

BROEI BIJ BIOMASSA:

**“Het opstellen van richtlijnen en criteria
om de groei bij biomassa te beheersen”.**

Auteur:	M. Loekemeijer
Studentnummer	0493376
Onderwijsinstelling:	Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit:	Technologie Management
Opleiding:	Techniek & Maatschappij
Stroom:	Technologie en Innovatiebeleid / Advanced Economies
1^e begeleider:	dr. ir. A.J.D. Lambert, TU/e Eindhoven
2^e begeleider:	dr.ir. G.P.J. Verbong, TU/e Eindhoven
3^e begeleider:	dr. C.H. Gast, KEMA Power Generation & Sustainables
Datum:	Juni 2004

VOORWOORD

Het rapport dat voor u ligt is geschreven in het kader van het afstudeertraject aan de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Technology Management. Onderzoek is verricht naar de groei bij de grootschalige opslag van biomassa. Het onderzoek werd uitgevoerd binnen KEMA, op de afdeling Power Generation & Sustainables (KPS) te Arnhem. KEMA is een commerciële onderneming, gespecialiseerd in hoogwaardige technische consultancy, testen, keuren en certificeren. Het is een onafhankelijke, marktgerichte organisatie die werkt voor opdrachtgevers die betrokken zijn bij de (elektrische) energievoorziening en de gebruikers daarvan.

Tijdens het schrijven van dit rapport is me duidelijk geworden dat voor het uitvoeren van een studie op het raakvlak van techniek en beleid een ruim blikveld vereist is. Hierbij wil ik Cees Gast, bedanken voor het verstrekken van de gelegenheid om bij KEMA te mogen afstuderen. Verder wil ik Fred Lambert bedanken voor zijn vriendelijke doch kritische aantekeningen gedurende het afstudeertraject en Geert Verbong die als tweede begeleider optrad.

Eindhoven, juni 2004.

Michel Loekemeijer

SAMENVATTING

In toenemende mate wordt biomassa ingezet ten behoeve van de Nederlandse energieopwekking. Het voorkomen en tegengaan van broeierschijnselen bij de (grootschalige) opslag van steeds nattere biomassastromen is van essentieel belang. De hiermee gepaard gaande warmteontwikkeling kan optreden ten gevolge van biologische en chemische omzettingreacties. Indien de geproduceerde warmte niet kan worden afgevoerd, stijgt de temperatuur in de opslag. Broei bij biomassa kan leiden tot problemen op het gebied van de veiligheid en rentabiliteit. Zo kan het schade aan de installatie veroorzaken of in het extreme geval zelfs tot brand leiden.

Op dit moment zijn er al richtlijnen voor de grootschalige opslag van biomassa, maar vanwege de gebrekkige kennis worden soms onnodige veiligheidseisen en -voorzieningen opgelegd. Er bestaat daarom behoefte aan het verkrijgen van meer kennis voor het opstellen van adequate criteria en richtlijnen voor de grootschalige opslag van biomassa ter voorkoming cq beheersing van broei. Het doel van dit onderzoek is het vergroten van het inzicht in dit fenomeen. Om uiteindelijk additionele richtlijnen en criteria op te stellen, om de veiligheidsmarges bij de broei van biomassa te vergroten.

Er bestaat reeds enige kennis over de omstandigheden die tot een begin van broei bij biomassa kunnen leiden en daaruit wordt duidelijk dat meerdere factoren een rol spelen. Vanwege de ruime ervaring met het broeigedrag van steenkool en hooi wordt de broei van biomassa grotendeels benaderd vanuit deze invalshoeken. Bij steenkool spelen voornamelijk chemische processen een rol, terwijl bij hooi naast de chemische- ook biologische processen broei kunnen veroorzaken.

Factoren die van invloed zijn op het optreden van broei zijn enerzijds gerelateerd aan de aard van het materiaal en anderzijds aan de wijze van opslag. Zo neemt de broeigevoeligheid van biomassa toe, wanneer de deeltjesgrootte afneemt. Bij broei zijn vooral de transportprocessen van groot belang, omdat daardoor wordt bepaald of de ontwikkelde warmte al dan niet kan worden afgevoerd.

Voor vrijwel alle soorten biomassa geldt dat er geen broei optreedt als deze maar droog genoeg worden opgeslagen; er treedt dan namelijk geen microbiologische activiteit meer op. Inertisering met stikstof is een mogelijkheid om het begin van het broeiproces te onderdrukken (of bij vers materiaal te beperken tot enzymatische broei), doordat aërobe micro-organismen de inertisering met stikstof niet overleven.

Een beperkte mate van broei zal niet tot problemen hoeven leiden indien de temperatuurstijging beperkt blijft. Onbekendheid bestaat echter over de precieze condities waaronder een gematigde vorm van broei overgaat in een snelle toename van broei en dus ook een snelle stijging van de temperatuur die tot brand kan leiden. Een bijkomend probleem is dat het broeigedrag en de broeigevoeligheid van verschillende specifieke biomassasoorten niet reproduceerbaar is.

Uit praktijkervaringen is bekend dat opslag uit verschillende partijen (van hetzelfde materiaal) met een uiteenlopend vochtgehalte, of uiteenlopende deeltjesgrootte, extra gevoelig is voor broei. Bovendien is bekend dat met name op het grensvlak tussen dergelijke partijen broei kan optreden. Het experimentele- en het simulatie onderzoek, met behulp van processimulatieprogramma Aspen Plus, richtte zich dan ook op deze "worst-case" benadering. Experimenten zijn uitgevoerd in kleine geïsoleerde vaatjes en een binnen KEMA ontwikkelde adiabatise reactor ontwikkeld voor experimenteel onderzoek aan broei. De broeireactor werd gevuld met een natte laag en aangevuld met een droge laag.

Met behulp van de vaatjes kan de aanvangssnelheid van het broeiproces bepaald worden in relatie tot het vochtgehalte. Deze experimenten geven een goed inzicht in de te verwachten resultaten van de materialen wanneer ze in de broeireactor worden geplaatst. Bij de experimenten in de broeireactor treedt vaak een snelle opwarming tot circa 60°C à 70°C op en afhankelijk van de omstandigheden blijft de temperatuur gedurende kortere of langere tijd op dit niveau, om daarna meestal weer af te nemen. Slechts in speciale gevallen (bij palmpitschroot) blijkt chemische broei op te treden, waardoor de temperaturen verder oplopen en temperaturen van rond de 100°C worden bereikt. Het stadium van

snelle temperatuurstijging (boven de 100°C) die uiteindelijk tot ontbranding kan leiden is echter niet opgetreden.

Broei kan het beste worden gedetecteerd met behulp van een temperatuur- en gasmeting. Voor brand zijn daarnaast de ionisatie rookmelders en de halfgeleiders toepasbaar. Broei bij biomassa kan het beste bestreden worden door middel van afkoeling. De manier van koelen is afhankelijk van de wijze van opslag. Bij open opslagen kan het broeiende materiaal met een shovel uit elkaar worden gehaald, waarna het kan afkoelen aan de buitenlucht. Bij gesloten opslagen (als silo's) is de veiligste methode van koelen het injecteren van vloeibare CO₂ aan de bovenkant- en van vloeibare N₂ aan de onderkant van de opslag. Vervolgens moet het materiaal verwijderd worden en verder afgekoeld te worden aan de buitenlucht.

Met behulp van de gegevens die voortkomen uit het experimentele onderzoek is getracht om met behulp van het simulatieprogramma Aspen Plus een model op te stellen dat de processen in de KEMA broeireactor beschrijft. Het model, opgesteld op basis van massa/energie balansen uitgaande van de omzettingsreactie van koolhydraten naar CO₂, moet dienen om te voorspellen welke veranderingen in temperatuur, vochtgehalte en gas samenstelling op zullen treden bij variatie van de omstandigheden. Modelleren van de broei door middel van de "plug-flow" reactor (opgebouwd uit een aantal batchreactoren) blijkt goed werkbaar bij temperaturen tot circa 70°C. Het model zal dienen als hulpmiddel bij de opzet van verdere experimenten, bij het selecteren van een beperkt aantal experimenten uit een grote matrix van mogelijkheden en bij het interpreteren van de resultaten.

Op basis van de gegevens uit de literatuur en door middel van experimenteel onderzoek zijn additionele richtlijnen en criteria aanbevolen. De aanbevolen richtlijnen zijn conform de Deense richtlijnen en criteria en dienen in eerste instantie om de broei te beheersen, waardoor de veiligheid van de installatie en de werknemers zal toenemen. De richtlijnen hebben betrekking op de gezondheid en veiligheid. Specifieke richtlijnen om de gezondheidsrisico's bij de broei van biomassa te voorkomen zijn er niet. Wel worden er reeds richtlijnen in de Arbouwgeving gegeven voor het werken met biologische agentia. Wat betreft de veiligheid kan er al naar gelang de fase waarin het broeiproces zich bevindt, richtlijnen onderscheiden worden voor broei, (smeulende) brand en explosie.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord.....	i
Samenvatting.....	iii
Inhoudsopgave.....	v
1 Inleiding.....	1
1.1 De vraagstelling van het onderzoek.....	2
1.1.1 Doelstelling	2
1.1.2 Probleemstelling	2
1.2 Onderzoekstype	3
1.3 Wijze van data verzameling.....	3
1.4 Leeswijzer.....	3
2 Opzet onderzoek.....	5
2.1 Stap 1: beschrijving LOC	6
2.2 Stap 2: beschrijving LOD's	6
2.2.1 Selectie relevante levensfasen en thema's veiligheidsbeheerssysteem	7
2.3 Stap 3: opstellen richtlijnen en criteria	7
3 Theoretische achtergrond van broei bij biomassa	9
3.1 Broei	9
3.1.1 Enzymatische warmteproductie	11
3.1.2 Microbiologische warmteproductie.....	11
3.1.3 Chemische warmteproductie	12
3.2 Invloedsfactoren	12
3.2.1 Eigenschappen van het materiaal	12
3.2.2 Opslagcondities	15
4 Voorkomen van broei.....	19
4.1.1 Geometrie van de opslag	19
4.1.2 Homogeniteit	19
4.1.3 Tijdsduur	20
4.1.4 Temperatuur	20
4.1.5 Compacteren / afdekken.....	21
5 Monitoring en bestrijding van broei.....	23
5.1 Monitoring van broei	23
5.1.1 Thermische detectie.....	23
5.1.2 Gas detectie	25
5.1.3 Rook detectie.....	25
5.1.4 Drukmeting.....	26
5.2 Bestrijding van broei	27
5.2.1 Blussen met water	27
5.2.2 Volschuimen.....	27
5.2.3 Inertiseren.....	28
5.3 Conclusies.....	28
6 Experimentele methoden voor het inschatten van broei.....	29
6.1 Experimentele methoden	30
6.2 Experimentele methoden uitgevoerd binnen KEMA.....	33
7 Experimenteel onderzoek	35
7.1 Kleine vaatjes	35
7.2 Broeireactor	36
7.2.1 Experiment A: palmpitschroot	37
7.2.2 Experiment B: biomassa pellets	39
7.2.3 Experiment C: donker hout	39
7.2.4 Experiment D: houtpellets	39
7.3 Resultaten	40

8	Simuleren	43
8.1	Simulatieprogramma Aspen Plus	43
8.1.1	Flowsheet van het broei simulatiemodel	43
8.2	Aannames model	45
8.3	Validatie model.....	47
8.4	Invloed van de parameters op de broei	48
8.4.1	Variatie van de ingangstemperatuur.....	49
8.4.2	Variatie van het vochtgehalte	49
8.4.3	Variatie van de luchtflow	50
8.5	Modelleren experimenten verricht in de broeireactor.....	50
8.6	Resultaten	51
9	Regelgeving biomassa	53
9.1	Problematiek wet- en regelgeving biomassa	53
9.1.1	Definitie biomassa	53
9.1.2	Classificatiesysteem biomassastromen.....	54
9.1.3	Landelijk Afvalstoffen beheersplan	54
9.1.4	Huidige situatie van de vergunningverlening in Nederland	55
9.1.5	Knelpunten en acties vergunningverlening	55
10	Richtlijnen en Criteria	57
10.1	Bestaande richtlijnen en criteria	57
10.2	Aanbevolen richtlijnen en criteria	57
10.2.1	Gezondheid.....	57
10.2.2	Veiligheid	58
11	Conclusies en aanbevelingen	61
11.1	Conclusies:	61
11.2	Aanbevelingen:	62
12	Literatuurlijst	63
	Bijlage A: De broeireactor	67
	Bijlage B: Beschrijving van het simulatieprogramma Aspen Plus	69
	Bijlage C: Bedrijfsprofiel KEMA Power Generation & Sustainables	71
	Bijlage D: Overzicht grafieken experimenten	73
	Bijlage E: Overzicht simuleren	77
	Bijlage F: Richtlijnen gezondheid en explosies	85
	Bijlage G: Reactiekinetiek broei bij biomassa	89

1 INLEIDING

Gezien de vele plannen tot inzet van biomassa ten behoeve van de Nederlandse energieopwekking en de daarvoor benodigde grootschalige opslag van (steeds nattere) biomassaströmen is het te onderzoeken thema zeer actueel. Op dit moment zijn er al richtlijnen voor de grootschalige opslag van biomassa, maar vanwege de gebrekkige kennis worden soms onnodige veiligheidseisen en voorzieningen opgelegd. Zoals uit ervaringen bij elektriciteitsproducenten is gebleken, is het voorkomen en tegengaan van broeiverschijnselen bij de opslag van biomassa van essentieel belang. De hiermee gepaard gaande warmteontwikkeling kan optreden ten gevolge van biologische en chemische omzettingreacties. Indien de geproduceerde warmte niet kan worden afgevoerd, stijgt de temperatuur in de opslag.

Broei bij biomassa kan leiden tot problemen op het gebied van de veiligheid en rentabiliteit van projecten voor de opwekking van duurzame energie. Zo kan het schade aan de installatie veroorzaken of in het extreme geval zelfs tot brand leiden. Dit kan bovendien leiden tot persoonlijk letsel bij de medewerkers. Door dit alles kan een imagoprobleem veroorzaakt worden, waardoor uiteindelijk de maatschappelijke acceptatie van het bijstoken van biomassa minder wordt.

Broei tijdens de opslag van biomassa leidt tot droge stofverlies. Beheersing van broei kan dus significant bijdragen aan een hoger energetisch rendement van de installatie en bovendien aan een verlaging van de CO₂-uitstoot per ingekochte kilogram biomassa. In het Kolenconvenant is een resultaatverplichting opgenomen van 3,2 Mton CO₂-reductie, [Lindeman, 2004].

Het bijstoken omvat naast zuiver biomassa ook gemengde en alternatieve brandstoffen zoals bio-olie/vetten. Het geheel wordt veelal aangeduid als secundaire brandstoffen. De daadwerkelijke inzet zal hoogstwaarschijnlijk lager uitvallen, onder andere omdat nog niet duidelijk is waar de technische grenzen van het directe meestoken liggen en of er steeds voldoende biomassa met de vereiste specificaties beschikbaar is.

Enkele elektriciteitscentrales doen reeds bio-energie opwekken op basis van eerdere vergunningen, echter de vergunningsprocedures voor de realisering van de convenantverplichtingen zijn in veel gevallen nog niet afgerond. De Nederlandse doelstellingen op het gebied van duurzame energieopwekking zijn ambitieus. In 2020 moet maar liefst 10 procent van het energieverbruik (circa 385 petajoules) op duurzame wijze worden opgewekt [Novem, 2002]. In 2000 was dat nog maar 1,2 procent. Met name bij energie uit biomassa wordt een flinke groei verwacht van circa 28 PJ in 2000 naar 170 PJ in 2020.

Er is nu nog voldoende biomassa in Nederland om de bestaande energiecentrales van biomassa te voorzien. De prijzen voor schone biomassa, zoals houtchips, zijn daardoor in vergelijking met onze buurlanden nu nog relatief laag. Maar uit verschillende studies blijkt dat er in de toekomst in Nederland onvoldoende biomassa zal zijn om aan de uiteindelijke doelstellingen te gaan voldoen. Men verwacht dan ook dat de prijzen zullen gaan stijgen. Daardoor wordt het mogelijk om biomassa grootschalig te gaan importeren uit landen als Rusland, de Baltische staten en Zuid-Amerika. Ook zijn er dan bepaalde biomassaströmen uit Nederland (zoals hout uit landschappelijke beplantingen) in te zetten, die nu nog te duur zijn of die lastig zijn in te zetten met de huidige technologie.

Ook in het landelijk gebied komt veel biomassa vrij, die in potentie geschikt is voor energieopwekking. Voorbeelden zijn drijfmest, agrarische residuen, stapelbare pluimveemest, snoei- en rooihout uit landschappelijke beplantingen en uit de fruitteelt en boomkwekerijen. Nederlandse veetelers ondervinden aan den lijve dat het steeds lastiger wordt om dierlijke mest in Nederland af te zetten als meststof. Ook bestaat steeds meer weerstand tegen het verbranden van snoei- en rooihout in de open lucht vanwege brandplekken in het land en luchtverontreiniging. Het terugbrengen van houtchips in de beplanting leidt ook steeds meer tot ongewenste verzuivering. Er bestaat een groot aantal plannen voor de realisatie van nieuwe bio-energiecentrales, waarbij deze strömen kunnen worden ingezet. Naast lagere afvoer- en verwerkingskosten kan het leveren van biomassa aan een energiecentrale positieve effecten hebben op de bedrijfsvoering van de eigenaar van de biomassaströmen, terwijl het milieu er bovendien mee gediend is.

Er bestaat daarom behoefte aan het verkrijgen van meer kennis voor het opstellen van criteria en richtlijnen voor de grootschalige opslag van biomassa ter voorkoming c.q. de beheersing van broei. Deze kennis zal moeten voortkomen uit experimenten enerzijds en uit interactie met de betrokkenen uit de dagelijkse praktijk anderzijds. Bijkomend voordeel is dat de resultaten ook bruikbaar zijn voor andere dan de beschreven grootschalige toepassingen.

Er is nu slechts beperkte kennis beschikbaar over de omstandigheden die tot een begin van broei bij biomassa kunnen leiden en daaruit wordt duidelijk dat meerdere factoren een rol spelen. Broei zal niet tot problemen hoeven leiden indien de hierdoor ontstane temperatuurstijging gering is. Onbekendheid bestaat echter over de precieze condities waaronder een gematigde vorm van broei overgaat in een snelle toename van broei en dus ook in een snelle stijging van de temperatuur die tot brand kan leiden. Wel is duidelijk dat het broeigedrag en de broeigevoeligheid van verschillende biomassasoorten niet uniform is en dat meer kennis hierover noodzakelijk is om tijdig risicovolle condities te kunnen onderkennen. Daartoe staat zowel een experimentele- als een simulatiemethode ter beschikking.

Bij een in 2002 gestart project binnen KEMA, op de afdeling Power Generation & Sustainable (KPS) is een adiabatische reactor ontwikkeld voor experimenteel onderzoek aan broei (zie bijlage C voor een bedrijfsprofiel). De doelstellingen van dit onderzoek zijn wel in zicht gekomen, maar nog niet behaald. Dit is het gevolg van de complexiteit van het broeiproces en de bijbehorende invloedsfactoren. De verkregen resultaten zijn bemoedigend en rechtvaardigen verder onderzoek (thans in uitvoering) dat meer gedifferentieerd is naar de verschillende fasen van het broeiproces. Uit praktijkervaringen is bekend dat opslag uit verschillende partijen (van hetzelfde materiaal) met een uiteenlopend vochtgehalte, of uiteenlopend deeltjesgrootte, extra gevoelig is voor broei. Bovendien is bekend dat met name op het grensvlak tussen dergelijke partijen broei kan optreden. Het experimentele- en het simulatie onderzoek, met behulp van Aspen Plus, zal zich dan ook richten op deze worst-case benadering.

1.1 De vraagstelling van het onderzoek

1.1.1 Doelstelling

Het verkrijgen van inzicht in het fenomeen broei bij biomassa door middel van experimenteel onderzoek en op basis van ervaringen uit de dagelijkse praktijk:

1. Het verder opzetten, verfijnen en valideren van een thermodynamisch rekenmodel in AspenPlus voor de beschrijving van de KEMA broei reactor.
2. Het in kaart brengen van de dagelijkse praktijk en problematiek van grootschalige opslag van biomassa bij de Nederlandse elektriciteitscentrales.

Om uiteindelijk te komen tot het opstellen van richtlijnen en criteria om broei bij grootschalige opslag van biomassa te kunnen beheersen.

1.1.2 Probleemstelling

Hoe kunnen de resultaten verkregen uit het experimentele- en simulatie onderzoek en ervaringen uit de dagelijkse praktijk worden vertaald naar richtlijnen en criteria, zodat de broei bij biomassa kan worden beheerst?

Deelvragen

1. Kan de broei van biomassa worden gemodelleerd / gesimuleerd, zodat er beter inzicht in het broeiproces wordt verkregen?
 - 1.1. Wat is het verband tussen de verschillende parameters en het broeigedrag?
 - 1.2. In hoeverre is er een verband tussen de samenstelling van de onderzochte soort biomassa en het broeigedrag?
2. Dient er een heroriëntatie op de huidige regelgeving omtrent de (grootschalige) opslag van biomassa plaats te vinden?
 - 2.1. Wat zijn de huidige criteria en richtlijnen voor de (grootschalige) opslag van biomassa?

2.2. Is het gewenst dat de huidige richtlijnen en criteria worden aangepast aan de opslag van (grootschalige) biomassa?

2.2.1. Hoe kunnen de huidige richtlijnen en criteria worden aangepast aan de (grootschalige) opslag van biomassa?

3. Hoe vindt de monitoring van broei bij de opslag van biomassa op dit moment plaats?

3.1. Is het gewenst dat deze monitoring aangepast wordt?

4. Wat zijn de voornaamste problemen uit de dagelijkse praktijk, die de grootschalige opslag van biomassa in de weg staan?

4.1 Kunnen de oplossingen verkregen uit het experimentele onderzoek een bijdrage leveren voor het oplossen / verminderen van deze problematiek?

1.2 Onderzoekstype

Het onderzoek is exploratief van aard. De opzet van het onderzoek is om door middel van experimenteel onderzoek de invloed van een aantal belangrijke parameters (o.a. vochtgehalte, type biomassa, deeltjesgrootte, luchtflow, temperatuur) op het broeigedrag te onderzoeken. Hierbij zullen m.b.v. kleine geïsoleerde vaten en een adiabatistische reactor de verschillende fasen in het broeiproces in de tijd worden gevolgd. Voorts zal er een mathematisch model worden gemaakt van de processen in de adiabatistische reactor, waarmee een efficiënte planning en sturing van de experimenten in de adiabatistische reactor mogelijk wordt.

Aanvullend zullen ook grootschalige biomassa opslaglocaties in kaart worden gebracht. Via interviews zal de problematiek die hier een grote rol speelt en de oplossingen die zijn toegepast in kaart worden gebracht, alsmede de nog openstaande vragen en (dagelijkse) problemen.

1.3 Wijze van data verzameling

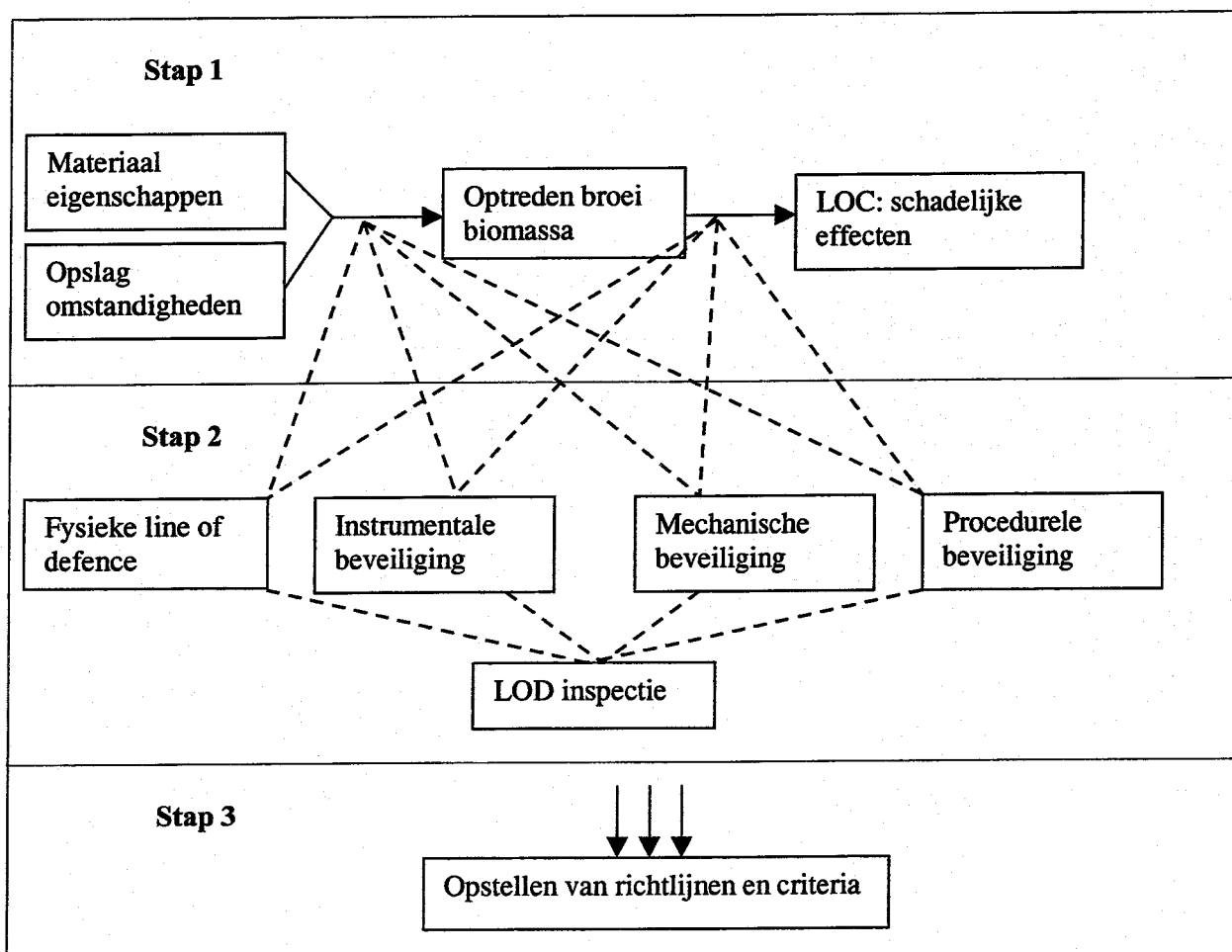
De informatie die benodigd is voor het onderzoek zal deels afkomstig zijn van bestaande informatie vanuit KEMA en vakliteratuur. Daarnaast zal informatie benodigd zijn die nog nergens gedocumenteerd is, en welke door middel van interviews en eigen observatie zal worden verkregen. De benodigde gegevens zullen gestructureerd verzameld worden, omdat al enigszins duidelijk is waarnaar gezocht moet worden. Verdere informatie zal verzameld worden door middel van interviews van medewerkers van KEMA en op locatie bij de elektriciteitscentrales. Deze interviews worden mondeling afgenomen omdat er steeds een klein aantal mensen benaderd worden.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft de opzet van het onderzoek weer. Om meer inzicht in het fenomeen te krijgen is ervoor gekozen om broei aan de hand van een onderzoeksschema te onderzoeken. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de theoretische achtergrond van broei bij biomassa. Tevens wordt er een overzicht gegeven van de diverse invloedsfactoren, die de broei bij biomassa beïnvloeden. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op het voorkomen van broei, met name de opslagcondities komen hier aan bod. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 een overzicht gegeven van de methoden om broei te monitoren en tevens te bestrijden. Eveneens worden hier diverse detectiemethoden en blusmiddelen uitvoerig besproken. Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van mogelijke experimentele methoden om broei te kunnen inschatten. Enkele daarvan worden in hoofdstuk 7 uitgevoerd en besproken. Hoofdstuk 8 geeft een overzicht van het thermodynamisch rekenmodel dat uitgevoerd is in AspenPlus voor de beschrijving van de experimenten die uit zijn gevoerd met de broeireactor. Aansluitend wordt in hoofdstuk 9 een kort overzicht gegeven van de huidige regelgeving omtrent biomassa om uiteindelijk te komen tot het opstellen van richtlijnen en criteria voor de opslag van biomassa in hoofdstuk 10. Het geheel wordt afgesloten in hoofdstuk 11 met een overzicht van de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek.

2 OPZET ONDERZOEK

Zoals in het voorgaande hoofdstuk is beschreven is broei van biomassa een complex proces, waarbij vele factoren een rol kunnen spelen. Broei kan aan de hand van het onderstaande schema (figuur 1) onderzocht worden. In dit schema wordt het verband tussen de verschillende fasen van broei weergegeven, om op systematische wijze na te gaan hoe de schadelijke effecten voorkomen kunnen worden. Het schema is opgesteld naar aanleiding van een ongeval bij DSM en aangepast voor dit onderzoek [Arbeidsinspectie, 2003]. Het schema bestaat uit 3 stappen, de eerste is het weergeven van het ontstaan van broei bij biomassa en de gevolgen hiervan. De tweede stap beschrijft de maatregelen die nodig zijn om broei bij biomassa te beheersen. Het uiteindelijke doel is om door middel van het doorlopen van deze 2 stappen, richtlijnen en criteria op te stellen om broei bij biomassa te beheersen (stap 3).



Figuur 1: onderzoeksschema broei bij biomassa

In het schema kunnen de volgende aandachtspunten worden onderscheiden:

- De basisoorzaak van de Loss of Containment (LOC): opslag en materiaal eigenschappen van de biomassa.
- De directe oorzaak van de LOC: ontstaan van broei bij biomassa.
- De gevolgen van de LOC: schadelijke effecten.
- De Lines of Defense (LOD's): preventieve en repressieve (gevolgenbeperkende) barrières die moeten voorkomen dat de LOC plaatsvindt.

Bij het onderscheiden van de eerste 2 stappen kan gebruik worden gemaakt van de onderverdeling naar LOC en LOD's:

2.1 Stap 1: beschrijving LOC

De bijzondere gevaren in bedrijven die vallen onder de werking van het Besluit Risico's Zware Ongevallen [BRZO, 1999] hebben betrekking op de aard en potentiële risico's van het ongewenst vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Dit besluit is mede tot stand gekomen na de zware vuurwerkcramp in Enschede. Een bedrijf moet in verband hiermee een expliciet preventiebeleid voeren dat er in resulteert dat alle maatregelen zijn getroffen om zware ongevallen te voorkomen en de gevolgen daarvan te beperken. Zware ongevallen worden gekenmerkt door het ongewenst vrijkomen van gevaarlijke stof(-en), ofwel het buiten de bescherming of omhulling (insluitsysteem) treden van de gevaarlijke stof. Dit wordt binnen het vakgebied aangeduid met de term: Loss of Containment. Bij de broei van biomassa kunnen vele schadelijke stoffen vrijkomen, vooral bij de onvolledige verbranding (smeulen) ervan. Er kunnen naast CO₂ ook grote hoeveelheden van o.a. CO vrijkomen, die grote schade aan de gezondheid kunnen toebrengen. Naast de gevaarlijke gassen is het vrijkomen van rookdeeltjes niet wenselijk. Voorts bestaat het gevaar van explosieve atmosferen ontstaan door broei (CO en H₂), of ontstaan tijdens het blussen van broei.

De eerste stap van het schema laat zien dat het optreden van broei bij biomassa afhankelijk is van de materiaaleigenschappen en de opslagomstandigheden. In hoofdstuk 3 en 4 wordt de relatie gelegd tussen de materiaaleigenschappen / opslagomstandigheden en de kans op broei bij biomassa. In hoofdstuk 7 (experimenteel gedeelte) en hoofdstuk 8 (modellering van experimenteel gedeelte) worden experimenten beschreven die uitgevoerd zijn om meer inzicht te verkrijgen in het fenomeen broei.

2.2 Stap 2: beschrijving LOD's

Op grond van BRZO moet elk bedrijf onder meer door het beschrijven van een groot aantal scenario's, vaststellen en aantonen dat alle noodzakelijke maatregelen zijn getroffen om zware ongevallen te voorkomen [BRZO, 1999]. Van primair belang voor het voorkomen van zware ongevallen, is de aanwezigheid en het doelmatig functioneren van zowel de preventieve als de repressieve LOD's (voorkomen van de LOC, dan wel het beperken van de gevolgen ervan). LOD's kunnen zowel van technische als organisatorische aard zijn. Met het in werking hebben van een veiligheidsbeheerssysteem (VBS) wordt beoogd de instandhouding en goede werking van LOD's in de bedrijfsvoering te borgen.

Het doel hiervan is het vaststellen of er voldoende adequate maatregelen zijn getroffen. Aan de hand van het vastgestelde ongevalsscenario dat zich uitstrekt van basisoorzaak via directe oorzaak tot en met veroorzaakte schade, worden de relevante barrières geïnventariseerd. Ter beoordeling worden de LOD's ingedeeld in onderstaande klassen:

Fysieke LOD's:

Deze voorkomen of beperken een LOC door middel van fysieke bescherming door het containment zelf, zoals dikte van het metaal, fysieke bescherming tegen in- en uitwendige omstandigheden. Bescherming tegen opwarming van buitenaf (zonnestraling), afscherming van lucht in verband met zuurstoftoevoer etc.;

Instrumentele beveiliging:

Deze voorkomen of beperken een LOC door middel van procesbesturing (feitelijk elk apparaat of instrument voor meting en regeling van de procescondities), zoals een hoge druk beveiliging, een automatische compartimentering. Tot deze groep behoren ook o.a. de temperatuur en gas detectiesystemen.;

Mechanische beveiliging:

Deze voorkomen of beperken een LOC door middel van een extra bescherming, die overbelasting van het containment voorkomt, zoals een overdrukbeveiliging, aanrijdbeveiliging;

Procedurele beveiliging:

Deze voorkomen het falen van het containment als gevolg van menselijke fouten, zoals toegepaste werkprocedures en -instructies. Voorkomen dat er ontstekingsbronnen in aanraking komen met de biomassa.

Tenslotte zal er een inspectie plaats moeten vinden naar de aanwezigheid-, de staat van onderhoud- en het functioneren van de LOD's. De beschreven LOD's zullen in hoofdstuk 5 uitvoeriger besproken worden. In hoofdstuk 6 komen nog experimentele methoden aan bod die (in de toekomst) kunnen worden ingezet om de broei bij biomassa te kunnen inschatten.

2.2.1 Selectie relevante levensfasen en thema's veiligheidsbeheerssysteem

Voor elke LOD zijn er relevante levensfasen, waarin zij van toepassing is, bijvoorbeeld de "ontwerpfase" voor het bepalen van de juiste beschermingscondities tegen broei. Er kunnen ook meer dan één levensfase voor een LOD relevant zijn, bijvoorbeeld het falen van een containment door broei kan zijn veroorzaakt door fouten in het "ontwerp, de constructie of het onderhoud". De levensfasen zijn:

- Ontwerp (en modificaties)
- Constructie
- Bediening
- Onderhoud (incl. inspectie en testen)

De verbinding tussen het technische- en het management systeem kan geschieden door het koppelen van een LOD aan een levensfase (Ontwerp / Constructie / Bediening / Onderhoud) en aan een thema van het veiligheidsbeheerssysteem (VBS) [MinSZW, 2003]. Tot de VBS-thema's behoren de volgende onderdelen:

1. De organisatie van het personeel: hiertoe behoren naast de opleiding en communicatie ook de procedures en instructies voor het personeel.
2. De identificatie van de gevaren en de beoordeling van de risico's van zware ongevallen door middel van veiligheidsstudies.
3. Het toezicht op de uitvoering.
4. De wijze waarop gehandeld wordt bij wijzigingen.
5. De planning voor noodsituaties.
6. Het toezicht op de prestaties: dit bestaat o.a. uit het onderzoeken van het ongeval, inspectie, controle / testen en onderhoud.
7. Audits en beoordeling.

De bovenstaande levensfasen en thema's zullen voornamelijk in hoofdstuk 10 aan bod komen.

2.3 Stap 3: opstellen richtlijnen en criteria

Het uiteindelijke doel is om door middel van het doorlopen van de eerste 2 stappen, richtlijnen en criteria op te stellen om broei bij biomassa te beheersen (stap 3). Eerst wordt er in hoofdstuk 10 een overzicht gegeven van bestaande richtlijnen en criteria afkomstig van Denemarken, gevolgd door aanbevolen richtlijnen en criteria.

In het komende hoofdstuk zal de theoretische achtergrond van broei bij biomassa worden beschreven. Zowel de materiaaleigenschappen als de opslagomstandigheden (stap 1) van het onderzoeksschema zullen hier aan bod komen.

3 THEORETISCHE ACHTERGROND VAN BROEI BIJ BIOMASSA

Biomassa wordt in toenemende mate gebruikt als energiebron bij de elektriciteitsproductie. Het is gebleken dat broei van biomassa tijdens de opslag een tot op heden onderbelicht thema is in Nederland [KEMA, 2001]. Uit het oogpunt van veiligheid is een grondige kennis van het broeiedrag noodzakelijk. Er bestaat nu reeds enige kennis over de omstandigheden die tot een begin van broei bij biomassa kunnen leiden en daaruit wordt duidelijk dat meerdere factoren een rol spelen. Een beperkte mate van broei zal niet tot problemen hoeven leiden indien de temperatuurstijging beperkt blijft. Onbekendheid bestaat echter over de precieze condities waaronder een gematigde vorm van broei overgaat in een snelle toename van broei en dus ook een snelle stijging van de temperatuur die tot brand kan leiden. Wel is duidelijk dat het broeiedrag en de broeigevoeligheid van verschillende specifieke biomassasoorten niet uniform is en dat meer kennis hierover noodzakelijk is om tijdig risicovolle condities te kunnen onderkennen. Vanwege de ruime ervaring met het broeiedrag van steenkool en hooi wordt de broei van biomassa grotendeels benaderd vanuit deze hoek.

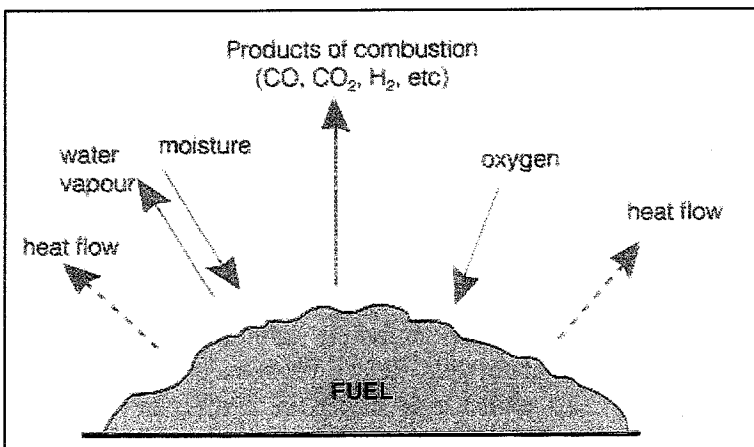
In dit hoofdstuk zal de theoretische achtergrond van broei bij biomassa worden beschreven. Stap 1 (materiaaleigenschappen) zal uitgewerkt worden, door de factoren die van invloed zijn op de broei te beschrijven.

3.1 Broei

Bij opslag van biomassa kan warmteontwikkeling optreden ten gevolge van biologische en chemische omzettingreacties. Indien de geproduceerde warmte niet kan worden afgevoerd, stijgt de temperatuur in de opslag. Dit proces van zelfopwarming wordt broei genoemd. Broei komt voor bij verschillende soorten producten namelijk:

- Organische materialen: o.a. hout, hooi, houtpulp, wol, compost, granen etc.
- Delfstoffen: o.a. steenkool, bruinkool, vlamkool etc.
- Synthetisch chemische producten: o.a. kruit, explosieven etc.
- Diversen: o.a. vast huishoudelijk afval.

Bij steenkool wordt broei veroorzaakt door een langzame chemische oxidatie die al bij lage temperaturen kan plaatsvinden. Als gevolg van deze oxidatie komt er warmte vrij. Wanneer er een voldoende hoeveelheid materiaal aanwezig is, kan een opbouw van warmte plaatsvinden. Hierdoor stijgt de temperatuur met als gevolg een toename van de oxidatiesnelheid. Door de warmteproductie wordt ook de convectie door de opslaghoop bevorderd, waardoor extra zuurstof wordt aangevoerd. Dit alles leidt dus tot een sneeuwbaaleffect, met als gevolg een nog snellere stijging van de temperatuur. Hetgeen uiteindelijk zelfs kan leiden tot zelfontbranding van de kolen. In figuur 2 is schematisch een overzicht gegeven van de fysische en chemische reactieprocessen die bij de broei van steenkolen een rol spelen.

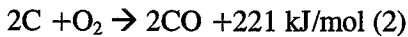
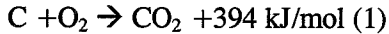


Figuur 2: fysische en chemische reacties bij de broei van steenkolen [IEA, 1999]

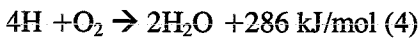
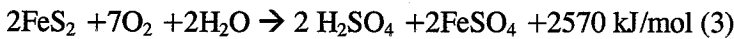
Bij broei in een kolenopslag spelen voornamelijk chemische processen (oxidatie en zuurhydrolyse) een rol. Oxidatie van steenkool is een 3-traps proces:

1. Fysische adsorptie van zuurstof
2. Chemische adsorptie: vorming van kool-zuurstof complexen en structuren zoals carbonyl, carboxyl- en andere groepen
3. Oxidatie: vrijkomen van gasvormige verbindingen zoals CO, CO₂ en H₂O.

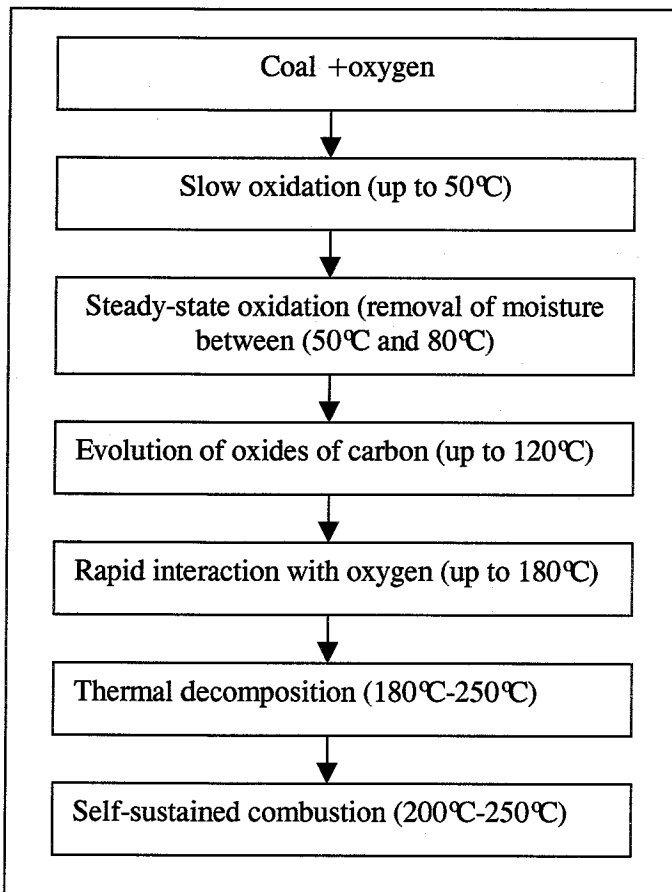
Hierbij treden de volgende exotherme reacties op:



Tevens kunnen ook andere oxidatieprocessen verlopen, bijvoorbeeld van pyriet of waterstof:



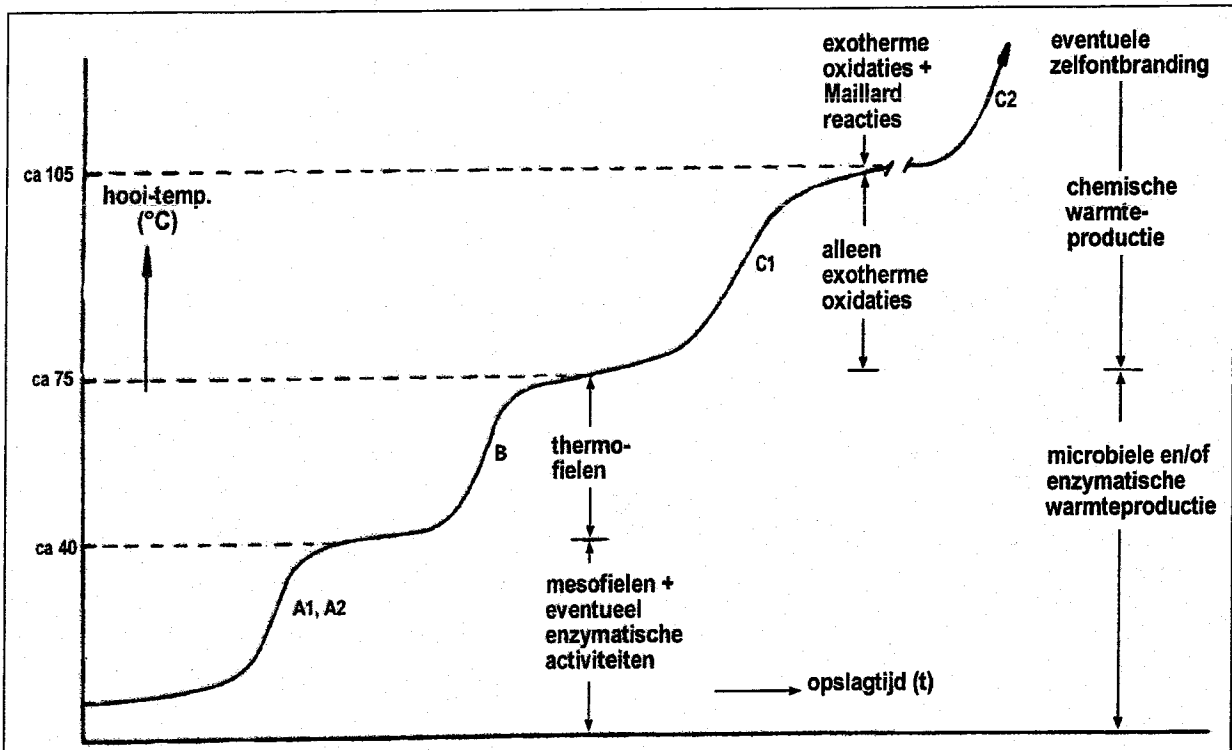
Onderstaande figuur 3 geeft voor kolenbroei schematisch de verschillende fasen weer waarin een broeiproces zich kan bevinden. Bij biomassa spelen naast de fysische en chemische reactieprocessen ook de biologische reactieprocessen een grote rol.



Figuur 3: fasering broeiproces [IEA, 1999]

De warmteontwikkeling die ontstaat door de biologische activiteit kan enerzijds worden toegeschreven aan de activiteit van levende cellen en anderzijds aan de biologische activiteit van bacteriën en schimmels [NOVEM, 1998]. Deze zijn onder te verdelen in aërobe en anaërobe processen. Omdat ook onder anaërobe omstandigheden biologische activiteit mogelijk is, kan ook bij volledige afsluiting van de buitenlucht toch broei ontstaan in opslagen van biologische materialen.

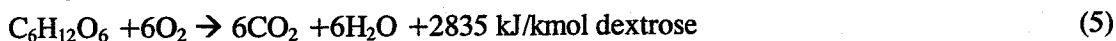
Van biomassa is met name hooibroei bekend. In figuur 4 is schematisch het verloop van het broeiproces bij hooi weergegeven [Ohm, 1971]. Dit is een voorbeeld waarbij biologische processen een belangrijke rol spelen. Zoals in de figuur is te zien, zijn het in eerste instantie enzymatische en microbiologische broei die de voortgang van het proces bepalen, terwijl pas in het laatste stadium chemische broei optreedt. De verschillende stadia die optreden bij de broei van biomassa worden in de volgende paragrafen uitvoeriger besproken. Voor een uitvoerigere beschrijving van de reactiekinetiek wordt verwezen naar bijlage G.



Figuur 4: schematisch temperatuurverloop bij hooibroei [Ohm, 1971]

3.1.1 Enzymatische warmteproductie

Enzymatische warmteproductie is de warmteontwikkeling welke plaatsvindt tijdens de ademhalingsprocessen in de plantencellen. Bij de ademhaling van alle planten, en dus ook gras, worden suikers (hexosen) onder aërobe condities verbrand tot koolzuurgas (CO_2) en water (H_2O) onder afgifte van warmte. De ademhaling in de plantencellen is mogelijk met behulp van biologische katalysators en de enzymen. De algemeen reactievergelijking luidt:



Bovenstaande bruto reactievergelijking toont een exotherme reactie, dit geeft aan dat bij het tot stand komen van de reactie een bepaalde hoeveelheid warmte wordt geproduceerd. In bijlage C is de berekening van de reactiewarmte opgenomen. Verder worden die voor deze reactie verantwoordelijke enzymen volledig onwerkzaam bij $T > 45^\circ\text{C}$ en een vochtgehalte < dan 25-30%.

3.1.2 Microbiologische warmteproductie

Deze vorm van warmteproductie wordt veroorzaakt door de groei en vermenigvuldiging van micro organismen, bacteriën en schimmels. Hierbij worden bepaalde voedselbronnen(substraten) als energieleverancier gebruikt. De belangrijkste parameters voor de microbiologische groei zijn; het substraat(zetmeel, proteïne en dergelijke), de temperatuur, het type micro-organisme (gist, schimmel, bacterie) en de wateractiviteit. De schimmels zijn in het algemeen van het type mesofiel met een temperatuuroptimum voor groei en vermenigvuldiging van circa 30°C en een maximum bij circa 40°C . Bij temperaturen boven de 50°C vertonen de schimmels geen activiteit meer. De bacteriën

omvatten zowel mesofiele als thermofiele soorten. De thermofielen hebben een temperatuuroptimum van circa 60°C en een temperatuurmaximum van circa 70°C. Temperaturen boven de 75°C overleven ze mogelijk wel, maar ze zijn dan niet meer actief.

3.1.3 Chemische warmteproductie

Doordat de bacteriën rond de 70-75°C niet meer actief zijn, mag verondersteld worden dat de verdere warmteproductie het gevolg is van exotherme chemische oxidatie tussen bestanddelen (koolhydraten) van de droge stof (Ds) en zuurstof in de lucht. Indien de biomassa ook nog eiwitten bevat, kunnen vanaf 105°C ook Maillard reacties (reacties tussen koolhydraten en eiwitten onder afsplitsing van CO₂) bijdragen aan de warmteontwikkeling. De oxidatie van koolhydraten uit hooi is heterogeen. Vaste bestanddelen reageren met gasvormig zuurstof(O₂) tot gasvormig kooldioxide(CO₂) en water onder afgifte van warmte. Uit experimenten blijkt dat de koolhydraten met een oxidatiewarmte van 483 kJ per geproduceerd mol CO₂, circa 85% van de oxideerbare bestanddelen uit hooi vormen. Hierdoor wordt voor het model van de chemische warmteproductie uitgegaan van de oxidatiereactie van koolhydraten. De bruto reactievergelijking (5) is hierbij ook van toepassing.

3.2 Invloedsfactoren

Factoren die van invloed zijn op het optreden van broei zijn enerzijds gerelateerd aan de aard van het materiaal en anderzijds aan de wijze van opslag. Uit de literatuur blijkt dat bij broei vooral de transportprocessen van groot belang zijn, omdat daardoor wordt bepaald of de ontwikkelde warmte al dan niet kan worden afgevoerd. Factoren zoals de hoogte van de hoop, de ligging van de opslag ten opzichte van de overheersende windrichting zowel als de neerslaghoeveelheden en windsterkte kunnen worden beschouwd als parameters die van belang zijn omdat ze de transportprocessen in de hoop beïnvloeden [Thörnqvist, 1988]. Bij transportprocessen moeten wij vooral denken aan transport van warmte, vocht en zuurstof. De transportsnelheid wordt bepaald door de ventilatiesnelheid. Deze snelheid is afhankelijk van de vrije ruimte tussen de deeltjes, van het verschil tussen de materiaaltemperatuur en de buitenluchttemperatuur en luchtdrukverschillen in de opslaghoop [KEMA, 1988].

Bij kolen zijn het vooral de opslagcondities die bepalend zijn voor de transportprocessen. Materiaaleigenschappen spelen daarbij een minder belangrijke rol. Hetzelfde geldt in principe voor de opslagcondities van biomassa, maar doordat de verschillende biomassasoorten sterk uiteenlopende eigenschappen kunnen hebben hoeft dit bij biomassa niet altijd het geval te zijn.

3.2.1 Eigenschappen van het materiaal

Wat betreft de eigenschappen van het materiaal spelen de volgende factoren een voornamelijk rol:

- vochtgehalte (verdamping en condensatie van vocht)
- temperatuur
- reactiviteit (voor met name zuurstof)
- specifieke oppervlak
- deeltjesgrootteverdeling
- homogeniteit van het materiaal
- aanwezigheid van micro-organismen

Deze worden in het volgende gedeelte uitvoeriger besproken.

Vochtgehalte

Vanuit het onderzoek aan kolenbroei is bekend dat vocht zowel positieve als negatieve effecten heeft op de ontwikkeling van broei. Zo neemt de reactiviteit van de steenkool toe met het vochtgehalte. Vochtige steenkool zal dus sneller in temperatuur stijgen dan droge steenkool. Aan de andere kant remt vocht de broei af op een niveau van 85 à 90 °C. Bij dit temperatuurniveau is er een evenwicht tussen de ontwikkelde warmte ten gevolge van de broeireacties en de warmte die nodig is om het

water te verdampen. Pas als alle water verdampt is, kan de temperatuur van de steenkool tot de zelfontbrandingstemperatuur oplopen, een proces dat overigens in enkele dagen kan verlopen [KEMA, 1988].

Bij condensatie van waterdamp komt warmte vrij. Dit heeft als consequentie dat lokale condensatie van vocht op steenkool kan leiden tot een temperatuurstijging van het steenkooloppervlak, tot zelfs 30°C waardoor de oxidatiesnelheid sterk toeneemt [IEA, 1999]. Dergelijke effecten kunnen ook optreden wanneer natte kool in een opslag wordt gemengd met droge steenkool. Op de grenslaag van beide partijen kan dan versnelde oxidatie optreden. Aan de andere kant kan condensatie van grote hoeveelheden vocht er toe leiden dan hierdoor een deel van de poriën in de opslag wordt gevuld waardoor een deel van het steenkooloppervlak niet meer bereikbaar is voor zuurstof. Om die reden is natte bruinkool minder gevoelig voor broei dan natte subbitumineuze kool ondanks het feit dat bruinkool in het algemeen oxidatiegevoeliger is [IEA, 1999].

Voor biomassa geldt een soortgelijke benadering als voor steenkool. Daarbovenop komt echter de invloed van de biologische activiteit. Vocht is, naast de aanwezigheid van voedingsstoffen en een geschikte temperatuur, essentieel voor bacteriën en schimmels.

In Zweden is onderzoek gedaan naar de broei van chips van naaldhout in relatie tot het vochtgehalte. Hieruit is gebleken dat het optimale vochtgehalte voor temperatuurverhoging 50% is. Als houtchips een vochtgehalte lager dan 20% hebben is er geen broei te verwachten [Thörnqvist, 1985]. Bij deze lage vochtgehalten treedt er namelijk geen microbiologische activiteit meer op [Kipping, 1988].

In Zweden is ook onderzoek gedaan naar verschillende vormen van droging en de mate van broei die daarbij optrad [Jirjis, 1995]. Hieruit bleek dat droging door continue ventilatie het laagste vochtgehalte oplevert en bovendien het laagste droge stof verlies ten gevolge van broei. Deze methode zorgt voor snellere afvoer van vocht en (de eventueel) ontwikkelde warmte zonder dat de continue aanvoer van verse lucht tot extra broeibevordering leidt.

Voor vrijwel alle soorten biomassa geldt dat er geen broei optreedt als ze maar droog genoeg worden opgeslagen. Het minimale vochtgehalte van een materiaal waarboven broei op kan treden is materiaal afhankelijk. Hierboven is al aangegeven dat voor houtchips dit minimale vochtgehalte 20% bedraagt. Voor minder fijn verkleind hout (chunks) en voor stammen ligt deze waarde hoger. Voor grassoorten is ze echter weer lager. In het BIOLOCO model [Mol, 1999] wordt voor bermgras en bermmaaisel een minimum vochtgehalte (waarboven broei op kan treden) gebruikt van 12,5% en voor andere materialen (zaagsel, boomschors, chips van dunningshout) een waarde van 25%. Deze waarden moeten worden gezien als een globale benadering.

Temperatuur

Het risico voor broei neemt toe met het temperatuurverschil tussen de materiaal- en de buitenluchttemperatuur. Grote temperatuurverschillen en dus risico's treden bijvoorbeeld op bij aanvoer van licht broeiende kool of bij aanvoer in de herfst van steenkool uit een warmer klimaat. Deze temperatuurverschillen zijn van invloed op de ventilatiesnelheid.

De warmteontwikkeling bij broei neemt ten opzichte van de temperatuur over het algemeen exponentieel toe. Het temperatuurniveau dat bereikt kan worden hangt af van de productiesnelheid van de warmte en van de snelheid waarmee warmte aan de omgeving wordt afgestaan. De gegenereerde warmte in een opslaghoop hangt af van het volume en wordt afgegeven via het buitenoppervlak van de opslag. Hierdoor is de warmteafgifte afhankelijk van de verhouding tussen het oppervlak en het volume van een opslag [Wilén, 1993].

Uit eerder onderzoek naar broei bij steenkolen blijkt dat de temperatuurstijging niet lineair verloopt in de tijd. Wanneer de temperatuur in een kolenopslag een waarde van 85 à 90°C bereikt, blijft de temperatuur geruime tijd constant om daarna uiteindelijk verder te stijgen tot de zelfontbrandingstemperatuur bereikt is [KEMA, 1988].

De temperatuur van naaldhoutchips is afhankelijk van het vochtgehalte, de dimensies van de hopen, de mate van de deeltjesverkleining, de samenstelling van het hout en de omgevingstemperatuur. In

kleine hopen van vers onverkleind houtafval volgt de bulktemperatuur van de hoop de omgevingstemperatuur, maar binnen in de 6-7 meter hoge hopen is de temperatuur 20°C hoger.

Het risico van broei is groter naarmate de begintemperatuur van het opgeslagen materiaal hoger is dan de omgevingstemperatuur, bijvoorbeeld als gevolg van drogen of malen [Wilén, 1995]. Verder is het risico wel afhankelijk van de deeltjesgrootte, want bij kleine afmetingen van het materiaal is de invloed van de externe temperatuur geringer dan bij grote afmetingen [Jirjis, 1995]. Dit komt omdat verkleind materiaal dermate broeigevoelig is dat eventuele verschillen in externe temperatuur niet meer bepalend zijn voor het al dan niet optreden van broei.

In het algemeen stijgt de temperatuur van een voorraad sneller wanneer verkleind materiaal wordt opgeslagen dan wanneer de opslag bestaat uit niet verkleind materiaal of uit vrij grove delen. De aanwezigheid van naalden en schors leidt eveneens tot een versnelling van de temperatuurstijging (zie ook specifiek oppervlak). Verder is de combinatie van temperatuur en vochtgehalte van belang, want deze is bepalend voor de snelheid waarmee schimmels en bacteriën groeien (zie ook paragraaf micro-organismen).

Reactiviteit

Bij steenkool is de inkolingsgraad bepalend voor de reactiviteit. Geologisch jonge en hoogvluchtige kolensoorten zijn broeigevoelig. Ze hebben een hogere H/C-verhouding en mogelijk ook een hoger O-gehalte. Bovendien zijn jonge kolen meestal poreuzer en bevat de kolenmatrix meer oxidatiegevoelige chemische structuren dan bij oude kolen. De relatieve oxidatiesnelheid en opwarmsnelheid van kolen van verschillende inkolingsgraad vormen een kwantitatieve maat voor broeigevoeligheid. Dergelijke verschillen in samenstelling kunnen ook van belang zijn bij biomassa. Overigens heeft biomassa veel hogere zuurstof- en waterstofgehalten heeft kolen en is het dus veel reactiever dan kolen.

Ook het asgehalte is indicatief voor de reactiviteit. Over het algemeen betekent een hoger asgehalte een lagere broeigevoeligheid. Aan de andere kant kunnen sommige minerale bestanddelen juist katalyserend werken op broei. Er moet rekening mee worden gehouden dat in bijzondere biomassa- of afvalstromen minerale bestanddelen of metaaloxides kunnen voorkomen, die broeibevorderend werken. Vanuit de cellulose- en spaanplaatindustrie is bekend dat metalen voorwerpen als katalysator kunnen werken bij broei [Novem, 1998].

Specifieke oppervlak

Omdat broei een biologisch/chemische reactie is, is de reactiesnelheid ervan afhankelijk van het specifieke oppervlak (m^2/kg) dat bereikbaar is voor met name zuurstof. Het specifieke oppervlak wordt vooral bepaald door de maalfijnheid. Kleinere deeltjes hebben een groter specifiek oppervlak en zijn daarom broeigevoeliger. Daarnaast speelt ook de structuur een rol, zoals bijvoorbeeld bij schors. Schors heeft een actieve biologische open celstructuur en bevat relatief veel vocht. Bovendien is bevat schors meer biologisch actief materiaal zoals enzymen en suikers. Hierdoor is schors extreem gevoelig voor broei en wordt afgeraden om het op te slaan. Hetzelfde geldt, zij het in mindere mate voor vers hout, met name wanneer het compleet met bast, bladeren of naalden gechipt is [Novem, 1998 en Thörnqvist, 1985].

Deeltjesgrootteverdeling / homogeniteit

In de vorige paragraaf is al genoemd dat kleinere deeltjes een groter specifiek oppervlak hebben en daardoor gevoeliger zijn voor broei. Hiernaast kan opgemerkt worden dat een brede deeltjesgrootteverdeling ongunstig is omdat hierdoor eerder inhomogeniteiten ontstaan die plaatselijk grotere ventilatiesnelheden tot gevolg kunnen hebben.

Het valt op dat chips veel gevoeliger zijn voor broei dan chunks en stammen [Gigler, 1996], met name wanneer het chips met een hoog vochtgehalte betreft. Soortgelijke resultaten werden eveneens vermeld bij een onderzoek uitgevoerd in Duitsland [Scholz, 2000]. Ook hier blijkt dat bij de opslag van chips er een snelle temperatuurstijging optreedt terwijl bij chunks en stammen de temperatuur van de opslag steeds de omgevingstemperatuur volgt.

Micro-organismen

Bij broei van biomassa wordt de warmteontwikkeling toegeschreven aan een combinatie van activiteit van levende cellen en biologische activiteit van bacteriën en in nog grotere mate van schimmels. Naarmate er meer micro-organismen aanwezig zijn, of de omstandigheden gunstig zijn voor vermeerdering ervan, zal de broei toenemen [Novem, 1998]. Met name onder gunstige condities (voldoende vocht en gunstige temperaturen) zullen houtschimmels zich zeer snel kunnen ontwikkelen en dit zal leiden tot een snelle stijging van de temperatuur in een opslag. Een vochtgehalte van 30-45% en een temperatuurtraject van 19-32°C [Gigler, 1996] worden genoemd als optimaal voor de ontwikkeling van schimmels. In het bijzonder bij de opslag van verkleind materiaal (zoals chips) en schors moeten deze condities worden vermeden, om dat deze materialen het meest gevoelig zijn voor biologische activiteit.

Verder is het tegengaan van schimmelgroei van groot belang in verband met het voorkomen van gezondheidsproblemen bij werknemers of andere personen die werkzaamheden in de nabijheid van zo'n opslag uitvoeren.

3.2.2 Opslagcondities

Omdat de opslagcondities in belangrijke mate bepalend zijn voor het voorkomen van broei (zie voorkomen broei) worden in de navolgende paragrafen de diverse opslagcondities kort besproken. In het volgende hoofdstuk wordt hieraan uitgebreid aandacht besteed, mede vanuit het oogpunt van de mogelijkheden om broei te voorkomen.

- afmetingen en geometrie
- ventilatie/verdichting (porositeit)
- meteorologische condities (neerslag, windsnelheid en omgevingstemperatuur)
- homogeniteit van de opslag
- duur van de opslag.

Afmetingen en geometrie van de opslag

De afmetingen en vorm van de opslag (de verhouding tussen inhoud en oppervlak) zijn van grote invloed op het broeigedrag omdat deze bepalend zijn voor de ventilatieprocessen in de opslag. De invloed van deze ventilatieprocessen komt in de volgende paragraaf aan de orde.

Ventilatie / verdichting

Verdichten of compacteren heeft zowel voor- als nadelen. Door het verdichten worden de ventilatiesnelheden lager. Lagere ventilatiesnelheden betekent enerzijds een verminderde aanvoer van zuurstof waardoor oxidatiereacties trager verlopen. Anderzijds kan de gegenereerde warmte moeilijker afgevoerd worden. Deze tegenstrijdige effecten maken het bijzonder moeilijk om in te schatten of met compacteren het gewenste effect ten aanzien van broei bereikt wordt (zie ook paragraaf compacteren/afdekken). Bij kolen, bij grotere opslagen, die langere tijd moeten blijven liggen, wordt in de regel wel gecompacteerd.

Als ervoor wordt gekozen om een opslag te verdichten, wordt dit meestal gedaan door middel van het aanrijden met een shovel. Er kan echter ook een mate van compactering optreden als gevolg van het eigengewicht. Hierbij drukt het bovenliggende materiaal op de onderliggende delen. Dit speelt natuurlijk vooral een rol bij hogere opslagen.

Voor kolen is gevonden dat door verkleinen van de vrije ruimte tussen de koolkorrels (compacteren) de ventilatie van lucht, en daarmee de broeineiging, sterk afneemt. De grootte van de ventilatiesnelheid is afhankelijk van de vrije ruimte tussen de kolenkorrels ($E = V_{\text{vrij}} / V_{\text{tot.}}$) en van het temperatuurverschil tussen de kolen en de buitenlucht (ΔT) [KEMA, 1988].

Bij langdurige opslag van koud aangevoerde steenkool kan het matig compacteren leiden tot sterkere broei dan bij los gestorte kolen [KEMA, 1988]. Wanneer biomassa wordt verdicht kan er zich lokaal een ophoping van vocht voordoen. Deze vochtige plekken kunnen dan het broeiproces in gang zetten.

Ventilatie bij opslag van hout en andere soorten biomassa is van belang vanuit het oogpunt van drogen van het materiaal. Dit is met name actueel bij vochtgehalten boven de 20%. Drogen kan gebeuren door natuurlijke ventilatie en dit heeft het beste resultaat bij de opslag van chunks en stammen. Daarnaast kan de ventilatie worden bevorderd door een ventilatietunnel onder de opslaghoop te plaatsen. Zweeds onderzoek heeft aangetoond dat hiermee het grootste deel van de ontstane warmte afgevoerd wordt waardoor het risico van broei sterk vermindert.

Bij de vergelijking van het droge stofverliezen bij opslagen van chunks en chips blijken de geringste verliezen aan droge stof en de hoogste afname van vochtgehalte op te treden bij opslagen van chunks onder een afdak, waarbij de vloer permeabel is zodat de natuurlijke ventilatie wordt bevorderd [Scholz, 2000]. Omdat de buitenluchttemperatuur 's nachts lager is dan overdag zien we dat de natuurlijke ventilatiesnelheid een dagelijks ritme volgt. De snelheid is 's nachts hoger omdat het temperatuurverschil tussen de omgeving en de lucht in de opslaghoop groter is. Dit uit zich ook in een dagelijks patroon in de temperatuur en het kooldioxide gehalte van de lucht in de hoop [Afvalzorg, 1999].

Weersinvloeden

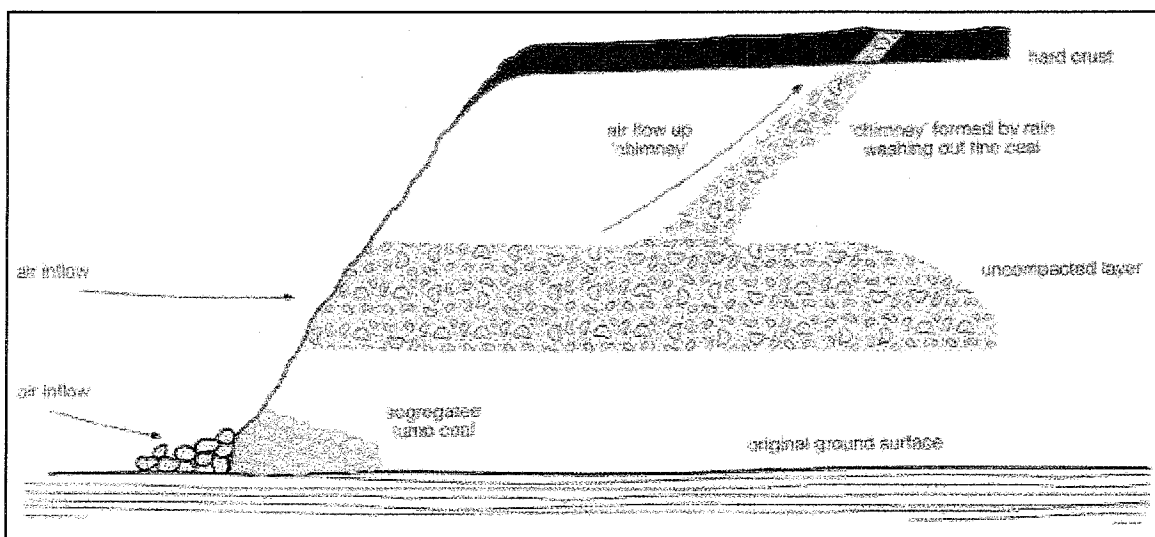
Indien de opslag niet overdekt is, zal de verhouding tussen neerslaghoeveelheid en verdamping een grote rol spelen. In Nederland kennen we een seizoensinvloed waardoor regenwater zal binnendringen in de opgeslagen hoop.

Ook de windsnelheid is van belang. Hierbij is de ligging van de opslag ten opzichte van de overheersende windrichting en de hellingshoek van de opslag van belang voor een drukverschil over de hoop. Dit drukverschil wordt gecreëerd door een overdruk aan de loef- en een onderdruk aan de lijzijde van de berg. Het drukverschil bepaalt samen met de poriegrootte en het temperatuurverschil tussen de biomassa en de buitenlucht, de ventilatiesnelheid.

Andere weersinvloeden bij een onoverdekte opslag zijn de temperatuur van de buitenlucht en in mindere mate de luchtvochtigheid. Eerder is al genoemd dat de ventilatiesnelheid in een opslaghoop afhankelijk is van het verschil tussen de buitenluchttemperatuur en de materiaaltemperatuur.

Homogeniteit van de opslag

Door broei geïnitieerde branden starten meestal in het overgangsgebied tussen aangedrukt en losser materiaal of tussen materiaal met verschillend vochtgehalte en/of verschillende deeltjesgrootte.



Figuur 5: luchtstroming door kolenopslag als gevolg van segregatie [IEA, 1999]

Dit verschijnsel werd zowel voor steenkool [IEA, 1999] als voor hout [Thörnqvist, 1988] gerapporteerd. Deze overgangsgebieden zorgen voor een verminderde afvoer van geproduceerde

Dit verschijnsel werd zowel voor steenkool [IEA, 1999] als voor hout [Thörnqvist, 1988] gerapporteerd. Deze overgangsgebieden zorgen voor een verminderde afvoer van geproduceerde warmte waardoor de temperaturen plaatselijk flink kunnen oplopen. Het is aannemelijk dat een zone met fijnere delen zorgt voor een gedeeltelijke afsluiting van de hoop. Hierdoor kunnen voorkeursstromingen ontstaan die plaatselijk een verhoogde toevoer van zuurstof veroorzaken. Juist in deze gebieden zal broei dan als eerste optreden. Figuur 5 toont schematisch de luchtstroom door een kolenopslag [IEA, 1999]. Het mag duidelijk zijn dat dergelijke voorkeursstromingen een verhoogd broeirisico met zich meebrengen.

Duur van de opslag

Wat betreft de invloed van de duur van de opslag zijn ertussen kolen en biomassa grote verschillen. Bij kolen spreekt men bij een opslag van enkele weken over een korte opslag en bij een opslag van een half jaar of langer over langdurige opslag. Bij biomassa, afhankelijk van het type biomassa, het vochtgehalte ervan en de vorm waarin het is opgeslagen, kan het gaan om veel kortere perioden (enkele dagen tot enkele weken). Zoals in de voorgaande paragrafen al is uiteengezet zijn houtchips veel gevoeliger voor broei dan chunks en stammen. Voor chips dient daarom de duur van de opslag zoveel mogelijk te worden beperkt, zeker wanneer het vochtgehalte hoog is.

Duidelijk komt naar voren dat een broei een complex proces, dat afhankelijk is van vele factoren. Om broei te voorkomen moet er enerzijds gekeken worden naar de materiaaleigenschappen en anderzijds naar de opslagomstandigheden. In het volgende hoofdstuk wordt het voorkomen van broei beschreven, waarbij vooral wordt ingegaan op de opslagcondities van biomassa.

4 VOORKOMEN VAN BROEI

Zoals in het voorgaande hoofdstuk reeds is verteld, zijn voor het voorkomen van broei naast de materiaaleigenschappen de opslagcondities van groot belang. In zijn algemeenheid wordt voor biomassa aanbevolen om het materiaal zodanig op te slaan dat er voldoende ventilatie mogelijk is, terwijl er geen neerslag de hoop mag binnendringen (bijvoorbeeld door een overkapping aan te brengen). In de volgende paragrafen wordt in detail ingegaan op de diverse aspecten waarmee bij de aanleg van een opslag/hoop rekening moet worden gehouden. Ook wordt een voorbeeld gegeven uit de Deense praktijk. Daarnaast is het belangrijk om bij een bestaande opslag een aantal parameters te monitoren om een eventueel broeiproces tijdig te kunnen signaleren.

4.1.1 Geometrie van de opslag

Voor de opbouw van een kolenopslag moeten de randvoorwaarden, zoals de geplande opslagduur en de fijnheid van de kolen, bekend zijn. Bij kortdurende opslag van fijne kool wordt een maximum hoogte van 8-9 meter aanbevolen. Bij grove kool hanteert men een maximale hoogte van 3-4 meter. Bij kortdurende opslag waarbij wordt gecompacteerd en ook adequate monitoring-systemen aanwezig zijn, kan men gaan tot hoogtes van wel 20-30 meter [IEA, 1999].

Uit kolenonderzoek is gebleken dat behalve de afmetingen ook de hellingshoek van de opslag van belang is, vooral aan de kant waar meestal de wind vandaan komt (loefzijde). Aanbevolen wordt om de hellingen van een opslag niet te steil te maken want dan kan de wind een geforceerde convectie veroorzaken met een verhoogde broeiactiviteit als gevolg [Fierro, 2001]. Een andere mogelijkheid om dit te verminderen is de aanleg van een voldoende hoge windkering [IEA, 1999].

Uit het eerder genoemde Zweedse onderzoek, blijkt dat het optreden van broei bij verkleind en onverkleind houtafval sterk afhankelijk is van de afmetingen van de opslag. Zo wordt vermeld dat bij een opslag van vers verkleind houtafval met een omvang van 55 m³ de temperatuur toenam tot boven de 60°C, terwijl bij een groter volume van de opslag (400 m³) de temperatuur steeg tot boven de 85°C [Thörnqvist, 1985].

In de Noorse literatuur is een overzichtartikel verschenen waarin een aantal aanbevelingen wordt gedaan betreffende de afmetingen van een onoverdekte opslag met verse houtchips. Om het risico van broei te reduceren mag de hoogte van een opslag een bepaalde maximum hoogte niet overschrijden. Deze hoogte is afhankelijk van het soort materiaal en van de mate van verdichting. Een overzicht is opgenomen in tabel 1 [Gislerud, 1990].

Tabel 1: *maximale opslaghoogten van houtproducten om het risico van zelfontbranding te minimaliseren [Gislerud, 1990]*

	niet gecompacteerd (m)	Gecompacteerd (m)
houtchips zonder schors	15	12
chips van naaldhout (hele boom)	10	7
verkleind residu hout	7	-
schors	7	4
zaagsel	6	4

4.1.2 Homogeniteit

Omdat broei meestal ontstaat op de overgangen tussen zones met verschillende eigenschappen moet een opslag zo homogeen mogelijk opgebouwd worden. Wij moeten hierbij niet alleen denken aan verschillen in vochtgehalte, maar ook verschillen in samenstelling en dichtheid. Ten aanzien van de samenstelling betekent dit, dat vermeden moet worden dat verschillende, materiaalsoorten bij elkaar opgeslagen worden. Bij steenkool is bekend dat losliggende grove delen aan de voet van een opslag (met name grove delen rollen omlaag langs de helling van de opslag, terwijl fijne delen gemakkelijker blijven liggen) als convectiebron voor het instromen van lucht in de opslag kunnen gaan werken.

Met name geldt dat voor dergelijke hopen van grove delen aan de windzijde van de opslag (zie ook figuur 4). Voor biomassa geldt dat er gekozen moet worden voor los opslaan zodat er beter geventileerd kan worden. Beter ventilatie zal de droging bevorderen, waardoor de broei wordt tegengewerkt. Indien menging onvermijdelijk is mogen de stoffen maximaal enkele dagen in (silo)opslag blijven. Vooral het mengen van nat en droog materiaal kan een explosieve groei van bacteriën en schimmels veroorzaken.

Wat het vochtgehalte betreft moet in het algemeen het materiaal zo droog mogelijk opgeslagen worden. Daarnaast is het van belang dat het vocht zo homogeen mogelijk verdeeld is omdat broei juist ontstaat in overgangsgebieden met een verschillend vochtgehalte.

Bij steenkool ontstaan af en toe problemen met verwaaing van aanwezig fijn stof. Om dat tegen te gaan moet in zo'n situatie de kolenopslag worden besproeid met water. Afhankelijk van de fractie fijne deeltjes kan dit ook voor biomassa van toepassing zijn, maar dat is dan wel ongunstig vanuit het oogpunt van broei.

Eerder is opgemerkt dat vers hout gechipt compleet met bast, bladeren of naalden extreem gevoelig is voor broei. Thörnqvist noemt dan ook dat hoe hoger het aandeel naalden en schors in een opslag, hoe hoger de temperatuur van de opslag oploopt [Thörnqvist, 1985].

4.1.3 Tijdsduur

Uit kolenonderzoek is gebleken dat bij langdurige opslag van grotere hoeveelheden speciale maatregelen, zoals compacteren en temperatuurcontrole noodzakelijk zijn om kolenbroei tegen te gaan. Voor biomassa wordt in het algemeen aanbevolen om het zo kort mogelijk op te slaan. Voor een goede planning zijn twee Engelstalige termen in gebruik die voor zichzelf spreken; het zogenaamde "just in time"-principe of het "first in, first out"-principe [KEMA, 2001].

Opgemerkt is dat bij houtchips vanuit energetisch oogpunt beter het "last-in, first-out" principe gehanteerd kan worden [GIT, 1984]. De reden hiervoor is dat het verlies in calorische waarde in de eerste periode bij een open opslag meestal sneller gaat dan in de periode daarna. Men gaat er hierbij vanuit dat de stookwaarde vooral daalt door een toename van het vochtgehalte ten gevolge van neerslag.

Naast de opslag in hopen kan biomassa ook in silo's worden opgeslagen. In deze gevallen moet worden voorkomen dat gevulde installaties langere tijd (zoals een weekend) stilstaan. Er kunnen dan ook problemen met vastkoecken ontstaan.

In Zweden wordt biomassa meestal als chips opgeslagen naast de energiecentrale om verzekerd te zijn van een constante aanvoer van biobrandstof. Nadelen hiervan zijn grote verliezen van de hoeveelheid droge stof, warmteontwikkeling met het risico van zelfontbranding en gezondheidsrisico's ten gevolge van hoge concentraties van allergene microsporen in de lucht. Een alternatief opslagsysteem is getest waarbij de verkleining van de brandstof is uitgesteld tot na de opslag. Een verminderde broeiactiviteit is te verklaren doordat bij grotere deeltjes hogere ventilatiesnelheden worden bereikt en een kleiner oppervlak beschikbaar is voor microbiologische activiteit (Jirjis, 1993). Vanuit het oogpunt van broei is dit aan te bevelen, maar dit zal moeten worden afgewogen tegen de overige economische factoren (transport- en opslagkosten).

4.1.4 Temperatuur

Ter voorkoming van broei is het van belang om de temperatuur van het materiaal zo laag mogelijk te houden. Bij de aanvoer van relatief warm materiaal betekent dit dat het noodzakelijk is om eerst te koelen, indien een opslagtijd langer dan enkele dagen wordt voorzien. Meestal zal aan de lucht gekoeld worden door het materiaal om te keren met een shovel of door gebruik te maken van extra transportbanden.

Ook hierbij geldt weer dat dit aspect met name van belang is bij opslag van verkleind hout (chips) met een hoog vochtgehalte. Als dergelijk materiaal wordt opgeslagen in een slecht geventileerde opslaghoop kan een snelle stijging van de temperatuur optreden. Bij goed geventileerde biomassaopslagen heeft het materiaal meestal een iets hogere temperatuur (5-20°C hoger) dan de

omgevingstemperatuur en fluctueert de materiaalt temperatuur mee met de veranderingen in de omgevingstemperatuur [Gigler, 1996]. Als de temperatuur van het materiaal niet hoger is dan 20°C boven de omgevingstemperatuur kan ervan worden uitgegaan dat het zonder extreem broeigevaar kan worden opgeslagen.

4.1.5 Compacteren / afdekken

Bij langdurende kolenopslag gaat men gewoonlijk compacteren in lagen van 150-300 mm. Het doel hiervan is het voorkomen van toevoer van lucht (en dus zuurstof) in de opslag. Dit is ook te bereiken door het aanbrengen van een afsluitende laag aan het oppervlak van de opslag. Dit kan bijvoorbeeld latex of een andere polymeer zijn. Ook worden wel water / vliegasslurry's toegepast [IEA, 1999 en KEMA, 1988].

Bij biomassa lopen de meningen over het wel of niet compacteren van een opslag uiteen. In Denemarken stelt men expliciet dat de opslag van houtchips niet verdicht mag worden, in Amerika daarentegen verdicht men de opslag wel. Men is het er wel over eens dat er geen overgangen tussen compacte en losse biomassa mogen bestaan. Juist op deze grensvlakken heeft men de start van broei waargenomen [Novem, 1999]. Het beste is om niet te verdichten en de opslag zo homogeen mogelijk te vullen.

Eerder is genoemd dat opslag onder een overkapping het voordeel heeft van voldoende ventilatie en voorkoming van vochtindringing. Dit is met name van belang voor droog materiaal dat een zo laag vochtgehalte heeft dat er geen broeigevaar aanwezig is. Dat een overkapping niet altijd wordt toegepast heeft dikwijls te maken met de omvang van een opslag en wijze van handling van het materiaal. De handling (opwerpen en afgraven van een opslag) kan door een overkapping sterk worden bemoeilijkt.

Houtchips worden wel afgedekt met zeil. Uit een door Afvalzorg uitgevoerde praktijkproef wordt geconcludeerd dat zowel afdekken als niet afdekken belangrijke nadelen heeft. Voor niet afdekken worden de volgende nadelen genoemd:

- Het vochtgehalte in niet afgedekte hopen neemt toe doordat de dikte van de natte laag toeneemt.
- De afbraak van organisch materiaal komt op gang bij toename van het vochtgehalte.

Voor afdekken worden als nadelen genoemd:

- Volledig afdekken met zeil is moeilijk door het zich zetten van de hoop; herverdeling van vocht vindt plaats waardoor op plaatsen waar vocht zich ophoopt biologische activiteit op gang komt
- Het aanbrengen van zeil is duur en tijdrovend [Afvalzorg, 1999].

Naast afdekken met zeil wordt in de Zweedse literatuur gesproken over het afdekken met geïmpregneerd papier [Jirjis, 1995].

In de voorgaande 2 hoofdstukken is stap 1 van het onderzoeksschema beschreven. In de volgende 2 hoofdstukken wordt stap 2 verder uitgewerkt. Naast de monitoring van broei wordt ook de bestrijding van broei bij biomassa in het volgende hoofdstuk beschreven.

5 MONITORING EN BESTRIJDING VAN BROEI

Ernstige gevolgen van zelfopwarming in de industriële praktijk hadden kunnen worden voorkomen indien de vroege stappen van oxidatie waren opgemerkt en hier tegen opgetreden was. Een onopgemerkte opwarming kan kostbaar en zelfs fataal voor werknemers zijn, daarom moet er vroege detectie en lokalisatie van de hot spots plaats vinden, om de consequenties tot een minimum te beperken. Vanwege de langzame oxidatie, kan het fenomeen van zelfopwarming in een bulk materiaal worden gekarakteriseerd met enkele chemische en fysische effecten. De exotherme reactie veroorzaakt een stijging in temperatuur en afhankelijk van het materiaal kan er een emissie van diverse gassen, stoom en aerosolen plaats vinden. Ter signalering van broei in een zo vroeg mogelijk stadium kunnen de temperatuur en/of de reactieproducten gemeten worden. Wanneer deze metingen niet afdoende zijn en de broei reeds het stadium van smeulen heeft bereikt, kan altijd nog worden teruggevallen op het gebruik van rookdetectors. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op stap 2 van het onderzoeksschema. Dit gebeurt door de verschillende detectiemethoden voor broei te bespreken, gevolgd door de middelen om broei te bestrijden.

5.1 Monitoring van broei

Bij de monitoring van broei zijn verschillende (detectie) methoden afzonderlijk of gecombineerd toepasbaar. De toepasbaarheid is afhankelijk van verschillende facetten zoals de soort opslag, het materiaal etc. In de volgende paragrafen komen de verschillende methoden aan bod.

5.1.1 Thermische detectie

De opbouw van warmte is relatief eenvoudig te meten. Een moeilijk punt daarbij is dat broei zeer lokaal kan optreden en dat dus een fijnmazig meetnet nodig is voor een doeltreffende controle. Hierbij moet worden gedacht aan de preferentie voor broei aan de windzijde van een opslag. Met name aan die kant van de opslag moet de dichtheid van temperatuursensoren hoger zijn dan elders in de opslag om de kans op detectie van (lokale) hot spots te vergroten. Handmatig testen door een lange staaf in een opslag te steken en na terugtrekken van de staaf de temperatuur van het uiteinde met de hand te voelen is een simpele methode om verdachte plekken te controleren. Een moderne variant daarop is een staaf met een thermokoppel aan het eind en een display aan de bovenzijde. Door de locale warmteontwikkeling is een meting van de ruimtetemperatuur of een meting van de oppervlaktetemperatuur bijvoorbeeld met behulp van een infrarood meting (IR-meting) niet geschikt als bewaking tegen broei.

Bij een kolenopslag moet extra aandacht aan de temperatuurontwikkeling worden gegeven, wanneer de temperatuur boven de 40°C komt. Bij temperaturen hoger dan 60°C wordt ervan uitgegaan dat broei een gevaarlijk stadium heeft bereikt [IEA, 1999].

In kleine opslagen kan deze temperatuurstijging van dunne lagen materiaal makkelijk met temperatuursensoren worden geregistreerd, zelfs wanneer de temperatuursensor niet direct in de hot spot zit. In grote opslagen is dit echter een wezenlijk probleem. De methode is dan niet toepasbaar, omdat het omringende materiaal de warmtetransport van de hot spot naar de omgeving tegenwerkt door deze zelf op te nemen. Bij elektriciteitscentrales wordt de biomassa opgeslagen in grootschalige silo's. Het probleem bij silo's is echter dat deze in het algemeen niet toegankelijk zijn voor eerder beschreven temperatuurmetingen. Temperatuurmeting kan daar dan ook plaats vinden via (draadloze) temperatuursensoren, waarvan de positie bekend is. Deze zijn meestal geplaatst op de bodem en in sommige gevallen aan de zijkant van de silo. Een betere oplossing is het gebruik maken van stalen kabels waarop temperatuursensoren bevestigd zitten, die vanonder naar boven in de silo opgehangen zijn. Hoe meer kabels des te groter de kans is om de broei in een vroegtijdig stadium te detecteren.

De IR-meting is dan eveneens niet geschikt als bewaking tegen broei, wanneer de broei in het midden van silo plaats vindt. Detectie is dan niet mogelijk vanwege het isolerende karakter van de omringde biomassa. Daarnaast zijn er praktische problemen en moeilijkheden. Ruwe procesomstandigheden veroorzaakt door het storen of bewegen van het opgeslagen materiaal, het veranderen van de opslaghoogte in de silo bemoeilijken het gebruik van thermokoppels [Kuchta, 1981].

Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruik maken van "balletjes" gevuld met een thermometer gekoppeld aan een positie-signaal. Deze balletjes kunnen dan bij het vullen van de silo worden toegevoegd. Wanneer broei in de buurt van zo'n balletje optreedt kan dit snel worden geregistreerd, waarop dan direct actie kan worden ondernomen. De positionering kan gebeuren via verschillende media. Hieronder volgt een overzicht van de verschillende (toekomstige) systemen:

- Global positioning systems
- Radiotransmitters

Global positioning systems

De bekendste positionering op dit moment is het Amerikaanse *Global Positioning System* (GPS)¹. GPS is in het leven geroepen en wordt onderhouden door de Amerikaanse overheid. In eerste instantie met name bedoeld voor militaire doeleinden. Het systeem bestaat uit een netwerk van 24 satellieten die rond de aarde draaien. Ieder van deze satellieten draait twee keer per dag in een vaste baan om de aarde en zendt een uniek signaal uit. Met een GPS-ontvanger kunnen deze unieke signalen worden opgevangen en verwerkt. Met behulp van deze informatie en een in de ontvanger ingebouwde almanak kan de GPS-ontvanger de positie berekenen en de verplaatsing registreren.

De GPS ontvanger ziet alleen de satellieten die op dat moment boven de horizon staan, meestal zijn dat er een stuk of zes. Overal ter wereld zijn deze te ontvangen. Het weer speelt hierbij geen rol. Wat betreft de nauwkeurigheid van het signaal, geeft de GPS-ontvanger een geschatte foutmarge van 10 meter van de werkelijke positie aan. Met 10 meter foutmarge wordt bedoeld dat het berekende punt binnen een straal van 10 meter rond het werkelijke punt ligt². In 2006 start het Europese Galileo project³. Dit is een gemeenschappelijk initiatief van de Europese Unie en het Europese Ruimteagentschap. Met dit eigen Global Positioning System dat in 2008 moet functioneren, wil Europa onafhankelijk worden van de Verenigde Staten. Het voordeel van dit systeem is de grotere nauwkeurigheid, de foutmarge zal met dit systeem binnen de 1 meter vallen.

Radiotransmitters

Tot deze groep horen de draadloze informatiezenders. Naast de bekende Wi-Fi, Bluetooth en 3G wordt er op dit moment hard gewerkt aan UltraWideBand (UWB)⁴. UWB is gebaseerd op een oude techniek die door digitalisering ongekende mogelijkheden kreeg⁵. Het zal een omwenteling in draadloze communicatie en economische exploitatie daarvan veroorzaken. De belangrijkste reden is dat UWB vrij van de ether gebruik kan maken en vrijwel niet traceerbaar is. Het gebruik van de UWB is sinds februari 2002 toegestaan in Amerika. UWB maakt op een andere manier gebruik van het beschikbare radiospectrum dan de gebruikelijke apparatuur die informatie met gemoduleerde draaggolven over specifieke frequentiebanden verstuurt. UWB signalen hebben geen draaggolf en de signaalsterkte is zo gering dat ze onder het niveau van de al in de ether aanwezige natuurlijke ruis blijft. Juist daarom was het al jaren het speeltje van de militairen. Het oude aan UWB is dat Hertz bij de eerste draadloze proeven meer dan honderd jaar geleden gebruik maakte van vonken. De pulsen vlogen vrij door de ether. Marconi maakte er honderd jaar geleden met z'n morsecode informatie van. Bij UWB zijn het geen vonken meer maar ultra korte en precieze pulsjes waarbij elk pulsje een bit is. De pulsjes zijn zo willekeurig als mogelijk in de tijd verdeeld en resulteren in breed frequentiespectrum van enkele Gigahertz met een vermogen van een paar microWatt.

Als hoge communicatiesnelheden gewenst zijn dan is de afstand waarover dat kan plaatsvinden slechts enkele meters. Het record van de datatransmissiesnelheid ligt nu al op 1,2Gbit/sec. Anderzijds is bij lage datasnelheid het bereik enorm groot. De theoretische grens ligt op 2000km bij 1 bit/sec. Natuurlijk is dat praktisch nooit haalbaar door allerlei verliezen zoals thermische-, modulatie- en antenneverliezen, maar een verbinding van 100kbit/sec over enkele kilometers ligt binnen de

¹ <http://www.gps-garmin.nl>

² <http://www.biodiv.nl/gps/>

³ http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo

⁴ www.wired.com

⁵ www.gemex.nl

mogelijkheden. UWB zenders en ontvangers weten aan de hand van het signaal precies hoever ze van elkaar verwijderd zijn. Deze op centimeters nauwkeurige afstandmeting opent een enorm aantal nieuwe mogelijkheden die vroeger niet eenvoudig te realiseren waren. Dit in tegenstelling tot de huidige Wi-Fi, Bluetooth en 3G systemen.

5.1.2 Gas detectie

Naast een temperatuurmeting kan een (continue) gaschromatografische (GC) meting uitgevoerd worden voor de verschillende componenten. Zo kunnen naast de componenten die ontstaan bij de (on)volledige verbranding (CO₂ en CO) ook de aanwezige hoeveelheid O₂ informatie verschaffen of er al dan niet broei optreedt. Uit kolenonderzoek is gebleken dat bij lage temperatuur (<35°C) en niet te hoge ventilatiesnelheden (<6*10⁻⁴ m/s) op grond van de concentraties van zuurstof en kooldioxide in de vrije ruimte van de kolenopslag een uitspraak gedaan kan worden of al dan niet broei te verwachten is binnen een aantal maanden [KEMA, 1988]. Voor biomassaopslagen is geen informatie gevonden om een soortgelijke voorspelling te doen. Om een eventuele verhoogde anaërobe activiteit van schimmels en bacteriën te detecteren kan de NH₃ en H₂S productie gevolgd worden [KEMA, 2001]. Dit is alleen van belang wanneer gebleken is dat er in belangrijke mate sprake is van anaërobe condities in een opslag.

Uit onderzoek verricht op een stortplaats in Canada bleek dat de meting van het gehalte aan CO de beste indicator was om de broei/brand te registreren⁶ (zie tabel 2). Andere indicatoren waren (naast metingen van overige componenten) temperatuur- en drukmeting. Aan de hand van de concentratie CO kon de fase worden bepaald.

Tabel 2: CO concentraties.

Fase	CO (ppm)
Geen broei/brand indicatie	0-25
Mogelijk brand in het gebied	25-100
Potentiële smeulende brand dichtbij	100-500
Brand of exotherme reactie mogelijk	500-1000
Brand aanwezig	>1000

5.1.3 Rook detectie

Er bestaan diverse systemen voor het detecteren van rook⁷:

- Ionisatie rookmelders
- Optische detectors
- Halfgeleiders (Taguchi-sensoren)

Ionisatie rookmelders

Ionisatiemelders hebben een kleine radioactieve bron die geladen deeltjes uitzendt. Die deeltjes worden opgevangen op een elektrode, zodat tussen de twee elektroden een stroompje loopt. Bij rook neemt de stroom tussen de elektroden af, omdat een deel van de geladen deeltjes door de rook geabsorbeerd of verstrooid wordt. Bij een felle, uitslaande brand zijn de temperaturen hoog en ontstaat er een vollediger verbranding. Hierbij komen kleinere rookdeeltjes vrij dan bij een smeulbrand. Een ionisatiemelder zal kleine rookdeeltjes sneller detecteren dan een optische melder en zal bij een direct uitslaande brand eerder alarm geven.

⁶ www.forester.net/mw_0109_vancouver.html

⁷ http://www.vego.nl/7/7_049.htm

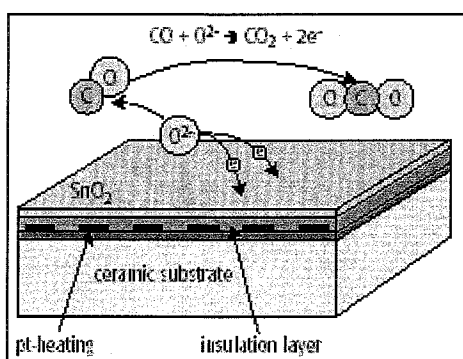
Optische detectors

Bij de optische detectors wordt een lichtbundeltje uitgezonden en door een lichtgevoelige cel opgevangen. Als zich rook in het lichtbundeltje bevindt, zal het licht deels verstrooid of geabsorbeerd worden. De rookmelder detecteert dit en geeft een alarm af. Het merendeel van de branden, vooral in woningen, ontstaat vanuit een smeulbrand die zich vervolgens tot een grote open brand ontwikkelt. De rookdeeltjes bij een smeulende brand zijn betrekkelijk groot omdat ze niet volledig verbranden. Een optische rookmelder zal grotere deeltjes eerder detecteren dan een ionisatiemelder en dus eerder alarm geven bij een beginnende brand. De optische rookmelders bevatten geen radioactieve bron en zijn daarom veiliger voor mens en milieu. Sinds 2002 is het gebruik van optische rookmelders met lichtnetaansluiting in nieuwbouwwoningen verplicht en per 31 december 2005 zal de verkoop van ionisatierookmelders aan huishoudens verboden worden⁸.

Taguchi-sensoren

Halfgeleiders zijn meestal elementen en verbindingen met een tetraëdrische kristalstructuur, waarin enkele atomen worden vervangen door 'vreemde' atomen, met één elektron meer of minder in de buitenste schil. Dit proces van vervangen wordt ook wel doperen genoemd. In het eerste geval ontstaat een elektronenoverschot, in het tweede geval een elektronentekort (een zogenoemd "gat"). Men spreekt in deze gevallen van halfgeleiders van het n-type en p-type. De taguchi-sensoren die geschikt zijn voor de detectie van rookdeeltjes en gassen bestaan uit een metaaloxide dat gedoteerd is met n-materiaal. De metaaloxide wordt vervolgens verwarmd tot ongeveer 100 tot 300°C. De weerstand van het materiaal is dan afhankelijk van de gas-samenstelling van de lucht. De weerstandsvariatie kan dan worden gemeten door een stroom door de sensor te sturen.

In de praktijk worden meerdere sensoren gekoppeld aan een pc. Zo'n systeem wordt in Denemarken en Duitsland reeds op grote schaal toegepast bij de open opslag van steenkool en in zowel de korte- als lange termijn opslag van houtpellets [Kohl, 1999]. Het gebruikte systeem is weergegeven in onderstaande figuur 6.



Figuur 6: overzicht taguchi-sensor [Kohl, 1999]

Met behulp van halfgeleidersensoren kunnen de vrijkomende CO-, H₂-, en NO_x-gassen boven de brandbare massa gemeten worden. De sensoren rapporteren continu de meetgegevens aan een centrale computer die in geval van vastgestelde broei direct alarm kan slaan. Ook wanneer er (stof)ontploffingsgevaar dreigt kunnen varianten van dit systeem gebruikt worden.

5.1.4 Drukmeting

In het verleden zijn bij de opslag van kolen bij mijnen ook drukmetingen verricht [Timko, 1995]. Deze drukmetingen werden gebaseerd op het verschil in druk tussen de hoop en de ingang waar gemeten werd in de hoop. In het begin werden de resultaten toegeschreven aan de ventilatie in de hoop in plaats van broei. Echter plekken met een groter drukverschil hadden een grote neiging voor

⁸ www.cgi.milieucentraal.nl

de karakteristieken van spontane opwarming. Ondanks dat er een correlatie was gevonden voor de drukverschillen en de kans op spontane opwarming, wordt deze methode niet toereikend beschouwd voor de detectie van broei. Echter in combinatie met de eerdergenoemde detectietechnieken kan deze wel van nut zijn. Toepassingen in gesloten opslagen kunnen wellicht problematisch zijn, vanwege de comprimerende werking van de opslag.

5.2 Bestrijding van broei

Bij de bestrijding van broei moet onderscheid worden gemaakt tussen open en gesloten opslag. Bij de open opslag is de broei, wanneer ze in een vroeg stadium wordt gedetecteerd, een minder groot probleem. Bij open opslagen kan met behulp van een shovel de hotspot verwijderd worden. Het hete materiaal kan dan aan de lucht afkoelen, of eventueel geblust worden. Bij een gesloten opslag dienen zich andere problemen aan. Niet alleen is de detectie/locatie een groter probleem, het bestrijden ook. Smeulbranden in silo's zijn zeldzaam en telkens weer anders, vanwege afwijkende constructiekenmerken en de inhoud van de silo's [Jaarboek, 1999]. Het feit dat de Nederlandse brandweer geen landelijk expertisecentrum voor gecompliceerde branden kent, betekent dat telkens weer opnieuw het wiel moet worden uitgevonden. Een gevolg hiervan kan zijn dat bij het bestrijden van broei in grootschalige opslagen soms ook psychologische problemen optreden. Bij het bestrijden van de broei wordt men dan 'gehinderd' door de steeds veranderende opvattingen vanonder meer de silosaneerder. De belangrijkste oorzaak hiervan ontstaat door het 'fiddling around': waarbij beslissers snel in beslag worden genomen door kleinere uitvoeringsproblemen, waardoor niet meer over de oorspronkelijke primaire beslissing wordt nagedacht.

Er zijn diverse blusmiddelen beschikbaar voor het bestrijden van broei, allen met een ander karakter en gevolg. Naast het afdekken met zeil of geïmpregneerd papier en/of verwijderen kan ook gekozen worden voor het gebruik van een blusmiddel. Hieronder volgt een overzicht:

- Blussen met water
- Volschuimen
- Inertiseren

5.2.1 Blussen met water

Blussen met water in een kolenopslag wordt afgeraden in verband met explosiegevaar, mogelijk versnelde oxidatie van de kool en het uitspoelen van de fijnere kooldelen waardoor naderhand de permeabiliteit van de opslag juist groter is en de opslag dus broeigevoeliger wordt.

Ook voor het blussen in een biomassaopslag wordt aanbevolen geen water toe te passen. Net als bij kolen kunnen er dan lokaal vergassingsreacties optreden. Het water dient dan (verrassenderwijs) als zuurstofleverancier voor het ontstaan van explosieve gasmengsels van CO en H₂ (Novem, 1999). Daarnaast kan de broeigevoeligheid van het materiaal toenemen, wanneer het vochtgehalte van het materiaal toeneemt.

5.2.2 Volschuimen

In sommige gevallen kan broei bestreden worden, door het blussen met een schuimvormend middel. Dit is het geval wanneer de broei nog in een vroeg stadium verkeert. Een bijkomend voordeel van volschuimen van een silo is dat het schuim voorkomt dat er een gevaarlijke situatie ontstaat waarbij de silo door de smeulbrand 'volloopt' met brandbare verbrandingsgassen. Dit zou uiteindelijk zelfs tot een (stof)explosie kunnen leiden. Maar er zijn echter ook nadelen te bespeuren. Het onderkende gevaar dat de waterinhoud van schuim leidt tot zwelling van de silo-inhoud, betekent echter dat een schuiminzet slechts korte tijd kan worden volgehouden. Bovendien zijn de kosten van het schuimvormend middel (SVM) relatief hoog en beïnvloedt de vermenging van de silo-inhoud en het SVM de restwaarde van de silo-inhoud negatief.

5.2.3 Inertiseren

Voor het bestrijden van broei in opslagsilo's is inertisering met gasvormige stikstof (N_2) niet effectief. Bestrijding door afkoeling is wel effectief. Door het injecteren van vloeibare N_2 of CO_2 injecteren kan een koelend effect gerealiseerd worden. Dit is echter een dure maatregel die alleen in extreme situaties toegepast wordt. Het continu inertiseren van de ruimte is dus weinig effectief tegen broei. Daarnaast zullen menselijke gevaarsaspecten een grote rol gaan spelen (met name bij betreding van deze ruimte voor bijvoorbeeld onderhoud) [KEMA, 2001]. Gebruik van droog ijs (CO_2) wordt wel toegepast als blusmiddel. Het heeft met name zin bij gesloten systemen of als de CO_2 in het centrum van een opslag kan worden ingebracht (anders verwaait de CO_2 te gemakkelijk en heeft het geen effect). Als voorbeeld wordt in de literatuur een incident genoemd waarbij 250 kg/h droog ijs werd gebruikt om een brand te bestrijden in een kolenopslag van 25 000 ton [IEA, 1999].

Het meest voor de hand liggend om broei te bestrijden in silo's is het inertiseren van de atmosfeer. Dit kan gedaan worden door het toevoegen van het "zwarte" CO_2 aan de bovenkant en/of het toevoegen van N_2 aan de onderkant van de reactor. Wat betreft CO_2 is op grond van de casuïstiek wel duidelijk dat dit blusmiddel slechts kan dienen om de smeulbrand te controleren.

Definitieve blussing van de silo-inhoud wordt met CO_2 niet bereikt. De in de silo-inhoud aanwezige zuurstof is voldoende om de smeulbrand praktisch gesproken onbeperkt te onderhouden. Bijkomend voordeel van inertiseren met stikstof is dat het begin van het broeiproces onderdrukt kan worden (of bij vers materiaal te beperken tot enzymatische broei), doordat aërobe micro-organismen de inertisering met stikstof niet overleven. Verder zal het inertiseren geen negatief effect hebben op de restwaarde van de silo-inhoud.

Een probleem dat kan optreden bij het inertiseren is het explosiegevaar. Het beste is namelijk om het inerte gas aan de onderkant te injecteren, omdat de verbrandingsproducten en opgewarmde gassen omhoog gaan. Het inerte gas zal dan aangezogen worden, waardoor het de plaats van zuurstof zal innemen. Het gevaar bestaat hierbij dat de aanwezige CO of ander brandbaar gas (afhankelijk van het opgeslagen materiaal) op het smeulende gedeelte tot ontploffing komt. Explosies doen zich voor wanneer het gehalte aan CO, in een CO-lucht mengsel boven de 12.5% (125.000 ppm) komt en de temperatuur van het smeulende oppervlak boven de 605°C komt [Nabert, 1963]. Om dit tegen te gaan moet er daarom ook geleidelijk aan, aan de bovenkant inert gas geïnjecteerd worden. Explosies kunnen voor voor elk gehalte aan CO, worden tegengegaan, wanneer het gehalte aan toegevoegd CO_2 minimaal 42% van het volume in de gasfase bedraagt [Zabetakis, 1965]. Voor N_2 bedraagt dit minimaal 57% van het volume in de gasfase. Het verschil tussen deze getallen is toe te schrijven aan het feit dat CO_2 effectiever is als inert gas dan N_2 , vanwege de hogere warmtecapaciteit van CO_2 . De uiteindelijke blusmethode zal echter altijd neerkomen op het leeghalen van de silo. Daarbij moet aandacht besteed worden aan het gevaar dat door wervelingen de smeulbrand zich explosief uitbreidt of een stofexplosie veroorzaken.

Een niet te onderschatten probleem bij het blussen met schuim of water, is dat wanneer de O_2 toevoer wordt beperkt het gehalte aan CO verder zal toenemen als gevolg van de onvolledige verbranding. Dit kan in extreme situaties zelfs tot vergiftigingsproblemen leiden bij het (blussend) personeel.

5.3 Conclusies

Broei kan op verschillende manieren gedetecteerd worden. In de toekomst moet er verder onderzoek worden verricht, om uit te vinden welke detector en/of een combinatie van detectoren het meest geschikt is om de broei in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Verder dient de locatie van de detector afhankelijk van de soort opslag uitvoeriger bestudeerd te worden. Dit vanwege het stromingsveld van de atmosfeer in de installatie. Eveneens dient er verder onderzoek naar de meest effectieve blusmiddelen voor de verschillende biomassastromen plaats vinden. Niet alleen vanuit economisch standpunt, maar vooral vanwege de veiligheid om ongevallen in de toekomst te voorkomen. In het volgende hoofdstuk komen experimentele methoden aan bod die (in de toekomst) kunnen dienen om broei bij biomassa te kunnen inschatten.

6 EXPERIMENTELE METHODEN VOOR HET INSCHATTEN VAN BROEI

Zoals in het vorige hoofdstuk naar voren komt, bestaat er nog weinig informatie om broei bij biomassa te voorkomen. Om de broei te kunnen beheersen moet deze al in vroeg stadium gedetecteerd worden. Voor (brandbare) poeders zijn al diverse studies verricht, niet alleen om smeulende brandjes te detecteren maar ook om deze te onderdrukken. Naast de ontbranding van poeders ontstaan door mechanische- of elektrische vonkoverslag, open vuur en hoge temperaturen of door contact met hete oppervlakken, bestaat er ook het gevaar dat het materiaal zich zelf gaat opwarmen. De opwarming van de poeders kan hierbij zelfs zover gaan dat er brandjes ontstaan. In het ergste geval, kunnen zich stofexplosies voordoen. Over het algemeen zullen silo's gevuld met biomassa niet snel tot ontploffing komen. Theoretisch gezien is de kans op een stofexplosie laag tot matig bij opslagen van biomassa [Handboek Arbo-aspecten, 2000]. Opgemerkt kan worden dat de kans op een stofexplosie afhankelijk is van:

- Deeltjesgrootte: deeltjes boven de 75 µm geven in het algemeen geen stofexplosie. Bij biomassa zijn de deeltjes over het algemeen aanmerkelijk groter.
- Het vochtgehalte van de stof: hoe droger, hoe groter de kans op explosies.
- De chemische samenstelling van de stof. Hoe makkelijker de stof of haar bestanddelen zich verbinden met zuurstof, hoe groter de kans op een stofexplosie.

Volgens een literatuurstudie, verricht in 1980 in Engeland, is 10% van alle branden en explosies in dat jaar, veroorzaakt door chemische reacties van onstabiele stoffen [Philips, 1981]. Wat betreft stofexplosies, wordt 5% van alle stofexplosies in Duitsland tussen 1965 en 1980 toegeschreven aan zelfopwarming processen [Beck, 1981]. In de Verenigde Staten was in de periode tussen 1982 en 1990, 3.1% van de stofexplosies bij de opslag van graan veroorzaakt door spontane opwarming. Voor de andere takken van industrie kwam dat cijfer op 4% uit. [Schoeff 1992]. Bekend is dat de ene groep van materialen meer vatbaar is voor spontane verwarming dan andere. De kans op zelfontbranding bij hout en steenkool is veel groter dan bij landbouwproducten, plastics en metalen. In het verleden hebben zich al vaker branden voorgedaan bij de grootschalige opslag van hout, steenkool, veen etc. Bij het overslagbedrijf EBS in de Rotterdamse Botlek heeft zich recent nog een smeulende brand voorgedaan. In deze silo lag 30.000m³ houtstof opgeslagen⁹.

Tijdens het onderzoek naar het ontstaan van de ongelukken komt bovendien duidelijk naar voren dat er te weinig aandacht is besteed aan de vroege detectie van zelfontbrandingsprocessen. Wellicht dat met de verderop beschreven experimenten beter inzicht kan worden verkregen in het broeigedrag van de verschillende biomassastromen.

Theorieën van zelfopwarming en thermische "runaway"

De thermische explosie theorie beschrijft omstandigheden voor een thermische runaway in reactie- en decompositie systemen. Het tracht het gedrag van deze systemen in de praktijk te voorspellen. Van 't Hoff beschreef het fenomeen van zelfopwarming slechts [Verhoeff, 1983]. Semenov was de eerste die een mathematische beschrijving opstelde van de stabiliteit, de explosie- en ontbrandings omstandigheden van een zelf opwarmingssysteem. Vervolgens was het Frank-Kamenetski die dit mathematische probleem oploste door enkele simpele grenzen toe te voegen. In de afgelopen 30 jaar is er intensief onderzoek verricht, zowel op experimenteel als op theoretisch gebied, wat uiteindelijk heeft geleid tot het Thomas model [Bowes, 1984].

Op het gebied van steenkool is al veel onderzoek verricht naar zelfopwarming en spontane oxidatie. De belangrijkste onderdelen zijn reeds besproken in hoofdstuk 3 en 4, hier volgen nog enkele onderbelichte onderdelen. Wat betreft de reactiesnelheid, deze verdubbelt bij elke temperatuurstijging van 8 tot 11°C. Verder geldt dat "vers gemijnde steenkool het grootste oxidatiepotentiaal bezit, echter het optreden van een hotspot kan maanden op zich laten wachten [U.S. Dept. of Energy, 1994]. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van methoden die van nut kunnen zijn bij de inschatting van broei, vervolgens worden experimentele methoden beschreven die binnen KEMA worden uitgevoerd.

⁹ www.nu.nl

6.1 Experimentele methoden

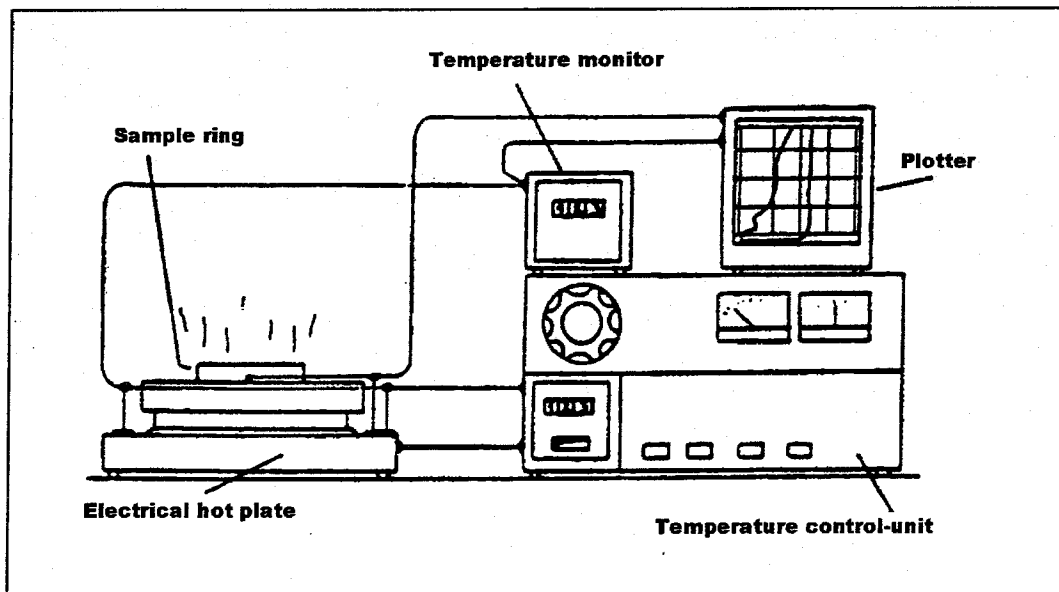
Naast het uitwerken van detectiemethoden is het belangrijk om zoveel mogelijke informatie te verkrijgen over de relevante veiligheidskarakteristieken van een specifieke situatie. Er is reeds een scala aan experimenten naar de waarschijnlijkheid van bepaalde vaste stoffen om oxidatie processen te ondergaan en naar andere kenmerken die veilige procesomstandigheden beïnvloeden. Verschillende indices van brandbaarheid worden gegeven in de literatuur, maar geen enkele van deze is algemeen in gebruik [Bureau of mines, 1977]. Vandaar dat een aantal toepasbare, relatief goedkope methoden is ontwikkeld¹⁰. Met deze methoden is het mogelijk om de stabiliteit van onstabiele substanties te evalueren. Ontbranding wordt hierbij veroorzaakt onder realistische condities met het doel informatie te verkrijgen. De testen kunnen onderverdeeld worden naar de gebruikte techniek:

- Klassieke technieken: o.a. bepaling minimale ontbrandingstemperatuur
- Thermische analyse: bijvoorbeeld thermogravimetrie en differential scanning calorimetry
- Bepaling activeringsenergie
- Testen met isothermische verwarming

Er volgt nu een overzicht van ondersteunende experimenten, die in het kader van dit onderzoek van nut kunnen zijn:

1. Smouldering test

Het is bekend dat stoflagen op warme oppervlakken kunnen oxideren, echter het ontstaan van branden of explosie blijft uit. De temperatuur waarbij dit verschijnsel optreedt, wordt de glimtemperatuur genoemd. Deze glimtemperatuur wordt gedefinieerd als de laagste temperatuur, waarbij het contactoppervlak (waarop een laag van 5 mm materiaal is aangebracht) ontbrandt. De temperatuur in het monster wordt gemeten door thermokoppels. Soms is het echter niet mogelijk om deze test uit te voeren, omdat het materiaal thermisch instabiel is of smelt. Verder kunnen de experimentele resultaten worden beïnvloed door de dichtheid en deeltjesgrootte van het materiaal. De opstelling staat in figuur 7 weergegeven.

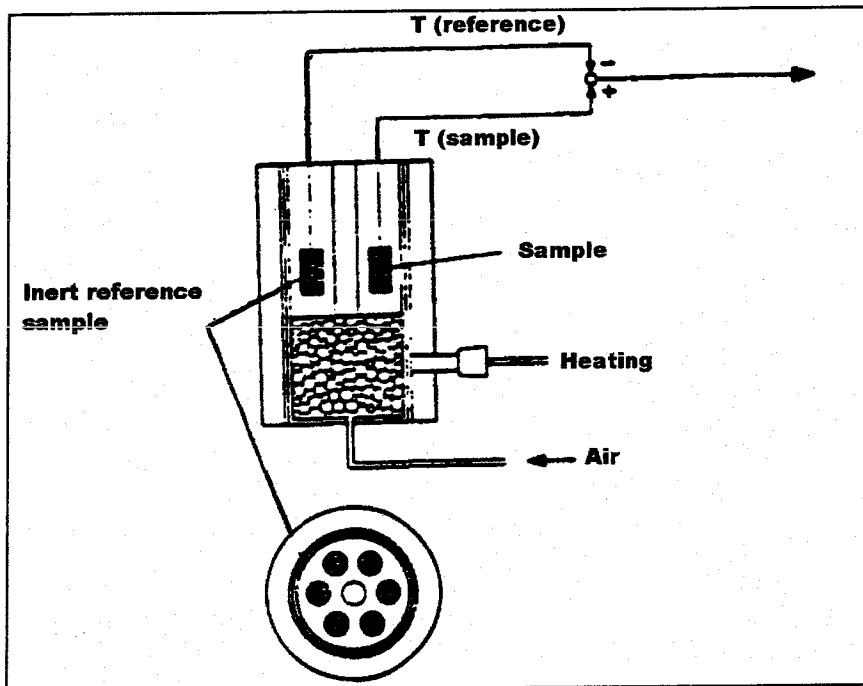


Figuur 7: opstelling smouldering test [Bureau of mines, 1977]

¹⁰ www.safetynet.de

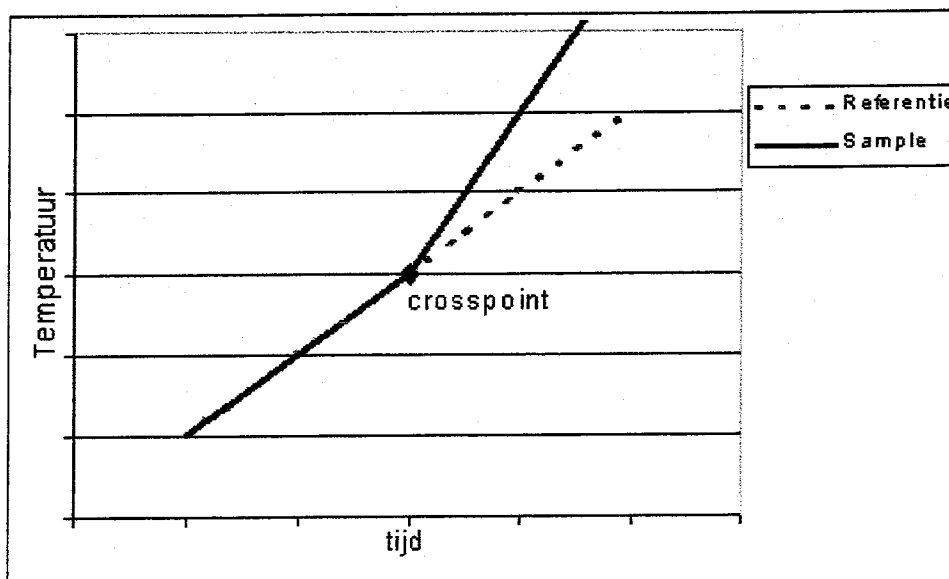
2. Grewer oven test

Met behulp van deze test kunnen de kritische temperaturen worden bepaald waarbij een materiaal ontbrandt, of temperatuurstijgingen worden bepaald (zie figuur 8).



Figuur 8: opstelling grewer oven test [Bureau of mines, 1977]

In de oven kunnen diverse monsters en een inert referentie monster worden opgewarmd door een luchtstroom die constant is of lineair toeneemt met de temperatuur. Wanneer het materiaal een exotherme reactie ondergaat, zal de temperatuur ervan stijgen en de temperatuur van het referentiemateriaal overschrijden. Dit zogenaamde "crosspoint" geeft een aanwijzing voor het zelfopwarming- of decompositie fenomeen (zie figuur 9). De crosspoint temperatuur is de temperatuur waarbij het verschil in temperatuur tussen de beide materialen het eerst wordt waargenomen.



Figuur 9: bepaling crosspoint temperatuur

De crosspoint temperatuur is de temperatuur waarbij het verschil in temperatuur tussen de beide materialen het eerst wordt waargenomen. De test is geschikt voor het screenen van een groot aantal materialen. Zelfopwarming door oxidatie is sterk afhankelijk van de monstergrootte en de duur van de thermische blootstelling. Een groter testvolume zal leiden tot zelfontbranding op lagere omgevingstemperaturen. De ontbrandingstemperatuur bepaald in de Grever oven kan dus niet in alle gevallen als veilige grens worden gehanteerd voor de uitvoering van thermische processen, maar is nuttig als referentie ter vergelijking van het thermisch gedrag van verschillende stoffen.

Een conclusie uitsluitend gebaseerd op de crosspoint temperatuur kan dus misleidend zijn, omdat de spontane ontbrandingstendens van bulkmaterialen ook afhankelijk is van de snelheid waarmee de warmteontwikkeling plaats vindt. Echter een snelle warmteontwikkeling met een lagere crosspoint temperatuur duidt er op dat het materiaal meer vatbaar is voor opwarming.

3. BAM heat accumulation storage test

Met behulp van deze test kan eveneens de laagste temperatuur waarbij een bepaalde thermisch instabiele stof decomposeert worden bepaald. Bij dit experiment wordt de minimale ontbrandingstemperatuur (MOT) met behulp van de BAM-oven (volgens VDI 2263, Blatt 1, 2.6.1¹¹) verricht. Deze test is ontworpen om de ontbrandingstemperatuur van opgewerveld stof op een heet oppervlak te bepalen. De laagste temperatuur van een verhitte impactplaat, waarbij het in de BAM-oven ingeblazen stof (binnen de 10 seconden) ontsteekt of ontbindt met vorming van vlammen of een explosie, wordt beschouwd als de minimale ontbrandingstemperatuur (MOT).

4. Static isothermal method

Wanneer een oxideerbaar materiaal wordt blootgesteld aan lucht, op of licht boven de omgevingstemperatuur, treedt irreversibele adsorptie van zuurstof op. De ratio van CO-vorming en zuurstofadsorptie (bekend als CO-index) is een belangrijk middel geworden om de adsorptie/desorptie te bepalen [bureau of mines, 1977]. De hoeveelheid geadsorbeerde zuurstof, de emissie van CO en ander gassen geven als functie van tijd en temperatuur de waarschijnlijkheid dat een materiaal neigt tot zelfopwarming en spontane ontbranding.

5. Sealed cell differential scanning calorimetry

Zelfopwarmingseffecten worden o.a. door exotherme reacties veroorzaakt. In een DSC kan de vrijgekomen warmte veroorzaakt door de exotherme reactie worden bepaald. Deze methode wordt reeds in vele sectoren gebruikt om mogelijke gevaarlijke materialen op te speuren.

6. Adiabatic calorimetry

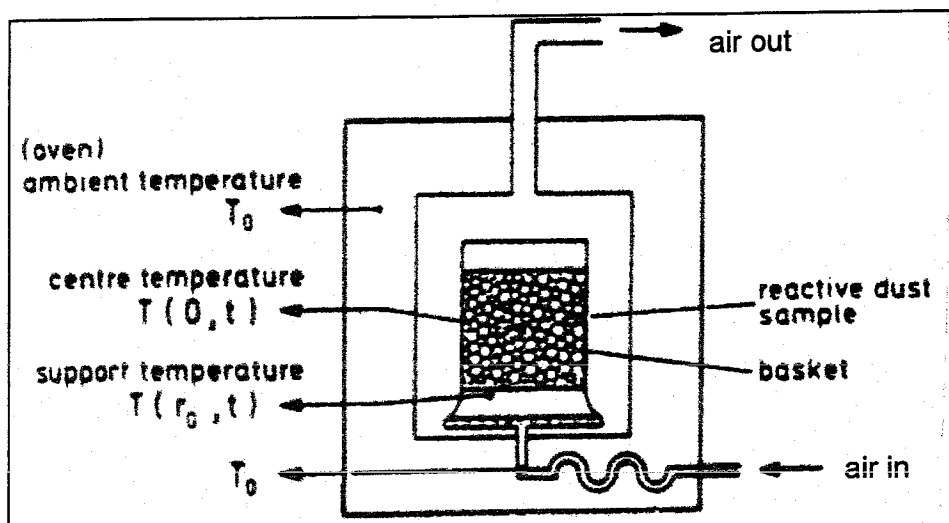
Bij deze test wordt een materiaal op een bepaalde temperatuur gebracht. Tijdens het experiment is er geen warmte transport, het materiaal wordt als veilig beschouwt wanneer het onder een bekende temperatuur ligt na 24 uur opslag. De verandering in temperatuur van het monster, de tijd die nodig is om een bepaalde temperatuur te bereiken en de hoeveelheid warmte die vrijkomt per eenheid tijd, wordt gebruikt om de spontane opwarmingsvermogen van het materiaal te bepalen.

7. Isothermal storage test

Met dit experiment kan gekeken worden naar de veilige opslag- en bewerkingstemperaturen, door materialen op te slaan in een temperatuurgereguleerde oven (zie figuur 10) [VN, 1999]. De maximale opslagtemperatuur is de temperatuur waarbij het monster niet ontbrandt. Deze is afhankelijk van verschillende factoren, zoals volume- en vorm van het monster, vocht- en zuurstofgehalte van de atmosfeer.

Deze parameters kunnen tijdens het experiment gevarieerd worden. Het monster vertoont geen zelfopwarming, wanneer het geen exotherme reacties vertoont tijdens een opslag van 48 uur [Wieman, 1984].

¹¹ www.vdi.de



Figuur 10: opstelling isothermal storage test [Wieman, 1984]

Weliswaar is broei een complex systeem en afhankelijk van vele factoren. Het grootste probleem dat de experimenten kan dwarsbomen is de aanwezigheid van inhomogeniteit bij de materialen. Eveneens kan de oorsprong van de warmteontwikkeling moeilijk toe te schrijven zijn aan biologische of chemische processen. Bovendien is ook bekend dat broei ook pas na verloop van tijd kan optreden, waardoor het niet binnen het tijdsbestek van de beschreven experimenten zal vallen. Afhankelijk van het materiaal kunnen de hierboven beschreven testen toch van grote waarde zijn, om inzicht te verkrijgen of het materiaal neigt tot zelfopwarming of in het extreme geval zelfs tot ontbranding.

6.2 Experimentele methoden uitgevoerd binnen KEMA

Naast de eerder beschreven experimenten zijn er ook experimenten uitgevoerd binnen KEMA, die inzicht geven in het broeigedrag van materialen.

1. Kleine vaatjes

Biologische broei is bepalend voor de start van het broeiproces bij de opslag van biomassa. Het vochtgehalte is hierbij een sterk bepalende factor. Om de aanvangssnelheid van het broeiproces te bepalen in relatie tot het vochtgehalte (en ook andere factoren zoals bijvoorbeeld deeltjesgrootte) kunnen experimenten worden uitgevoerd in kleine geïsoleerde vaten. Door het temperatuurverloop in de tijd in deze vaten te volgen wordt informatie gekregen over de kritische waarden van de onderzochte parameters waar boven of beneden (snel) broei zal gaan optreden.

2. KEMA- broeireactor

Net als de experimenten met de kleine vaatjes kunnen ook experimenten op grotere schaal worden uitgevoerd om het broeiproces in kaart te brengen. Het voordeel hierbij is dat verschillende parameters zoals de temperatuur en de samenstelling van het gasmengsel in de broeireactor eenvoudig gedetecteerd kunnen worden.

De kleine vaatjes en broeireactor worden reeds toegepast bij het onderzoek naar de broei van biomassa. Deze experimenten worden dan ook uitvoeriger besproken in het volgende hoofdstuk. De overige 7 methoden worden o.a. toegepast bij poeders, wellicht dat ze in de toekomst kunnen worden toegepast bij het inschatten van broei bij biomassa.

7 EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

De afgelopen jaren zijn er bij KEMA diverse experimenten uitgevoerd naar de broei van biomassa. Zo zijn er experimenten uitgevoerd in een grote adiabatische broeireactor (zie bijlage A, figuur A1) en in kleine geïsoleerde vaatjes [KEMA, 2003]. De experimenten in de broeireactor zijn verricht om de broei bij de grootschalige opslag van biomassa te kunnen nabootsen. Kleinschalige experimenten in de vaatjes zijn verricht om de broeigevoeligheid te onderzoeken.

Uit de resultaten van deze experimenten en op basis van gegevens uit de literatuur is er voor gekozen om een worst-case scenario toe te passen waarbij de kans op spontane zelfontbranding maximaal is.

Voor experimenteel onderzoek aan broei, lijkt een experimentele opzet gewenst waarbij gradiënten van vocht, zuurstof en temperatuur ontstaan om binnen afzienbare termijn resultaten te boeken. Bij homogene condities moeten anders zeer veel experimenten worden verricht, vanwege de vele variabelen die in de diverse stadia van het broeiproces een verschillende invloed lijken te hebben. De gekozen opzet met een reactor gevuld met een broeigevoelige laag en een niet-broeigevoelige laag lijkt een veelbelovende optie.

Uit de experimenten is namelijk gebleken dat wanneer de broeireactor gevuld wordt met een natte laag en aangevuld met een droge laag hogere temperaturen bereikt kunnen worden. De broei start in de onderste natte laag. De warmteontwikkeling ontstaat uit de enzymatische- maar vooral uit de biologische activiteit van het materiaal zorgt ervoor dat het verdampte water naar boven wordt getransporteerd. Nu zal de bovenliggende laag, die "normaal" niet zou broeien vanwege het tekort aan water, nu ook gaan broeien. Spontane ontbranding is pas mogelijk wanneer al het water verdampt is. Wanneer er gestart wordt met een overmaat aan droog materiaal is de kans hierop dan ook groter.

7.1 Kleine vaatjes

Het is bekend dat beneden een zeker vochtgehalte er geen biologische broei zal optreden [Ohm, 1972; KEMA, 2001]. Het vochtgehalte verschilt per type biomassa. Zo wordt voor hout in het algemeen een kritisch vochtgehalte van 25% aangenomen, terwijl voor grasachtig materiaal een lagere waarde van 15% vocht wordt aangenomen. Beneden deze vochtgehaltes zou het materiaal zonder broeigevaar kunnen worden opgeslagen.

Om de aanvangssnelheid van het broeiproces te bepalen in relatie tot het vochtgehalte (en ook andere factoren zoals bijvoorbeeld deeltjesgrootte) is onderzoek verricht in kleine geïsoleerde vaten. Door het temperatuurverloop in de tijd in deze vaten te volgen wordt informatie gekregen over de kritische waarden van de onderzochte parameters waar boven of beneden (snel) broei zal gaan optreden.

Uitvoering

Een partij biomassa pellets werd aan de lucht gedroogd en verdeeld over een aantal vaatjes. De pellets waren bevochtigd tot vochtgehaltes variërend van circa 10 tot 55%. Daarna is het temperatuurverloop gevolgd voor de verschillende vaatjes. Bij deze biomassa pellets bleek dat pas bij een vochtgehalte van 20% broei optrad.

Dergelijke experimenten zijn ook voor andere soorten biomassa uitgevoerd, om snel inzicht te verkrijgen in het broeiproces. In Bijlage D (figuur D1) is de broeigevoeligheid van diersmeel weergegeven. In de grafiek wordt de temperatuur in de loop van de tijd gevolgd bij verschillende vochtgehaltes van het materiaal. Duidelijk is te zien dat het pas vanaf 20% vochtgehalte het materiaal een duidelijke temperatuurstijging geeft.

Onderzochte biomassa soorten

Er zijn verschillende materialen en combinaties van materialen onderzocht op hun broeigevoeligheid. Hieronder volgt een kort overzicht van de onderzochte materialen:

- Biomassa pellets: de pellets van EON bestaan voornamelijk uit papierslib, RWZI-slib en hout. De pellets hebben een relatief hoog vochtgehalte en daardoor een lage stookwaarde.
- Palmpitschroot: palmpitschroot van Essent is een bijproduct van de winning door olie door extractie uit de (zoveel mogelijk van de steenschaal ontdane) zaden van de oliepalm.

- Refuse Derivel Fuel (RDF): RDF is de brandbare fractie van huishoudelijk afval dat bestaat voornamelijk uit papier, (droog) organisch afval en plastics etc. Het RDF van Essent heeft een hoge stookwaarde.
- Organische natte fractie (ONF): dit is de organische natte fractie die overblijft bij het scheiden van huishoudelijk afval naar RDF en wordt veelal gestort (1/3 deel van het totale afval). De ONF van Essent heeft vanwege het hoge vochtgehalte (40-50% vocht) een lage stookwaarde.
- Houtpellets: houtpellets van Essent zijn biomassa pellets die alleen van hout zijn vervaardigd.
- Olijfschroot: de olijfschroot van Essent en Electrabel is een bijproduct van de winning van olie door extractie van uitgeperste olijven, waaruit delen van de pit zoveel mogelijk zijn verwijderd.
- Diermeel: diermeel geleverd door EON is een restproduct uit de voedingsindustrie en wordt gemaakt door slachtafval of een kadaver lange tijd te verhitten en te vermalen.

In de onderstaande tabel 3 staan de gebruikte materialen met hun broeigevoeligheid ten opzichte van het vochtgehalte.

Tabel 3: *broeigevoeligheid van materialen in kleine geïsoleerde vaatjes*

Materiaal	Broeigevoelig vanaf een vocht % van
Biomassa pellets	20
Palmpitschroot	15
RDF	20
ONF	15
Houtpellets (2 soorten)	Geen broei
Houtpellets gemengd met vochtige biomassapellets	20
Olijfschroot	30
Diermeel	20
Donker hout	30

Het bleek bij de biomassa pellets bij hogere vochtgehaltes, dat het langer duurde voordat de temperatuur begint op te lopen. Waarschijnlijk komt dit doordat er meer vocht beschikbaar is voor verdamping, hetgeen veel warmte kost. Wel blijven de monsters met een hoger vochtgehalte langer broeien, omdat het langer duurt voordat het vochtgehalte van de monsters is afgenomen tot een waarde waarbij de micro-organismen niet meer actief zijn.

7.2 Broeireactor

Op basis van de resultaten met de broeireactor in het verleden en de experimenten verricht in de kleine vaatjes zijn diverse experimenten uitgevoerd in de broeireactor. Met de adiabatise broeireactor wordt getracht om het broeigedrag van de kern van een grote opslag te simuleren. De eerst experimenten gingen uit van een homogene vulling van de broeireactor, om vertrouwd te raken met de broeireactor. Uiteindelijk is overgestapt op een 2-lagen systeem. Zoals al eerder is verteld komt na de fase van biologische broei, een fase van chemische broei die uiteindelijk kan overgaan in een derde fase van snelle broei. Deze snelle broei kan uiteindelijk zelfs tot ontbranding leiden. De fase van chemische broei begint vanaf 70°C. De temperatuur bij experimenten in de broeireactor blijkt te kunnen oplopen naar waardes van circa 90 - 100°C en kan dan langdurig op die waarde blijven. Getracht wordt om deze fase te onderzoeken in de adiabatise reactor. Het materiaal in de reactor moet dan eerst een groot deel van het vocht verliezen alvorens er temperaturen boven de 100°C bereikt kunnen worden. Bovendien blijkt het uitdrijven van vocht in een homogeen gevulde reactor veel tijd te kosten. Om dit sneller te realiseren werd de reactor gevuld met twee batches van hetzelfde materiaal met een verschillend vochtgehalte. Onder in de broeireactor wordt een natte fractie aangebracht (met een vochtgehalte dat net hoog genoeg blijkt te zijn om het proces van

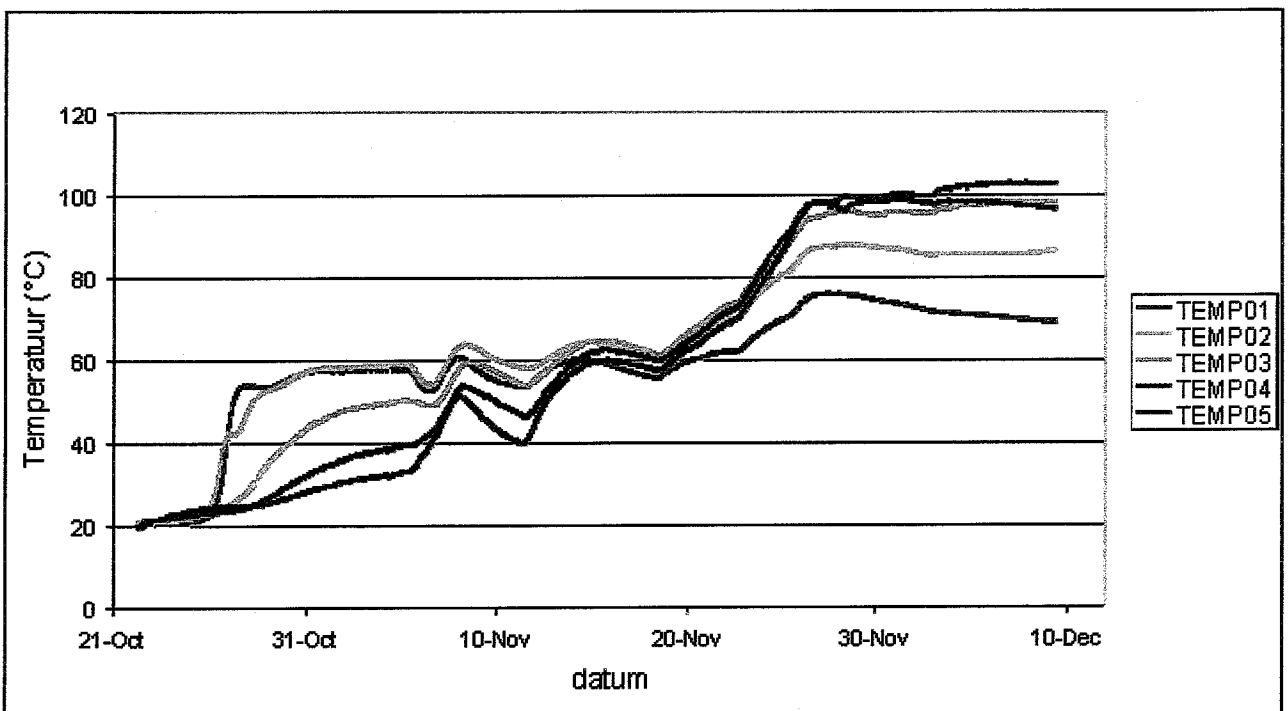
biologische groei snel op gang te brengen) en daarboven wordt een droge fractie aangebracht, die in eerste instantie ongevoelig is voor groei. Naar verwachting zal het onderste deel gaan broeien en daardoor zullen er temperatuur- en vochtgradiënten over de lengterichting van de reactor gaan ontstaan. Het broeiproces zal zich naar boven verplaatsen, waardoor er eerder kritische condities voor ontbranding in de reactor kunnen gaan optreden.

Een dergelijke aanpak kan worden gezien als een worst-case benadering van de kans op spontane ontbranding. Het doel ervan is om voor diverse materialen beter inzicht te verkrijgen in de grenzen van het gevaarlijke gebied van omstandigheden waarbinnen ontbranding kan optreden. Dit sluit ook aan bij praktijkervaringen. In de praktijk is vastgesteld dat een opslag bestaande uit partijen (van hetzelfde soort materiaal) met een uiteenlopend vochtgehalte (of uiteenlopende deeltjesgrootte) extra gevoelig is voor groei. Vooral op het grensvlak van dergelijke partijen kan groei gaan optreden, die in het extreme geval uiteindelijk zelfs tot ontbranding kan leiden. Om de groei te detecteren is gebruik gemaakt van thermokoppels en een online GC-meting. De belangrijkste experimenten die in dit kader zijn uitgevoerd zullen nu uitvoeriger worden beschreven.

7.2.1 Experiment A: palmpitschroot

In het verleden is reeds een experiment uitgevoerd met palmpitschroot, het betrof toen wel een experiment met een homogene vulling qua vochtgehalte. Met dit experiment werden temperaturen van circa 90 °C bereikt. Op basis van ervaringen hiermee en uit de literatuur verzamelde gegevens is een experiment ingezet waarbij de reactor werd gevuld met twee lagen. De onderste laag (circa 1/3 deel) heeft een vochtgehalte van 25% en daarboven is een laag (circa 2/3 deel) met het oorspronkelijk materiaal dat een vochtgehalte van 8% had.

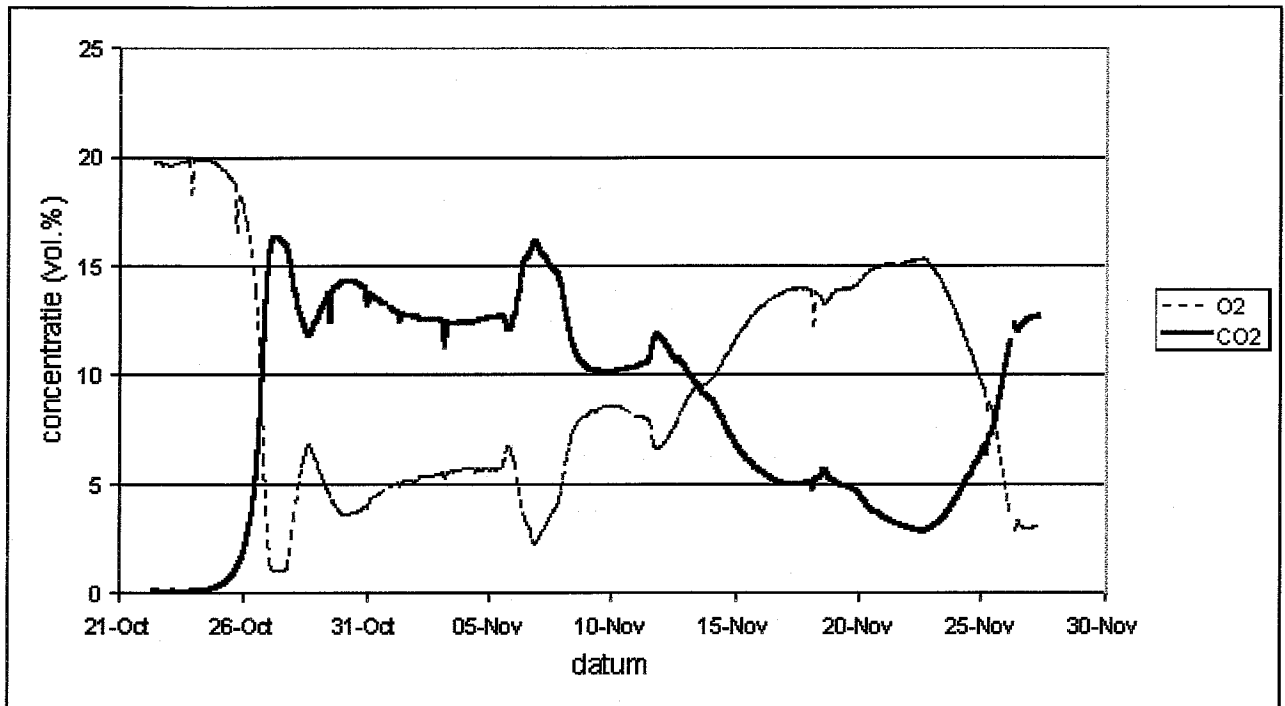
Een dergelijke aanpak kan worden gezien als een worst-case benadering van de kans op spontane ontbranding. Dit sluit aan bij praktijkervaringen. De bij dit experiment verkregen resultaten zijn weergegeven in onderstaande figuur 11 en 12.



Figuur 11: temperatuurprofiel voor palmpitschroot

In figuur 11 staat het verloop van de temperaturen 1 t/m 5 en in figuur 12 worden de CO₂- en O₂-volumeconcentraties in de tijd weergegeven. Temp01 geeft de temperatuur onder in de reactor en

Temp05 geeft de temperatuur boven in de reactor weer. Het experiment is uitgevoerd bij een constante luchtflow van 1 l/min. Bij de start van het experiment werd de buitenwand niet verwarmd, omdat een differentiatie in temperatuur werd verwacht en bij lage temperatuur de warmteverliezen via de geïsoleerde wand zeer beperkt zullen zijn. Zoals verwacht, begon het broeiproces onder in de reactor. Na circa drie dagen incubatietijd begon de temperaturen op niveau 1 en 2 op te lopen, waarna de andere lagen langzaam volgen. De start van het broeiproces was ook goed te zien aan de CO₂-curve. Die bereikte een eerste maximum wanneer de temperatuur op niveau 1 begon te stijgen. Bij afname van de CO₂-concentratie stabiliseerde de temperatuur zich op niveau 1. Daarna begon ook in het middendeel van de reactor broei op te treden waardoor de CO₂-concentratie opnieuw steeg.



Figuur 12: CO₂- en O₂-profiel voor palmpitschroot

Op 5 november werd de wandverwarming ingeschakeld met T4 (temperatuur op niveau 4) als referentie. Hiervoor was gekozen om de reactor niet extra te ondersteunen in het opwarmingsproces. Dit had echter tot gevolg dat de mantel voor de onderste lagen koelend werkte, terwijl de bovenste lagen opwarmde. Dat is de reden waarom in de korte periode na 5-nov (5-nov tot 6-nov) de temperaturen op de niveaus 1 t/m 3 afnamen en op de niveaus 4 en 5 toenamen. In de periode daarna (10-nov tot 20-nov) gingen de temperaturen enigszins op en neer. Vanaf 20-nov zette een verdere stijging van de temperatuur in, met name op de niveaus 3 t/m 5. De toename van de broei kwam ook tot uiting in de stijging van de CO₂-productie. Uiteindelijk werden op de niveaus 3 t/m 5 temperaturen van rond de 100°C bereikt. Boven in de reactor werd zelfs een maximale temperatuur van 104 °C bereikt. Dit was 36 dagen na aanvang van het experiment en 33 dagen na de start van het broeiproces onder in de reactor.

Tabel 4: vochtgehalten bij de start en na afloop van experiment A.

positie	Vocht (%)		
	onder	midden	boven
Start	25	8	8
einde	5,3	5	7,6

Na afloop van het experiment werd wederom het vochtgehalte op drie niveaus in de reactor bepaald. De resultaten hiervan staan in tabel 4. Duidelijk is te zien dat het vochtgehalte daalt als gevolg van de verdamping, veroorzaakt door de warmteontwikkeling tijdens het broeiproces.

7.2.2 Experiment B: biomassa pellets

Bij dit experiment werd de onderste laag (circa 1/5 deel) met biomassapellets met een vochtgehalte van 25% en daarboven een laag (circa 4/5 deel) met het een vochtgehalte van 12,5% ingezet. Bij de biomassa pellets begon de broei direct in de onderste laag en verplaatste zich snel naar de hogere lagen in de reactor (zie bijlage D, figuur D2). Reeds na 1 dag (13-nov) begon de broei in de bovenste lagen en heeft de onderste laag al een maximumtemperatuur van 65°C bereikt. De start van het broeiproces was ook goed te zien aan de CO₂-curve (zie bijlage D, figuur D3). Die bereikte een eerste maximum wanneer de temperatuur op niveau 1 begint te stijgen. Vervolgens koelen de bovenste lagen lichtjes af, omdat de verwarming nog niet ingeschakeld was. De bovenste lagen stijgen daardoor nog steeds in temperatuur. Dit was ook te zien aan de afname van de CO₂-concentratie, die vervolgens stabiliseerde op niveau 2. Na 1 week (19-nov) werd de wandverwarming ingeschakeld met T4 (temperatuur op niveau 4) als referentie. Toen was ook duidelijk te zien dat ook de bovenste lagen weer toenamen in temperatuur. Het broeiproces werd weer aangewakkerd, waardoor er weer een toename in de CO₂-concentratie volgde. Na circa 10 dagen (22-nov) hadden alle lagen een maximum temperatuur bereikt van ongeveer 60°C. De temperaturen bleven toen een lange periode schommelen rond de 60°C. Wel was duidelijk te zien dat vanaf 25-nov de CO₂-curve zakte bij een stijgende O₂-curve. Dit duidde dan ook op een afname van het broeiproces. Vanaf 4-dec zakten alle temperaturen, omdat de pomp van het waterbad te weinig opvoerhoogte bleek te hebben. Op 11-dec werd dit probleem verholpen door de pomp hoger te plaatsen, waardoor deze beter werkte. De temperaturen bleken dan ook weer toe te nemen, resulterend in een lichte stijging van de CO₂-concentratie voor een korte periode. De temperatuur stabiliseerde zich vervolgens weer (15-dec) op alle niveaus, waarna het vervolgens zakte en het experiment beëindigd werd.

7.2.3 Experiment C: donker hout

Bij proeven met de kleine vaatjes bleek al dat het donker hout weinig broeigevoelig was. Dit was merkbaar, doordat er slechts een lichte temperatuurstijging optrad. Bij het experiment in de broeireactor werd de onderste laag (circa 1/5 deel) met donker hout met een vochtgehalte van 35% en daarboven een laag (circa 4/5 deel) met het een vochtgehalte van 12,35% ingezet. Omdat er nu ook een lichte temperatuurstijging van slechts enkele graden te zien is, was het experiment in een vroegtijdig stadium gestaakt.

7.2.4 Experiment D: houtpellets

Bij dit experiment werd de onderste laag (circa 1/5 deel) met houtpellets met een vochtgehalte van 25% en daarboven een laag (circa 4/5 deel) met het een vochtgehalte van 12,5% ingezet. De broei start meteen (10-feb) in de onderste lagen (zie bijlage D, figuur D4) en bereikt in de bovenste laag een maximum van 41 °C (15-feb). De start van het broeiproces is ook goed te zien aan de CO₂-curve, die op 13-feb zijn maximum had (zie bijlage D, figuur D5). Verdere temperatuurstijging bleef uit, waarschijnlijk door een gebrek aan micro-organismen. Daarom werd op 16-feb de wandverwarming ingeschakeld met een hogere temperatuur dan T1, waardoor er een gedwongen opwarming plaatsvond. De temperaturen stegen op alle niveaus, tot een uiteindelijke waarde van circa 55°C. Vanaf 21-feb begon het broeiproces weer toe te nemen, waardoor de CO₂-concentratie steeg tot een maximum. Omdat het broeiproces weer afvlakte, was er voor gekozen om de luchtflow te verhogen zodat er meer zuurstof beschikbaar was voor het broeiproces. De broei kwam toen ook weer langzaam op gang, en liep vanaf 3-mrt weer sterk op. Omdat de temperaturen niet meer toenamen was het experiment op 4-mrt beëindigd.

7.3 Resultaten

Tijdens de GC metingen wordt de vorming van CO₂ aangetoond, maar bij geen enkel experiment vindt er CO detectie plaats. Dit is geheel volgens de verwachting, omdat er bij biologische groei geen CO gevormd zal worden, omdat schimmels en bacteriën geen CO produceren. Vorming van CO zal pas optreden, wanneer er sprake is van gloeiende- of smeulende delen in de opslag. Tevens werd er geen methaan (CH₄) gedetecteerd. CH₄ kan vrijkomen wanneer er in een silo, lokaal geen zuurstof meer is. Het gevaar bestaat dan dat er zich anaërobe processen gaan voordoen, waarbij CH₄ vrijkomt. Dit zeer brandbare gas leidt bij buitenopslagen zoals stortplaatsen vaak tot brandjes. Tijdens de proeven met de broeireactor, werd voldoende zuurstof toegevoegd, zodat er aërobe omstandigheden waren en er dus geen CH₄ gedetecteerd werd.

Op basis van de resultaten uit het experimentele onderzoek en de in de literatuur gevonden ervaringen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Met behulp van de kleine geïsoleerde vaatjes kan de aanvangssnelheid van het broeiproces bepaald worden in relatie tot het vochtgehalte (en ook andere factoren zoals bijvoorbeeld deeltjesgrootte).
- De experimenten met de kleine geïsoleerde vaatjes geven een goed inzicht in de te verwachten resultaten van de materialen wanneer ze in de broeireactor worden geplaatst.
- Een snelle opwarming tot circa 60°C à 70°C treedt vaak op (palmpitschroot en biomassa pellets) en afhankelijk van de omstandigheden blijft de temperatuur gedurende kortere of langere tijd op dit niveau, om daarna meestal weer af te nemen.
- Het maximale temperatuurniveau dat ten gevolge van microbiologische groei wordt bereikt, blijkt niet van doorslaggevend belang voor het bereiken van het stadium van chemische groei. Het is dus niet zo, dat boven een bepaalde temperatdrempel chemische groei vanzelfsprekend op zal treden.
- Slechts bij uitzondering blijkt chemische groei op te treden, waardoor de temperaturen verder oplopen en temperaturen van rond de 100°C worden bereikt. Het palmpitschroot in vochtige toestand lijkt reactiever dan de overige materialen. Alleen met dit materiaal werden dergelijke temperaturen bereikt.
- De overgang van microbiologische groei naar chemische groei is sterk afhankelijk van het vochtgehalte. In de literatuur wordt gesteld dat dit slechts binnen een beperkt venster van vochtconcentraties (en bijbehorende relatieve luchtvochtigheid) het geval is. Slechts bij die condities werd bij hooi vastgesteld dat de temperatuur opliep naar circa 100°C.
- Uit de literatuur blijkt dat bij hooi (van circa 100°C) een overgangperiode nodig van circa enkele weken (>10 dagen), alvorens daadwerkelijk een snelle temperatuurstijging boven de 100°C optreedt die uiteindelijk tot ontsteking leidt [Ohm, 1972]. Bij de uitgevoerde experimenten is het stadium waarbij een snelle temperatuurstijging naar temperaturen ver boven de 100°C nog niet bereikt. Ondanks het feit dat het palmpitschroot in de reactor wel gedurende circa 10 dagen een temperatuur van circa 100°C heeft gehad.
- Om het stadium van ontbranding te bereiken, moet droging van de biomassa op treden [Ohm, 1972]. In combinatie met een langzame oxidatie van het hooi (toevoer van droge lucht via diffusie of door middel van een lage luchtflow) wordt aangenomen dat daardoor een reactief oppervlak wordt gevormd dat uiteindelijk verantwoordelijk is voor de snelle temperatuurstijging.
- Ten aanzien van de invloed van deeltjesgrootte op de broeigevoeligheid kan worden opgemerkt dat de broeigevoeligheid toeneemt als de grootte van het materiaal afneemt. In dit onderzoek ging het in alle gevallen om fijn materiaal (deeltjesgroottes <5 cm) dat broeigevoelig is en variatie binnen dit gebied leidt niet tot grote verschillen in broeigevoeligheid.
- Met de verschillen tussen microbiologische groei en chemische groei moet ook rekening worden gehouden met eventuele bestrijding van groei. Zo blijkt in het beginstadium van de groei (biologische groei) een geringe verhoging van het luchtdebiet een verhoging van de temperatuur te veroorzaken.

Beperkingen broeireactor

Uit experimenteel onderzoek blijkt dat met behulp van de broeireactor het broeiproces goed bestudeerd kan worden. Toch blijven er altijd kritische kanttekeningen:

- Bij opslagen zal het warmtetransport ook in horizontale richting plaatsvinden, bij de broeireactor is dit beperkt vanwege de afmetingen.
- Een nadeel bij het gebruik van de broeireactor is dat de mantel slechts op één temperatuur ingesteld kan worden. Zo kan de mantel het broeiproces dan ook versnellen cq vertragen.
- Grote silo's hebben een grotere opslagcompressie, dit kan in de broeireactor moeilijk nagebootst worden.

8 SIMULEREN

Met behulp van de gegevens die voortkomen uit het experimentele onderzoek is getracht om een model op te stellen dat de processen in de KEMA broeireactor beschrijft. Het model, opgesteld op basis van massa/energie balansen uitgaande van de omzettingsreactie van koolhydraten naar CO₂, moet dienen om te voorspellen welke veranderingen in temperatuur, vochtgehalte en gas samenstelling op zullen treden bij variatie van de omstandigheden. Het uiteindelijke doel van het model is dat het zal dienen als hulpmiddel bij de opzet van verdere experimenten, bij het selecteren van een beperkt aantal experimenten uit een grote matrix van mogelijkheden en bij het interpreteren van de resultaten.

8.1 Simulatieprogramma Aspen Plus

Om de eerder beschreven experimenten (verricht in de broeireactor) te modelleren is gebruik gemaakt van het simulatieprogramma Aspen Plus (zie bijlage B). Aspen Plus (Advanced simulator for process Engineering) is een steady state processimulatie pakket, oorspronkelijk ontwikkeld door het M.I.T (Massachusetts Institute for Technology). Dit pakket wordt voornamelijk gebruikt bij het modelleren van processen in de proces industrie. Tijdens het simuleren wordt gebruik gemaakt van een proces flowsheet. Een proces flowsheet kan worden gedefinieerd als een blauwdruk van een fabriek of een gedeelte ervan. Hierin worden alle voedingsstromen, eenheidsoperaties, stromen die de eenheidsoperaties verbinden en afsluitend de productstromen geïdentificeerd. Werkcondities en andere technische details kunnen worden gedefinieerd in het "detail" gedeelte van de flowsheet.

Voordelen van het gebruik van een proces flowsheet simulator:

Het gebruik van een proces flowsheet simulator is van belang voor de 3 niveaus van een fabriek: research en development, design en productie [Scott, 2002]. In research en development kunnen door het gebruik hiervan het aantal experimenten op laboratoriumschaal en in pilot plants worden teruggebracht. Op het niveau van design kunnen ze de ontwikkeling versnellen dmv simpelere vergelijkingen van de verschillende alternatieven. Tenslotte op het niveau van productie kunnen ze worden gebruikt voor "risk-free" analyses en verschillende "what-if" scenario's.

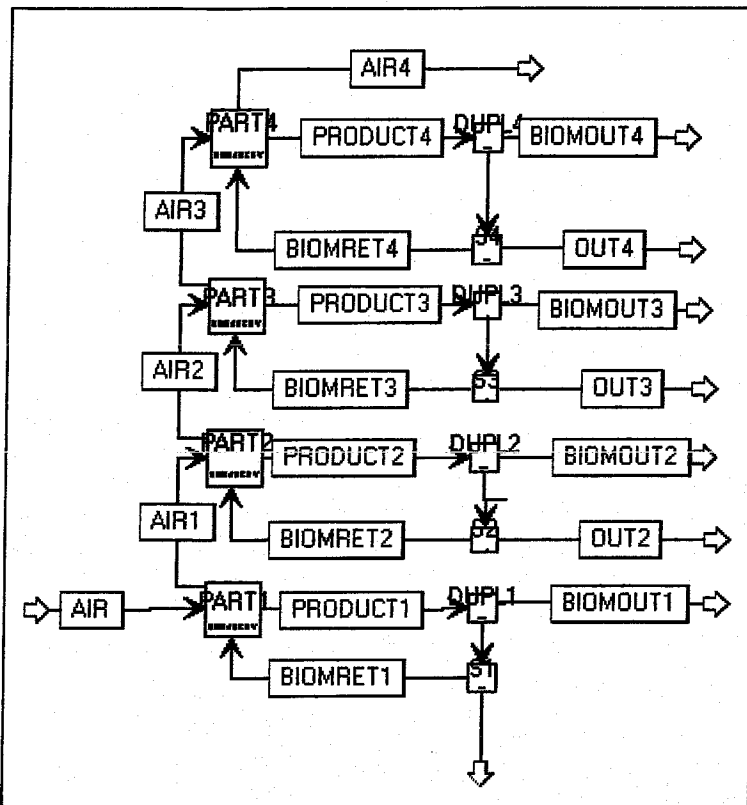
Nadelen van het gebruik van een proces flowsheet simulator:

Handmatige oplossingen voor een probleem dwingen iemand om dieper over het probleem na te denken, om nieuwe aanpakken te ontwikkelen. Deze vervolgens op te lossen, te evalueren. Het gevaar bestaat dat vanwege de "eenvoud" de complexiteit van het probleem niet aan het licht komen, waardoor de ware toedracht verborgen blijft.

8.1.1 Flowsheet van het broei simulatiemodel

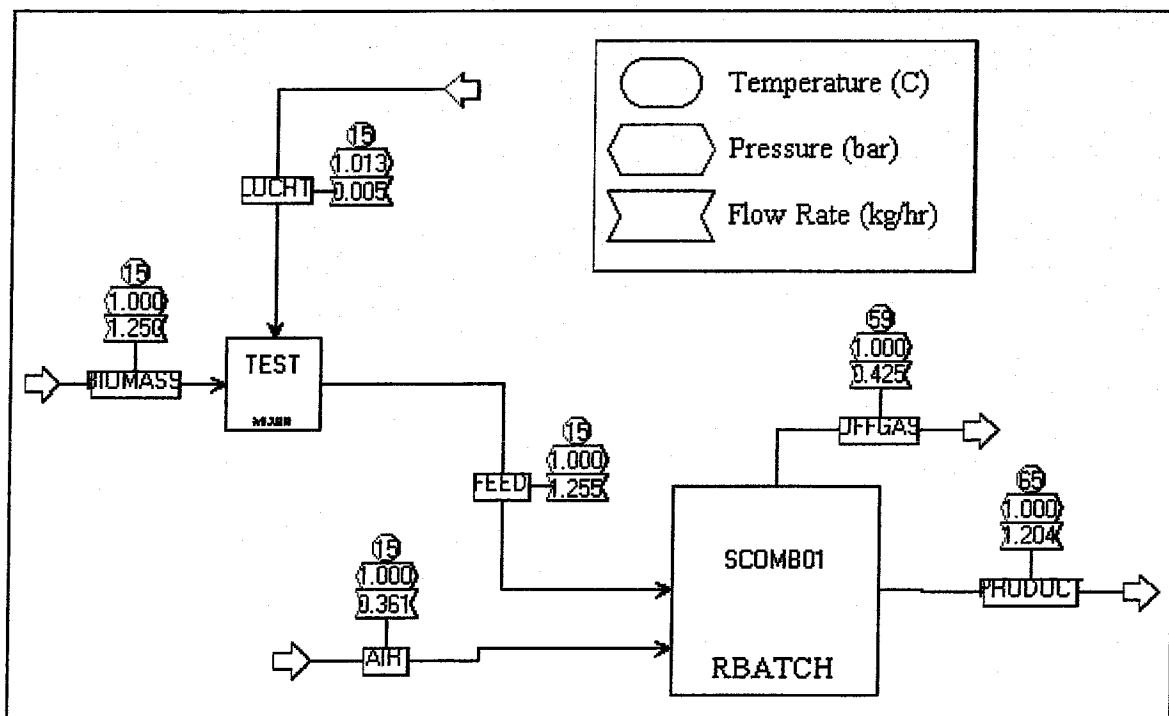
Broei is een tijdsafhankelijk (dynamisch) proces. Een dergelijk proces kan beschreven worden met behulp van de eenheidsoperatie Rbatch. Deze simuleert een batch reactor of geroerde tank (zie figuur 14) [Peters, 2003]. Met de batchreactor wordt het verloop in de tijd van slechts 1 temperatuurmeetpunt gemodelleerd. In de broeireactor is een temperatuurgradiënt aanwezig, die wordt veroorzaakt doordat relatief koude lucht aan de onderkant van de reactor wordt ingevoerd. De lucht wordt door het broeiproces opgewarmd en neemt vocht op. Hierdoor zijn de omstandigheden onder in de reactor anders dan bovenin. Om dit proces beter te beschrijven is het model uitgebreid, waarbij de reactor is opgesplitst in 4 delen (zie figuur 13). Door het achter elkaar schakelen van 4 batch reactoren ontstaat een "plug-flow" reactor.

De Rbatch (die in detail is weergegeven in figuur 14) werkt in een semi-batch mode, omdat er een ventilatie stroom en continue ingaande stroom aan de reactor is gekoppeld. Indien de reactor in de semi batch mode opereert gebruikt deze een virtuele buffer. Hierin worden alle gassen die tijdens reacties ontstaan opgeslagen.



Figuur 13: flowsheet van het model

De ventilatie stroom wordt in de flowsheet aangegeven met (Offgas) en de continue ingaande stroom wordt met (Air) aangegeven. Het debiet van deze ingaande luchtstroom (Air) kan in de tijd worden gevarieerd.



Figuur 14: schema van het model van de batchreactor (een enkele reactor).

Batch operaties zijn unsteady state processen, variabelen zoals temperatuur en samenstelling veranderen continu in de tijd. In tegenstelling hiermee is Aspen Plus een steady state programma. Om de Rbatch aan een steady state flowsheet te koppelen, gebruikt Aspen Plus gemiddelde stromen (in de tijd). Hierdoor kan de Rbatch toch op een dynamische wijze berekend worden. De totale massa (Batch charge) van het product dat aan het begin van de reactietijd naar de reactor wordt getransporteerd, wordt berekend door de massastroom van de Feed (biomassa en lucht) te vermenigvuldigen met de batch feed time. De batch feed time is de tijd nodig om de hoeveelheid massa van het product dat naar de reactor wordt getransporteerd, aan het begin van de reactietijd te berekenen. De reactietijd is een tijdsinterval waarbinnen de reactie moet plaatsvinden, deze kan via de input paragraaf van de reactor ingesteld worden. Via de input paragraaf van de Rbatch kan ook de condities waaronder de reactor moet opereren worden ingesteld, bijvoorbeeld een adiabatische reactor of een reactor met constante temperatuur en drukprofiel.

Vanwege de complexiteit van de beschreven biologische- en chemische reacties die zorgen voor de warmteontwikkeling; is gebruik gemaakt van een Fortran Subroutine om de broei te beschrijven. In deze subroutine zijn de kinetiek en parameters van de biologische- en chemische reacties vastgelegd. De gebruikte kinetiek en parameters zijn afkomstig van het proefschrift "Broei en droogprocessen in hooi" [Ohm, 1972].

8.2 Aannames model

Voor het opstellen van het simulatiemodel zijn verschillende aannames gedaan, om de broei bij biomassa te kunnen beschrijven. Voor het beschrijven van de component biomassa is ervoor gekozen om de aanwezige modelcomponent dextrose ($C_6H_{12}O_6$), omdat hout voor circa 50% uit cellulose bestaat, dat weer is opgebouwd uit glucose polymeren. Dextrose is genomen vanwege het feit, dat bij broei suikers worden verbrand tot koolzuur en water. Het vochtgehalte van biomassa wordt beschreven door een deel water toe te voegen aan de dextrose.

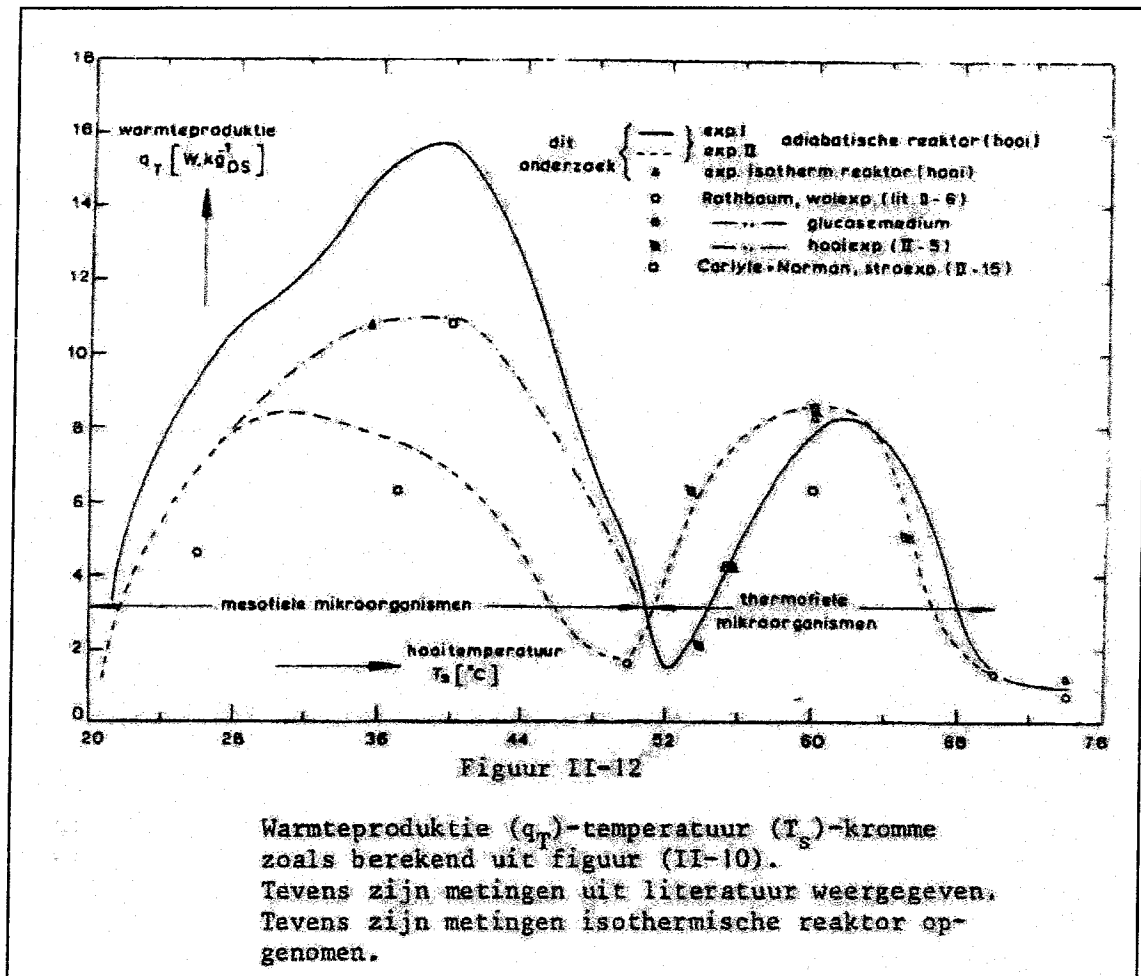
Bij het model wordt uitgegaan van de waarden van de parameters beschreven in tabel 5. Van daaruit worden er wijzigingen aangebracht om de broei te modelleren. Om de resultaten van het model goed af te stemmen op de resultaten van het voorgaande hoofdstuk, is bij het beschrijven van de kinetiek in Fortran, de mogelijkheid aangebracht om een aantal parameters van een fitfactor te voorzien.

Tabel 5: parameters met bijbehorende fitfactor

Nr	Parameter	fitfactor	Beschrijving
1	(k) enzymen*	0.39	reactiesnelheidsconstante voor de enzymatische warmteproductie
2	(Ea) activeringsenergie**	58000	Activeringsenergie
3	(k) mesofielen	0.45	reactiesnelheidsconstante voor de mesofiele warmteproductie
4	(k) thermofielen	0.4	reactiesnelheidsconstante voor de thermofiele warmteproductie
5	Enz μ	32	punt waarbij de populatie maximaal (1) is
6	Enz σ	3.75	breedte van de populatie
7	Meso μ	41	punt waarbij de populatie maximaal (1) is
8	Meso σ	4.25	breedte van de populatie
9	Therm μ	58	punt waarbij de populatie maximaal (1) is
10	Therm σ	4.75	breedte van de populatie
11	Vochtgehalte	0.32	vochtgehalte waaronder enzymatische broei niet plaatsvindt
12	(k) chemisch	1	reactiesnelheidsconstante voor de chemische warmteproductie

* Eenheid k is [mol CO₂/kg.Ds.s] **Eenheid Ea is [J/mol]

Bij hooibroei is gebleken [Ohm, 1972], dat de warmteproductie ten opzichte van de temperatuur "normaal" is verdeeld (zie onderstaande figuur 15).



Figuur 15: warmteproductie ten opzichte van de temperatuur [Ohm, 1972]

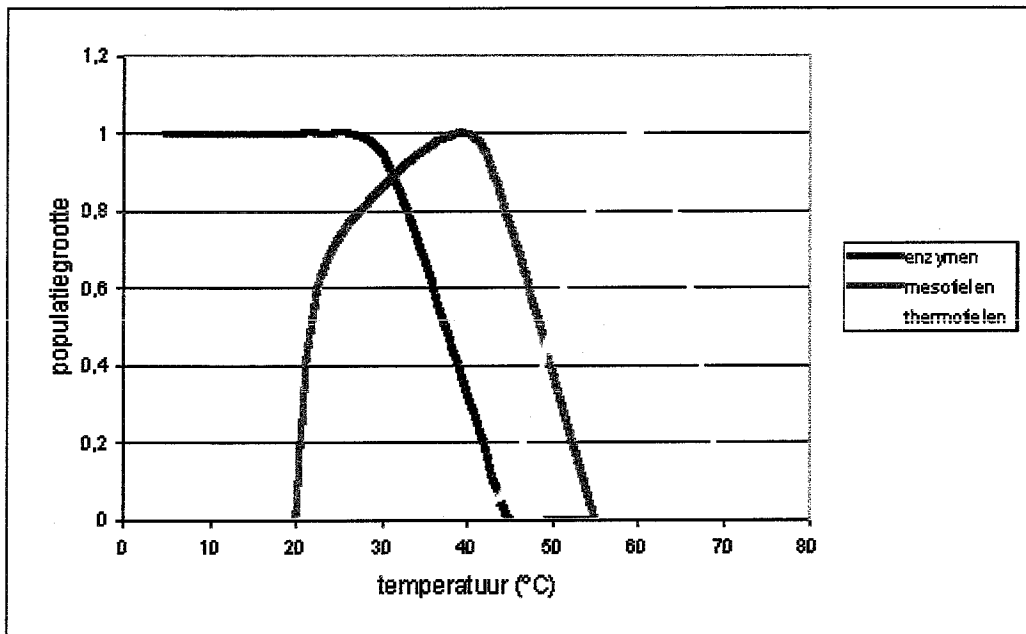
Om de populatie van de verschillende organismen te bepalen is gebruik gemaakt van de onderstaande functie van de normale verdeling.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-1/2 \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (6)$$

Door gebruik te maken van de functie kan bij elke temperatuur de heersende populatie berekend worden. In het model is aangenomen dat voor iedere groep het temperatuuroptimum van de populatie van de desbetreffende groep een waarde van 1 heeft. Verder kenmerkt de normaalverdeling zich (voor de meso- en thermofiele micro-organismen) door een verwachtingswaarde (μ) en de sigma (σ) die de breedte van de populatie aangeeft. Bij de verschillende experimenten in de broeireactor is te zien dat er verschillen in de trends zijn. Dit was ook te verwachten omdat het model gebaseerd is op de reactiekinetiek van hooi. Een ander oorzaak hiervoor ligt in de aannames die zijn gedaan voor de populatie enzymen, mesofielen en thermofielen.

Zoals eerder beschreven zijn de enzymen reeds actief bij 5°C, maar begint de activiteit ervan af te nemen boven de 30°C. De enzymen zijn inactief bij temperaturen boven de 45°C en een vochtgehalte kleiner dan 30%. De mesofiele micro-organismen hebben in het algemeen een temperatuuroptimum voor groei van 30°C en een temperatuurmaximum van circa 40°C. De thermofiele micro-organismen

hebben een temperatuuroptimum van circa 60°C en een temperatuurmaximum van circa 70°C. Boven de 70°C vindt er alleen maar chemische broei plaats. De reactiekinetiek voor de beschreven processen staat in bijlage G beschreven.



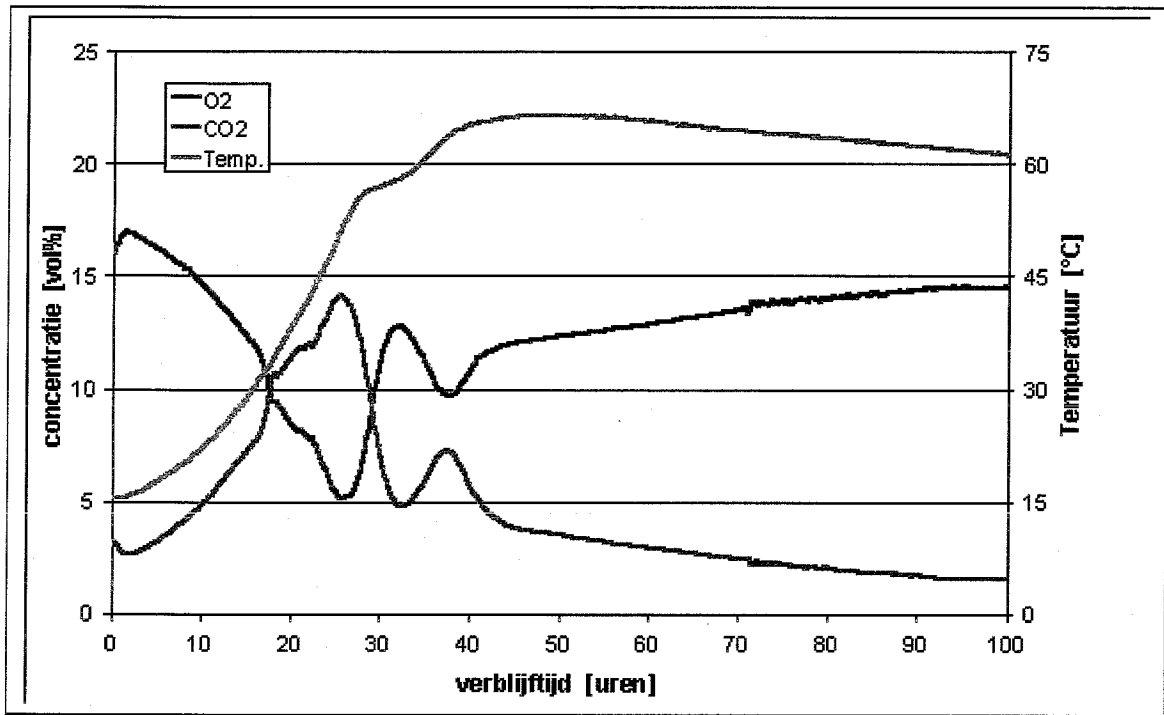
Figuur 16: populatiegrootte van enzymen, meso- en thermofielen als functie van de temperatuur

8.3 Validatie model

Tijdens het ontwikkelen/valideren van het model is onderzoek verricht naar verschillende aspecten van broei. Bij het gebruik van het simulatieprogramma Aspen Plus kunnen verschillende parameters worden gevolgd in de loop van de tijd. Voor het hier beschreven experiment zijn dit, de temperatuur, het vochtgehalte van de biomassa in de betreffende batch en de gehalten aan O₂ en CO₂, die respectievelijk worden verbruikt en vrijkomen bij de biologische- en chemische reacties.

Om het model te valideren is gebruik gemaakt van de resultaten verkregen bij experiment H3, dat was verricht in de broeireactor [KEMA, 2003]. Dit experiment is uitgevoerd met vers snoeihout, met een deeltjesgrootte van 2-5 cm, een vochtgehalte van circa 50% met een luchtdebiet van 5 l/min. Bij dit experiment is het verloop van de temperatuur en de gassenstelling gemeten als functie van de tijd (figuur 17). Door het broeiproces in de reactor wordt zuurstof verbruikt en kooldioxide geproduceerd. De stijging van de temperatuur tot circa 30°C wordt veroorzaakt door de enzymatische broei. Boven de 30°C sterven de enzymen geleidelijk af (binnen 20-25 uur) en wordt opgevolgd door de eerste fase van microbiologische groei (mesofielen). Deze overgang is duidelijk te zien aan zowel de CO₂- als de O₂-concentratie. Boven de 50°C (circa 28 uur) daalt de CO₂- en stijgt de O₂-concentratie. Dit wordt veroorzaakt door het afsterven van de mesofiele micro-organismen. Ten gevolge hiervan treedt er ook een stagnatie in de toename van de temperatuur op. Door de ontwikkeling van thermofiele micro-organismen loopt de temperatuur even later weer op. Dit is ook te zien in de toename van de CO₂- en de afname van de O₂-concentratie (33-38) uur. Boven de 62°C neemt de activiteit van de thermofiele organismen geleidelijk af en daalt de CO₂-concentratie. De temperatuur stijgt nog naar 68°C om vervolgens geleidelijk terug te zakken naar 62°C.

Om de experimenten in de broeireactor die zijn beschreven in hoofdstuk 7 te kunnen modelleren, is een plug-flow reactor gebruikt. Het bovenstaande model is hierop aangepast. Bij dit nieuwe model is gebruik gemaakt van biomassa met een vochtgehalte van 45%, bij een luchtflow van 4,25 l/min. In bijlage E1 staan de verschillende profielen beschreven (temperatuur, O₂ / CO₂ en H₂O).



Figuur 17: grafiek experiment H3 in de broeireactor [KEMA, 2003]

Het temperatuurprofiel (zie bijlage E, figuur E1) komt goed overeen met het temperatuurprofiel van Experiment H3. Alleen het temperatuurverloop van batchreactor 1 loopt achter bij de overige temperatuurprofielen. Dit verloop beschrijft de broei onder in de reactor op hoogte 1. Een verklaring voor het achterblijven van de temperatuur kan zijn dat er in het model aangenomen wordt dat in het eerste deel van de reactor de koude lucht mengt met de aanwezige lucht. Bij de broeireactor vindt er geen menging plaats, maar treedt er een zuivere plug-flow stroming op.

In figuur E2 (bijlage E) staat het watergehalte op de verschillende niveaus (batchreactoren) in de loop van de tijd weergegeven. Na circa 20 uur daalt het watergehalte op hoogte 1, door verdamping van water. Deze waterdamp stijgt naar boven waar het condenseert, het watergehalte zal in rbatch2-4 in eerste instantie dan ook toenemen. Na circa 35 uur is er voldoende warmteontwikkeling in rbatch2 waardoor ook hier een daling van het watergehalte te zien is. Na circa 70 uur neemt de snelheid van de daling van het watergehalte op hoogte 2 af. De gehalten aan water op hoogte 3 (rbatch3) en 4 (rbatch4) blijven gestaag toenemen in de tijd. Wanneer maar lang genoeg wordt doorgegaan met het experiment zullen de gehalten aan water op deze hoogtes door de warmteontwikkeling ook afnemen. Dit is te zien bij een experiment uitgevoerd met 2 verschillende lagen. Bij het experiment werd in de onderste laag een vochtigheid van 45% ingesteld en in laag 2-4 een vochtigheid van 25%. Figuur E10 (bijlage E) laat zien dat op hoogte 2 na circa 50 uur en op hoogte 3 na circa 70 uur een afname is te zien van het watergehalte.

Bij de O₂ en CO₂ profielen is duidelijk te zien dat het gehalte aan O₂ (figuur E3, bijlage E) afneemt en CO₂ (figuur E4, bijlage E) toeneemt bij toenemende hoogte (van rbatch1 → rbatch4). Dit wordt veroorzaakt doordat de lucht die van rbatch1 naar rbatch2 gaat etc., deel heeft genomen aan de betreffende reacties in de reactor. Het O₂ en CO₂ profiel voor hoogte 2 komt zeer goed overeen met het bovenstaande model. Door het afwijkende temperatuurprofiel van batchreactor 1, verschillen de O₂ en CO₂ gehalten ook. Wanneer deze vergeleken worden met Experiment H3, is de 2^e piek van CO₂ en het bijbehorende dal van O₂ niet aanwezig. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat bij rbatch1 steeds verse lucht wordt ingevoerd.

8.4 Invloed van de parameters op de broei

Tijdens het ontwikkelen/valideren van het model is onderzoek verricht naar verschillende aspecten. Zo kunnen bij het gebruik van Aspen Plus verschillende parameters worden gevolgd in de loop van

de tijd. De belangrijkste zijn natuurlijk de temperatuur, het vochtgehalte van de biomassa in de betreffende batch en het gehalte aan O₂ en CO₂, die respectievelijk worden verbruikt en vrijkomen bij de biologische- en chemische reacties. De belangrijkste aspecten die zijn onderzocht zijn de onderstaande, hier zal vervolgens dieper op in worden gegaan:

- Variatie in ingangstemperatuur
- Variatie in het vochtgehalte
- Variatie in de luchtflow

8.4.1 Variatie van de ingangstemperatuur

Bij het model wordt uitgegaan van een begintemperatuur van 15°C. Bij deze temperatuur zijn de enzymen werkzaam; de thermofiele- en mesofiele organismen over het algemeen nog niet. In de praktijk komt het natuurlijk voor dat het aangeleverde materiaal een afwijkende temperatuur heeft. Een lagere temperatuur is gezien vanuit het voorkomen van broei gewenst, een verhoogde temperatuur kan tot grote problemen leiden. Vandaar dat er bij het afnemen van partijen afspraken worden gemaakt over de maximale temperatuur van het aangeleverde materiaal. Een verhoging van de temperatuur kan komen doordat de partij al bij binnenkomst een hogere temperatuur heeft, doordat de partij door de straling van de zon is opgewarmd. Er is dan ook gekeken naar het effect van de aanvangstemperatuur op de broei van biomassa.

In bijlage E staan de resultaten weergegeven. De temperatuur van het materiaal is gevarieerd tussen 5 en 50°C. Bij het model is uitgegaan van een vochtgehalte van 45% (rbatch1) onder en 25% (rbatch2-4) boven in de reactor. In figuur E7 (bijlage E) staan voor de verschillende ingangstemperaturen de temperatuur van rbatch2 (hoogte 2) weergegeven. Duidelijk is te zien dat bij hogere ingangstemperaturen, binnen enkele uren al temperaturen boven de 65°C worden bereikt. Bij lagere ingangstemperaturen is er een langere tijd nodig voordat de temperaturen gaan stijgen.

Ook is zichtbaar dat hoe lager de ingangstemperatuur van het materiaal is, hoe langer het duurt voordat de stijging van de temperatuur begint. Dit is duidelijk te zien wanneer figuur E5 en E6 (bijlage E) worden vergeleken. Bij E6 is de ingangstemperatuur 15°C en bij E7 10°C. Voor alle hoogtes geldt dat bij 15 °C eerder een duidelijke temperatuurstijging zichtbaar is. De berekende resultaten voor de overige ingangstemperaturen laten dezelfde trends zien.

8.4.2 Variatie van het vochtgehalte

Bij het bekijken van de invloed van het vochtgehalte op de snelheid van de broei zijn verschillende situaties gemodelleerd. Voor het verkrijgen van een worst-case scenario worden in het model de batches gevuld met een verschillende verhouding van biomassa/water. Zo is in Rbatch1 een natte laag aangebracht en in de overige (Rbatch2-4) een drogere laag. Er wordt uitgegaan van materiaal dat pas boven de 32% vochtigheid gaat broeien, bij een luchtflow van 4,25 l/min en een ingangstemperatuur van 15°C. De volgende situaties zijn onderzocht:

- Situatie 1: homogene vulling 45% vochtigheid (zie figuur E1)
- Situatie 2: onderste laag 45%- en daarboven (laag 2-4) 25% vochtigheid (zie figuur E5)
- Situatie 3: onderste laag 45%- en daarboven (laag 2-4) 5% vochtigheid (zie figuur E8)

Wanneer de temperatuurprofielen van de 3 situaties worden vergeleken, is het temperatuurverloop van rbatch1 (TEMP01) natuurlijk bij alle 3 hetzelfde, omdat deze voor alle 3 gelijk is. Voor situatie 2 en 3 geldt dat de temperatuurstijging voor hoogte 2-4 later begint dan bij situatie 1. Het belangrijkste verschil dat te zien is, is dat de temperaturen bij situatie 3 voor hoogte 2-4 eerder stijgen dan bij situatie 2. Zo stijgen de temperaturen voor hoogte 4 bij situatie 3 al na circa 50 uur, terwijl bij situatie 2 pas na circa 80 uur er een temperatuurstijging zichtbaar is.

8.4.3 Variatie van de luchtflow

Om de wisselende reactieomstandigheden na te bootsen is de luchtflow gevarieerd. De luchtflow zorgt voor de aanvoer van zuurstof en de afvoer van warmte, maar helpt bovendien mee aan het transporteren van verdampt water naar boven. Er is gekeken naar de invloed van de luchtflow op de reactiesnelheid en temperatuur. De temperatuur van de lucht is 15°C bij een druk van 1 bar en heeft dezelfde samenstelling als de buitenlucht. De luchtflow is gevarieerd van 1 l/min tot 10 l/min. Bij het model is uitgegaan van een vochtgehalte van 45% (rbatch1) onder en 25% (rbatch2-4) boven in de reactor. Bij hoge luchtflows (15 l/min) bleek bij experiment 5C dat de warmte volledig werd afgevoerd en daardoor er geen temperatuurstijging plaats vond.

In figuur E9 (bijlage E) staat het temperatuurverloop voor hoogte 2 als functie van de tijd weergegeven. In deze figuur is duidelijk te zien, dat bij een toename van de luchtflow de broei eerder start. Ook is te zien dat de grafieken bij toename in flow naar elkaar toegaan, waardoor het verschil in temperatuur onderling afneemt. Experimenten berekend met een vochtgehalte van 45% (rbatch1) onder en 5% (rbatch2-4) boven in de reactor, laten dezelfde trends zien.

Daarnaast zijn er experimenten berekend waarbij de luchtflow na 100 uur verlaagd cq verhoogd werd. Wanneer de luchtflow na 100 uur verhoogd wordt van 4.25 naar 10 l/min cq verlaagd wordt naar 0.005 l/min is er geen verschil te zien met de temperaturen wanneer de luchtflow constant op 4.25 l/min gehouden wordt. Bij experimenten in de praktijk is dit echter niet het geval, dan treedt er wel een verlaging cq verhoging van de temperatuur op (zie exp. H6 [KEMA, 2003]).

8.5 Modelleren experimenten verricht in de broeireactor

Zoals al eerder naar voren kwam bij het valideren van het model, komen de berekende waarden (van het model) en de waarden uit de praktijk niet altijd overeen. Dit was ook te verwachten omdat het model gebaseerd is op de reactiekinetiek van hooi. Een ander oorzaak hiervoor ligt in de aannames die zijn gedaan voor de populatie enzymen, mesofielen en thermofielen. Om de resultaten van het model goed af te stemmen op de resultaten van de experimenten in hoofdstuk 7 is bij het beschrijven van de kinetiek in Fortran, de mogelijkheid aangebracht om een aantal parameters van een fitfactor te voorzien. Deze factoren zorgen ervoor dat de reactie getemperd of juist sneller gaat lopen waardoor een heel ander effect optreedt.

Bij de experimenten uitgevoerd met de broeireactor en de kleine reactievaatjes blijkt dat de broei reeds start bij lagere vochtgehaltes dan 32%. Bij het model wordt er in het begin uitgegaan dat broei slechts optreedt bij vochtgehaltes vanaf 32%. Door een verlaging van de parameter vochtgehalte uit tabel 5, is het mogelijk om deze experimenten te modelleren. Daarnaast kunnen ook de overige fitfactoren van de parameters in tabel 5 worden aangepast. Door de juiste factor te gebruiken is het mogelijk om het model te fitten op de experimenten verricht in de broeireactor. De verschillende fitfactoren staan in tabel 6 weergegeven voor de onderstaand experimenten:

- Experiment A: palmpitschroot

Bij het opzetten en valideren van het model, bleek dat het temperatuurverloop tot circa 70 °C goed te modelleren zijn. Daarboven is het echter veel moeilijker. Een onderliggend probleem hiervan is dat het doorschieten van de temperatuur van 65°C naar circa 100°C bij de experimenten slechts één maal is opgetreden. Bovendien was dit experiment niet reproduceerbaar, waardoor de ware toedracht niet bekend is. In figuur E11 (bijlage E) staat het berekende temperatuurverloop weergegeven. Vergeleken met figuur 7 komt deze overeen. In figuur E11 schommelen de temperaturen niet zo, omdat er in tegenstelling tot experiment A geen verwarmingsmantel gedurende het experiment hoeft ingeschakeld te worden. Daardoor zal de temperatuurstijging van 5-nov tot 6-nov in het berekende model niet optreden.

- Experiment B: biomassa pellets

In figuur E12 (bijlage E) staat het berekende temperatuurverloop weergegeven. Vergeleken met figuur D2 komt deze goed overeen. In tegenstelling tot figuur D2 schommelen de temperaturen niet zo, omdat er in tegenstelling tot experiment B geen problemen met de verwarming gedurende het experiment zijn (4-dec t/m 11-dec). Daardoor zullen de temperatuurschommelingen van 4-dec t/m 15-dec in het berekende model niet optreden.

- Experiment D: houtpellets

In figuur E13 (bijlage E) staat het berekende temperatuurverloop weergegeven. Vergeleken met figuur D4 komt deze goed over een. De broei van de houtpellets wordt gestart door de enzymen en gevolgd door de mesofiele micro-organismen. Tot 40°C is het nabootsen geen probleem, daarna worden de houtpellets "extra" opgewarmd met behulp van de externe verwarming, waardoor de temperaturen oplopen tot circa 55°C. Met het model is dit verwarmen niet na te bootsen.

Tabel 6: parameters experimenten met bijbehorende fitfactor

Nr	Parameter	fitfactoren		
		Exp. A	Exp. B	Exp. D
1	(k) enzymen	0.39	0.39	0.39
2	(Ea) activeringsenergie	58000	58000	58000
3	(k) mesofielen	0.45	0.45	0.45
4	(k) thermofielen	0.4	0.4	0
5	Enz μ	32	32	28
6	Enz σ	3.75	3.75	3.75
7	Meso μ	41	41	33
8	Meso σ	4.25	4.25	3
9	Therm μ	58	58	58
10	Therm σ	4.75	4.75	4.75
11	Vochtgehalte	0.2	0.2	0.2
12	(k) chemisch	1	1	1

8.6 Resultaten

Op basis van de berekende resultaten kunnen de onderstaande conclusies worden getrokken:

- Modelling van de broei door middel van de plug-flow reactor (opgebouwd uit een aantal batchreactoren) blijkt goed werkbaar bij temperaturen tot circa 70°C.
- Met behulp van het model kunnen de temperatuurprofielen, van de experimenten waarbij de luchtflow en -ingangstemperatuur gevarieerd werd, goed berekend worden.
- Bij het beschrijven van de kinetiek in Fortran is de mogelijkheid aangebracht om een aantal parameters van een fitfactor te voorzien. Daardoor kunnen de experimenten verricht in de broeireactor goed beschreven worden met het model.

Beperkingen van het model

Het broeiproces lijkt goed te modelleren bij het gebruik van het simulatieprogramma Aspen Plus, blijkt dat het broeiproces goed te modelleren is. Toch blijven er altijd kritische kanttekeningen:

- Verschillen tussen het gemeten temperatuurprofiel en het berekende profiel is waarschijnlijk het gevolg van het beperkte aantal batchreactoren waaruit het model is opgebouwd.
- In werkelijkheid ontwikkeld een populatie micro-organismen zich in de tijd en bij een bepaalde temperatuur is deze maximaal. Hierdoor kan een temperatuuroverschot ontstaan, terwijl dit niet

wordt berekend. Het model gaat ervan uit dat bij een bepaalde temperatuur een bepaalde populatie micro-organismen (mesofiele of thermofiele) aanwezig is.

- Bij het model blijft de temperatuur in het eerste deel van de reactor vaak achter. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt, doordat het model ervan uit gaat dat in het eerste deel van de reactor de koude lucht zich mengt met de aanwezige lucht. Bij de broeireactor vindt er geen menging plaats, maar treedt er een zuivere plug-flow stroming op.

9 REGELGEVING BIOMASSA

Er zijn veel leemtes in kennis over het gebruik van biomassa en daardoor dus ook in de huidige normen die specifiek van toepassing zijn voor biomassa. Door de steeds nieuwe ontwikkelingen en het vooruitlopen van de technologie lopen de wetgeving, nieuwe normen of aanpassing van oude normen op deze ontwikkeling achter. De Nederlandse en Europese normen en richtlijnen schieten tekort of zijn er simpelweg niet [Novem, 2003]. Zoals uit het onderzoeksschema naar voren komt, is het opstellen van richtlijnen en criteria om groei bij biomassa te beheersen het uiteindelijke doel van het onderzoek. Omdat het al erg moeilijk is om uniforme regels voor het gebruik van biomassa op te stellen, zal het opstellen van richtlijnen en criteria dan ook gecompliceerd zijn. Vandaar dat gerelateerde problemen in andere bedrijfstakken, zoals de papier- en de houtindustrie, de agrarische sector en afvalverwerkende bedrijven als handvat worden gebruikt.

9.1 Problematiek wet- en regelgeving biomassa

In de loop van dit hoofdstuk zullen problemen aan bod komen die spelen bij het gebruik van biomassa. Zo worden in het spraakgebruik biomassa en afval doorgaans in één adem genoemd en naast elkaar gebruikt. Hoewel biomassa veelal uit afvalstoffen bestaat en in afval meer of minder biomassa aanwezig kan zijn, wordt in de uitvoeringspraktijk gehecht aan het gebruik van beide begrippen. Onderling is er echter wel een verschil in uitwerking: biomassa karakteriseert doorgaans een materiaal terwijl het begrip afval veelal een primair juridische betekenis heeft. Vandaar dat de regelgeving geldend voor afval in grote lijnen toepasbaar is voor biomassa. Naast het classificeren van de verschillende biomassastromen doen zich problemen voor, omdat domweg de kennis ontbreekt en/of het vergunningentraject te langdurig en complex is.

9.1.1 Definitie biomassa

Voor biomassa zijn diverse omschrijvingen in omloop en ontbrak het tot voor kort aan een eenduidige definitie. Biomassa is doorgaans de verzamelterm voor uiteenlopende materialen en stoffen van kortcyclisch organische oorsprong, zowel plantaardige als dierlijke, bestemd voor energieopwekking (een hernieuwbare energiebron). Biomassa kan afkomstig zijn uit speciale voor energieopwekking bestemde teelten (zoals wilgen, populieren of miscanthus), reststromen (bijvoorbeeld uit de bosbouw, landbouw of fruitsector) en afvalstromen (zoals afvalhout, de organische fractie van huishoudelijk afval, mest, oud papier en RWZI-slib). De biomassa kan naar haar aard of ten gevolge van het voorgebruik als schoon worden aangemerkt dan wel als verontreinigd. Het schoon of vervuild zijn van biomassastromen wordt bepaald door de chemische samenstelling die doorgaans samenhangt met de natuurlijke herkomst en het gebruik dat ervan is gemaakt. Dat laatste blijkt meestal uit de herkomst zoals bijvoorbeeld sloophout of restafval uit de voedingsmiddelenindustrie. Ook kan er sprake zijn van een samengesteld product met biomassa van verschillende oorsprong, al dan niet in combinatie met organisch materiaal van fossiele oorsprong. Dit laatste fossiele materiaal valt niet onder de definitie van biomassa. Indien biomassa vermengd is met fossiele stromen wordt doorgaans gesproken van gemengde stromen.

Richtlijn elektriciteit uit hernieuwbare bronnen

Met betrekking tot de inkadering van biomassa is onlangs meer duidelijkheid gegeven in de Europese richtlijn betreffende de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen op de interne elektriciteitsmarkt (Richtlijn 2001/77/EG van 27 september 2001, PB L 283) [Directoraat-Generaal Milieubeheer, 2002]. Deze richtlijn beoogt een groter gebruik van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare bronnen te bevorderen en bevat daartoe nationale indicatieve streefcijfers, uitgedrukt in een percentage van het gebruik. Voor Nederland is als streefcijfer een aandeel van 9% opgenomen, te bereiken in 2010. Naast zon, wind en water wordt biomassa als hernieuwbare energiebron aangemerkt, waarbij in artikel 2 van de richtlijn de volgende definitie voor biomassa wordt gehanteerd.

Biomassa volgens Richtlijn 2001/77/EG

De biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval. Deze afbakening van biomassa is 'breed' en omvat alle biomassastromen zonder dat een specifieke verdeling is gemaakt naar aard en samenstelling van de verschillende stromen.

Afbakening biomassa voor grote stookinstallaties

In Richtlijn 2001/80/EG is voor biomassa óók een definitie opgenomen in artikel 2, in de vorm van een limitatieve opsomming, en die luidt als volgt:

Biomassa volgens Richtlijn 2001/80/EG

Producten die geheel of gedeeltelijk bestaan uit plantaardig landbouw- of bosbouw materiaal dat gebruikt kan worden als brandstof om de energetische inhoud ervan te benutten, alsmede de volgende als brandstof gebruikte afvalstoffen:

- plantaardig afval uit land- en bosbouw;
- plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp; indien het op de plaats van productie wordt meeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- kurkafval;
- houtafval, met uitzondering van houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, wat in het bijzonder het geval is voor houtafval afkomstig van bouw- en sloopafval.

Bovenstaande definitie van biomassa bepaalt de werkingssfeer van Richtlijn 2001/80/EG; inzet van biomassa van een andere oorsprong dan die in de definitie valt dus buiten de reikwijdte van de richtlijn en kan dus als afval beschouwd worden.

9.1.2 Classificatiesysteem biomassastromen

NEN heeft een classificatiesysteem voor het indelen en classificeren van (met name) biomassastromen als brandstoffen voor energiewinning gepubliceerd: NTA 8003 [NEN, 2001]. Deze NTA (Nederlandse Technische Afspraak) is tot stand gekomen op basis van eerder (praktijk)onderzoek, dat door KEMA/TNO is verricht in opdracht van NOVEM. Het classificatiesysteem deelt in op vier hoofdcriteria van de biomassa: typologie en herkomst, vochtgehalte, stookwaarde, verschijningsvorm. Dit classificatiesysteem is bedoeld om het gebruik van biomassa te stimuleren door verduidelijking van aard en samenstelling hiervan. Het systeem is van belang voor alle betrokken partijen, zoals aanbieders en afnemers van biomassa, maar ook voor vergunningverlenende instanties. In vergunningen kan het classificatiesysteem zorgen voor verduidelijking en vereenvoudiging. Dit systeem is toepasbaar, maar is momenteel nog ontoereikend, omdat een aantal zuivere biomassastromen nog niet expliciet zijn benoemd en indien nodig moeten worden opgenomen [Raats, 2003].

9.1.3 Landelijk Afvalstoffen beheersplan

Het beleid inzake de op- en overslag en be- en verwerking van afvalstoffen (biomassa) wordt beschreven in het Landelijk Afvalstoffen beheersplan (LAP) [Afval Overleg Orgaan, 2002]. Door de nieuwe Wet milieubeheer, die per 8 mei 2002 van kracht is geworden, moet de Minister (staatssecretaris) van VROM eenmaal in de vier jaar een Landelijk afvalbeheersplan (LAP) opstellen. Inmiddels is, in goed overleg met overheden, bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties, het eerste LAP opgesteld. Dit bevat het beleid voor het beheer van afvalstoffen tot 2006, met een doorkijk tot 2012. Het LAP vervangt onder meer het tienjarenprogramma Afval 1995-2005 en het

Meerjarenplan Gevaarlijke Afvalstoffen II, die hierdoor niet meer maatgevend zullen zijn voor het rijksbeleid op het gebied van afvalstoffen. In het LAP is het beleid voor de gevaarlijke en niet-gevaarlijke afvalstoffen geïntegreerd. Het bevat onder meer een nieuwe beleidslijn voor het thermisch verwerken van brandbaar afval en de minimumstandaarden voor de verwerking van afvalstoffen.

9.1.4 Huidige situatie van de vergunningverlening in Nederland

In het Kolenconvenant is een resultaatverplichting opgenomen van 3,2 Mton CO₂-reductie, die navenant aan het opgestelde vermogen is verdeeld over de 6 kolengestookte centrales Gelderland, Hemweg 8, Maasvlakte, Borssele, Amer en Willem-Alexander [Lindeman, 2004]. Daarnaast rust op deze bedrijven een inspanningverplichting om bij kolen- en/of gascentrales nog eens 0,5 Mton CO₂ te reduceren, zonder dat dit per centrale is gekwantificeerd. Verder kunnen nog 3 gascentrales worden opgemerkt, te weten de centrales Harculo, Eems en Claus die in het convenant een bijdrage dienen te leveren. In het convenant worden een aantal omstandigheden omschreven, die de nakoming van de verplichtingen kunnen bemoeilijken dan wel onmogelijk maken en dus aanleiding kunnen vormen tot beperking van de verplichtingen uit het convenant. Enkele centrales doen reeds bio-energie opwekken op basis van eerdere vergunningen, echter de vergunningsprocedures voor de realisering van de convenantverplichtingen zijn in veel gevallen nog niet afgerond.

Het bijstoken omvat naast zuiver biomassa ook gemengde en alternatieve brandstoffen zoals bio-olie/vetten. Het geheel wordt veelal aangeduid als secundaire brandstoffen. De daadwerkelijke inzet zal hoogstwaarschijnlijk lager uitvallen, onder andere omdat nog niet duidelijk is waar de technische grenzen van het directe meestoken liggen en of er steeds voldoende biomassa met de vereiste specificaties beschikbaar is.

Met betrekking tot de vergunningverlening volgt hier de huidige status:

- Alleen voor de Amer- en Clauscentrale is sprake van een onherroepelijke vergunning
- Tot nu toe is in 4 vergunningtrajecten (Gelderland, Maasvlakte, Borssele en Eems) beroep ingesteld gevolgd door vernietiging (Maasvlakte, Borssele en Eems) of schorsing (Gelderland)
- Twee vergunningaanvragen zijn nog in behandeling (Hemweg en Maasvlakte wervelbed)
- Een vergunning ligt momenteel ter behandeling van schorsingsverzoek en beroep bij de raad van state (Willem-Alexander)

Bij de ontwikkeling van bio-energieprojecten in Nederland vormt vergunningverlening in het algemeen een zeer groot knelpunt. De vergunningentrajecten voor de bijstook-projecten zijn hiervan overduidelijk een exponent. Wat betreft de vergunningtrajecten hebben, uitgezonderd de Claus- en de Amercentrale, een zeer lange doorlooptijd van gemiddeld 4 jaar of meer. Met de doorlooptijd wordt bedoeld op het tijdsverloop tussen de formele start van de m.e.r.- en/of vergunningprocedure en het moment waarop de vergunning onherroepelijk is geworden of vernietigd.

9.1.5 Knelpunten en acties vergunningverlening

Initiatiefnemers krijgen bij het ontwikkelen van projecten te maken met complexe wet- en regelgeving. Initiatiefnemers hebben de medewerking van lokale overheden nodig in verband met de vereiste vergunningen op deze terreinen. Provincies en gemeenten zullen een afweging van belangen moeten maken en uiteindelijk een besluit moeten nemen over ruimte, bouw en milieu [MinEZ, 2003].

In het traject rond vergunningverlening komen 3 knelpunten naar voren:

1. vergunningentraject duurt lang en is duur
2. onduidelijk toetsingskader, ontbreken afstemming wet- en regelgeving en grote hoeveelheid betrokkenen.
3. uitblijven handhaving en sancties bij overschrijding wettelijke termijnen door bevoegd gezag.

9.1.5.1 Vergunningentraject duurt lang en is duur

Procedures rond het verkrijgen van de juiste vergunningen duren lang en zijn, met name voor kleinschalige biomassaopties, relatief kostbaar. Belangrijkste oorzaak hiervoor is dat de procedures en te nemen stappen in deze procedures vaak niet helder zijn. Met name gericht op het verkorten van het bestaande vergunningentraject zullen twee acties in gang gezet worden:

- Procesgerichte hulpmiddelen, gericht op het vergunningentraject moeten ontwikkelt worden. Op dit moment is VROM in samenwerking met EZ, NOVEM en InfoMil hier mee bezig.

Het gaat met name om de informatieverstrekking en onderlinge communicatie die vereist is in elke procedurestap. Daarnaast moet bekeken worden wat de mogelijkheden zijn om het proces zo soepel mogelijk te doorlopen. Daarbij kan gedacht worden aan checklists, 'standaardvergunningen', een infobulletin om betrokken partijen te informeren en de oprichting van een pool van deskundigen vanuit de markt die 'klaar staat' om gewenste ondersteuning pro-actief te leveren aan zowel vergunningverleners als aan initiatiefnemers.

- Daarnaast moet de actuele praktijk van de vergunningverlening gemonitord worden.

Aan de hand van deze monitoring kan vastgesteld worden waar zich kansen op verbeteringen voordoen en waar van anderen kan worden geleerd, zodat niet opnieuw het wiel wordt uitgevonden. In 2004 zal door Novem een nulmeting uitgevoerd worden, die als referentie gaat dienen.

9.1.5.2 Onduidelijk toetsingskader en ontbreken van afstemming wet- en regelgeving

Voor biomassaprojecten zijn veel wetten en regels van toepassing. Onduidelijk daarbij is vaak wat nu precies het toetsingskader is. Sommige beleidsterreinen zijn daarnaast niet goed op elkaar afgestemd, althans onvoldoende zichtbaar voor marktpartijen. Via het energiebeleid wordt de inzet van biomassa gestimuleerd, terwijl het mestbeleid en het emissiebeleid de inzet van sommige stromen juist ontmoedigd. Voor deze wetten en regels zijn bovendien verschillende partijen bevoegd gezag met ieder hun eigen interpretatie daarvan.

acties

- Nadere doorlichting van het wet- en regelgevingcomplex rond biomassa, inclusief het M.E.R.-traject, is nodig.
- Afronden van de witte- en gele lijst door VROM. Deze lijsten omvatten de rubricering van biomassa en afvalstromen naar herkomst en kwaliteit met het oog op het van toepassing zijnde emissieregime. De 'witte' lijst betreft stromen die wat betreft emissies als 'schoon' kunnen worden aangemerkt, de 'gele' lijst betreft stromen die buiten de categorie schoon vallen.

Hierbij moet worden gekeken naar mogelijkheden om procedures te verkorten, te versimpelen en uiteindelijk tot meer integrale besluitvormingsprocedures te komen. Wat betreft de lijsten, deze omvatten de rubricering van biomassa en afvalstromen naar herkomst en kwaliteit.

9.1.5.3 Uitblijven handhaving en sancties bij overschrijding wettelijke termijnen

De wettelijke termijnen voor vergunningverlening worden vaak overschreden zonder dat dit gevolgen heeft voor het bevoegd gezag. Dit leidt tot onzekerheid en hogere kosten voor initiatiefnemers.

Acties

- Nadere doorlichting van het wet- en regelgevingcomplex rond biomassa, inclusief het M.E.R.-traject, is nodig.

Hierbij moet ook worden gekeken naar mogelijkheden om procedures te verkorten, te versimpelen en uiteindelijk tot meer integrale besluitvormingsprocedures te komen.

De beschreven problematiek voor het gebruik van biomassa, treedt ook op bij het opstellen van richtlijnen en criteria om groei bij biomassa te beheersen. In het volgende hoofdstuk worden Vervolgens worden additionele richtlijnen en criteria aanbevolen, om de veiligheidsmarges te vergroten bij de groei van biomassa.

10 RICHTLIJNEN EN CRITERIA

De beschreven problematiek voor het gebruik van biomassa in hoofdstuk 8, treedt ook op bij het opstellen van richtlijnen en criteria om broei bij biomassa te beheersen. Regelgeving om broei van biomassa te voorkomen is er in Nederland simpelweg niet. Bedrijven mogen naar eigen goeddunken te werk gaan. In de Scandinavische landen bestaat reeds veel ervaring met de inzet van biomassa (met name schoon, vers hout) voor energieopwekking en ook met de wijze van opslag en het bijkomende broeigevaar. In hoofdstuk 3 en 4 zijn diverse aspecten, waarmee bij de aanleg van een opslag rekening moet worden gehouden afzonderlijk besproken. In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de bestaande richtlijnen. Vervolgens worden additionele richtlijnen en criteria aanbevolen, om de veiligheidsmarges te vergroten bij de broei van biomassa (stap 3 van het onderzoeksschema).

10.1 Bestaande richtlijnen en criteria

Een combinatie van deze aspecten wordt gebruikt in Denemarken [Novem, 1999a]. Daar worden voor de opslag van verse biomassa de volgende regels aangehouden:

- opslag niet hoger dan 10 m
- opslag tot 35 000 m³
- zo droog mogelijk opslaan
- zo los mogelijk opslaan (niet verdichten dus)
- zo homogeen mogelijk (wat betreft vocht en materiaal)
- geen metaaldelen in verband met katalytische werking op broei
- opslagduur van houtchips maximaal zes maanden

10.2 Aanbevolen richtlijnen en criteria

Zoals in hoofdstuk 9 al duidelijk naar voren komt, bestaan dergelijke regels in Nederland niet. Om toch tot richtlijnen te komen om broei te minimaliseren cq te voorkomen worden in dit hoofdstuk enkele richtlijnen en bijbehorende criteria opgesteld. Deze zijn gebaseerd op gegevens uit de literatuur en op basis van de resultaten van het experimenten en modelleren. In het verleden is reeds onderzoek verricht naar algemene Arbo-aspecten omtrent biomassa [Handboek Arbo-aspecten, 2000 en Novem, 1999a]. Hierbij werd er onderscheid gemaakt tussen richtlijnen die betrekking hebben op gezondheid en/of veiligheid. In de volgende paragrafen wordt er op beide aspecten dieper ingegaan.

10.2.1 Gezondheid

Specifieke richtlijnen om de gezondheidsrisico's bij de broei van biomassa te voorkomen zijn er niet. De belangrijkste effecten op de gezondheid, zijn in de onderstaande tabel 6 gespecificeerd naar het type biomassa.

Tabel 6: gezondheidseffecten bij het gebruik van biomassa

Gezondheidseffect	hout	afval	Overige biomassa
Ademhalingsproblemen	X	X	X
Voorkomen van neuskanker	X		
Huid- en oogirritaties	X	X	X
Stofhinder	X	X	
Geurhinder		X	X
Spijverteringsklachten		X	X

Het is bekend dat de beschreven gezondheidseffecten voornamelijk worden veroorzaakt door bio-aërosolen (schimmels, bacteriën en hun sporen endotoxinen) en houtstof. Deze zijn mede

verantwoordelijk voor het ontstaan van broei. Richtlijnen voor het werken met biologische agentia worden beschreven in de Arbowetgeving (Arbobesluit afdeling 9 biologische agentia; artikel 4.84 t/m 4.105) [KEMA, 2001a]. In bijlage F staan de adviesnormen voor biologische agentia en endotoxinen die het niveau van blootstelling aangeven, waar beneden de effecten op de gezondheid (zelfs bij langdurige blootstelling) te verwaarlozen zijn. Overige gezondheidsrisico's die een rol spelen bij de broei van biomassa, komen in de volgende paragraaf aan bod.

10.2.2 Veiligheid

Wat betreft de veiligheid kan er al naar gelang de fase waarin het proces zich bevindt onderscheid gemaakt worden in broei, (smeulende) brand en explosie. De richtlijnen dienen in eerste instantie om de broei te voorkomen cq te minimaliseren, waardoor de veiligheid van de installatie en de werknemers zal toenemen. Bij de richtlijnen kan verder onderscheid gemaakt worden in richtlijnen voor de opslag van biomassa, voor de detectie van broei, organisatorische- en algemene richtlijnen voor de opslag in silo's.

10.2.2.1 Broei

Uit het onderzoek verricht binnen KEMA met de broeireactor komen de volgende richtlijnen / aspecten ook naar voren. Deze zijn conform de eerder beschreven Deense richtlijnen en criteria.

- Zo is voor het op gang komen van het broeiproces vooral het vochtgehalte een belangrijke parameter en met eenvoudige experimenten kan een schatting worden gemaakt van de range van vochtgehalten waarbinnen broei niet of slechts zeer langzaam op gang zal komen. Hoe droger de biomassa hoe kleiner de kans op broei is, met een bijkomend voordeel dat de energetische waarde van de partij biomassa dan hoger is.
- Daarnaast is inertisering met vloeibare stikstof een mogelijkheid om het begin van het broeiproces te onderdrukken (of bij vers materiaal te beperken tot enzymatische broei), doordat aërobe micro-organismen de inertisering met stikstof niet overleven. Dit zal alleen effectief uitgevoerd kunnen bij een opslag in bijvoorbeeld een silo waar de aanwezige lucht ook daadwerkelijk door stikstof kan worden verdrongen. Echter wanneer dit gebeurt moet er extra aandacht besteed worden aan de menselijke gevaaraspecten, bijvoorbeeld de risico's van werknemers bij het betreden van een ruimte die geïnertiseerd is.
- Verder is duidelijk dat het toevoeren van lucht aan de opslag moet worden voorkomen. Als er toch een ongewenste temperatuurstijging optreedt, kan een sterk verhoogde doorstroming van lucht voor de afvoer van de warmte zorgen (groter dan de productie van warmte door de extra beschikbaarheid van zuurstof), waardoor de temperatuur omlaag wordt gebracht. Dit kan een tijdelijke maatregel zijn om een langere opslagduur dan gepland te overbruggen, voordat de opgeslagen biomassa aan de verbrandingsinstallatie wordt toegevoerd.
- Een ander aspect is de homogeniteit van de opgeslagen partij. Maak zo homogeen mogelijke voorraden zowel qua vocht als qua samenstelling. De aanwezigheid van enkele vochtige plekken in een partij biomassa die voor het overige een voldoende laag vochtgehalte heeft kan toch voldoende zijn om broei in de gehele partij te laten ontstaan. Dergelijke inhomogeniteiten moeten dus worden voorkomen. Wat nog niet mogelijk is gebleken, is het aangeven van een maximale opslagduur voor veilige opslag van een biomassa met bepaalde eigenschappen (zoals vocht en deeltjesgrootte). Indien er toch verschillende stromen (gemengd) opgeslagen worden dienen deze maximaal enkele dagen opgeslagen te worden.
- Ten aanzien van de invloed van deeltjesgrootte op de broeigevoeligheid kan worden opgemerkt dat de broeigevoeligheid toeneemt als de grootte van het materiaal afneemt. In dit onderzoek ging het in alle gevallen om fijn materiaal (deeltjesgroottes <5 cm) dat broeigevoelig is. Variatie binnen dit gebied leidt niet tot grote verschillen in broeigevoeligheid.
- Wat betreft de compactheid, dient getracht te worden om de partij zo los mogelijk op te slaan. Indien dit mogelijk is, is het beter om de partij in compartimenten op te slaan.

- Let op de afmetingen van de opslag. Hoe kleiner de opslag is, des te makkelijker deze te controleren is en des te beter er ingegrepen kan worden bij calamiteiten.

Aan de hand van het literatuuronderzoek kunnen bovendien richtlijnen worden opgesteld voor de detectie van broei. Daarnaast kunnen er ook nog organisatorische maatregelen en algemene richtlijnen voor de opslag in silo's worden aanbevolen.

Detectie van broei:

Aangezien er in de eerste fase slechts broei plaats vindt en geen verbranding optreedt, zullen er geen grote rookdeeltjes vrijkomen. Vroegtijdige detectie kan dan plaatsvinden door gebruik te maken van de volgende systemen.

- **Temperatuurmeting:** de temperatuur van de opslag dient continu gemeten te worden. Naast de temperatuurmeting van de mantel, dienen er ook temperatuurmetingen binnenin de opslag plaats te vinden. Deze kunnen verricht worden door middel van warmtekoppels bevestigd aan stalen kabels (die van boven naar beneden hangen in de opslag), of wellicht in de toekomst met de eerder beschreven "balletjes".
- **Gasmeting:** door middel van een continue gc-meting kan de broei al in vroegtijdig stadium ontdekt worden. Tijdens het broeiproces zal de gassamenstelling veranderen. Het gehalte aan CO₂ zal sterk toenemen, bij een afnemend O₂ gehalte. Op deze wijze kan een verhoogde activiteit van schimmels en bacterien worden waargenomen.
- **Drukmeting:** door het vrijkomen van de verbrandingsgassen zal de druk in de opslag toenemen. Echter in de praktijk is het de vraag of deze parameter bruikbaar is.

Organisatorisch:

- Zorg voor een goede planning, waardoor de opslagduur zo kort mogelijk is. Verder moeten de volgende principes "first in first out" van de voorraad en "just in time" voor de externe aanvoer van de leveranciers gelden.
- Voorkom stilstand van installaties gevuld met biomassa gedurende langere tijd.
- De vergunninghouder is verplicht binnen de inrichting werkzame personen te instrueren omtrent de voor hen van toepassing zijnde voorschriften van deze vergunning en de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen.
- Tijdens het in bedrijf zijn van installaties die in geval van storingen of onregelmatigheden kunnen leiden tot nadelige gevolgen voor het milieu, moet steeds voldoende, kundig personeel aanwezig zijn om in voorkomende gevallen te kunnen ingrijpen
- Stel procedures op voor de materialen wanneer ze worden aangeleverd:
 - o Materialen dienen bij binnenkomst getest te worden op hun broeigevoeligheid.
 - o Nieuwe materialen moeten uitvoeriger gescreend worden.
- Stel procedures op voor het handelen bij broei:
 - o Terugsturen van broeiende biomassa naar leverancier (indien verantwoord).
 - o Meten van temperatuur en gassamenstelling in de silo.
 - o Verwijderen van broeiende biomassa met shovel.

Opslag/verlaadinstallatie en transportleidingen

- De installatie en het leidingwerk moeten zodanig zijn geconstrueerd en worden onderhouden dat het optimaal functioneren van alle onderdelen gewaarborgd is. Ze moeten bestand zijn tegen druk, temperatuur welke hierin optreden en het medium waarvoor ze bestemd zijn. Elk defect aan een installatie dat gevaar, schade of hinder buiten de inrichting kan veroorzaken dient zo spoedig mogelijk te worden hersteld [Gedeputeerde Staten van Limburg, 2002].
- De installatie moet goed bereikbaar zijn voor alle voertuigen die in geval van calamiteiten toegang tot de installatie moeten hebben.

- De opslagsilo moet zijn voorzien van een overdrukbeveiliging (drukontlasting) en er moet een niveaumeting plaats kunnen vinden.
- De opslagsilo mag niet meer dan 95 % gevuld zijn, boven de 95% moet de vulling automatisch gestopt worden.
- In de opslag mogen zich geen dode ruimtes en hoeken bevinden.
- Hete oppervlakken en in de zon staande silo's dienen geïsoleerd te worden.
- Ontstekingsbronnen moeten vermeden worden.

10.2.2.2 Brand

Biomassa bestaat voor een belangrijk gedeelte uit brandbare verbindingen van koolstof, waterstof en zwavel etc. In de praktijk kan biomassa dan ook worden ontstoken door warmtebronnen zoals vonken, wrijving, blikseminslag etc. (zie ook bijlage F). Als interne oorzaak kan broei worden aangewezen. Bij het blussen van brand moet de brandstof en/of zuurstof verwijderd worden en/of temperatuurverlaging aangebracht worden; ook wel bekend als de branddriehoek.

- Elektrische vonken en/of elektrostatische ontladingen dienen te worden vermeden door enerzijds goede aarding en anderzijds door minimalisering van bewegende delen. De opslagsilo moet tegen blikseminslag zijn beveiligd met een afleiderinstallatie overeenkomstig de norm NEN 1014.
- Blussen met water kan beter vermeden worden, omdat door het toevoegen van water de broeigevoeligheid toeneemt en een explosief gasmengsel kan ontstaan. In een vroeg stadium kan ook gekozen worden voor een schuimvormend middel. De beste oplossing is te koelen door van boven vloeibare CO₂ en van onder vloeibare N₂ te injecteren in de opslag. Temperatuurverlaging kan geschieden door de mantel van de silo met water te koelen. Na het koelen dient de partij verwijderd te worden uit de opslag en verder afgekoeld worden aan de lucht. Wanneer er geen gevaar meer is voor brand, kan de partij weer worden opgeslagen.

Wat de blusmiddelen betreft:

- Elk blusmiddel moet duidelijk zichtbaar, steeds onbelemmerd bereikbaar en tot onmiddellijk gebruik gereed en beschikbaar zijn.
- Brandblusmiddelen moeten jaarlijks worden gecontroleerd door een daartoe erkende instantie. De datum en het resultaat van de laatst uitgevoerde controle moeten op of nabij het blusmiddel zijn aangegeven.
- De silo moet voorzien zijn van een automatisch blussysteem, met een voldoende voorraad aan blusmiddel.

Detectie van brand

Naast de bij broei beschreven temperatuur en drukmeting is bij brand rookdetectie een belangrijke methode. Indien de broei nog niet gedetecteerd is zullen de volgende een melding geven:

- Zowel de ionisatie rookmelders als de halfgeleiders (Taguchi-sensoren) zijn toepasbaar. Aan te raden is meerdere sensoren te koppelen aan een PC, zodat een eventuele (smeulende) brand eerder gedetecteerd kan worden.

10.2.2.3 Explosie

Explosies treden veelal op wanneer een (smeulende) brand geblust wordt met water. Er kunnen dan lokaal vergassingsreacties optreden, Het water dient dan als zuurstofleverancier voor het ontstaan van explosieve gasmengsels van CO en H₂ (Novem, 1999). Naast de gasexplosies bestaat er een theoretische kans voor het optreden van een stofexplosie. In de praktijk zullen stofexplosies van biomassa zich niet voordoen, omdat bij biomassa de deeltjes over het algemeen aanmerkelijk groter zijn dan bij poeders. Er bestaan reeds richtlijnen en normen om het explosiegevaar te verminderen. Een relevante Nederlandse norm is de NEN 1010. Daarnaast bestaan er ook Europese richtlijnen; de ATEX-richtlijnen (atmosphères explosives). Deze worden in bijlage F uitvoeriger besproken.

11 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit rapport zijn additionele richtlijnen en criteria aanbevolen, om de veiligheidsmarges te vergroten bij de broei van biomassa. Deze zijn gebaseerd op basis van gegevens uit de literatuur en door middel van experimenteel onderzoek. De richtlijnen dienen in eerste instantie om de broei te beheersen, waardoor de veiligheid van de installatie en de werknemers zal toenemen. Bij de richtlijnen kan verder onderscheid gemaakt worden in richtlijnen voor de opslag van biomassa, voor de detectie van broei, organisatorische- en algemene richtlijnen voor de opslag in silo's. De aanbevolen richtlijnen zijn conform de Deense richtlijnen en criteria. Onderstaand volgen de belangrijkste conclusies die getrokken kunnen worden naar aanleiding van het afstudeeronderzoek. Gevolgd door aanbevelingen om broei in de toekomst nog beter te kunnen beheersen.

11.1 Conclusies:

Beheer van opslagen:

- Factoren die van invloed zijn op het optreden van broei zijn enerzijds gerelateerd aan de aard van het materiaal en anderzijds aan de wijze van opslag. Vooral de interne transportprocessen zijn van groot belang, omdat daardoor wordt bepaald of de ontwikkelde warmte al dan niet kan worden afgevoerd. Een beperkte mate van broei zal niet tot problemen hoeven leiden indien de temperatuurstijging beperkt blijft.
- Voor vrijwel alle soorten biomassa geldt dat er geen broei optreedt als deze maar droog genoeg worden opgeslagen; er treedt dan namelijk geen microbiologische activiteit meer op. Het minimale vochtgehalte van een materiaal waarboven broei op kan treden is materiaal afhankelijk.
- De broeigevoeligheid van biomassa neemt toe, wanneer de deeltjesgrootte afneemt.
- Inertisering met stikstof is een mogelijkheid om het begin van het broeiproces te onderdrukken (of bij vers materiaal te beperken tot enzymatische broei), doordat aërobe micro-organismen de inertisering met stikstof niet overleven

Experimentele opzet en resultaten:

- Met behulp van de kleine geïsoleerde vaatjes kan de aanvangssnelheid van het broeiproces bepaald worden in relatie tot het vochtgehalte (en ook andere factoren zoals bijvoorbeeld deeltjesgrootte). Tevens bieden de experimenten met de kleine geïsoleerde vaatjes een goed inzicht in de te verwachten resultaten (van de materialen) wanneer ze in de broeireactor worden geplaatst.
- Een snelle opwarming tot circa 60°C à 70°C treedt vaak op (palmpitschroot en biomassa pellets) en afhankelijk van de omstandigheden blijft de temperatuur gedurende kortere of langere tijd op dit niveau, om daarna meestal weer af te nemen.
- Het maximale temperatuurniveau dat ten gevolge van microbiologische broei wordt bereikt, blijkt niet van doorslaggevend belang voor het bereiken van het stadium van chemische broei.
- Bij biomassa treedt in speciale gevallen het proces van chemische broei op, waardoor de temperaturen verder oplopen en uiteindelijk temperaturen van rond de 100°C worden bereikt. Het palmpitschroot in vochtige toestand lijkt reactiever dan de overige materialen. Alleen met dit materiaal werden dergelijke temperaturen bereikt.
- Om het stadium van ontbranding te bereiken, moet droging van de biomassa op treden. Bij de uitgevoerde experimenten is het stadium, van snelle temperatuurstijging (boven de 100°C) die uiteindelijk tot ontbranding kan leiden niet opgetreden.

Modelleren:

- Modelleren van de broei door middel van de plug-flow reactor (opgebouwd uit een aantal batchreactoren) blijkt goed werkbaar bij temperaturen tot circa 70°C.
- Bij het beschrijven van de kinetiek in Fortran is de mogelijkheid aangebracht om een aantal parameters van een fitfactor te voorzien. Daardoor is het mogelijk om de resultaten van het model te fitten op de experimenten verricht in de broeireactor.

Detectie en bestrijding:

- Broei kan het beste worden gedetecteerd met behulp van een temperatuur- en gasmeting. Voor brand zijn daarnaast de ionisatie rookmelders en de halfgeleiders toepasbaar.
- Broei bij biomassa kan het beste bestreden worden door middel van afkoeling. De manier van koelen is afhankelijk van de wijze van opslag. Bij open opslagen kan het broeiende materiaal met een shovel uit elkaar worden gehaald, waarna het kan afkoelen aan de buitenlucht. Bij gesloten opslagen (als silo's) is de veiligste methode van koelen, het injecteren van vloeibare CO₂ aan de bovenkant- en van vloeibare N₂ aan de onderkant van de opslag. Vervolgens moet het materiaal verwijderd worden en verder afgekoeld te worden aan de buitenlucht.

11.2 Aanbevelingen:

Uit ervaringen blijkt dat het broeigedrag en de broeigevoeligheid van verschillende specifieke biomassasoorten niet geheel reproduceerbaar zijn. Bovendien kunnen inhomogeniteiten voor grote problemen zorgen. Het verwerven van meer kennis is dan ook noodzakelijk om tijdig risicovolle condities te kunnen onderkennen. Voorts moet aandacht besteed worden aan de onderstaande aspecten:

- Stel procedures op voor de condities van materialen, wanneer ze worden aangeleverd en er dienen procedures opgesteld te worden voor het handelen bij broei.
- Voor de voorraad moeten de principes "first in first out" en "just in time" voor de externe aanvoer van de leveranciers gelden.
- In de toekomst moet er verder onderzoek worden verricht naar de beschreven testen voor de inschatting van het broeigevaar. Omdat met hulp van deze testen een beter inzicht verkregen kan worden of het materiaal neigt tot zelfopwarming of in het extreme geval zelfs tot ontbranding.
- In de toekomst moet er verder onderzoek worden verricht, om uit te vinden welke detector en/of een combinatie van detectoren het meest geschikt is om de broei in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Verder dient de locatie van de detector afhankelijk van de soort opslag uitvoeriger bestudeerd te worden. Dit vanwege het stromingsveld van de atmosfeer in de installatie. Eveneens dient er verder onderzoek naar de meest effectieve blusmiddelen voor de verschillende biomassastromen plaats vinden. Niet alleen vanuit economisch standpunt, maar vooral vanwege de veiligheid om ongevallen in de toekomst te voorkomen.
- Bij de bestrijding van broei moet rekening worden gehouden met de verschillen tussen microbiologische broei en chemische broei. Zo blijkt in het beginstadium van de broei (biologische broei) een geringe verhoging van het luchtdebiet een verhoging van de temperatuur te veroorzaken.
- Het is mogelijk dat er in een silo, lokaal geen zuurstof meer is. Het gevaar bestaat dan dat er zich anaërobe processen gaan voordoen, waarbij methaangas vrijkomt. Dit zeer brandbare gas leidt bij buitenopslagen zoals stortplaatsen vaak tot brandjes. Tijdens de proeven met de broeireactor, werd voldoende zuurstof toegevoegd, zodat er aërobe omstandigheden waren en er dus geen methaangas gedetecteerd werd. Het is dan ook interessant om experimenten uit te voeren met een ondermaat aan zuurstof, waarbij in de broeireactor kunstmatig vonken worden toegevoegd. Om te kijken onder welke omstandigheden de verschillende biomassastromen vlam vatten cq gaan smeulen.

12 LITERATUURLIJST

- Afval Overleg Orgaan., 2002. *Milieueffectrapport Landelijk Afvalbeheerplan*.
- Afvalzorg., 1999 (Vermeulen, J.W.). *Opslag en droging van houtchips, Onderzoek uitgevoerd door Afvalzorg met financiële ondersteuning van het programma Energiewinning uit afval en biomassa (EWAB), mei 1999*.
- Arbeidsinspectie directie major hazard control Provincie Limburg., 2003. *Rapport van bevindingen ongeval 1 april 2003 DSM-Melaminefabriek Geleen*.
- Arcken, A.J.F. van., 1999. *Apparaten en explosiebeveiligingen volgens de ATEX-richtlijn*.
- Beck, H and Jeske, A., 1982. *Dokumentation staubexplosionen. Analyse und einzelfalldarstellung*, BIA-report Nr. 4/82.
- Bowes, P.C., 1984. *Self-heating: evaluating and controlling the hazards*. Elsevier, Amsterdam.
- BRZO., 1999. Staatsblad 1999 nr 234.
- Bureau of mines., 1977. *Laboratory studies on spontaneous combustion of Canadian coals*.
- Directoraat-Generaal Milieubeheer., 2002. *Circulaire: emissiebeleid voor energiewinning uit biomassa en afval*, Den Haag.
- Fierro, V., Miranda, J.L., Romero, C., Andres, J.M., Arriaga, A. and Schmall, D., 2001. *Model predictions and experimental results on self-heating prevention of stockpiled coals*. Fuel 80.
- Gedeputeerde Staten van Limburg., 2002. *Ontwerpbesluit van 2001/56337 Maastricht*.
- Gigler, J.K., Curvers, A. en Annevelink, E., 1996. *Input and output characteristics of biomass pretreatment techniques*. IMAG-DLO, rapportnr P 96-23.
- Gislerud, O., 1999. *Drying and storing of comminuted wood fuels*. Biomass 22, pp. 229-244.
- GIT., 1984. *The Industrial Wood Energy Handbook*. Atalanta, Technology Applications Library ISBN: 0-442-22085-5.
- Helsloot, I., 1999. *Jaarboek onderzoek 1999: evaluatie silobrand Doetinchem*.
- IEA., 1999 (Walker, S.). *Uncontrolled fires in coal and coal wastes*. IEA Coal Research, ISBN nr. 92-9029-324-1.
- Jirjis, R., 1995. *Storage and drying of wood fuel*. Biomass and Bioenergy, Vol. 9, Nos 1-5, pp. 181-190.
- KEMA., 1988 (Kok, A.). *Broei- en opslagverlies van steenkool - overzichtsrapport*. KEMA rapport nr. 20649-SBA-38.
- KEMA., 1998 (Havinga, H., Verhoef, R.O.J.). *Inventarisatie van biomassa- en afvalstromen*, KEMA rapport nr. 95163-KPG/TCT 98-1004.
- KEMA., 2000 (Hendriks, N.J.B. en Veen, M.L. van der). *Handboek "Arbo-aspecten bij het gebruiken van biomassa voor energie-opwekking"*, KEMA rapport nr. 560485-KPS/MEC 00-3037.
- KEMA., 2001 (Gast, C.H., Vehoef, R.O.J.). *Broei bij de opslag van biomassa*. KEMA rapport nr.50131116-KPS/TPE 01-1088.
- KEMA., 2001a (Raas, J.L., Voorde, A.C. van de, Weits, R.). *Inventarisatie veiligheids- en gezondheidsaspecten biomassaconversie-installaties middels een HAZOP*. KEMA rapport nr. 50030204-KPS/TPE 00-1104.
- KEMA., 2003 (Gast, C.H., Weijers, H.M.). *Broei bij biomassa: onderzoek in de KEMA-broeireactor*. KEMA rapport nr. 50180306-KPS/TPE 03-1004.
- Kipping, J.E., Schneider, M.H., 1988. *Moisture changes in particulate wood fuels during storing and drying*. Production, storage and utilisation of wood fuels. IEA/BE conference Task III/Activity 6 and 7 on Production, storage and utilisation of wood fuels, Uppsala (Sweden), 6-7 December 1988.
- Kohl,D., Kelleter, J., and Petig, H., 1999. *Detection of fires by gas sensors*. In Sensors Update pp 161-223.

- Kuchta, J.M., 1981. *Preliminary report on guidelines for protection systems in coal mine storage silos*, PRC report No. 4323.
- Lindeman J., 2004. *Vergunningenproblematiek*, Dialoog, maart 2004.
- Ministerie van Economische Zaken., 2003. *Actieplan biomassa: "samen werken aan bio-energie"*.
- Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid., 2000. *AVRIM-2 beoordelings- en inspectiemethodiek*, Handboek versie 2000, Den Haag.
- Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid., 2003. *NIVRIM: inspectie-instrument Arbeidsinspectie (checklist) voor de beoordeling van een veiligheidsbeheersysteem (VBS)*.
- Mol, R.M. de, Erbrink, J.J., Annevelink, E., Wildenberg, C.J.M., en Verhoeven, F.M.P., 1999. *Biologo: een optimalisatiemodel voor de keten van biomassa naar energie*. In: Conferentieboek Nederlandse Duurzame Energie Conferentie 1999, Noordwijkerhout, pp 202-203, 25-26 November 1999.
- Nabert, K and Schön, G., 1963. *Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe*, Deutscher Eichverlag.
- NEN 2001. *Classificatie van biomassa voor energietoepassing*, Nederlandse Technische Afspraak 8003, Normcommissie 310029 "vaste biobrandstoffen".
- NOVEM., 1999. *Arbo-aspecten van energiewinning uit afval en biomassa: een literatuurstudie*, rapport nr. 9839. Onderzoek uitgevoerd door KEMA in het kader van het programma Energiewinning uit afval en biomassa (EWAB), Arnhem.
- NOVEM., 1999a. *Arbo-aspecten van energiewinning uit afval en biomassa*. Rapport nr. 9921. Onderzoek uitgevoerd door KEMA in het kader van het programma Energiewinning uit afval en biomassa (EWAB), Arnhem.
- NOVEM., 2002. *Energie uit het landelijk gebied: het gebruik van agrarische reststromen voor duurzame energieopwekking.*
- Novem., 2003. *Informatiebron arbo-aspecten bij het gebruik van biomassa voor energie-opwekking – normen en richtlijnen.*
- Ohm, A., 1972. *Broei- en droogprocessen in hooi*. Proefschrift TU Delft, februari 1972.
- Peters, S., 2003. *Modelleren van broei bij biomassa*, afstudeerverslag Hogeschool Brabant, Arnhem.
- Philips, D., 1981. *factory inspectorate viewpoint*, Paper presented at the symposium "The recognition and reduction of ignition hazards in the chemical industry", Londen.
- Raats, M., Kuypers, H., Kwant, K., Ploumen, P en Pfeiffer, E., 2003. *Advies differentiatie binnen de MEP-categorie "Zuivere biomassa"*, april 2003.
- Schoeff, R.w., 1992. *Statistical information of the frequency of dust explosions in several types of industry in the USA*, Paper presented at the first world seminar on the explosion phenomenon of explosion protection techniques in practice, Brussel.
- Scholz, V. en Idler, C., Loss., 2000. *Reduced and human hygienic storage of field wood chips*. 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla., pp. 536-539.
- Scott Fogler, H en Gurmen, N.M., 2002. *Aspen Plus Workshop for Reaction Engineering and Design*, The University of Michigan.
- SDU., 2000. *Arbo-informatie; A1-9, biologische agentia*. Uitgave SDU Uitgevers, onder auspiciën van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.
- SER., 2000. *Persbericht subcommissie adviseert over wettelijk blootstellingnorm endotoxinen*.
- Thörnqvist, T., 1985. *Drying and storage of forest residues for energy production*. Biomass 7, 1985, pp. 125-134.
- Timko, R., and Lincoln Derick, R., 1995. *Detection and control of spontaneous heating in coal mine pillars: a case study*, VS.
- United nations., 1999. *Recommendations on the transport of dangerous goods: Manual of tests and criteria*, New York en Geneva.

- U.S. Dept. of Energy., 1994. *Primer on spontaneous heating and pyrophoricity*, Washington.
- Verhoeff, J., 1983. *Experimental study of the thermal explosion of liquids*, Proefschrift TU Delft.
- Wiemann, W. and Scholl, E.W., 1984. *Staub*, 45.
- Wilén, C., Rautalin, A., 1993. *Handling and feeding of biomass to pressurised reactors: safety engineering*. Bioresource Technology 46, pp. 77-85.
- Wilén, C., Rautalin, A., 1995. *Spontaneous ignition of coal in pressurised lock-hoppers – safety aspects*. Coal utilisation and fuel systems: Proceedings. 20th International technical conference on coal utilisation and fuel systems, Clearwater, Fl. (United States), 20-23 Mar 1995.
- Zabetakis, M.G., 1965. *Flammability characteristics of combustible gases and vapors*, Bureau of mines bulletin 627.

Geraadpleegde websites:

www.biodiv.nl/gps/

www.cgi.milieucentraal.nl

www.europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo

www.forester.net/mw_0109_vancouver.html

www.gemex.nl

www.gps-garmin.nl

www.nu.nl

www.safetynet.de

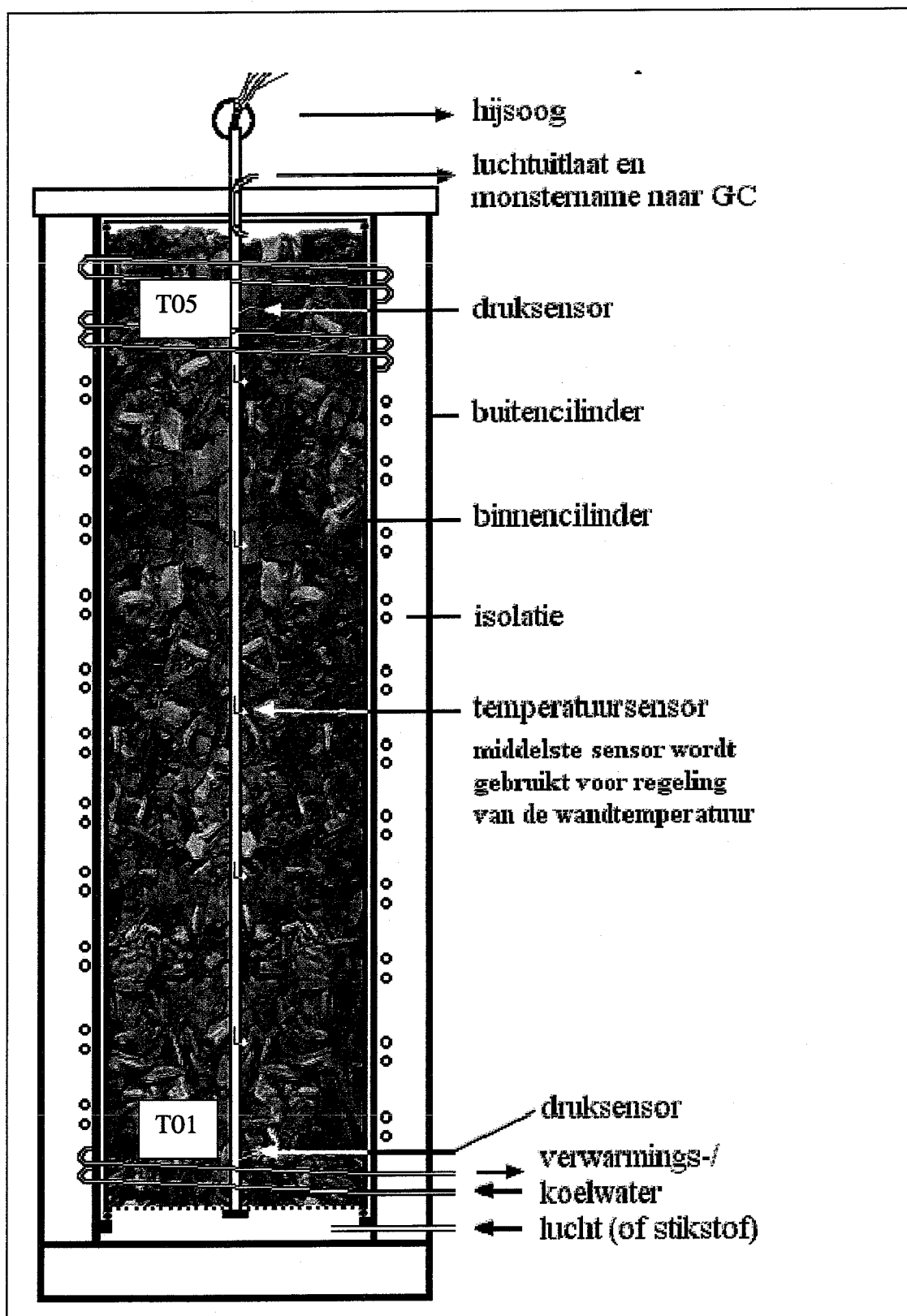
www.vdi.de

www.vego.nl/7/7_049.html

www.wired.com

BIJLAGE A: DE BROEIREACTOR

De adiabatische broeireactor die door KEMA wordt gebruikt is ontworpen volgens de beschrijving van een reactor in een proefschrift van de TU Delft uit 1972 [Ohm, 1972].



Figuur A1: schematische opstelling van de adiabatische reactor [Ohm, 1972]

De reactor is cilindervormig met een diameter van circa 0,5 m en een hoogte van circa 2 m. De reactor heeft een binnen- en een buitencilinder. In de binnencilinder bevindt zich de biomassa en in de buitencilinder zijn isolatiemateriaal en een verwarmingsspiraal aangebracht. De biomassa wordt doorstroomd met lucht die aan de onderzijde van de reactor wordt toegevoerd. Aan de onderzijde van de binnencilinder is een geperforeerde plaat aangebracht zodat de biomassa kan worden doorstroomd met (bevochtigde) lucht (of eventueel stikstof). In het centrum van de binnencilinder is een staaf aangebracht waarin meetsensoren voor temperatuur en druk zijn bevestigd. Aan de bovenzijde is de binnencilinder afgesloten met een deksel. De toegevoerde lucht verlaat de reactor via een ontluchtingspijpje dat is aangebracht in de centrale buis met meetsensoren. Op de bovenzijde van de buitencilinder is een deksel met isolatiemateriaal geplaatst.

De temperatuur in de binnencilinder wordt op vijf hoogtes gemeten. Om verlies van warmte aan de omgeving te voorkomen, wordt de buitencilinder op dezelfde temperatuur gehouden als de binnencilinder door middel van een verwarmingsspiraal. Door deze spiraal wordt water geleid waarvan de temperatuur gelijk wordt gehouden aan de binnentemperatuur met behulp van een thermostaatbad waarvan het setpoint wordt geregeld door de gemeten binnentemperatuur en wel de temperatuur gemeten door de middelste van de 5 thermokoppels. Bij latere experimenten is de temperatuur van het thermostaatbad gelijk gesteld aan de hoogste temperatuur van de koppels om afkoeling te voorkomen.

De temperatuur en de drukval worden automatisch geregistreerd. Tevens wordt een on-line gasanalyse uitgevoerd via een gaschromatograaf. Hiermee worden de concentraties aan O₂, CO₂, N₂, CO en CH₄ doorlopend bepaald. De luchtafvoerleiding aan de bovenkant van de reactor en de aftakking daarvan naar de GC zijn verwarmd om condensatie van water in de leidingen en ophoping van condensatievocht in de middenbuis met meetsondes te voorkomen.

De lucht die door de biomassa wordt geleid wordt bevochtigd (vochtgehalte is iets lager dan de verzadigingsconcentratie) om uitdroging van de biomassa te voorkomen. De luchtflow is laag omdat de doorvoer van lucht alleen is bedoeld om zeker te zijn van voldoende aanbod van zuurstof en niet om de biomassa te drogen.

De opstelling wordt in continu bedrijf bedreven, daarom is een beveiliging opgenomen om te voorkomen dat de temperatuur te hoog oploopt. Indien de temperatuur stijgt boven het setpoint voor de maximale temperatuur (momenteel ingesteld op 100°C) wordt automatisch van lucht overgeschakeld op stikstof.

BIJLAGE B: BESCHRIJVING VAN HET SIMULATIEPROGRAMMA ASPEN PLUS

In hoofdstuk 8 is reeds een kort overzicht gegeven van Aspen Plus. In het onderstaande komen verschillende aspecten van het simulatieprogramma aan bod.

Met het pakket kunnen o.a. de onderstaande gegevens worden ingevoerd:

- *Thermodynamische evenwichtsberekeningen*

Dit pakket bevat uitgebreide mogelijkheden om met onder andere vaste stoffen te rekenen. Verder bevat het pakket een groot aantal systeem opties. Systeemopties zijn een aantal vergelijkingen die gebruikt worden bij het berekenen van de thermodynamische- en materiaaleigenschappen van componenten zoals enthalpie, entropie, viscositeit, warmtegeleiding en diffusiecoëfficiënt. Ieder optie set bevat een specifieke vergelijking waarmee eigenschappen van de component kunnen worden berekend.

De parameters (data) die wordt gebruikt bij het berekenen van de fysische eigenschappen van de componenten worden uit een aantal databanken gehaald. Aspen maakt onderscheid tussen twee typen parameters: de pure component en de Binary parameters. De pure component parameters bevat informatie over de component afzonderlijk met de andere componenten aanwezig in het systeem zoals, molecuul massa en dergelijke. De binary parameters bevatten informatie omtrent de interactie tussen de aanwezige componenten in het systeem. Een goede keuze van systeem optie bepaald grotendeels de nauwkeurigheid van de resultaten van de simulatie.

- *Stroomstructuur*

Massastromen kunnen in Aspen Plus uit meerdere substromen bestaan. Enkele zijn; MIXED, MIXCISOLID, MIXCIPSD, NC enz. De substromen toegepast bij de broeimodellering zijn; mixed en CISOLID. De substroom van het type MIXED kan een gasfase, meerdere vloeistoffasen en vaste stoffen bevatten welke in thermodynamisch evenwicht zijn. Het vochtgehalte van biomassa en de invoer van lucht worden dan ook met de substroom MIXED gedefinieerd.

De substroom van het type CISOLID (chemical inert Solid) en NC(Nonconventioneel) bevatten vaste stoffen welke niet in thermodynamisch evenwicht zijn met de MIXED substroom. Substromen van het type NC worden meestal gebruikt voor niet conventionele stoffen zoals steenkool, houtpulp, en dergelijke. De biomassa (dextrose) wordt dan ook met de substroom CISOLID gedefinieerd. Ook bestaat de mogelijkheid om de NC substroom een particle size distribution(deeltjes grootteverdeling) te geven. Bij het modelleren van broei is gebruikt gemaakt van de sub-stromen Cisolid en mixed.

- *Eenheidsoperaties*

Aspen Plus beschikt over een grote verscheidenheid aan modellen voor de simulatie van processen in de (petro)chemisch industrie. Enkele voorbeelden zijn: reactoren, destillatie kolommen, mixers, warmtewisselaars, pompen en dergelijke. Sommige modellen bevatten ingewikkelde algoritmen voor de beschrijving van de optredende processen.

- *Databanken*

Aspen Plus bevat een aantal databanken waar parameters zoals molecuul, massa en dichtheid enz. van componenten die nodig zijn voor berekeningen instaan. Bij het modelleren van broei is gebruik gemaakt van de Pure 10 databank. Deze databank bevat eigenschappen voor een groot aantal vaste stoffen. Eigenschappen voor componenten kunnen ook ingevoerd worden via de Properties paragraaf, hierbij zullen de oorspronkelijke waardes in de databank overschreven worden.

Fortran Subroutine

In Fortran Param wordt de hoeveelheid hout [kg/h], aantal reactoren [-], de verblijftijd van de lucht in 1 reactor [h] en het vochtgehalte van het hout [-] ingevuld. In de stream AIR wordt de hoeveelheid lucht die aan de bioreactor wordt toegevoegd ingevuld. Met de Fortran Param wordt in eerste instantie het hout gelijkmatig verdeeld over de reactoren met hetzelfde vochtgehalte.

In Fortran C-results worden de uitgaande temperaturen van de lucht per reactor op het scherm geprint. Er vindt 100* een directe substitutie plaats, waarbij de biomassa uit weer terug wordt gevoerd naar dezelfde reactor. Aan het eind van de run zal er dus een foutmelding komen, omdat de massabalans niet klopt. Deze wordt dan ook genegeerd.

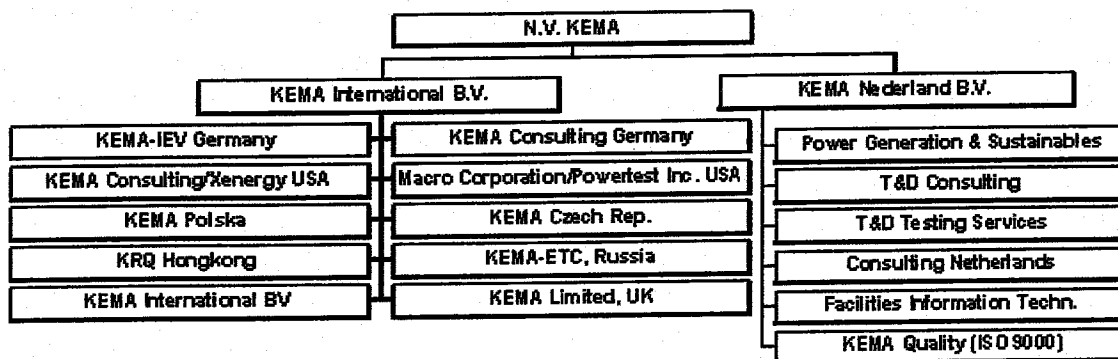
Om de RBATCH met de user-reactie te laten convergeren, moet het volume precies kloppen. Vandaar dat er eerst N2 eruit wordt gehaald blokken S1-4 en met een design-spec in de hierarchy blocks weer wordt toegevoegd. In de convergentieparagraaf zijn de 4 designspec opgenomen en een blok waarin alle zgn. tearstreams zijn vermeld.

BIJLAGE C: BEDRIJFSPROFIEL KEMA POWER GENERATION & SUSTAINABLES

Voorheen was KEMA een gerenommeerd kennis- en onderzoeksinstituut, in 1927 opgericht door de elektriciteitsbedrijven die destijds behoefte hadden aan een instituut dat materialen en componenten voor de elektriciteitsvoorziening zou testen, keuren en standaardiseren. Sinds 1988 is KEMA een onafhankelijke, marktgerichte organisatie.

KEMA is een onafhankelijke dienstverlener en werkt met circa 1600 professionals wereldwijd voor opdrachtgevers die betrokken zijn bij de (elektrische) energievoorziening en de gebruikers daarvan. De twee kernactiviteiten van KEMA zijn consultancy en testen/keuren/certificeren. KEMA levert procesverbeterende en rendementverhogende technologische adviezen en oplossingen die worden ondersteund door R&D-activiteiten. KEMA is actief in de hele cyclus van elektriciteit, namelijk opwekking, transport en distributie, en het gebruik ervan. ICT-consultancy speelt hierin een belangrijke rol. KEMA heeft in 13 landen vertegenwoordigingen, met de nadruk op Europa en Noord-Amerika.

Het hoofdkantoor van KEMA, waar 1100 mensen werken, staat op BusinessPark Arnhem. Bij KEMA's internationale vestigingen in onder andere de Verenigde Staten, Duitsland, Tsjechië, Polen, Hongarije, Hong Kong en Australië werken 500 medewerkers (zie onderstaand figuur C1).



Figuur C1: overzicht vestigingen KEMA

KEMA Power Generation & Sustainables (KPS) is één van de zeven Nederlandse werkmaatschappijen. KPS is in 1999 ontstaan door het samenvoegen van de twee business units KEMA Sustainable Technology en KEMA Power Generation. Hiermee ontstond een werkmaatschappij die haar dienstverlening volledig concentreert op alle aspecten van de energieproductie.

KEMA Power Generation & Sustainables voert opdrachten uit in meer dan 25 landen over de hele wereld, samen goed voor 25 procent van de omzet. De gedegen kennis en het hoge niveau worden mede bereikt door deelname in een scala van onderzoeksprojecten. Onderzoek dat door KPS wordt uitgevoerd is goed voor 20 procent van de omzet. De resterende 55 procent wordt gerealiseerd in Nederland bij elektriciteitsbedrijven, afvalverwerkingsbedrijven, energie-intensieve industrie en de diverse overheden.

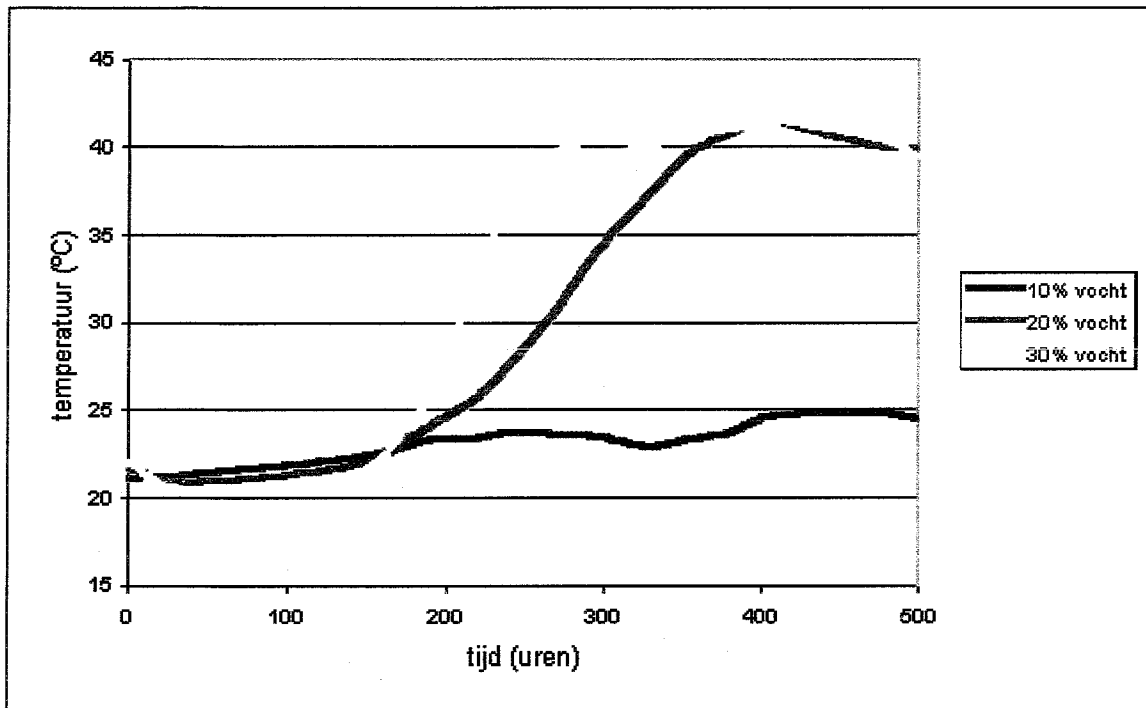
De business unit KEMA Power Generation & Sustainables (KPS) - één van de 6 Nederlandse business units - geeft adviezen met betrekking tot de opwekking van (elektrische) energie, zowel fossiel als duurzaam. Bij KPS werken circa 210 medewerkers: consultants, projectmanagers, engineers en (administratief) ondersteunend personeel. De dienstverlening van KPS richt zich met name op elektriciteitsproductiebedrijven, afvalverwerkers, energie-intensieve industrie, investeerders, banken en overheden die hierin actief zijn.

De belangrijkste diensten van KPS zijn:

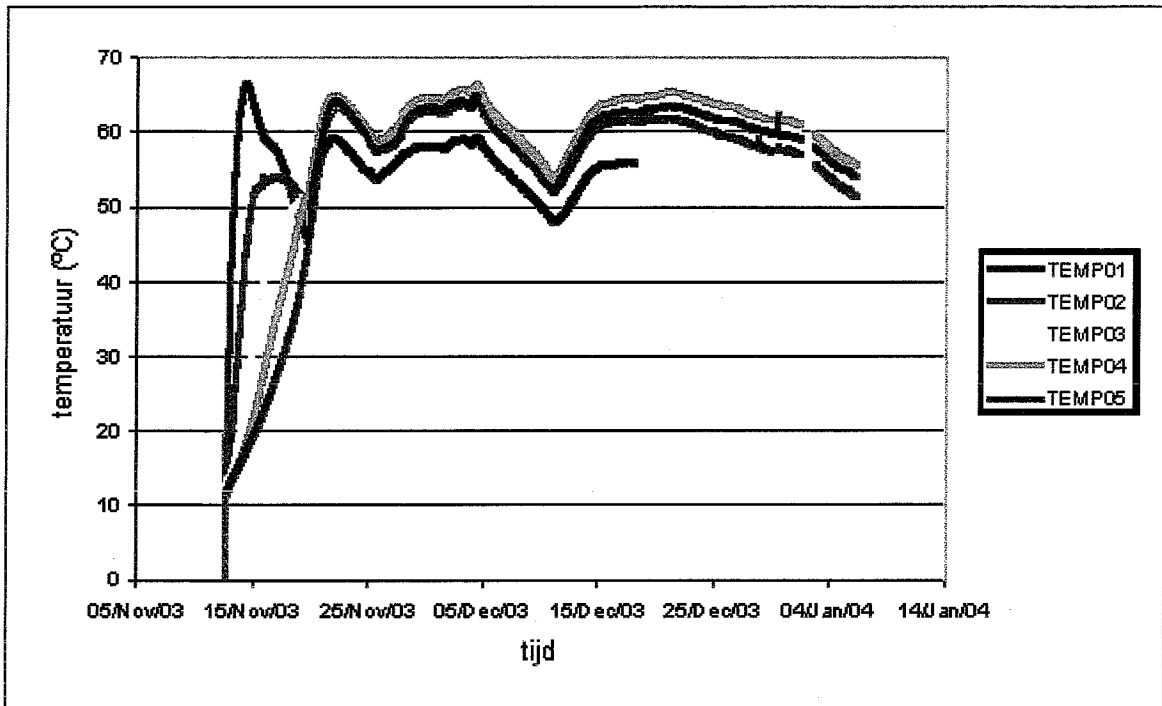
- Owners en independent engineer
- Advisering voor ombouw en levensduurverlenging
- Bedrijfsvoeringsondersteuning
- Advisering voor windenergie en duurzame energiebronnen

KEMA is al jaren actief betrokken bij de ontwikkeling en uitvoering van bio-energie- en bijstookprojecten. Hierdoor is KEMA dan ook in staat alle mogelijkheden duidelijk op 'n rijtje te zetten en klanten te adviseren over de te volgen route: vanaf het allereerste idee naar de vergunningsfase, de milieueffectrapportage, technische en economische haalbaarheid, ontwerp, realisatie en implementatie van de bio-energie-installatie. Bovendien biedt KEMA ondersteuning in operationele zaken en op het gebied van onderhoud en bij de eindoplevering van de installatie. Hierbij ondersteunt KEMA alle partijen die rechtstreeks betrokken zijn bij bio-energie en bijstoken, van beleidsmakers en overheidsinstanties tot eigenaren van centrales en industriële organisaties.

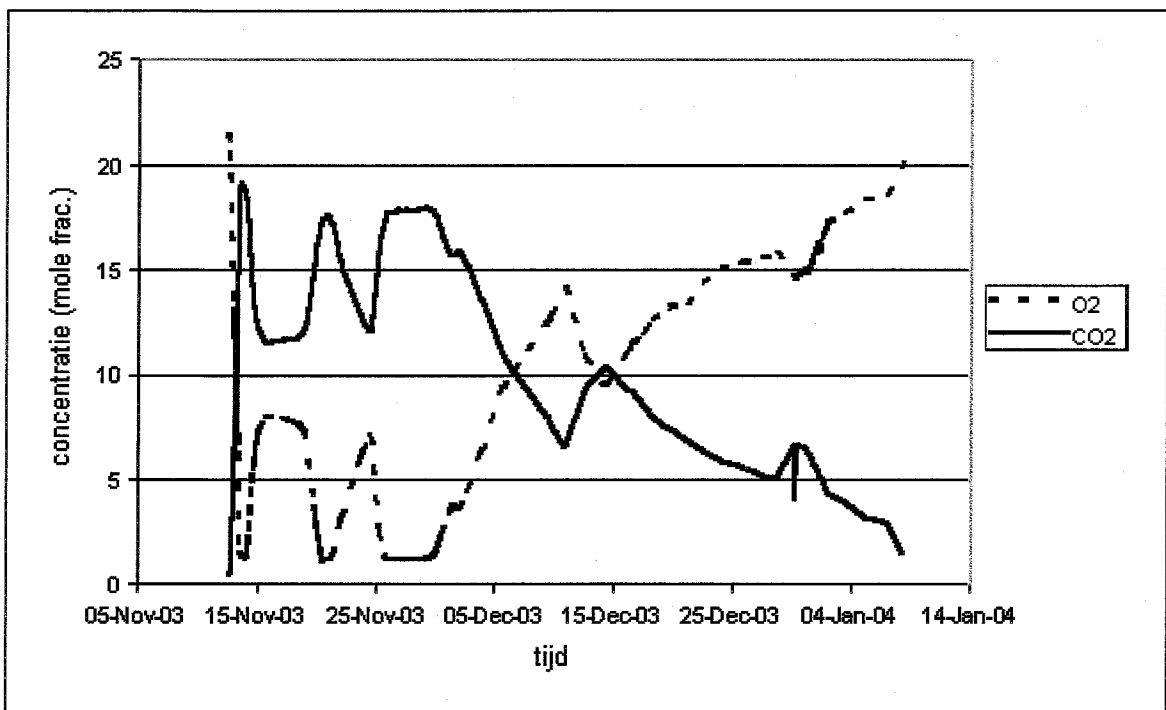
BIJLAGE D: OVERZICHT GRAFIEKEN EXPERIMENTEN



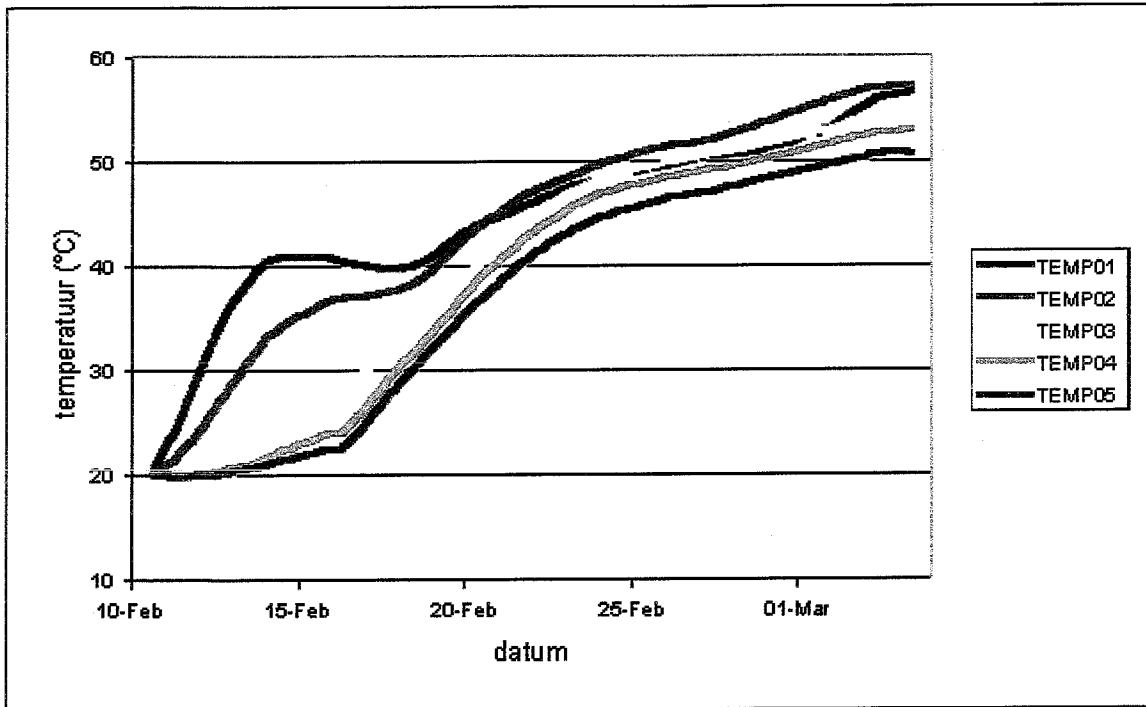
Figuur D1: temperatuurprofiel diermeel in kleine vaatjes



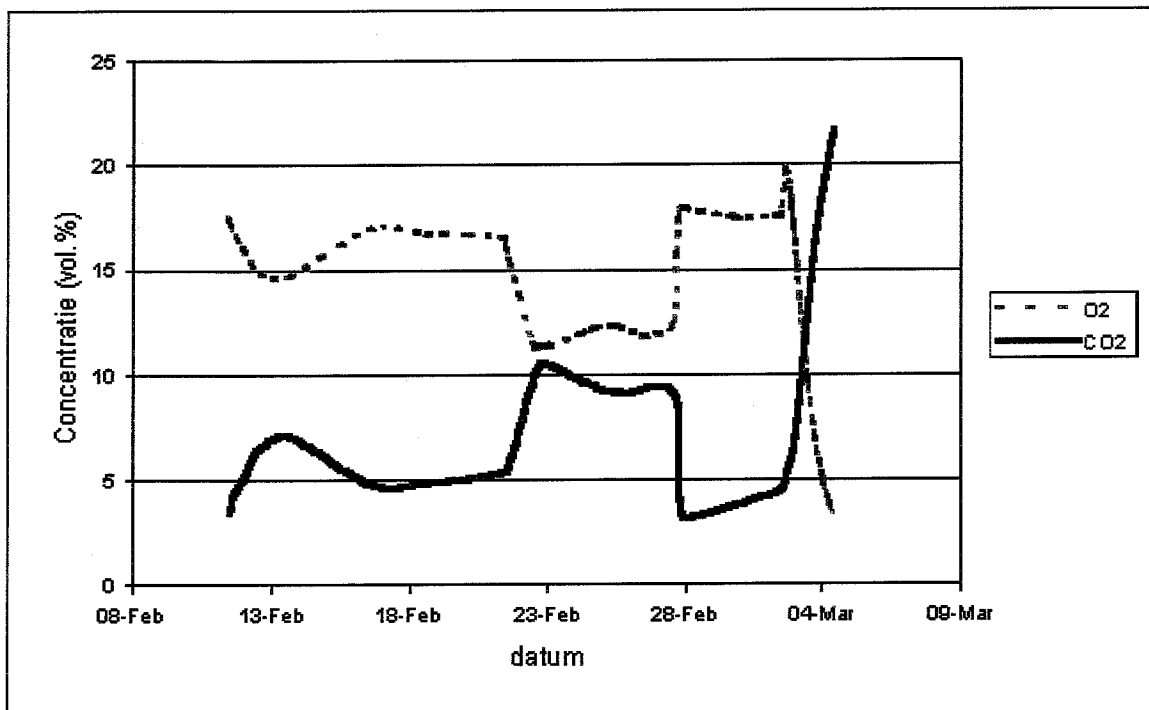
Figuur D2: temperatuurprofiel biomassa pellets (experiment B)



Figuur D3: O₂ / CO₂-profiel biomassa pellets (experiment B)



Figuur D4: temperatuurprofiel houtpellets (experiment D)



Figuur D5: O₂ / CO₂-profiel houtpellets (experiment D)

BIJLAGE E: OVERZICHT SIMULEREN

Overzicht experimenten:

- Experiment 1:

Homogene vulling met een vochtgehalte van 45%, luchtflow is 4.25 l/min.

- Experiment 2:

Vochtgehalte batch 1 =45% en batch 2-4 =5%.

2A: luchtflow is 1.0 l/min

2B: luchtflow is 2.5 l/min

2C: luchtflow is 4.25 l/min

2D: luchtflow is 7.5 l/min

2E: luchtflow is 10.0 l/min

2F: luchtflow is 4.25 l/min na 100 uur verhoogd naar 10.0 l/min.

2G: luchtflow is 4.25 l/min na 100 uur verlaagd naar 1.0 l/min.

- Experiment 3:

Vochtgehalte batch 1 =45% en batch 2-4 =25%.

3A: luchtflow is 1.0 l/min

3B: luchtflow is 2.5 l/min

3C: luchtflow is 4.25 l/min

3D: luchtflow is 7.5 l/min

3E: luchtflow is 10.0 l/min

3F: luchtflow is 4.25 l/min na 100 uur verhoogd naar 10.0 l/min.

3G: luchtflow is 4.25 l/min na 100 uur verlaagd naar 1.0 l/min.

- Experiment 4:

Vochtgehalte batch 1 =45% en batch 2-4 =25%, luchtflow is 4.25 l/min.

4A: T = 5°C

4B: T = 10°C

4C: T = 15°C

4D: T = 25°C

4E: T = 35°C

4F: T = 50°C

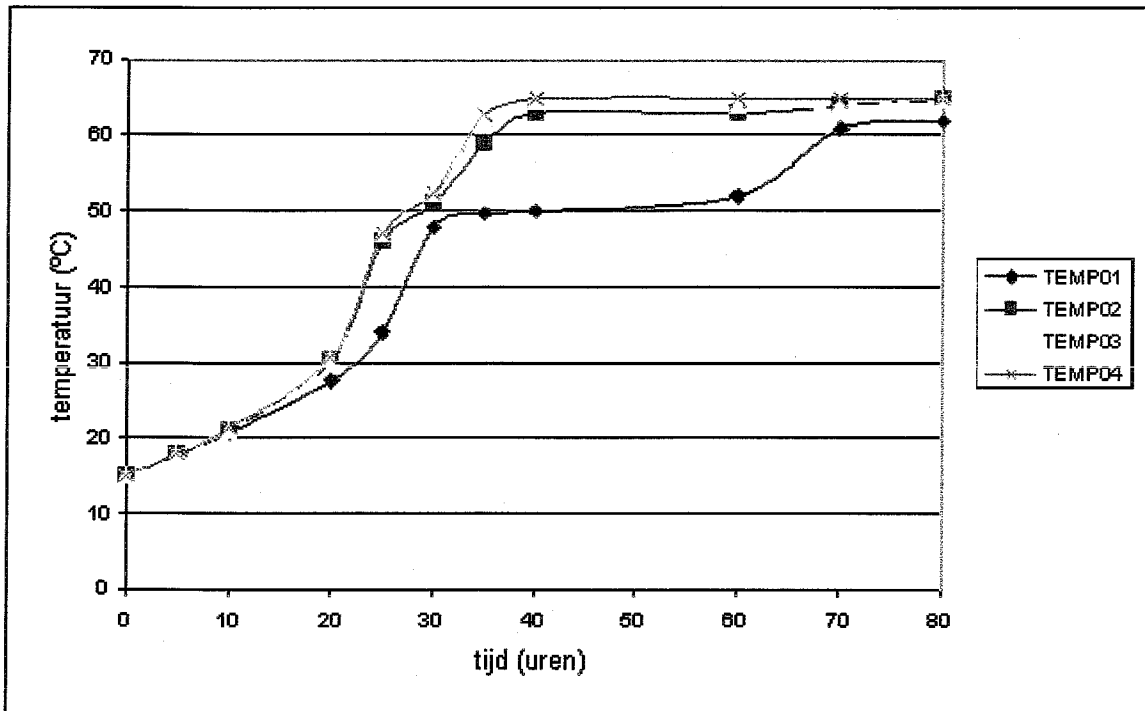
- Experiment 5:

5A: vochtgehalte batch 1 =25% en batch 2-4 =12.5%, luchtflow is 4.25 l/min, T =20°C

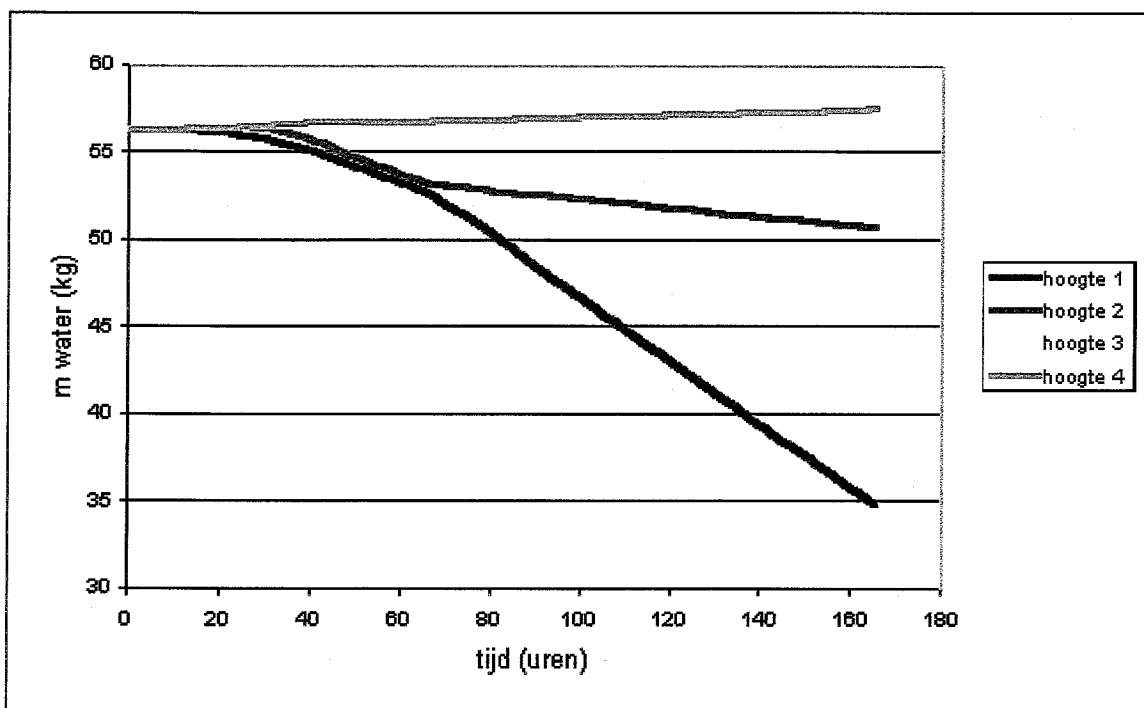
5B: vochtgehalte batch 1 =25% en batch 2-4 =12.5%, luchtflow is 4.25 l/min, T =15°C

5C: vochtgehalte batch 1 =25% en batch 2-4 = 8%, luchtflow is 4.25 l/min, T =20°C

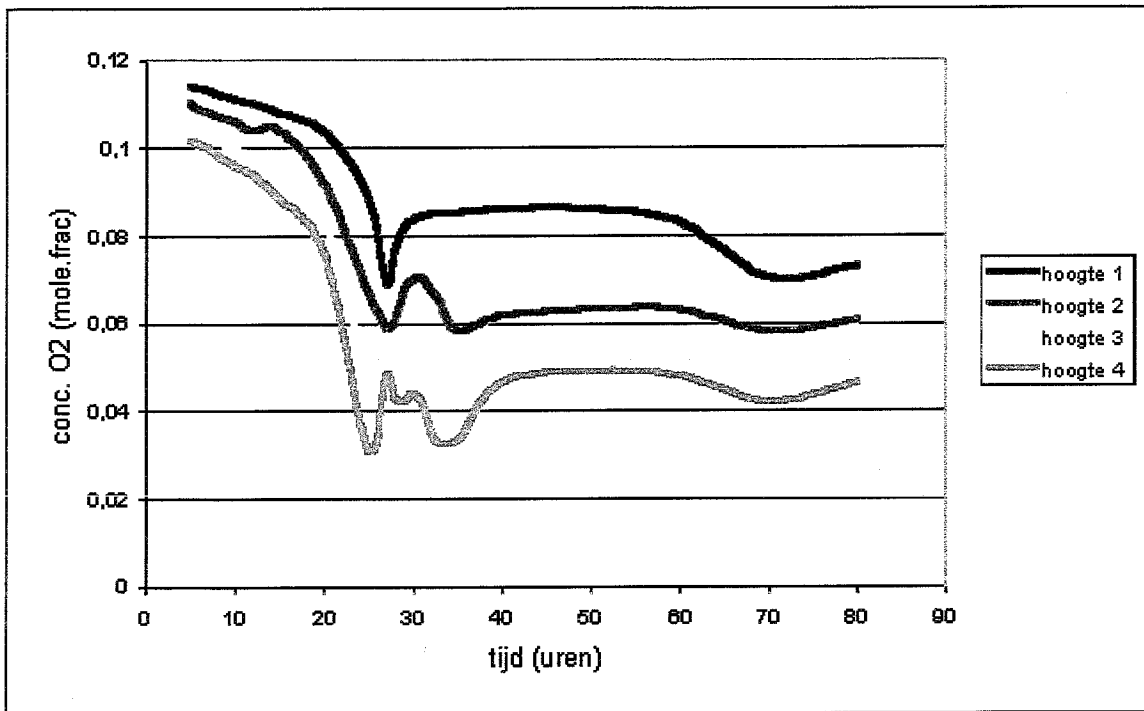
Overzicht grafieken:



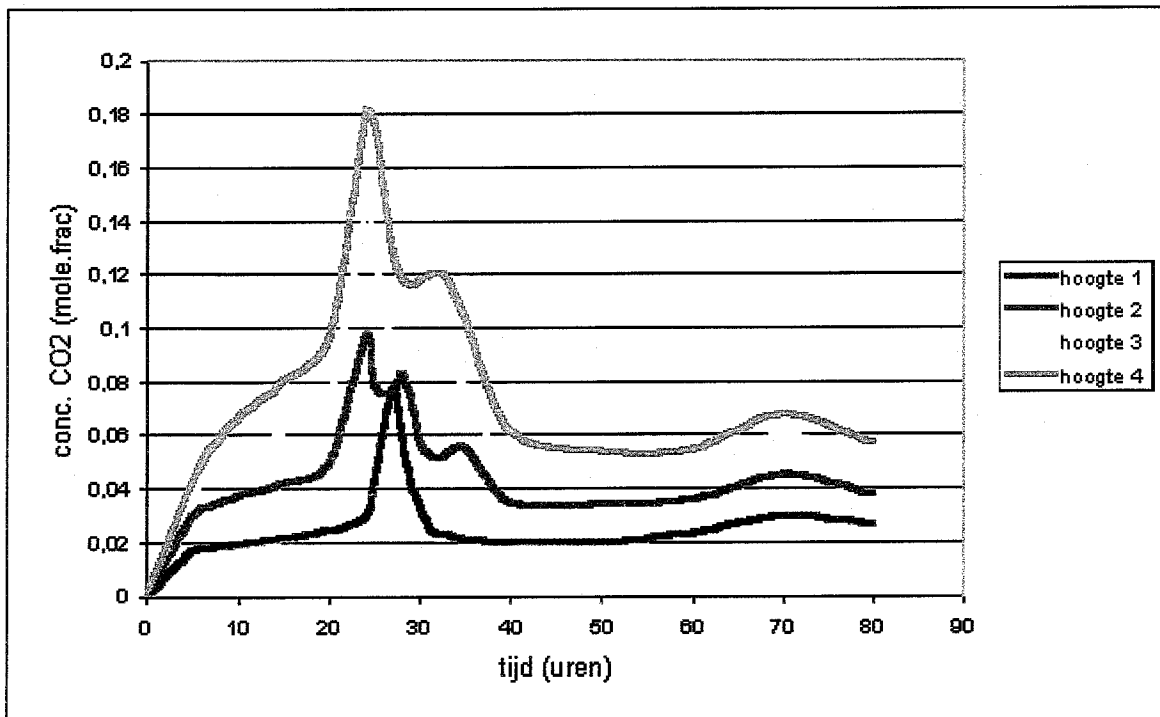
Figuur E1: tempverloop homogene vulling (45% vochtigheid)



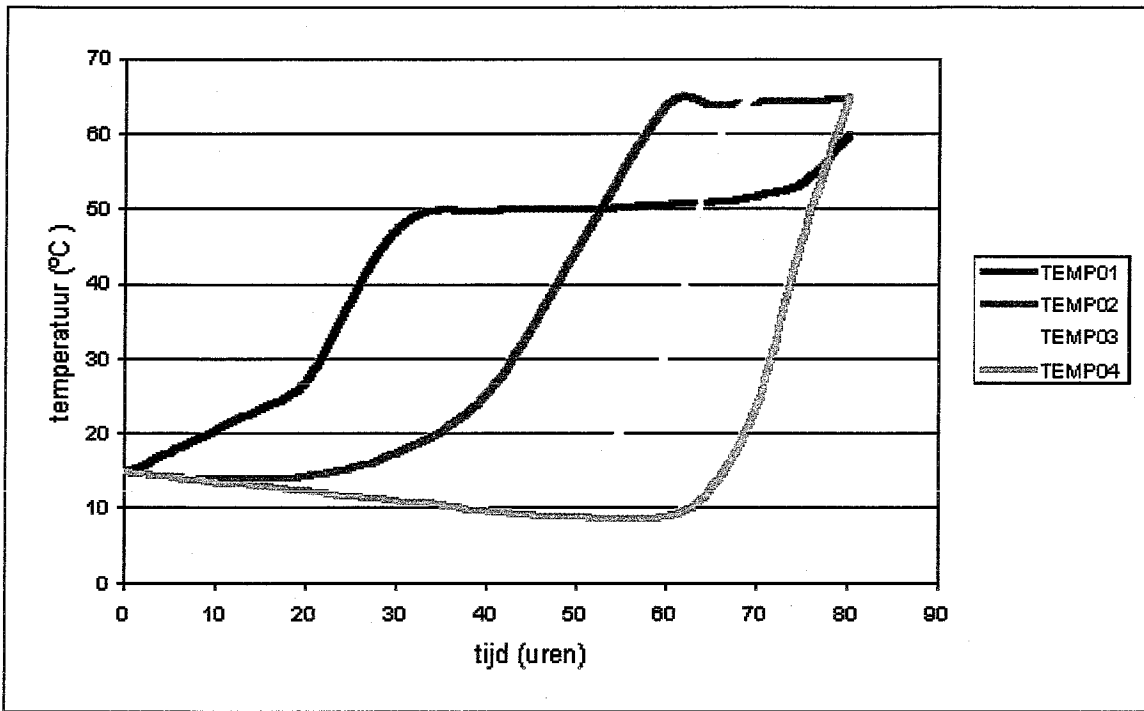
Figuur E2: gehalte aan water op de verschillende hoogtes bij de homogene vulling



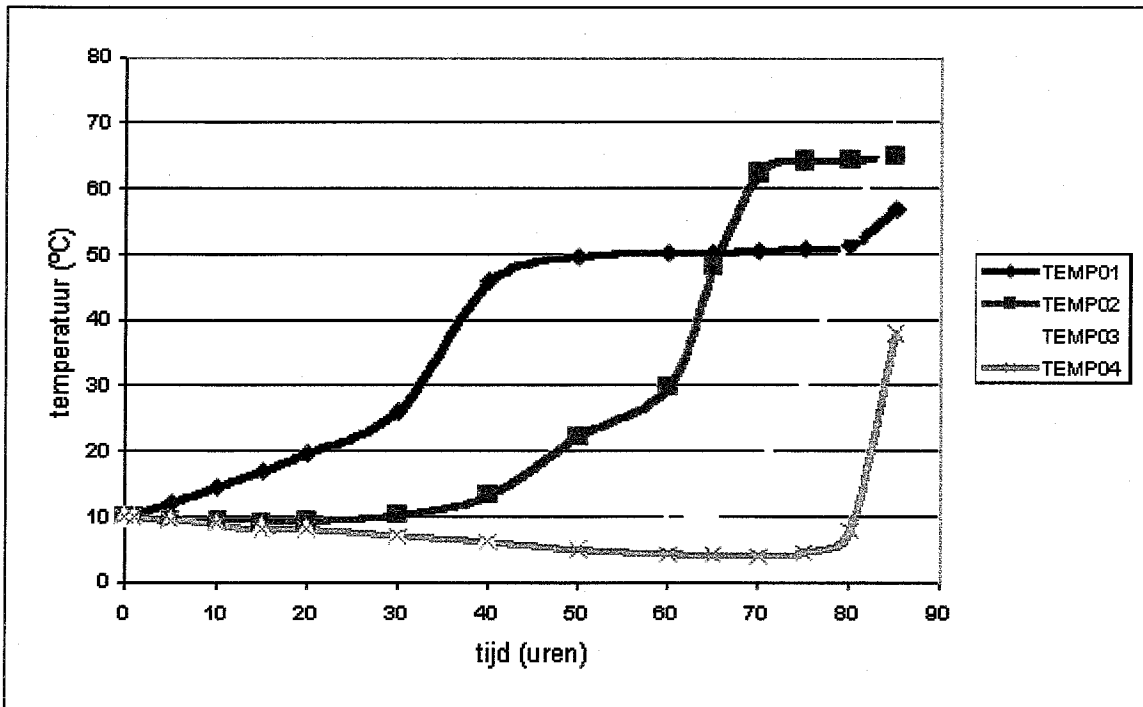
Figuur E3: gehalte aan zuurstof op de verschillende hoogtes bij de homogene vulling



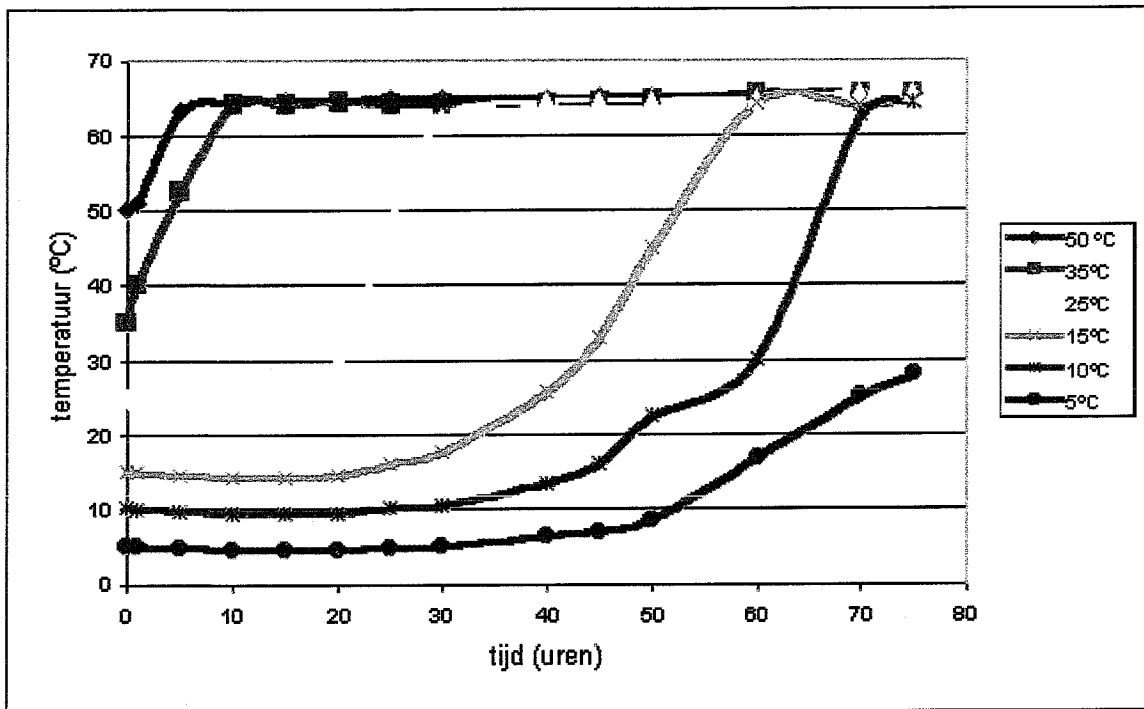
Figuur E4: gehalte aan koolzuur op de verschillende hoogtes bij de homogene vulling



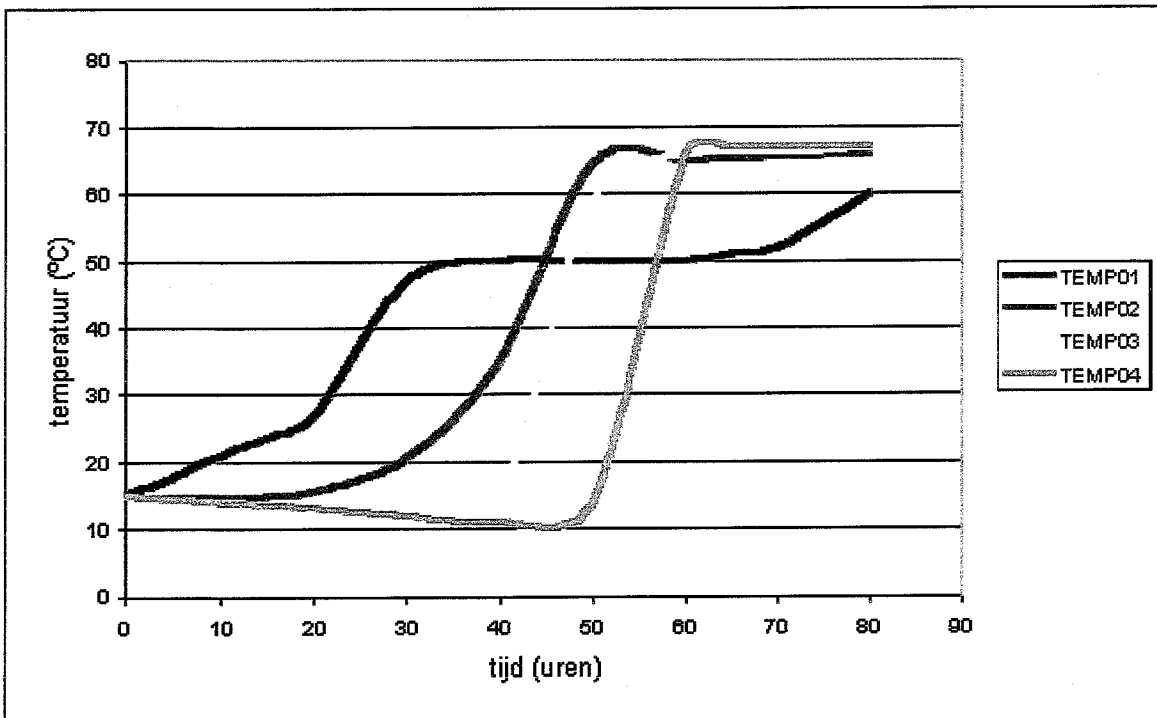
Figuur E5: temperatuurverloop van de verschillende hoogtes bij een vulling van 45% (laag 1) en 25% (laag 2-4) vocht, bij een ingangstemperatuur van 15°C.



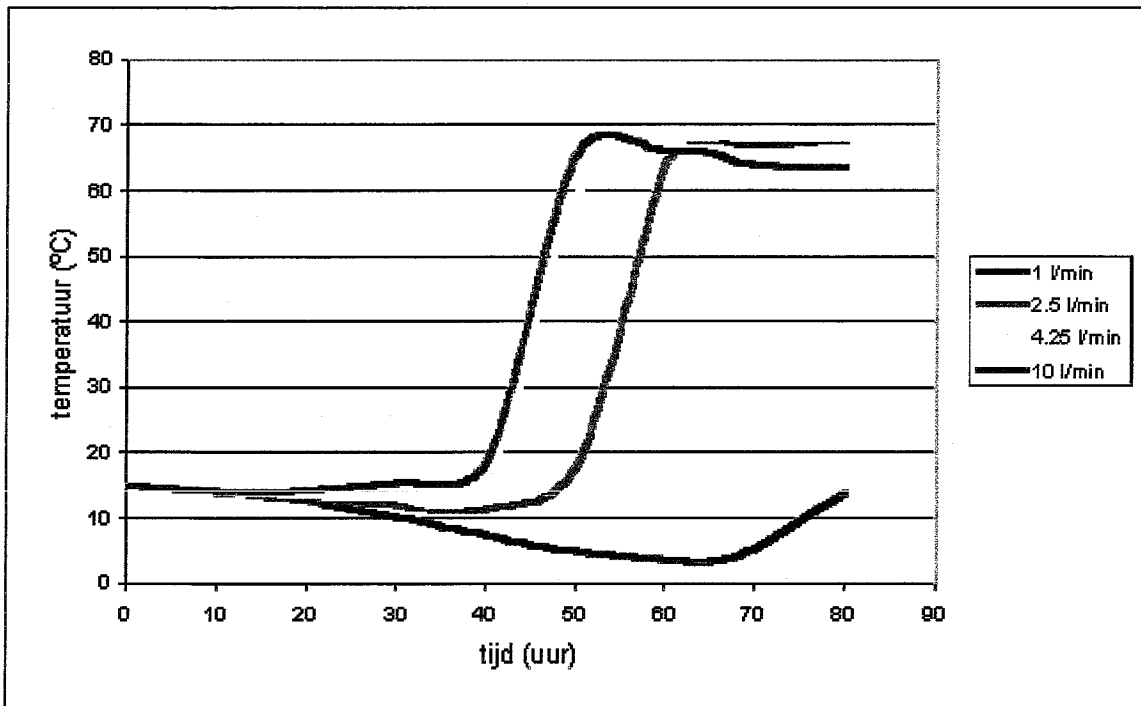
Figuur E6: temperatuurverloop van de verschillende hoogtes bij een vulling van 45% (laag 1) en 25% (laag 2-4) vocht, bij een ingangstemperatuur van 10°C.



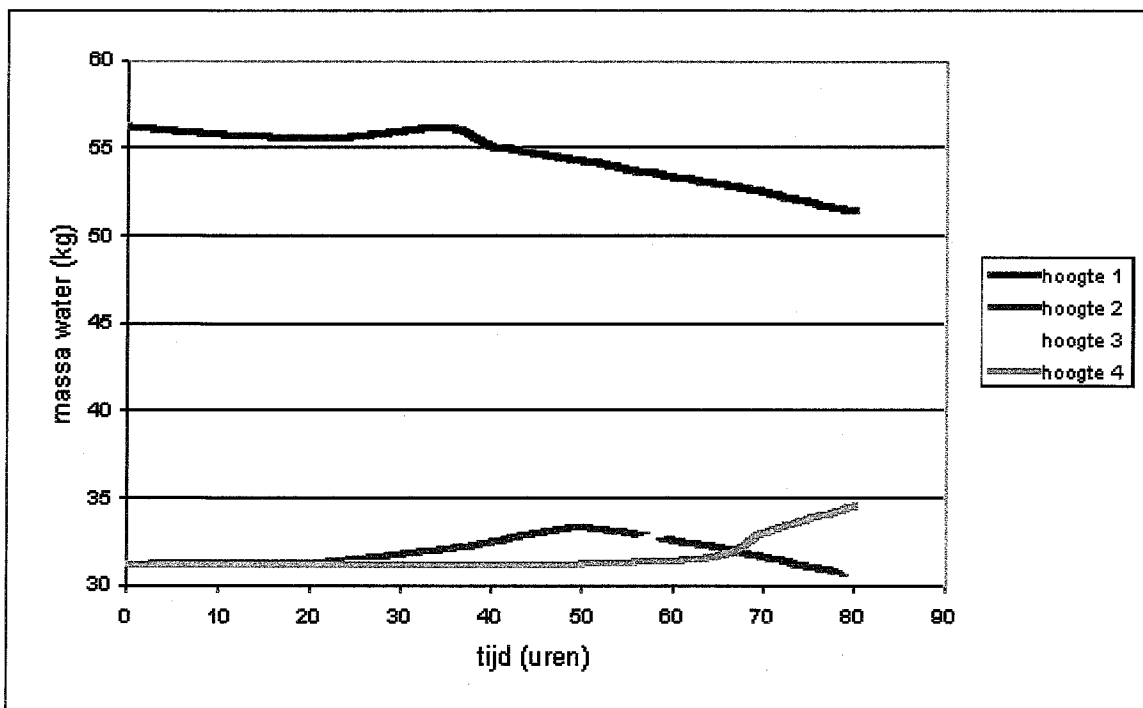
Figuur E7: temperatuurverloop van de verschillende ingangstemperaturen bij een vulling van 45% (laag 1) en 25% (laag 2-4) vocht, gemeten op hoogte 2.



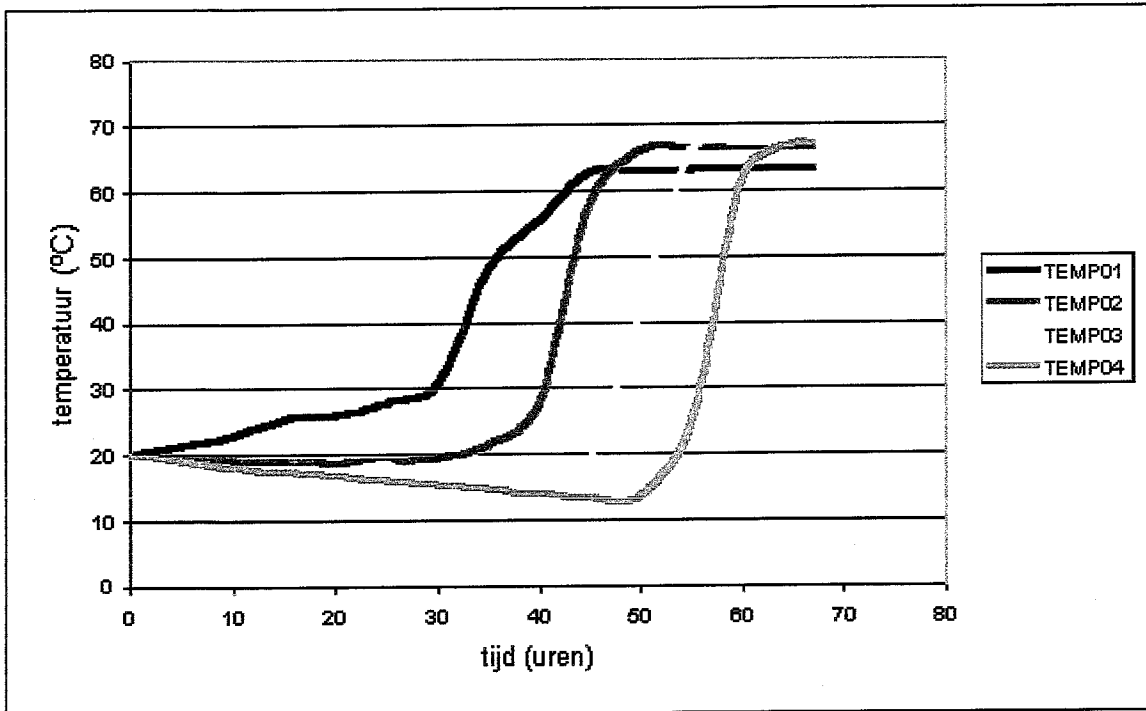
Figuur E8: temperatuurverloop van de verschillende hoogtes bij een vulling van 45% (laag 1) en 5% (laag 2-4) vocht, bij een ingangstemperatuur van 15°C.



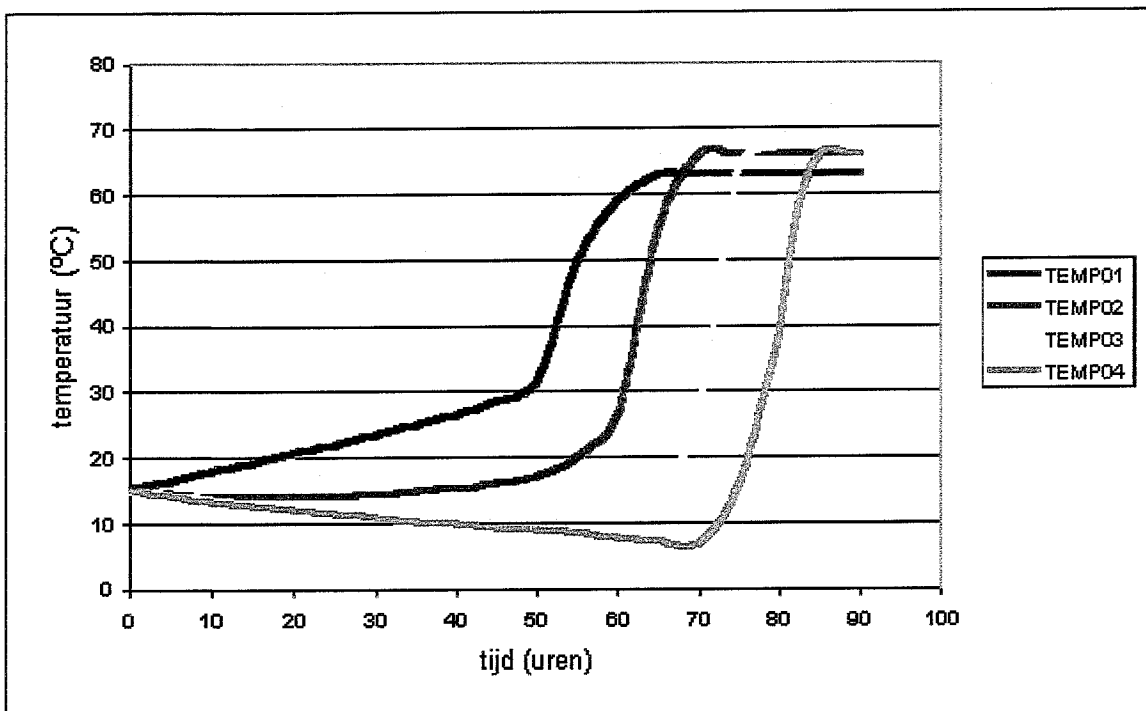
Figuur E9: temperatuurverloop bij variatie in luchtflow met een vulling van 45% (laag 1) en 5% (laag 2-4) vocht, gemeten op hoogte 2.



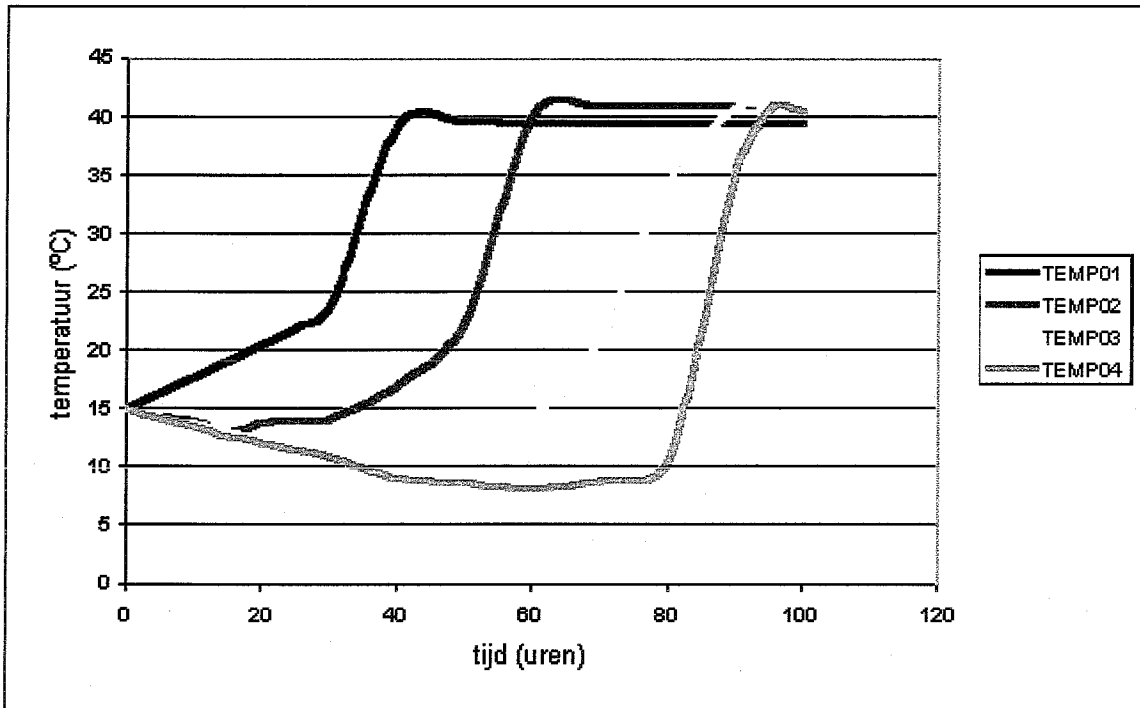
Figuur E10: gehalte aan water op de verschillende hoogtes bij een vulling van 45% (laag 1) en 5% (laag 2-4) vocht.



Figuur E11: berekend temperatuurprofiel palmpitschroot



Figuur E12: berekend temperatuurprofiel biomassa pellets



Figuur E13: berekend temperatuurprofiel houtpellets

BIJLAGE F: RICHTLIJNEN GEZONDHEID EN EXPLOSIES

Gezondheid

In het verleden is er weinig systematisch onderzoek uitgevoerd naar de risico's van biologische agentia. Normering van specifieke agentia lijkt weinig specifiek, op grond daarvan heeft de overheid besloten tot een meer specifieke aanpak. Uit deze aanpak komt het eerste voorstel tot normering van o.a. endotoxinen voort. Voor normen geldt dat ze een bepaald doel omschrijven: het betreft raamregelgeving. Veelal worden normen weergegeven in MAC-waarden. Dit is de maximaal aanvaarde concentratie van gas, damp, nevel of stof in de lucht op de werkplek, gedurende 8 uur per dag en gedurende een groot aantal jaren. Deze waarde moet worden beschouwd als de uiterste bovengrens die niet overschreden mag worden.

Biologische agentia

Momenteel zijn in Nederland nog geen vastgestelde grenswaarden beschikbaar voor blootstelling aan biologische agentia op het werk. In de praktijk wordt de vuistregel gehanteerd van 10.000 Kolonie Vormende Eenheden/m³ (KVE/m³) als grens voor het totaal aan schimmels en bacteriën op de werkplek met een grens van 500 KVE/m³ voor elke specifieke soort of groep micro-organismen [SDU, 2000]. Schimmels en bacteriën kunnen infecties veroorzaken. Schimmels produceren gifstoffen, zogenaamde mycotoxinen. Voor zogenaamde Gram-negatieve bacteriën wordt een grens van 1000 KVE/m³ voorgesteld, vanwege de effecten van mogelijke blootstelling aan endotoxinen die hiermee gepaard gaan.

Endotoxinen

In broeigevoelige materialen (slib van rioolwaterzuiveringsinstallaties en papierslib) komen endotoxinen voor. De door de Gezondheidsraad voorgestelde gezondheidkundige advieswaarde van 50 EU/m³ in de lucht op de werkplek is voor een aantal branches niet haalbaar. Het bedrijfsleven zou daardoor in grote financiële en technische problemen komen. De subcommissie van de Sociaal Economische Raad (SER) stelt voor om een wettelijke grenswaarde in te voeren van 200 EU/m³, waarbij er uitdrukkelijk naar dient te worden gestreefd binnen een termijn van twee jaar na de wettelijke invoering de norm bij te stellen naar 50 EU/m³. De subcommissie van de SER bepleit de invoering van de wettelijke grenswaarde te koppelen aan de publicatie van de meetmethode door het Europees Normalisatie Comité voor meting van micro-organismen en endotoxinen [SER, 2000].

Explosies

Met betrekking tot explosie is een aantal normen en richtlijnen van belang. Een relevante Nederlandse norm is de NEN 1010: installatieregels voor elektrische installaties, met inbegrip van installaties in ruimten met stofexplosiegevaar. Daarnaast zijn er Europese richtlijnen. De ATEX-richtlijnen (atmosphères explosives); deze zijn bedoeld om te komen tot een totale harmonisering van Europese normen betreffende het gebruik van alle apparaten en beveiligingssystemen in een explosiegevaarlijke omgeving. De ATEX behoort tot de zogenaamde nieuwe aanpakrichtlijnen. Deze 'nieuwe aanpak' houdt in dat wat betreft het stellen van productveiligheidseisen wordt volstaan met doelvoorschriften. Dit zijn voorschriften die het veiligheidsdoel omschrijven, maar niet de middelen (beveiligingssystemen) aangeven die daartoe moeten worden gebruikt. Op Griekenland na hebben alle andere EU-lidstaten deze 94/9/EG-richtlijn in hun nationale wetgeving geïmplementeerd. In deze richtlijnen wordt de systematische aanpak van de potentiële gevaren voorgeschreven. Er zijn twee ATEX-richtlijnen: 100a en 118a. De ATEX 100a betreft apparaten en beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen. Hierin wordt onderscheid gemaakt in apparaten van groep I en groep II. Groep I betreft mijnbouw en is hier niet van belang. Groep II betreft alle overige categorieën. Deze worden weer in drie conformiteitsklassen onderscheiden:

1. bestemd voor omgevingen waar naar alle waarschijnlijkheid explosiegevaar zal heersen
2. bestemd voor omgevingen waar waarschijnlijk explosiegevaar zal heersen
3. bestemd voor omgevingen waar het weinig waarschijnlijk is dat er explosiegevaar heerst.

De ATEX 118a betreft de minimale eisen voor het verbeteren van de veiligheid en gezondheid van de werknemers die potentieel gevaar lopen door explosieve omgevingen. Dit houdt in dat de gebieden waarin gewerkt wordt geclassificeerd moeten worden en dat de daarin opgestelde apparatuur voldoet aan de ATEX 100a richtlijn.

De gevarezone indeling maakt een onderscheid in zes verschillende zones:

Tabel F1: *gevarenzone indeling*

zone	gevaar
0	voortdurend of frequent gasexplosiegevaar
1	gasexplosiegevaar is waarschijnlijk tijdens normaal bedrijf
2	kortdurend en weinig voorkomend gasexplosiegevaar
20	een brandbare stof is als wolk voortdurend of frequent tijdens normaal bedrijf aanwezig in voldoende mate om een explosieve concentratie te vormen
21	een brandbare stof is als wolk af en toe tijdens normaal bedrijf aanwezig in voldoende mate om een explosieve concentratie te vormen
22	een brandbare stof is als wolk tijdens normaal bedrijf zelden langer dan kortstondig aanwezig of afzettingen of lagen van brandbare stof kunnen een explosieve concentratie veroorzaken

De gevaren zones 0, 1 en 2 gelden voor gasexplosiegevaar, de zones 20, 21 en 22 gelden voor stofexplosiegevaar. In zone 0 en 20 geldt als algemene regel dat de aanwezigheid van werknemers en het uitvoeren van werkzaamheden niet is toegelaten. Explosiegevaar

Preventie tegen explosies

Preventie van explosies is de basis voor een veilig ontwerp van de processen. Onder het concept van veilig werken kunnen verschillende acties vallen, variërend van eenvoudige implementeerbaar en goedkope tot complexere die meer vereisen vanuit het punt van productiviteit en economische gewin. Preventie tegen explosies is eigenlijk niet anders dan de condities wegnemen die nodig zijn om een explosie te laten aanvangen [Arcken, 1999]. Preventie is met name ervoor zorgen dat er geen ontstekingsbronnen aanwezig zijn, of buiten de bekende explosiegrenzen werken van een brandbaar gas, damp of stof/luchtmengsel. Bij het voorkomen van ontstekingsbronnen moet aan de volgende punten gedacht worden:

- Elektrische apparatuur moet gecertificeerd zijn voor het gebruik met brandbare materialen
- Metalen etc moeten verwijderd worden voordat het opgeslagen wordt
- Alle onderdelen van het proces moeten geaard zijn
- Bewegende delen moeten zorgvuldig gehanteerd worden om wrijving te voorkomen
- Frequentie inspectie

Beheersing van explosies

Ondanks preventieve maatregelen kan niet altijd een explosie worden vermeden. Te vaak ontploft er een brandbaar mengsel in installaties die preventief zijn beveiligd. Beheersing van explosies daarentegen zorgt ervoor dat de schadelijke gevolgen tijdens of na een explosie zoveel als mogelijk worden beperkt.

Volgens de ATEX-richtlijn zijn dit inrichtingen, dus geen onderdelen, van apparaten die de functie hebben beginnende explosies te stoppen en/of de door explosie getroffen zone te beperken en die afzonderlijk in de handel worden gebracht als systemen met autonome functies. Men spreekt hier niet over preventieve maar over correctieve maatregelen die moeten worden genomen. Met andere woorden onderkennen dat een explosie kan plaatsvinden en dan ervoor zorgdragen dat die explosie beheersbaar blijft binnen van tevoren gestelde maatstaven. De explosie moet drukontlast, onderdrukt en/of geïsoleerd worden.

- Explosiedrukontlasting

Het is de meest toegepaste methode om zich op een veilige en economische wijze te beschermen tegen de gevolgen van een explosie. Het principe van explosiedrukontlasting is eenvoudig; het ontlasten van de opgebouwde druk door een breuk van een bewust gekozen zwakke plek in een installatiwand. Explosiedrukontlasting beschermt dus de installatie tegen overdruk en zorgt ervoor dat de explosie in een goede en veilige richting wordt geleid. Een explosiepaneel of breekplaat is zo'n bewust gekozen zwakke plek. Het paneel heeft een lage massa en opent zich bij een van tevoren bepaald en gegarandeerd drukgebied. Het paneel mag daarbij niet fragmenteren. Een weggeblazen metaaldeel kan namelijk personen of installaties treffen, met alle gevolgen van dien. Een andere belangrijke eis aan een paneel is dat het zich volledig opent, binnen enkele milliseconden en bij een vooraf bepaalde ontlastoppervlakte. De berekeningen voor de vereiste ontlastoppervlakte zijn eenvoudig dankzij grootschalige testen in verschillende drukhouders en geformuleerd in richtlijnen zoals in de VDI 3673¹².

- Vlamloze drukontlasting

Als bij een binnen opgestelde installatie het explosiepaneel breekt, dient de vrijkomende energie via een afblaaskanaal naar een veilige zone (de open lucht) te worden afgeleid. Ook bij buitenopstellingen moet men erop letten dat de drukgolf en steekvlam geen verdere schade kunnen veroorzaken. Het installeren van een afblaaskanaal vereist de nodige zorg. De weerstand van zo'n kanaal zal de gereduceerde explosiedruk aanzienlijk verhogen. Bovendien kan in een afblaaskanaal een secundaire explosie optreden. Dit gebeurt als onverbrand materiaal mee wordt afgeblazen en door het vlamfront (na de drukgolf) wordt ontstoken. Om een vlamfront te elimineren, kan gebruik worden gemaakt van een vlamdovend element. De combinatie van een explosiepaneel en een vlamdovend element maakt een vlamloze druk-ontlasting mogelijk. Het vlamdovend element verlaagt de temperatuur van het vlamfront tot onder de zelfontbrandingstemperatuur van de brandstof.

- Explosie-onderdrukking

Als men een explosie vergelijkt met een zeer snelle brand, en men een brand kan blussen, dan kunnen de meeste explosies ook geblust ofwel onderdrukt worden. Explosie-onderdrukkingssystemen werden ontwikkeld om een explosie in een vroegtijdig stadium te herkennen en zodanig te reageren dat de drukontwikkeling wordt afgebroken alvorens onaanvaardbare schade aan beveiligde toestellen optreedt. Bijkomend blust dit systeem een beginnende brand en vermindert het een eventuele vlamuitstoot. Explosie-onderdrukking heeft de voorkeur als bescherming bij situaties waar giftige producten worden verwerkt of getransporteerd. Ook bij het beveiligen van toestellen die binnen een gebouw zijn opgesteld, of daar waar drukontlasting ontoelaatbaar is omwille van gevaar voor personeel, installaties of milieu. Na de detectie van de explosie en verwerking door een controle-eenheid wordt binnen enkele milliseconden een geschikt blusmiddel gespoten in het betreffende apparaat en wordt de vuurbal geheel ingesloten en geblust. De explosiedruk die na het blussen beperkt blijft (tot circa 0,2 tot 0,3 bar) is zeer kortstondig en geeft aanleiding tot een minimaal risico voor schade aan de installatie. Ook in een doorgaande leiding kan een explosie worden onderdrukt, men spreekt hier van een chemische isolatie.

- Explosie-isolatie

Onder explosie-isolatie ofwel compartimentering wordt verstaan: het op een mechanische of chemische manier vermijden dat een explosie zich verder kan uitbreiden van het ene naar het andere apparaat. Door de explosie te isoleren wordt het effect beperkt tot dat deel van de installatie waarin de explosie begint. Explosiebescherming is dikwijls een combinatie van explosie-isolatie met explosiedrukontlasting of andere beveiligingstechnieken. Een volkomen autonoom en actief mechanisch isolatiesysteem, beter bekend als explosie-isolatieklep, is ontworpen om in de beginfase van een explosie, deze mechanisch te isoleren om zodoende de voortplantingsdruk en het vlamfront te blokkeren.

¹² www.vdi.de

BIJLAGE G: REACTIEKINETIEK BROEI BIJ BIOMASSA

De kinetiek bij de broei van biomassa kan in verschillende stadia worden beschreven. De kinetiek die gebruikt is bij de modellering is grotendeels gebaseerd op de broei bij hooi beschreven in het proefschrift [Ohm, 1972].

Enzymatische warmteproductie

De snelheid van de glucose verademing bepaald de reactiesnelheid van de enzymatische warmteproductie. De reactiesnelheid (r^x) is het aantal mol van één van de aan de reactie deelnemende stoffen, dat per tijdseenheid, omgezet of gevormd wordt. De ademhaling van de plantencellen is een pseudo nulde orde reactie in alle zuurstof. De reactiesnelheid bij de ademhaling van de levende plantencel kan met de zogenaamde Arrhenius vergelijking worden beschreven.

$$r^x = \frac{dC_{CO_2}}{dt} = -\frac{dC_{O_2}}{dt} = k = k_o(x^x) \cdot \exp\left[-\frac{Ea}{RT}\right] \quad (G1)$$

Waarbij;

$$k = \text{reactiesnelheidsconstante} \quad [mg.CO_2 / 100gr.Ds.uur]$$

$$k_o(x^x) = \text{frequentiefactor v/d glucose verademing} \quad [mg.CO_2 / 100gr.Ds.uur]$$

$$Ea = \text{Aktiveringsenergie} \quad [J/mol]$$

$$R = \text{molairgas constante} = 8.317 \quad [J/mol.K]$$

$$T = \text{Temperatuur} \quad [K]$$

$$r^x = \text{reactiesnelheid} \quad [mol.CO_2 / kg.Ds.s]$$

De activeringsenergie is voor de enzymatische warmteproductie op basis van de correlatie tussen de reactiesnelheidsconstante en de temperatuur bepaald en bedraagt 13800 cal/mol (hetgeen over een komt met 58000 J/mol).

Doordat de activeringsenergie (Ea) onafhankelijk is van het vochtgehalte (x^x), is de invloed van water op de reactiesnelheid van de ademhaling niet katalytisch van aard. Slechts de frequentiefactor $k_o^*(x^x)$ of te wel de botsingskans wordt groter bij toenemend vochtgehalte (x^x). Op basis van de verbrandingswarmte van glucose kan de warmteproductie tijdens de ademhaling als functie van de temperatuur en het vochtgehalte berekend worden.



Op basis van de bovenstaande vergelijking komt er per geproduceerd mol CO_2 : $1/6 \cdot 2835 = 472 \text{ [kJ]}$ aan warmte(Q) vrij.

De enzymatische warmteproductie $q_{(T)}$ kan met de volgende formule berekend worden;

$$q_{(T)} = Q \cdot r^x \quad (G2)$$

waarin;

$$r^x = \text{de reactiesnelheid van de glucoseverademing} \quad [mol.CO_2 / kg.Ds.s]$$

$$q_{(T)} = 0.427 \cdot 10^6 \cdot k_o(x^x) \cdot \exp\left[-\frac{Ea}{RT_s}\right]$$

$$\left[\frac{W}{kg.Ds}\right] = Q \left[\frac{J}{mol.CO_2}\right] \cdot k \left[\frac{mol.CO_2}{kg.(Ds).s}\right]$$

Microbiologische warmteproductie

Uit experimenten in het verleden met een adiabatise reactor en een isotherm reactor, beschreven in het proefschrift blijkt dat de warmteproductie t.g.v de activiteiten van de mesofielen bij hooi tussen de 8-16 [W/kg.Ds] ligt en maximaal is bij 38-40°C (zie figuur 15). Voor de thermofielen geldt dat de maximale warmteproductie 9 [W/kg.Ds] is bij een temperatuur van 60-62°C.

Door gebruik te maken van vergelijking (G2) kan de reactiesnelheidsconstante (k) = (r) voor de mesofielen c.q. thermofielen langs mathematische weg berekend worden door de maximale warmteproductie die veroorzaakt wordt door de mesofielen c.q. thermofielen te delen door de molaire reactiewarmte of oxidatie warmte(Q).

Voor zowel de mesofielen als de thermofielen zijn de volgende aannames gedaan. Doordat het proefschrift een boven- en een ondergrens aangeeft voor de warmteproductie ten gevolge van de mesofielen, is gebruik gemaakt van gemiddelde waarde bij de berekeningen. Voor de mesofielen is bij een gemiddelde warmteproductie van 12 [W/kg Ds], de reactiesnelheidsconstante: $r^x = 2.54 \cdot 10^5$ [mol.CO₂ / kg.Ds.s]. Door dezelfde berekening uit te voeren voor de thermofielen, met een gemiddelde warmteproductie van 8,5 [W/kg Ds], volgt een waarde voor de reactiesnelheidsconstante van $1.8 \cdot 10^5$ [mol.CO₂ / kg.Ds.s].

Chemische warmteproductie

Doordat de bacteriën rond de 70-75°C niet meer actief zijn, mag verondersteld worden dat de warmteproductie het gevolg is van exotherme chemische oxidatie tussen de bestanddelen van biomassa (koolhydraten) en zuurstof in de lucht. Uit experimenten blijkt dat de koolhydraten met een oxidatiewarmte van 472 kJ, circa 85% van de oxideerbare bestanddelen uit hooi vormen. Hierdoor wordt voor het model van de chemische warmteproductie uitgegaan van de oxidatiereactie van koolhydraten. De reactiesnelheid (r_s) kan betrokken worden op de gasvormige component zuurstof (O₂).

Voor de reactiesnelheid geldt:

$$r_s = k [C_a]^n \quad (G3)$$

waarin:

$$C_a = \text{concentratie zuurstof} \quad [\text{mol/m}^3]$$

$n = \text{orde van de reactie}$

Een hooistapeling met een vochtgehalte (x^*) en een dichtheid ρ [kg/m³] bevat voor de biomassa $(1-x) \cdot \rho$ [kg/(Ds).m³]. Op basis hiervan kan de chemische warmteproductie met de volgende formule berekend worden;

$$q_{(T)} = \frac{\varepsilon \cdot Q}{(1-x^*) \cdot \rho} \cdot C_a^n \cdot k_o \cdot \exp(-Ea / RT) \quad \left[\frac{W}{kg_{Ds}} \right] \quad (G4)$$

Chemische groei kan beschreven worden met een Arrhenius-vergelijking. Voor zowel de activeringsenergie als voor de frequentiefactor is er een afhankelijkheid gevonden voor het vochtgehalte.

$$\text{Voor de } E_a \text{ geldt : } Ea = (107.5 - 99.16 \cdot x^*) \cdot 1000$$

$$\text{Voor de } k_o \text{ geldt : } k_o = (20.5 - 67.5 \cdot x^*) * 1.10^8$$