
- De hoek van de lange zijde van het gebouw ten opzichte van de wind (HOEKLING) is per run random gekozen, op basis van een uniforme verdeling van 0 tot 180 graden. Omdat het gebouw rechthoekig is, zijn hoeken groter dan 180 graden niet mogelijk.

7.2.3 *Brandkenmerken*

De brandkenmerken zijn geen invoerwaarden maar bepalen de emissiekenmerken (zie volgende paragraaf). Hiervoor zijn de volgende aannames gedaan:

- Het brandoppervlak varieert per run random van 10% tot 80% van het gebouwoppervlak, op basis van een uniforme verdeling tussen de ondergrens en de bovengrens.
- De brandsnelheid per eenheid oppervlak varieert per run random van 0,0025 kg·(s·m²)⁻¹ tot 0,1 kg·(s·m²)⁻¹, op basis van een uniforme verdeling tussen de ondergrens en de bovengrens.
- De convectieve warmte per massa-eenheid is in alle runs gelijk aan 2 MW·kg⁻¹. De totale emissiewarmte (QH) varieert afdoende door de variatie in brandoppervlak en brandsnelheid.
- Uitstroomhoogte: random variërend tussen 50% en 100% van de gebouwhoogte, op basis van een uniforme verdeling.
- Locatie waarop de rookgassen vrijkomen: langs de zijwand van het gebouw, random variërend in alle richtingen op basis van een uniforme verdeling over de richtingen.

De verdeling van brandoppervlakken en convectieve warmtes in het sample is weergegeven in Figuur 7.3. De mediaan van het brandoppervlak is 920 m². De mediaan van de convectieve warmte is 80 MW.



Figuur 7.3 Distributie van brandoppervlak en convectieve warmte in het sample

7.2.4

Invoerwaarden voor emissiekenmerken

De parameters 16 t/m 24 in Tabel 7.1 hebben betrekking op de uitstroming.

- XPYP en YPYP bepalen de locatie van het uitstroompunt. Het emissiepunt ligt steeds op een zijwand van het gebouw. De richting vanaf het middelpunt van het gebouw tot het emissiepunt is per run random gekozen op basis van een uniforme verdeling voor alle mogelijke hoeken (0 tot 360 graden).
- Voor de hoogte van het uitstroompunt (HPYP) is uitgegaan van een uniforme verdeling tussen 0,5 gebouwhoogte en 1 gebouwhoogte.
- De inwendige (DI) en uitwendige (DU) diameter van de uitlaat is gelijkgesteld de diameter van het brandoppervlak, met de aanname dat het brandoppervlak (zie vorige paragraaf) cirkelvormig is.
- Het volumedebiet van de uitstroming bij standaard temperatuur en druk (QNM3) betreft de totale hoeveelheid verbrandingsgassen en ingemengd stikstof dat de brandhaard verlaat. Hiervoor is aangenomen dat het massadebiet 6 keer de verbrandingssnelheid is, en de dichtheid $1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. De parameter is waarschijnlijk niet erg relevant voor de uitkomsten.
- De warmte van de emissie (QH) is berekend op basis van de eerder genoemde brandkenmerken (brandoppervlak, brandsnelheid per eenheid oppervlak en convectieve warmte per massa-eenheid).
- Het massadebiet (QEMIS) is het product van het volumedebiet bij standaard temperatuur en druk (QNM3) en de dichtheid van lucht bij die temperatuur en druk ($1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).
- De verticale snelheid van de bron is in alle runs gelijkgesteld aan $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Op die manier hangt de pluimstijging alleen af van de warmte van de emissie.

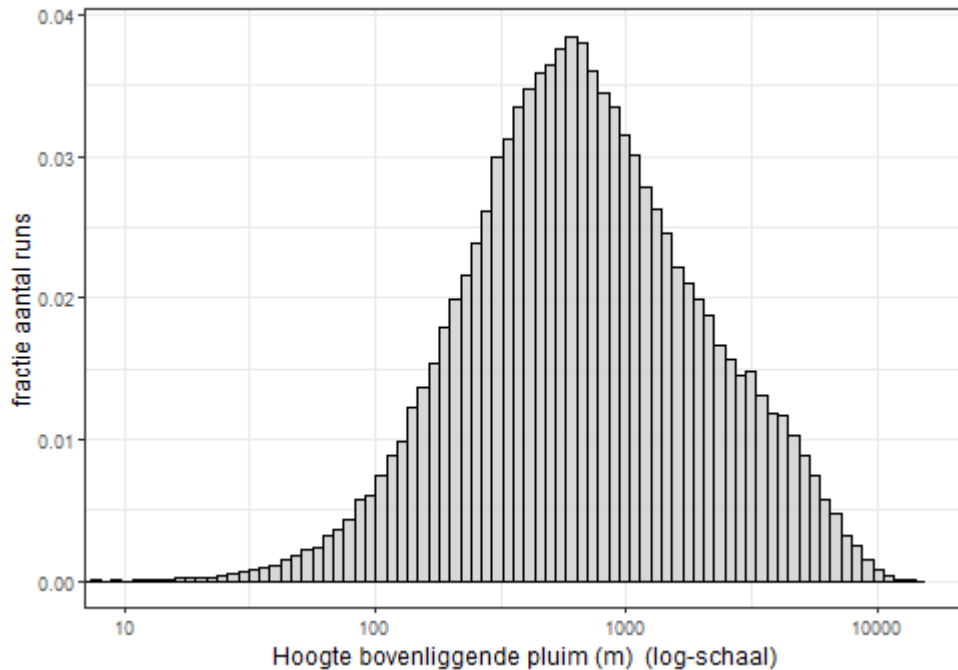
7.3 Resultaten

7.3.1 Resultaten op hoofdlijnen

In deze gevoeligheidsanalyse is gekeken naar de hoogte die de bovenliggende pluim bereikt en naar de massaverdeling tussen de bovenliggende pluim en de lijwervelpluim.

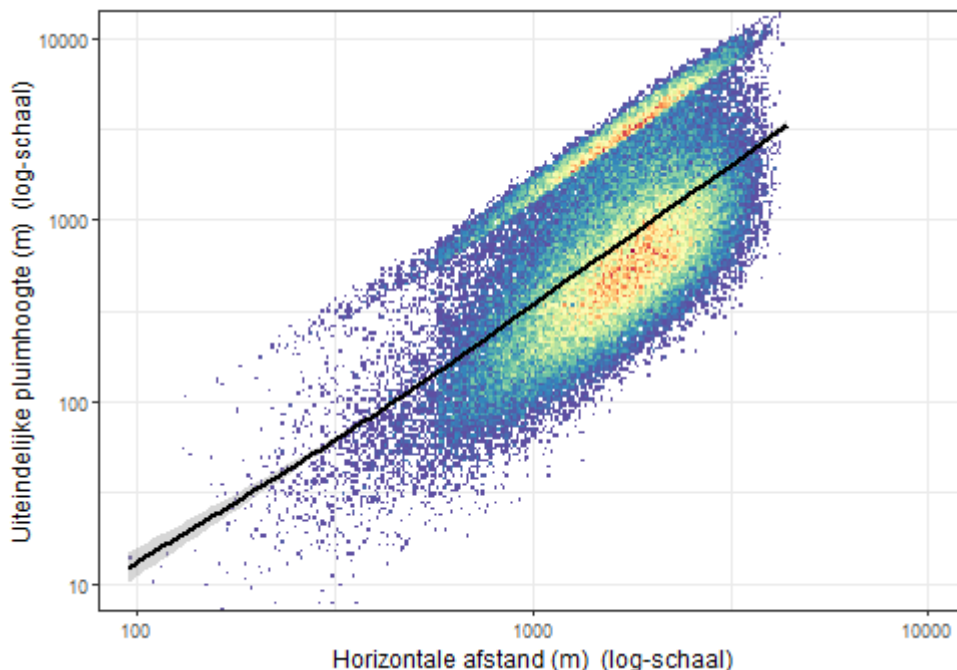
7.3.1.1 Pluimhoogte

De verdeling van de hoogte van de bovenliggende pluim is weergegeven in Figuur 7.4. Het betreft de hoogte die na pluimstijging door warmte wordt bereikt. De schaalverdeling is logaritmisch (log10). De hoogte na pluimstijging varieert ruwweg van 100 m (5%) tot 4 km (95%). De mediaan van de berekende hoogtes is 650 m.



Figuur 7.4 Distributie van de hoogte van de bovenliggende pluim

Het model berekent ook over welke afstand (horizontaal) de pluim stijgt (Figuur 7.5). Deze horizontale afstand varieert in de simulaties van 400 m (5%) tot 3 km (95%).



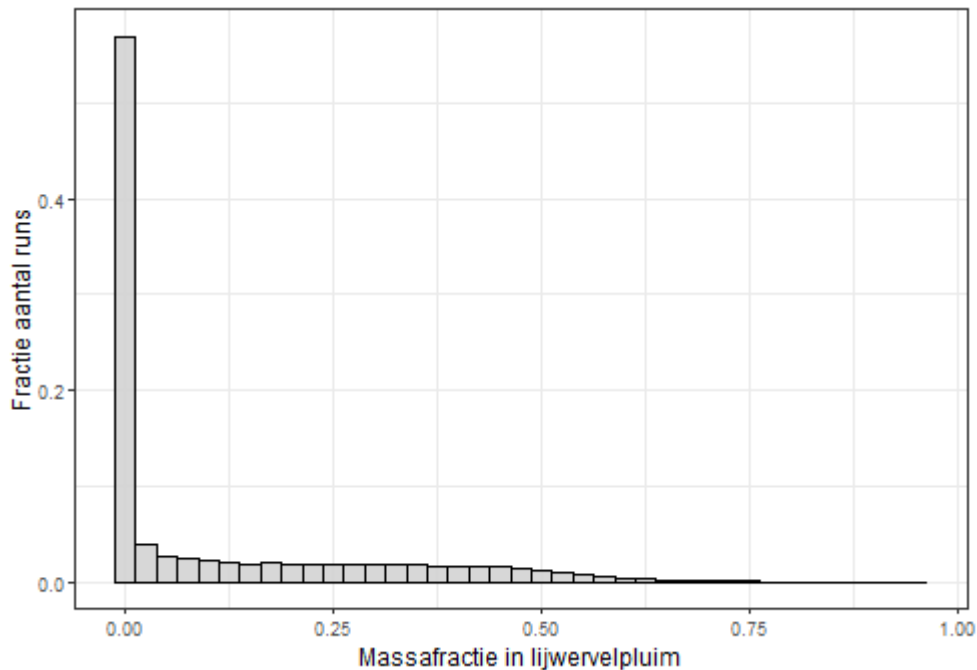
Figuur 7.5 Horizontale afstand tot het bereiken van de uiteindelijke pluimstijging

7.3.1.2

Massaverdeling over de twee pluimen

De massafractie die in de lijwervelpluim terecht komt, is weergegeven in Figuur 7.6. Het resterende deel van de massa wordt door het model toegekend aan de bovenliggende pluim.

In bijna de helft van alle runs is de massafractie voor de lijwervelpluim gelijk aan 0. De bronterm komt dan volledig in de bovenliggende pluim terecht. Voor de overige situaties varieert de massafractie van de lijwervelpluim ruwweg van 0 tot 0,75.



Figuur 7.6 Distributie van de massafractie in de lijwervelpluim

De massaverdeling over de twee pluimen (Figuur 7.6) correleert sterk met de hoogte van de bovenliggende pluim (Figuur 7.4). Anders gezegd: hoe meer pluimstijging, hoe minder massa in de lijwervel ingemengd wordt.

7.3.2 Vergelijking van de berekende pluimhoogte met de correlaties van Briggs en Mills

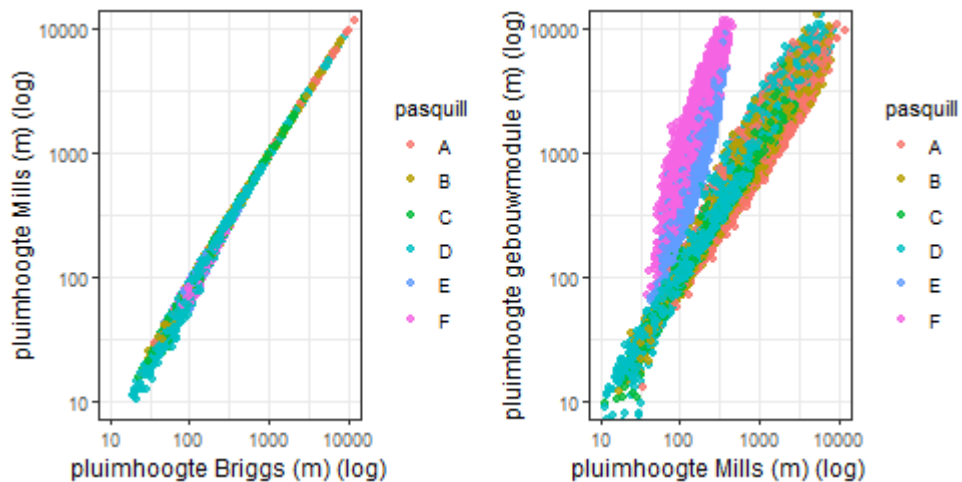
De correlaties voor pluimstijging van Briggs en Mills zijn aan de dataset toegevoegd om een vergelijking te kunnen maken met de pluimhoogte die de NNM gebouwmodule berekent. Een beperking daarbij is dat noch de Pasquill klasse noch de bewolingsgraad waaruit de Pasquill klasse berekend kan worden, beschikbaar waren in de set met meteogegevens. Als benadering is de bewolingsgraad afgeleid uit de stralingswarmte. Dat leverde een schatting van de Pasquill klasse op voor alle runs op tijdstippen overdag en voor 28% van de runs voor tijdstippen 's nachts.

De resultaten van de vergelijking zijn weergegeven in Figuur 7.7.

- De linker figuur toont de pluimhoogtes die berekend zijn met de correlaties van Briggs (x-as) en Mills (y-as). Over het algemeen zijn de verschillen tussen de twee verwachtingen beperkt. Alleen aan de onderkant van de grafiek geeft de correlatie van Mills iets lagere pluimhoogtes dan de correlatie van Briggs. Blijkbaar is de correctie van Mills vooral van invloed als de warmte van de emissie beperkt is.
- De rechter figuur toont de pluimhoogtes die berekend zijn met de correlaties van Mills (x-as) en met de NNM gebouwmodule (y-as). Ook in dit geval is er voor veel datapunten redelijk goede overeenstemming, met twee uitzonderingen:
 - De onderkant van de grafiek bevat een aantal datapunten waarvoor de NNM gebouwmodule ten opzichte van de Mills correlatie (iets) lagere pluimhoogtes berekent. Mogelijk speelt

de gebouwinvloed hier een rol: de correlatie van Mills houdt geen rekening met gebouwinvloeden.

- Voor stabiel weer (Pasquill klassen E en F) berekent de gebouwmodule grotere pluimhoogten dan de correlatie van Mills. Dat komt mogelijk doordat de NNM gebouwmodule de pluimhoogte berekent voor neutraal weer. Bij stabiel weer (en alle andere parameters gelijk) is de pluimstijging beperkter dan bij instabiel of neutraal weer.

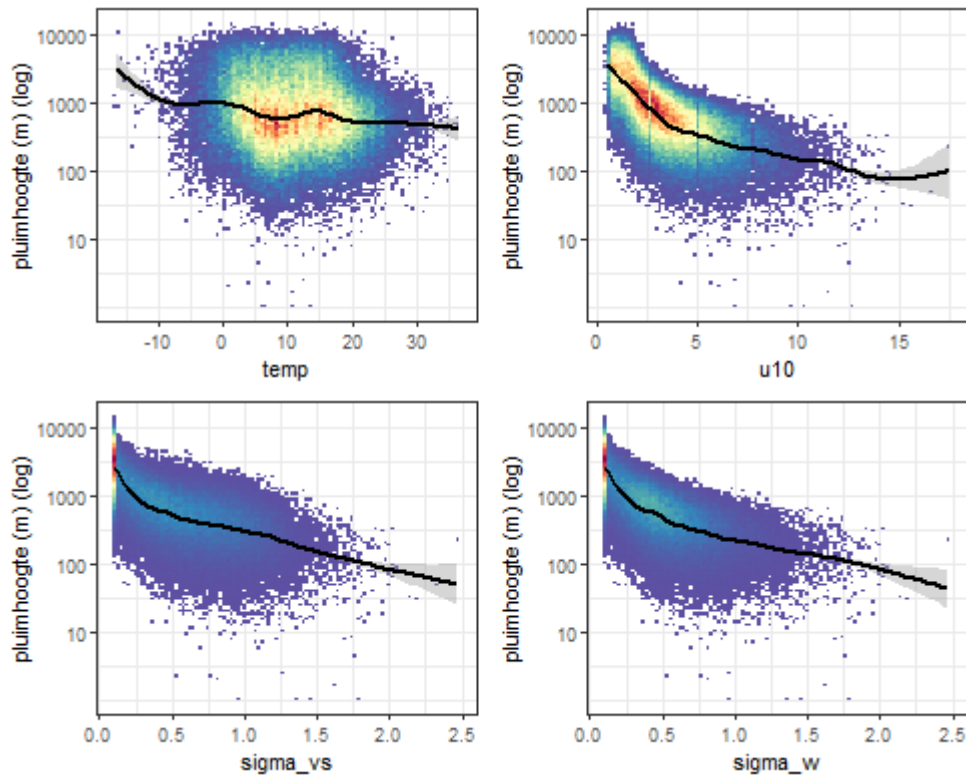


Figuur 7.7 Vergelijking van pluimhoogtes volgens Briggs en Mills (links) en volgens Mills en de NNM gebouwmodule (rechts)

7.3.3

Invloed van invoerparameters op de uitkomsten

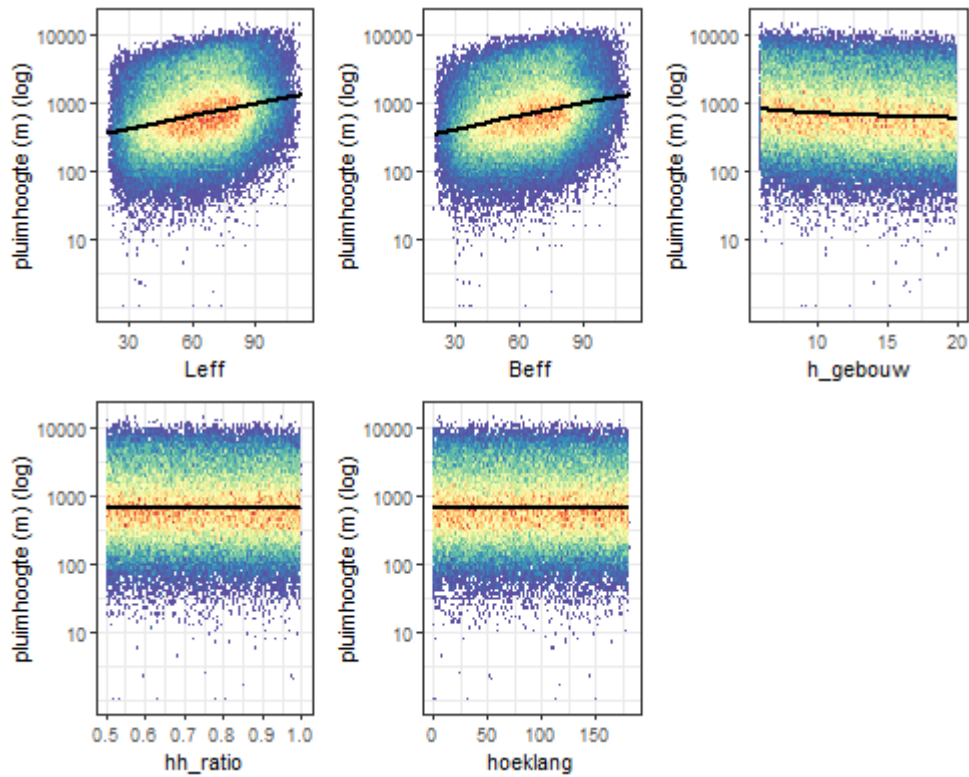
In deze paragraaf wordt besproken wat de invloed is van verschillende invoerparameters op de hoogte van de bovenliggende pluim en de massaverdeling over de twee pluimen. In het algemeen geldt dat parameters die invloed hebben op de pluimhoogte ook invloed hebben op de massaverdeling, en andersom. Daarom wordt eerst de invloed op de pluimhoogte besproken. Daarna wordt voor invloedrijke parameters de massaverdeling getoond.



Figuur 7.8 Invloed van meteoparameters op pluimhoogte

In Figuur 7.8 is de invloed van vier meteoparameters op de hoogte van de bovenliggende pluim weergegeven.

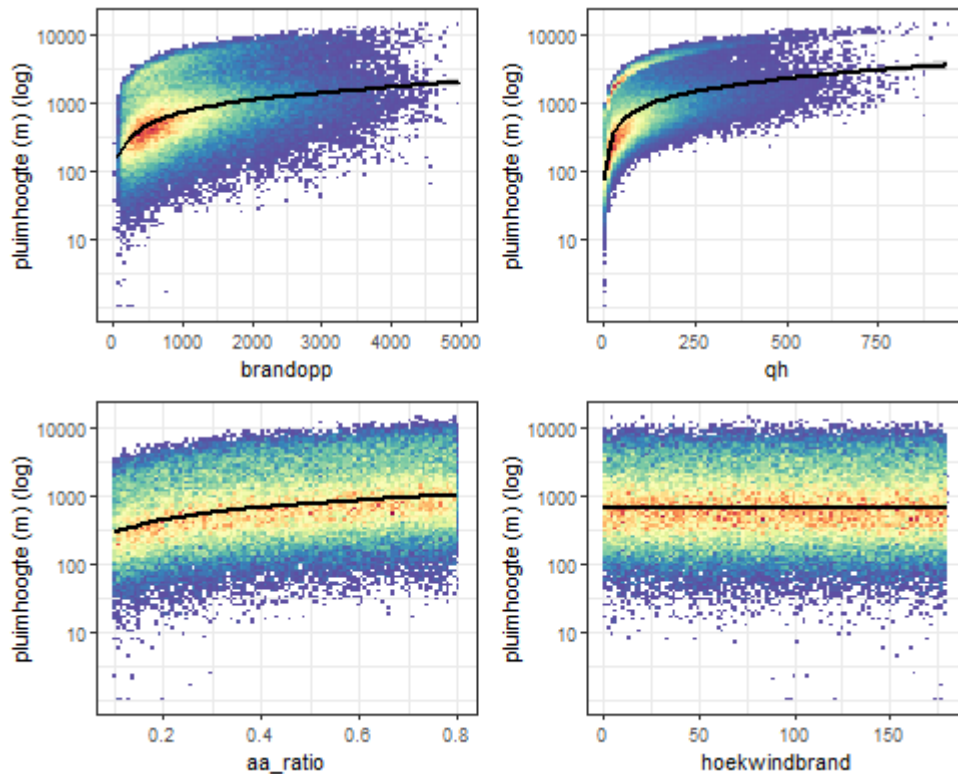
- De omgevingstemperatuur (temp) heeft geen duidelijke invloed op de berekende pluimhoogte: de uitkomsten voor lage verschillen zijn niet wezenlijk anders dan die voor hoge temperaturen.
- De windsnelheid (u10) is wel van invloed op de uitkomsten: bij toenemende windsnelheid neemt de pluimhoogte duidelijk af.
- De windfluctuaties (sigma_vs en sigma_w) correleren met de windsnelheid en vertonen eenzelfde patroon.



Figuur 7.9 Invloed van gebouwkenmerken op pluimhoogte

In Figuur 7.9 is de invloed van vijf gebouwkenmerken op de hoogte van de bovenliggende pluim weergegeven.

- De effectieve lengte (Leff) en breedte (Beff) van het gebouw correleren met de pluimhoogte. Het effect is niet sterk en hangt waarschijnlijk samen met de grotere brandoppervlakken (meer warmte) die voor grotere gebouwen zijn berekend in de invoerset.
- De hoogte van het gebouw (h_gebouw) en de verhouding van de uitstroombreedte en de gebouwhoogte (hh_ratio) hebben weinig invloed op de pluimhoogte.
- Ook de hoek van het gebouw met de wind (hoeklang) heeft weinig invloed op de pluimhoogte.



Figuur 7.10 Invloed van brandkenmerken op pluimhoogte

In Figuur 7.10 is de invloed van vier brandkenmerken op de hoogte van de bovenliggende pluim weergegeven.

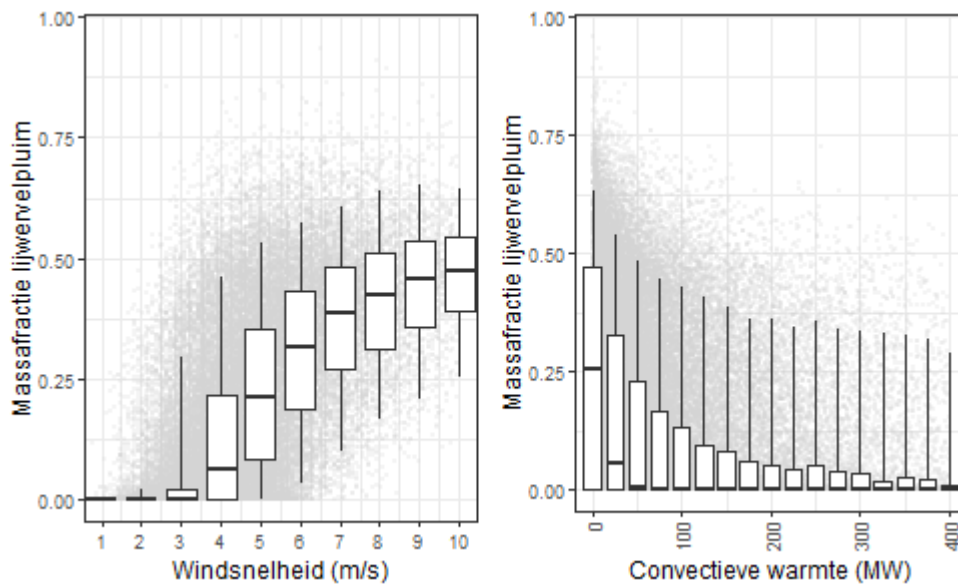
- Het brandoppervlak heeft duidelijk invloed op de pluimhoogte: hoe groter het oppervlak hoe meer pluimstijging. Dit komt omdat de vrijkomende warmte toeneemt met brandoppervlak (zie volgend punt).
- In samenhang met het brandoppervlak, correleert ook de totale hoeveelheid convectieve warmte (qh) sterk met de berekende pluimhoogte. Ten opzichte van het brandoppervlak is de spreiding van uitkomsten kleiner. Dat komt doordat uiteindelijk de warmte, en niet het brandoppervlak, de pluimstijging bepaald.¹⁰ Het effect van toenemende warmte is eerst sterk en zwakt daarna af (zoals een logaritmische functie). Dit wordt later verder besproken.
- De verhouding van het brandoppervlak en het gebouwoppervlak (aa_ratio) is veel minder relevant. Het maakt dus vooral uit wat het brandoppervlak is, en niet hoe dat zich verhoudt tot het gebouwoppervlak.
- De locatie waar de rookgassen vrijkomen ten opzichte van de wind (hoekwindbrand) heeft geen relevante invloed op de pluimhoogte.

Uit de verschillende grafieken blijkt dat de totale hoeveelheid warmte (qh) en de windsnelheid (u_{10}) de grootste invloed hebben op de pluimhoogte. Voor deze twee parameters is ook de invloed op de

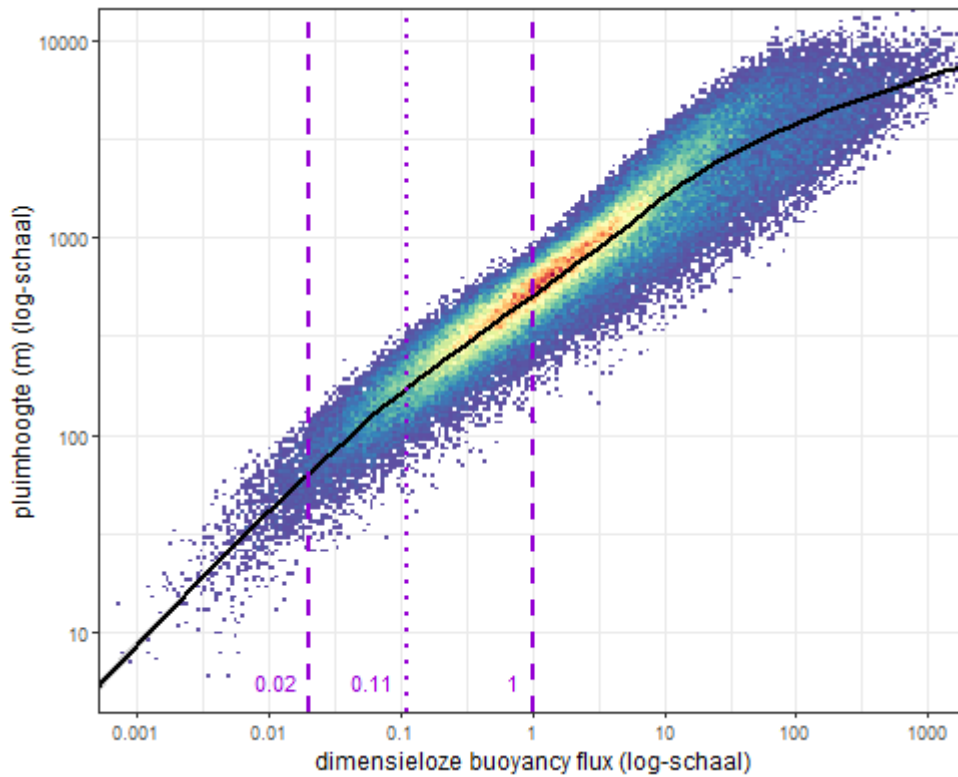
¹⁰ Het brandoppervlak hangt niet 1-op-1 samen met de totale hoeveelheid warmte die vrijkomt, omdat de brandsnelheid per oppervlakte-eenheid in de runs varieert.

massafractie in de lijwervel weergegeven, zie Figuur 7.11. In die figuur geven de 'boxen' de ligging van de helft van de punten weer (van 25% tot 75%). De 'snorharen' reiken tot 5% aan de onderkant en tot 95% aan de bovenkant.

- De grafiek voor de windsnelheid (links) laat zien dat de massafractie in de lijwervel tot 3 m/s zeer beperkt is, en tussen 4 m/s en 8 m/s sterk toeneemt. Vanaf 8 m/s bereikt de massafractie een constante waarde rond de 0,5.
- De massafractie in de lijwervel neemt af met toenemende warmte. Vooral tussen 0 en 50 MW is de afname aanzienlijk, de mediaanwaarde daalt dan naar bijna 0. Vanaf 125 MW ligt 75% van de punten tussen 0 en 0,1. De 95%-waarde daalt minder snel.



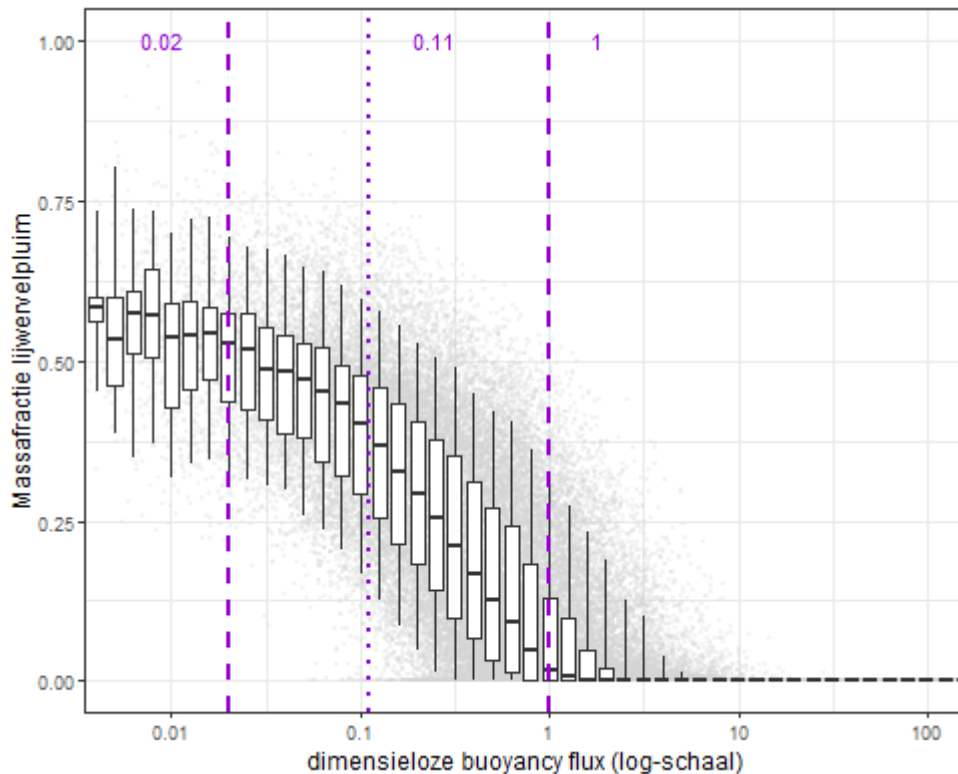
Figuur 7.11 Invloed van de windsnelheid (u_{10}) en de convectieve warmte (qh) op de massafractie van de lijwervelpluim. De boxen geven de variatie weer voor de middelste 50% van de datapunten (van 25% tot 75%). De snorharen reiken tot 5% aan de onderkant tot 95% aan de bovenkant.



Figuur 7.12 Hoogte van de bovenliggende pluim als functie van de dimensieloze buoyancy flux

In Figuur 7.12 is de hoogte van de bovenliggende pluim afgezet tegen de dimensieloze buoyancy flux ($F^* \approx 8,5 \cdot qh / (u_{10}^3 \cdot H)$, zie Bijlage 2). De parameters correleren inderdaad goed, en bij benadering lineair.

De paarse hulplijnen in de figuur tonen het gebied waar compacte emissies, volgens onderzoek van David Hall et al., veranderen van nauwelijks stijgend tot nagenoeg volledig stijgend (zie Bijlage 2). NB: In deze simulatie zijn de runs eerder 'verspreid' dan 'compact'; het brandoppervlak varieert random van 10% tot 80% van het gebouwoppervlak. Verder is de massafractie in de lijwervel (Figuur 7.13) minstens zo belangrijk.



Figuur 7.13 Massafractie in de lijwervelpluim als functie van de dimensieloze buoyancy flux.

In Figuur 7.13 is de massafractie in de lijwervelpluim weergegeven ten opzichte van de dimensieloze buoyancy flux. Deze dimensieloze flux blijkt inderdaad een redelijk goede voorspeller te zijn voor de massafractie in de lijwervel. In overeenstemming met de bevindingen uit de windtunnelexperimenten van David Hall et. al., neemt de massafractie sterk af in het gebied tussen 0,02 en 1.

7.4 Conclusies

De vergelijking met resultaten uit de gevoeligheidsanalyse waarbij de NNM gebouwmodule is gebruikt, leidt tot de volgende conclusies:

- Bij brand in een gebouw wordt een deel van de emissie ingevangen in de lijwervel van het gebouw. Het deel dat ingevangen wordt, koelt af in de lijwervel, en ondervindt daarna weinig pluimstijging.
- De dimensieloze buoyancy flux (Figuur 7.13) is de beste indicator voor de massafractie die in de lijwervel wordt ingevangen. Deze flux hangt sterk af van de windsnelheid en beperkt van de warmte.
- Overige parameters, zoals de afmetingen van het gebouw en de precieze uitstroomlocatie lijken minder relevant voor de massafractie die wordt ingevangen in de lijwervel.
- De pluimhoogte die met de correlaties van Briggs en Mills wordt berekend komt over het algemeen goed overeen met de pluimhoogte die de NNM gebouwmodule berekent voor de bovenliggende pluim. Alleen bij weinig warmte geven de correlaties mogelijk een overschatting omdat de gebouwinvloed

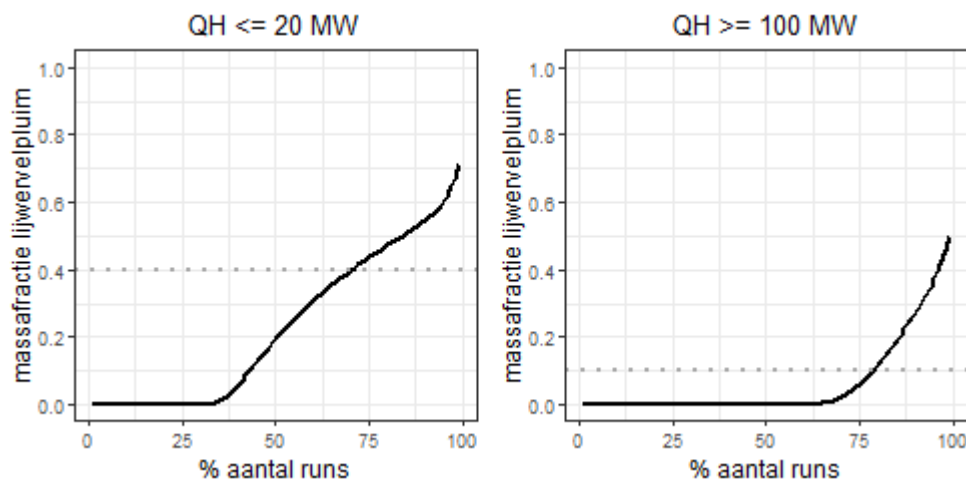
niet wordt meegenomen en leidt tot een lagere pluimhoogte. Dit is voor Pluimradar niet problematisch als ook de onderliggende lijwervelpluim in de berekeningen wordt meegenomen. Voor stabiele weertypen geeft de NNM gebouwmodule waarschijnlijk een overschatting van de hoogte van de bovenliggende pluim.

7.5 Aanbeveling: massafractie in lijwervelpluim

Zoals in deze bijlage besproken is dimensieloze buoyancy flux de beste indicator voor de massafractie in de lijwervelpluim. De dimensieloze buoyancy flux is afhankelijk van de windsnelheid. Het berekenen van de massafractie in de lijwervelpluim voor Pluimradar is daarom pas mogelijk als de meteogegevens van het KNMI zijn ingelezen. Hiervoor moet NPK-Puff worden aangepast.

Een alternatief is om te werken met vaste massafracties. Voor de gebruikers van Pluimradar is de exacte massaverhouding tussen de twee pluimen minder belangrijk dan de richting waarin de pluimen zich verspreiden (de resultaten van Pluimradar zijn immers altijd kwalitatief). De vaste massafractie voor de lijwervelpluim wordt als volgt geschat (zie ook Figuur 7.14):

- Uitslaande branden (hoge convectieve warmteflux): hiervoor is gekeken naar de (36.000) runs met convectieve warmteflux groter of gelijk aan 100 MW. In meer dan de helft van deze runs is de massafractie van de lijwervel gelijk aan 0. Om toch de lijwervelpluim niet te verwaarlozen is gekozen voor een massafractie van **0,1**. Dit komt ongeveer overeen met het 80^e percentiel van de runs.
- Binnenbranden (lage convectieve warmteflux): hiervoor is gekeken naar de (12.000) runs met convectieve warmteflux kleiner of gelijk aan 20 MW. In dit geval lijkt **0,4** een voldoende conservatieve waarde voor de massafractie van de lijwervel.



Figuur 7.14 Massafractie in de lijwervelpluim voor binnenbranden (<20 MW convectieve warmteflux, links) en uitslaande branden (> 100 MW convectieve warmteflux, rechts).

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

juni 2024

De zorg voor morgen
begint vandaag