

Ref.nr. : 90-250
Dossiernr. : 8722-19624
Datum : januari 1991
P
(embargo tot 1/5/'91)

Titel
DIËLEKTRISCHE TOEPASSINGEN IN DE
MILIEUTECHNOLOGIE

Auteur(s):
Ing. H. Boot
Ir. M. Hinsenveld
Ir. W.J.L. Jansen, KEMA
Ing. G.J. Meijer, KEMA
Dr.ir. E. Mot (projectleider)
Drs.ing. H.J. Munter

Trefwoord(en):
- diëlektrisch verwarmen
- microgolf verhitting
- radiofrequent verhitting
- alternatieve reinigingstechnieken
- lucht
- water
- bodem
- afval
- procesgeïntegreerde milieutechnologie

Bestemd voor:
NOVEM B.V., Siemens Nederland N.V.,
B.V. Kon. Mij. 'De Schelde'

COLOFON

Deze studie is tot stand gekomen door samenwerking van TNO met Siemens Nederland N.V., B.V. Kon. Mij. 'De Schelde' en KEMA.

De TNO-inbreng is mogelijk gemaakt door een financiële bijdrage uit de Stimuleringsregeling Milieutechnologie van het ministerie van VROM (onder projectnummer 51610/2410), beheerd door NOVEM B.V., en van Siemens Nederland N.V.

KEMA en B.V. Kon Mij. 'De Schelde' leverden bijdragen in de vorm van eigen manuren.

Dit rapport kan worden besteld door overmaking van een bedrag van f 90,--, exclusief BTW op postgiro 416269 ten name van TNO-MT, Apeldoorn, onder vermelding van referentie nummer 90-250.

KORTE SAMENVATTING

In deze studie wordt een eerste beeld geschetst van de betekenis van diëlektrische technieken in de milieutechnologie. Dit beeld is mede gevormd door het uitvoeren van een aantal eenvoudige diëlektrische proeven op afvalstoffen, of op equivalenten daarvan.

De proeven zijn uitgevoerd door de KEMA, in een radiofrequentie (27 MHz) en in een microgolf (2450 MHz) installatie.

Onderzoek vond plaats aan actief kool, beton, verontreinigde grond, rubber, kunststofafval en diverse soorten extractieslib. Aan de hand van deze proeven kon worden geconcludeerd, dat diëlektrische technieken in ieder geval zinvol kunnen worden toegepast op rubberafval (onder andere voor pyrolyse), verontreinigde grond (in situ uitdampen van verontreinigingen), en extractieslib (uitdampen, mogelijk gevolgd door sinteren).

Naast de toepassingsmogelijkheden, die op basis van de KEMA-proeven konden worden aangereikt, zijn door diverse TNO-medewerkers suggesties aangedragen voor andere toepassingen in de milieutechnologie. Dit heeft geleid tot een aanzienlijke opsomming van principiële mogelijkheden die, ondanks haar huidige omvang, gemakkelijk voor verdere uitbreiding vatbaar is.

Uit deze opsomming zijn enkele veelbelovende mogelijkheden nader bezien. Vermeldenswaard zijn in dit verband het recyclen van afgewerkte smeerolie, de vitrificatie (verglazing) van afvalstoffen die zware metalen bevatten, en het ontsluiten van anorganische en organische afvalstoffen.

Daarnaast zou het bevorderen van hergebruik van asfalt door toepassing van diëlektrische smelttechnieken nader dienen te worden bestudeerd.

Op basis van deze studieresultaten kan worden geconcludeerd, dat diëlektrische technieken weliswaar kostbaar zijn, maar nochtans vanwege hun speciale eigenschappen in diverse gevallen zeer zinvol kunnen worden toegepast. Algemeen gesproken liggen de voordelen van diëlektrische technieken in de unieke wijze van warmteontwikkeling (in het materiaal zelf, selectief), een betere procesbeheersing, beperkte afmetingen van de installaties en in het ontbreken van verbrandingsgassen.

Voor grote vermogens (boven 2 MW) is diëlektrische verwarming om econo-

mische redenen echter minder geschikt.

Afsluitend kan worden gesteld, dat diëlektrische technieken in de milieutechnologie op ad hoc basis, in 'marktniches' kunnen worden toegepast. Dit betekent, dat bij milieutechnologische warmtebehandelingen het gebruik van deze technieken van geval tot geval op zijn mérites moet worden bezien, en zorgvuldig tegen de alternatieven moet worden afgewogen.

SAMENVATTING

Milieutechnologie is een nog jonge tak van toegepaste wetenschap. Het ligt daarom in de lijn der verwachting, dat van allerlei meer en minder bekende technieken wordt nagegaan, in hoeverre zij voor de milieutechnologie zinvol kunnen worden ingezet.

Eén van die technieken is de diëlektrische verwarming. Dit is een reeds lang toegepaste techniek voor het verwarmen en drogen van materialen. Behandeling van afvalstoffen met deze techniek heeft tot nu toe echter nauwelijks aandacht gekregen.

Bij diëlektrische technieken wordt de energie voor verwarming door een hoogfrequent elektrisch veld aan het materiaal toegevoerd. Een afvalstof kan alleen diëlektrisch worden verwarmd, als zijn verliesfactor voldoende groot is. Dit betekent, dat de stof in een snel wisselend elektrisch veld energie opneemt (dissipeert) en dus in warmte omzet.

Diëlektrische technieken

Diëlektrische technieken worden, om storingen in telecommunicatie te vermijden, beperkt tot enkele discrete frequenties. Men onderscheidt in dit verband de relatief lage radiofrequenties (RF, tientallen MHz) en de, hogere, microgolffrequenties (MG, duizenden MHz). In het kader van deze studie zijn door de KEMA proeven uitgevoerd, en wel in een radiofrequente installatie (27 MHz) en in een microgolfinstallatie (2450 MHz).

Diëlektrische technieken bezitten een aantal karakteristieke voor- en nadelen ten opzichte van hun alternatieven.

Als voordeel geldt, dat de warmteontwikkeling in het materiaal zelf plaatsvindt, en materiaalselectief is (met name water heeft een hoge verliesfactor). De energiedichtheid kan hoog zijn, zodat een stof snel opwarmt. De installatie is relatief klein; het proces is goed beheersbaar, en er treedt geen vermenging op van emissies met verbrandingsgassen.

Een nadeel is, dat diëlektrische technieken relatief duur zijn. Het vermogen is beperkt, tot circa 0,2 MW voor microgolf, en tot circa 2 MW voor radiofrequente toepassingen.

Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste voor- en nadelen.

Tabel 1 Algemeen overzicht van de voor- en nadelen van de toepassing van diëlektrische technieken in de milieutechnologie

Voordelen	Nadelen
Lokale warmteontwikkeling, nl. in het materiaal zelf, met hoge energiedichtheden	Dure installatie
Hoge snelheid warmteontwikkeling	Materiaalselectief; niet elk materiaal is geschikt
Relatief kleine installaties	Onbekend proces in milieutechnologie
Bedrijfs- en onderhoudskosten zijn relatief laag	Door verontreiniging in materiaal vonkoverslag of inbranding mogelijk
Selectieve warmte bv. alleen op water gericht	Beperkte capaciteit ovens/drogers
Geen vermenging met verbrandingsgassen	MG:0,2 MW; RF:2 MW
Procescontrole goed te realiseren	High tech oplossing voor laagwaardige stoffen
Vaak zeer hoog energierendement mogelijk	Onvoorspelbare verontreinigingen geven onvoorspelbaar opwarmgedrag
Soms zeer specifieke voordelen haalbaar	

Principiële functies

Aan de diëlektrische technieken kunnen een aantal principiële functies worden toegekend. Deze functies zijn:

a. Drogen

Dit betreft het uitdampen of -koken van water. De hoge verliesfactor van water maakt het mogelijk water te verwarmen, terwijl de omringende stof relatief koud blijft. Hiermee kan in principe energie worden bespaard.

b. Uitdampen

Hierbij gaat het om de verwijdering van bestanddelen, zoals koolwaterstoffen en halogeenverbindingen uit een vloeistof of matrix.

c. Ontleden

Dit betreft stoffen die boven een bepaalde temperatuur worden afgebroken.

d. Katalytische werking (p.m.)

Rechtstreekse beïnvloeding van (bijvoorbeeld) de afbraak van een stof door de elektromagnetische straling.

Over dit effect is nog weinig bekend.

e. Breken

Bij breken wordt het kristalwater van een stof in stoom omgezet, waardoor breuk optreedt (bijvoorbeeld in beton).

f. Scheiden

Door voornoemde differentiële verhitting kan men bijvoorbeeld 'gefractioneerd smelten', en aldus stoffen van elkaar scheiden.

g. Infrarood detectie

Door de differentiële verhitting tengevolge van diëlektrische verwarming met IR-detectie te meten, kan men verschillende stoffen van elkaar onderscheiden.

Bij de keuze van de te onderzoeken stoffen is gestreefd naar een goede verscheidenheid in benutting van voornoemde functies.

KEMA-onderzoek

Op basis van de voorgaande overwegingen zijn door TNO een aantal (afval)stoffen geselecteerd, ten behoeve van het onderzoek bij KEMA, namelijk:

- Actief kool, voor filtering van water en van lucht.
- Beton
- Kunststofafvallen, en wel LDPE, HDPE, nylon, PVC. Steeds zowel folie als plaatmateriaal.
- Kabel, vernet polyetheen (XLPE) met PVC mantel (door KEMA zelf geleverd).
- Verontreinigde grond (PAK-houdende grond ¹⁾)

¹⁾ PAK: Polycyclisch Aromatische Koolwaterstoffen

- *Extractieslib*, de fijne (meest vervuilde) fractie van slib van een aantal waterbodems.
- *Autobanden*, van personenauto's en van bedrijfswagens.

In dit vroege ontwikkelingsstadium is van deze stoffen alleen nagegaan, in welke mate zij gevoelig waren voor radiofrequente en microgolf-behandeling, door meting van de temperatuur als functie van de tijd.

Resultaten en gevolgtrekkingen uit KEMA-onderzoek

Uit de proeven is gebleken, dat droog actief kool, beton, verontreinigde grond, slib en rubber met diëlektrische technieken goed te verwarmen zijn. Op basis daarvan wordt het zinvol geacht, onderzoek te starten naar:

- *Diëlektrische pyrolyse van rubberafvallen*

Dit leidt tot de produken als gas, roet, benzeen en metalen, die weer als grondstof kunnen worden verkocht.

- *Diëlektrische behandeling van extractieslib*

Dit slib, het meest verontreinigde deel van vervuilde grond of waterbodems, kan eerst mechanisch worden gedroogd. Daarna wordt het diëlektrisch verder gedroogd, de koolwaterstoffen etc. worden uitgedampt, en tenslotte zou het in korrels kunnen worden gesinterd, om de zware metalen te immobiliseren. Aldus kan een nieuw produkt uit dit afval worden vervaardigd.

- *Diëlektrische in situ reiniging van de bodem, door uitdampen van vluchtige verontreinigingen*

Dit is één van de weinige methoden om de bodem te reinigen, zonder dat hij behoeft te worden uitgegraven.

Een oriënterende vergelijking met enkele andere reinigingsmethoden wijst uit, dat diëlektrische in situ bodemreiniging financieel aantrekkelijk kan zijn.

Vergelijking wordt overigens bemoeilijkt, doordat de reinigingskosten sterk afhankelijk zijn van grondsoort en bodemgesteldheid.

Overige toepassingsmogelijkheden

Om na te gaan wat voor andere mogelijkheden er in principe bestaan, om diëlektrische verwarming in de milieutechnologie toe te passen, is aan een vrij groot aantal TNO-medewerkers gevraagd, met suggesties hierover te komen. Dit leidde tot een lijst van tientallen, soms nogal speculatieve, mogelijkheden.

Enkele van de meest veelbelovende daarvan zijn ook in financieel opzicht nader bezien. Een kleine selectie volgt hierna.

- *Recycling afgewerkte smeerolie*

Langs diëlektrische weg kunnen water en organochloorverbindingen waarschijnlijk zeer goed uit afgewerkte smeerolie worden verwijderd (selectieve verwarming!). Daarnaast kunnen, langs andere weg, grove deeltjes en metalen worden afgescheiden. Aldus kan een hoogwaardige vorm van hergebruik worden gerealiseerd (de verkoopprijs van nieuwe smeerolie bedraagt circa f 10,000/ton).

- *Vitrificatie (verglazing) van afvallen die zware metalen bevatten*

De overheid streeft ernaar, de mobiliteit (uitloogbaarheid) van ongewenste stoffen in afval als één van de classificaties-criteria te gebruiken.

Het kan daarom belangrijk zijn, stoffen te vitrificeren. Aldus kunnen hoge stortkosten worden vermeden, en er kunnen herbruikbare, grindachtige produkten ontstaan.

Men kan in dit verband onder andere denken aan diverse stof-, as- en slaksoorten als uitgangsmateriaal.

- *Ontsluiten van anorganische en organische afvalstoffen*

Hierbij gaat het om chemische omzetting van schadelijke afvallen in minder schadelijke, respectievelijk om het losmaken van milieugevaarlijke, of waardevolle bestanddelen uit een afvalstof. Daarnaast kan het geschikt maken van (bijvoorbeeld) afval uit de voedings- en genotsmiddelenindustrie voor dierlijke consumptie worden overwogen.

- *Hergebruik van asfalt*

Asfalt bezit een slechte warmtegeleidbaarheid. Dit beperkt thans het percentage hergebruik, dat ter plaatse mogelijk is. Omdat met diëlektrische verwarming de warmtegeleiding geen rol speelt, kan aldus misschien een groter hergebruikspercentage worden bewerkstelligd.

Conclusie

Uit het voorgaande blijkt, dat zich allerlei reële mogelijkheden voordoen, om diëlektrische technieken zinvol in de milieutechnologie toe te passen. Desondanks is het nauwelijks mogelijk, om daarvoor algemeen geldende criteria te formuleren.

De toepassingen bezitten een ad hoc karakter; het zijn marktniches. Die marktniches zijn wel steeds gebaseerd op het benutten van de specifieke voordelen van diëlektrische technieken ten opzichte van alternatieven. Bijvoorbeeld de selectieve verwarming, de warmteontwikkeling in het materiaal zelf, betere procesbeheersing, ontbreken van verbrandingsgassen, kleine afmetingen van de de installatie, etc.

Het voorgaande impliceert, dat de in deze studie verzamelde toepassingsvoorbeelden nooit 'compleet' kunnen zijn. In de verdere ontwikkelingsgang van de milieutechnologie zullen zich zeker nog andere opties voor diëlektrische technieken voordoen. Daarom is het goed, om deze technieken steeds mede te bezien, wanneer een milieutechnisch probleem door verwarming moet worden opgelost.

90-250/R.22/HVG	11
INHOUDSOPGAVE	
COLOFON	2
KORTE SAMENVATTING	3
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	13
2. DIËLEKTRISCHE TECHNIEKEN	16
2.1 Theorie diëlektrische techniek	16
2.2 Verschillen tussen radiofrequente en microgolfinstallaties	19
2.3 Voordelen diëlektrische technieken	23
2.4 Nadelen diëlektrische technieken	25
3. DE HUIDIGE POSITIE VAN DE DIËLEKTRISCHE TECHNOLOGIE	30
3.1 Radiofrequente verhitting	30
3.2 Microgolf verhitting	31
3.3 Enkele toepassingsvoorbeelden	32
4. EERSTE SELECTIE VAN KANSRIJKE AFVALSTOFFEN	34
4.1 Keuzeproblematiek	34
4.2 De selectie van afvalstoffen	41
5. KEMA-ONDERZOEK	45
5.1 Afvalstoffen	45
5.2 Experimentele aanpak	46
5.2.1 Diëlektrische installaties	46
5.2.2 De radiofrequente installatie (27 MHz)	47
5.2.3 De microgolfoven (2450 MHz)	48
5.2.4 Werkwijze	49
5.3 Verwerking resultaten radiofrequente installatie	50
5.3.1 Resultaten proeven	50
5.3.2 Analyse resultaten radiofrequente proeven	51
5.4 Verwerking resultaten microgolfproeven	52
5.4.1 Resultaten proeven (buiten de zuurkast)	52
5.4.2 Resultaten proeven (in de zuurkast)	52
5.4.3 Analyse resultaten microgolfproeven	54
5.5 Overzicht resultaten diëlektrisch verwarmen	57

90-250/R.22/HVG	12
6. EXTRAPOLATIE RESULTATEN KEMA-ONDERZOEK	59
6.1 Beoordelingscriteria	59
6.2 Toetsing geselecteerde stoffen aan beoordelingscriteria	63
6.3 Veelbelovende toepassingen	73
7. OVERIGE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN	75
7.1 Lucht	77
7.2 Water	79
7.3 Bodem	79
7.4 Afval	79
7.5 Procesgeïntegreerde technieken	82
8. ENKELE MARKTMOGELIJKHEDEN (SELECTIE UIT H 6 EN 7)	84
8.1 De marktproblematiek van milieutechnologische processen	84
8.2 Rubberafvallen	85
8.3 Extractieslib	86
8.4 In situ reiniging van de bodem door uitdampen vluchtige verontreinigingen	89
8.5 Afgewerkte smeerolie	93
8.6 Vitrificatie van afvalstoffen die zware metalen bevatten	94
8.7 Ontsluiten van anorganische en organische afvallen	96
9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	98
10. REFERENTIES	101
11. VERANTWOORDING	105
Bijlage 1 ENKELE GEGEVENS BETREFFENDE VERLIESFACTOREN	
Bijlage 2 GEGEVENS OVER GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN	
Bijlage 3 W.J.L. JANSEN; DIËLEKTRISCHE TECHNOLOGIE IN DE INDUSTRIE ELEKTROTECHNIEK <u>67</u> (1989) 7 JULI, BLZ. 641-648	
Bijlage 4 BELANGRIJKSTE GEGEVENS VAN DE BIJ KEMA UITGEVOERDE PROEVEN	
Bijlage 5 EXTRAPOLATIE RESULTATEN KEMA-ONDERZOEK IN TABELVORM	

1. INLEIDING

Het doel van deze studie is, de toepassingsmogelijkheden van de diëlektrische technieken voor de behandeling van afvalstoffen, afvalvloeistoffen, verontreinigde gronden, waterbodems en verontreinigde afgassen te evalueren. Daarnaast zal, op globale wijze, aandacht worden besteed aan toepassingsmogelijkheden in de procesgeïntegreerde milieutechnologie. Deze evaluatie is er primair op gericht, uit het grote aantal potentieel aanwezige toepassingsmogelijkheden de meest kansrijke (in technisch en economisch opzicht) te selecteren en aan te geven, welk onderzoek noodzakelijk is om deze kansrijke toepassingsmogelijkheden te ontwikkelen voor de praktijk.

De studie is bedoeld, om bouwers van diëlektrische apparatuur, alsmede potentiële gebruikers daarvan, inzicht te geven in de mogelijkheden van deze technologie voor wat betreft haar toepassing bij het oplossen van milieuproblemen.

Een studie als deze bezit een wat ongebruikelijk karakter, dat misschien het beste kan worden gekenschetst als:

'We hebben een oplossing; daar zoeken we problemen bij'.

Het ligt voor de hand dat deze benaderingswijze alleen zinvol is, wanneer er véél problemen zijn. In de milieutechnologie is aan deze voorwaarde ruimschoots voldaan - zeker ook voor wat betreft problemen, die voor één of andere vorm van thermische behandeling in aanmerking komen.

Om nu te komen tot een oordeel over de toepasbaarheid van diëlektrische technieken dient voor elk probleem de bestaande behandelingswijze te worden onderzocht of, bij het ontbreken daarvan, een behandelingswijze te worden vastgesteld. Vervolgens moet per geval worden bestudeerd in welke procesonderdelen, waarbij warmte nodig is, diëlektrische technieken efficiënt kunnen worden ingezet.

Het gevolg van deze situatie is, dat de gevonden toepassingsmogelijkheden overwegend het karakter bezitten van de ad hoc, 'toevallige' marktniches en er, althans oppervlakkig gezien, nauwelijks sprake is van algemene criteria, op grond waarvan besloten kan worden of diëlektrische

behandeling wel of niet zinvol is. Desondanks kunnen op grond van deze studie toch enkele 'algemene lijnen' worden geïdentificeerd, die de toepasbaarheid van diëlektrische methoden bepalen.

Voor het oplossen van milieuproblemen die veroorzaakt worden door vaste afvalstoffen, afvalvloeistoffen, verontreinigde gronden, sedimenten (onderwaterbodems) en afgassen wordt zowel in binnen- als buitenland een toenemende behoefte geconstateerd aan behandelingstechnieken (zuiveringstechnieken, verwerkingstechnieken) die tegen aanvaardbare kosten kunnen worden ingezet. Een groot aantal van dit soort technieken is reeds op praktijkschaal ontwikkeld en wordt met wisselend succes toegepast. Nieuwe technieken, gericht op lagere kosten of hogere rendementen, zijn volop in ontwikkeling. Daarbij wordt gebruik gemaakt van thermische, fysische, chemische of microbiologische processen.

Bij de thermische reinigings- en verwerkingstechnieken wordt in het algemeen gebruik gemaakt van directe verhitting door branders, waarbij het te reinigen materiaal rechtstreeks in contact komt met de brandergassen, en van indirecte verhitting door middel van warmtewisselaars, waarbij het te reinigen materiaal door contact met het hete warmtewisselaarsoppervlak wordt verhit. De eerste methode heeft als nadeel, dat grote hoeveelheden verbrandingsgassen ontstaan, waarmee de verontreinigingen worden afgevoerd. In het algemeen is het noodzakelijk, deze afgassen na te behandelen (naverbranden en reinigen), teneinde aanwezige toxische verbindingen te verwijderen.

Bij toepassing van warmtewisselaars wordt weliswaar slechts een geringe verontreinigde afgasstroom verkregen, maar de benodigde apparatuur is in het algemeen aanzienlijk gecompliceerder en duurder dan bij de directe warmteoverdrachtsystemen.

Diëlektrische technieken, bieden in principe de mogelijkheid om de voordelen van bovengenoemde verhittingssystemen te combineren.

Diëlektrische verhitting is een reeds lang toegepaste techniek voor het verwarmen en drogen van materialen. Behandeling van afvalstoffen met behulp van deze technieken heeft tot nu toe echter nog weinig of geen aandacht gekregen.

In deze studie is daarbij gekozen voor de volgende opbouw:

In hoofdstuk 2 worden allereerst de theoretische grondslagen van zowel het radiofrequente als van het microgolf verhittingsprincipe beschreven. Verder wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan de voor- en nadelen van deze technieken in algemene zin. In hoofdstuk 3 wordt de huidige positie van genoemde technieken gezien en wordt aandacht besteed aan de toepassingsmogelijkheden van de diëlektrische techniek. In hoofdstuk 4 worden eerst de mogelijke functies van diëlektrische technieken kort besproken. Daarna wordt in dit hoofdstuk een eerste selectie gemaakt van afvalstoffen, die mogelijk geschikt kunnen zijn voor diëlektrische verwerking. Met de geselecteerde stoffen zijn door de KEMA enkele oriënterende proeven uitgevoerd, teneinde uitspraken te kunnen doen over de ontvankelijkheid van deze stoffen voor verwarmen met diëlektrische technieken (hoofdstuk 5).

In hoofdstuk 6 worden de resultaten van deze proeven geëvalueerd en, voor zover mogelijk, vertaald in suggesties voor praktisch bruikbare behandelingsmethoden.

Omdat de door KEMA uitgevoerde proeven slechts voor een zeer beperkt deel representatief konden zijn voor de mogelijkheden van diëlektrische technieken in de milieutechnologie zijn daarnaast - door gesprekken met diverse TNO-ers - suggesties verzameld voor andere toepassingsmogelijkheden. Deze zijn in hoofdstuk 7 bijeengebracht. Vele daarvan zijn speculatief; getracht is een onderverdeling aan te brengen tussen meer en minder veelbelovende opties. Uitgangspunt was daarbij, dat het in dit vroege ontwikkelingsstadium van deze klasse van toepassingen beter is een speculatieve mogelijkheid te noemen dan haar te verzwijgen.

In hoofdstuk 8 worden, op grond van het voorgaande, van enkele veelbelovende opties, de marktmogelijkheden geschetst - uiteraard voor zover dat in dit stadium mogelijk is.

De rapportage wordt afgerond met conclusies en met aanbevelingen voor eventuele vervolgfases (hoofdstuk 9).

2. DIËLEKTRISCHE TECHNIEKEN

2.1 Theorie diëlektrische techniek

Bij conventionele verwarmingsprocessen wordt de warmte van buitenaf via convection, geleiding of straling aan het oppervlak van het te verwarmen materiaal toegevoerd. Vanaf het oppervlak dringt de warmte door geleiding verder het materiaal in. Bij verwarmen met diëlektrische technieken wordt de warmte direct in het materiaal zelf opgewekt; een warmteoverdrachtsmedium is niet noodzakelijk. Dit biedt voordelen, die liggen op gebied van besparing op proces- en produktkosten, verbetering van de proces- en produktkwaliteit, nieuwe proces- en produktmogelijkheden en verbetering van lokale arbeidsomstandigheden. Daarnaast zijn er echter ook nadelen. In 2.3 en 2.4 worden de voor- en nadelen van diëlektrische technieken ten opzichte van conventionele technieken gegeven. Bij diëlektrisch verwarmen wordt de energie voor verwarming via een hoogfrequent elektrisch veld aan het materiaal toegevoerd.

De in een diëlektricum, onder invloed van een elektrisch veld E (effectief), gegenereerde warmte P_V per volume-eenheid, wordt gegeven door de uitdrukking:

$$P_V = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad \text{W/m}^3 \quad (E \text{ effectieve waarde veldsterkte})$$

waarin f de frequentie en ϵ'' de verliesfactor is; ϵ_0 is de diëlektrische constante van het vacuüm ($8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$).

Uit deze vergelijking blijkt dat de vermogensontwikkeling evenredig is met het kwadraat van de elektrisch veldsterkte E ; verder is de warmteontwikkeling evenredig met de verliesfactor ϵ'' en met de frequentie f .

Wil een afvalstof diëlektrisch kunnen worden verwarmd, dan moet de stof een hier te lage verliesfactor ϵ'' bezitten. Een afvalstof kan dus alleen diëlektrisch worden verwarmd als deze daarvoor geschikte eigenschappen bezit. Een geschikt materiaal voor diëlektrisch verwarmen bevat vrije ladingdragers en/of elektrische dipolen. Onder invloed van het wisselende elektrische veld trachten de ladingen de richting van het veld te volgen. De vrije ladingdragers komen daarbij in trilling; de dipolen roteren.

Temperatuur, ofwel warmte, is bewegingsenergie van moleculen. De extra, door het elektrische veld in het materiaal geïnduceerde bewegingsenergie van de trillende ladingdragers en roterende dipolen wordt door een wisselwerking overgedragen aan naburige moleculen. Dit veroorzaakt de warmteontwikkeling in het diëlektricum, die wordt waargenomen door de optredende temperatuurverhoging van het materiaal. De mate waarin de bewegingsenergie wordt overdragen, ofwel de mate van warmteontwikkeling in het materiaal, wordt dus primair bepaald door de verliesfactor. In bijlage 1 worden hiervan een aantal gegeven. Van lang niet alle materialen zijn verliesfactoren bekend; verliesfactoren van afvalstoffen zijn weinig in de literatuur aangetroffen. Verder zijn door Booij in 1977 diëlektrische constanten van gehalogeneerde koolwaterstoffen verzameld. Deze zijn als bijlage 2 opgenomen.

Als de diëlektrische verliesfactor laag is, is de warmteontwikkeling in het medium gering. Door het verhogen van de elektrische veldsterkte zou deze warmteontwikkeling vergroot kunnen worden. Aan deze veldsterkte is echter een grens, omdat ieder materiaal maar een bepaalde veldsterkte kan weerstaan. Daarboven treedt doorslag op in het materiaal.

Voor lucht bijvoorbeeld ligt bij normale atmosferische omstandigheden, deze doorslagveldsterkte op ongeveer 30 kV/cm. Bij de systeemkeuze, en bij het ontwerp van installaties, moet rekening gehouden worden met de elektrische veldsterkte om doorslag te voorkómen.

Het verhogen van de frequentie is een andere mogelijkheid om de warmteontwikkeling in een materiaal te vergroten. De hogere vermogenswikkeling is een gevolg van het sneller trillen van de ladingen in het materiaal. Echter, ook de frequentie kan niet onbeperkt worden opgevoerd. Bij hogere frequenties neemt de indringdiepte van het elektrisch veld in het materiaal namelijk af, waardoor in het inwendige van het materiaal de vermogensontwikkeling klein is. Het produkt wordt dan voornamelijk aan de buitenkant, dus inhomogeen, verwarmd. In het algemeen zullen radiofrequenties worden toegepast voor grote objecten met kleine vermogensdichtheden. Kleine objecten en hoge gewenste vermogensdichtheden leiden tot microgolftoepassingen.

In de diëlektrische techniek wordt tot 300 MHz gesproken over radiogolffrequenties, daarboven over microgolffrequenties.

De in de praktijk meest gebruikte frequenties zijn 13, 27, rond 900 en 2450 MHz. In Nederland wordt een frequentie van rond de 900 MHz toegepast in industriële processen voor diëlektrisch verwarmen en drogen. Deze frequentie is hier op dit moment echter alleen toegestaan, indien voldaan wordt aan de radiostoringseisen. Voor gedetailleerde informatie over de toegestane frequenties wordt verwezen naar [1]. Deze publicatie is tevens als bijlage 3 in dit rapport opgenomen.

Het voorgaande is van toepassing op produkten, die uit één enkele stof bestaan. Bij afvalstoffen is veelal sprake van een mengsel van stoffen - waarbij één van die stoffen vaak water is. In dat geval ligt de zaak gecompliceerder.

De effectieve verliesfactor van een nat lichaam bestaat uit een bijdrage van de matrix van dat lichaam en een bijdrage van de in de matrix gebonden en vrije vloeistof. Veel gegevens zijn bekend van water als vloeistof; de onderstaande beschouwing geldt echter in principe eveneens voor andere polaire vloeistoffen.

Indien water in voldoende hoeveelheid in de matrix aanwezig is, bepaalt dat in belangrijke mate de effectieve waarde van de verliesfactor, omdat water een zeer hoge diëlektrische constante heeft ten opzichte van andere materialen.

Wanneer de matrix droger wordt, bepalen het gebonden water en de verliesfactor van de matrix zelf de grootte van effectieve verliesfactor. Daarbij is het belangrijk, dat de verliesfactor van water afhangt van de concentratie aan elektrolyten in het water. De verliesfactor van vrij water, waarin zouten zijn opgelost, wordt gegeven door:

$$\epsilon'' = \frac{c \cdot \sigma}{f} + \epsilon''_{\text{dipool}}$$

Hierin is:

c = constante,

σ = de geleidbaarheid van de oplossing,

$\epsilon''_{\text{dipool}}$ = het verlies ten gevolge van de rotatie van watermoleculen (dipolen).

Zowel ϵ'' dipool als σ zijn functies van de frequentie. Het maximum van ϵ'' dipool ligt bij 17 GHz, terwijl bij radiofrequenties ϵ'' dipool zeer gering is. Indien echter in het water zouten zijn opgelost kan ook bij radiofrequenties een zeer grote verliesfactor worden bereikt. Verder zijn zowel ϵ'' dipool als σ temperatuurafhankelijk (ϵ'' dipool neemt af met toenemende temperatuur, en σ neemt toe), hetgeen het geheel nog gecompliceerder maakt.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd, dat de behandelbaarheid van een afvalstof niet eenvoudigweg te bepalen is door het opzoeken van enkele parameterwaarden, of door het uitvoeren van een eenvoudige meting. Vele factoren zijn van belang. Tevens is het duidelijk dat het gedrag van de afvalstof een functie is van de tijd: zo wordt bijvoorbeeld tijdens het drogen van een matrix de elektrolytconcentratie hoger, en veranderen onder meer de frequentie waarbij de verliesfactor ϵ'' dipool maximaal is, en de energiedissipatie in het materiaal. Het gevolg is dat, wanneer experimenten worden uitgevoerd aan een afvalstof, het wenselijk kan zijn deze experimenten bij meerdere frequenties, energieën en afmetingen uit te voeren.

Het voorgaande impliceert in feite de noodzaak van een uitgebreid onderzoekprogramma per afvalstof. In het kader van deze globale studie is zoiets uiteraard niet haalbaar. Vandaar dat, ondanks het voorgaande, gekozen is voor enkele eenvoudige oriënterende proeven, aangevuld met - soms speculatieve - beschouwingen.

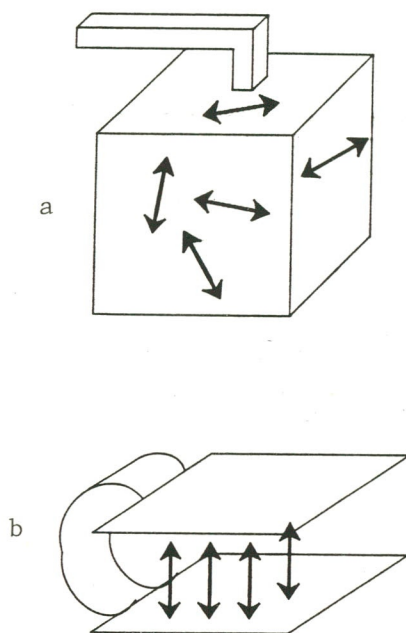
Daarom dient deze studie vooral te worden gezien als een middel om een aantal mogelijke toepassingen te selecteren, die vervolgens in dieper gravende analyses en experimenten zullen moeten worden geëvalueerd.

2.2 Verschillen tussen radiofrequente en microgolfinstallaties

Zowel bij radiofrequent als bij microgolf verwarmen wordt het materiaal verhit door interacties van de moleculen met het elektrische veld. Bij radiofrequent verwarmen (onder 300 MHz) is de golflengte van het elektromagnetische veld meestal veel groter dan de afmetingen van het produkt. Een radiofrequente installatie kan daarom worden beschouwd als

een capaciteit, gevormd door de elektroden, waartussen of waarboven het te verwarmen materiaal wordt geplaatst. In het microgolfgebied (boven 300 MHz) ligt de golflengte van het elektromagnetische veld veelal in dezelfde orde van grootte of is kleiner dan de afmetingen van het te verwarmen object. Het elektrische veld gedraagt zich dan als een golf. De energie wordt niet meer aan het object toegevoerd via geleidende verbindingen naar de elektroden, maar hij wordt er ingestraald, via golfpijpen. Er is daarom een verschil in bouwwijze tussen een microgolfoven en een radiogolfoven ten aanzien van de applicator (het gedeelte van het systeem waarin de warmte wordt opgewekt). Bij een microgolfoven bestaat de applicator uit een gesloten metalen kast, waar de energie ingestraald wordt vanuit een golfpijp. Bij de radiofrequente oven bestaat de applicator uit twee of meer elektroden, waartussen of waarboven zich het te verwarmen materiaal bevindt. Het gevolg is, dat de veldoriëntatie bij radiofrequente behandeling min of meer uniform is, en bij microgolfbehandeling willekeurig (figuur 1).

Er bestaan verschillende uitvoeringsvormen van applicatoren. De meest voorkomende zijn voor microgolven de rechthoekige oven (multi mode oven), de trilholte oven (single mode oven), de golfpijpooven, en de meander oven. Voor radiofrequente toepassingen zijn de meest gebruikelijke elektrodevormen de langsveldelektroden, dwarsveldelektroden en strooiveldelektroden. De laatste kunnen aan beide zijden of aan een zijde van het produkt worden aangebracht. In bijlage 3 worden illustraties van de verschillende typen applicatoren gegeven.



Figuur 1 Verschil tussen microgolf en radiofrequente behandeling

- a: microgolf: willekeurige veld-oriëntatie
- b: radiofrequente: uniforme veld-oriëntatie

In tabel 1 worden enkele belangrijke aspecten van microgolf en radiofrequente verhitting onderling vergeleken.

Tabel 1 Vergelijking eigenschappen radiofrequente en microgolven

PARAMETER	RADIOFREQUENT	MICROGOLF
Frequentie	13.56 MHz (22,2 m) 27.12 MHz (11,1 m)	±900 MHz (±30 cm) 2450 MHz (12,2 cm)
Verliesfactor materiaal:	Moet relatief hoog zijn	Mag laag zijn
Doordringingsdiepte	Enkele decimeters tot een meter	Centimeters tot een decimeter
Produktgrootte	Mag groot en variabel zijn	Klein tot gemiddeld
Produktvorm	Min of meer gelijk- matig van vorm	Elke willekeurige vorm
Generator	Oscillator circuit en industriële triode	Klystron of magnetron
Maximum vermogen buizen	1500 kW per unit	60 kW bij ca. 900 MHz magnetrons, 30 kW bij 2450 MHz voor magne- trons, 50 kW bij 2450 MHz voor klys- trons. Units te koppe- len tot ca. 200 kW
Levensduur buizen	5000 tot 10000 bedrijfsuren	2000 tot 5000 uren magnetrons 15000 uren klystrons
Applicator	Dwarsveld elektroden Langsveld elektroden Strooiveld elektroden	Rechthoekige oven Trilholte oven Golfpip oven Meander oven
Bedrijfs- omstandigheden	Geen belasting nodig bij volledige spanning	(Dummy) belasting noodzakelijk bij volle spanning
Installatie- kosten	ca. f6000 per kW effectief vermogen, (27 MHz)	ca. f9000 per kW effectief (2450 MHz)
Rendement installatie (inclusief randappa- tuur)	50-60%	60-80%

2.3 Voordelen diëlektrische technieken

Wanneer de introductie van diëlektrische verwarmingsmethoden in de milieutechniek wordt overwogen, is het van groot belang stil te staan bij de voordelen die men, op basis van de theoretische achtergronden en beschikbare praktijkvoorbeelden, verwacht te behalen.

Vooralsnog wordt uitgegaan van de volgende potentiële voordelen:

- Wanneer het warmtetransport een probleem vormt, bezit diëlektrische verwarming het voordeel, dat de warmteontwikkeling in het materiaal zelf plaatsvindt. De energiedichtheid kan daarbij hoog zijn.

Bij conventionele processen wordt de warmte door externe verbranding, of door andere externe processen gegenereerd, waarna door warmtetransport de warmte in het produkt wordt gebracht. Bij diëlektrische methoden ontstaat de warmte in het produkt zelf. De techniek kan daarom bruikbaar zijn bij processen, waarbij het warmtetransport de bottleneck in het systeem vormt.

- Er is een hoge snelheid van warmteontwikkeling haalbaar.

Dit verschijnsel is inherent aan het warmteontwikkelingsproces zelf, dat niet wordt beperkt door warmtegeleidingscoëfficiënten of warmteoverdrachtscoëfficiënten, en aan de hoge energiedichtheid, die bereikt kan worden door een zeer sterk veld aan te leggen.

- Diëlektrische ovens en drogers zijn relatief kleine installaties ten opzichte van conventionele installaties met hetzelfde vermogen.

Ook dit aspect hangt nauw samen met de hoge energiedichtheid en warmteontwikkelingsproces.

- De bedrijfskosten van diëlektrische ovens zijn laag; zij vragen minder onderhoud dan bijvoorbeeld gasovens.

- Er kan sprake zijn van een selectieve verwarming, die bijvoorbeeld preferent op water gericht is.

Dit wordt veroorzaakt door de relatief hoge verliesfactor van water. Hierdoor leent de techniek zich bijzonder goed voor onder andere droogprocessen.

- Er treedt geen vermenging op met verbrandingsgassen.

Doordat verbrandingsgassen ontbreken, blijft bij uitdampprocessen een zeer zuivere, geconcentreerde gasstroom over. Dit aspect kan voor milieutoepassingen van cruciaal belang zijn.

- Over het algemeen is procescontrole betrekkelijk eenvoudig te realiseren.

Omdat elektriciteit goed regelbaar is, leent diëlektrische verwarming zich goed voor nauwkeurige regelingen en voor geautomatiseerde procesbesturing. Een belangrijke voorwaarde is echter, dat sensoren gebruikt worden die ook in een diëlektrische omgeving hun werk goed doen. Voor temperatuurcontrole moet men daarbij denken aan infraroodopnemers voor continue processen, of aan zogenaamde fluoro-optische sensoren bij batch toepassingen. Ook ten behoeve van vochtmetingen zijn speciale sensoren beschikbaar. Indien gewerkt wordt met materiaal met een zeer constante kwaliteit, kan bij droogprocessen soms gebruik worden gemaakt van de verandering van diëlektrische eigenschappen van het materiaal, als indicatie voor het vochtgehalte.

- Vaak is een relatief hoog energieomzettingsrendement haalbaar.

Alhoewel het opwekkingsrendement van de electriciteitscentrale natuurlijk mede in de beoordeling moet worden betrokken, levert het volstrekt unieke warmteontwikkelingsprincipe ten opzichte van de conventionele methoden vaak toch een hoger energetisch totaalrendement. De energie wordt opgewekt waar hij nodig is: in het materiaal zelf.

Naast deze vrij algemene opsomming van mogelijke voordelen wordt in enkele literatuurbronnen ook gesproken over allerlei specifieke voor-

delen die niet in algemene zin gelden. Bekende voorbeelden hiervan zijn: het optreden van de mogelijkheid om van batchprocessing over te gaan op continu processing, of verminderde materials handling, doordat met een zeer compacte productielijn gewerkt kan worden.

- Door de combinatie van conventioneel drogen met diëlektrisch drogen zijn soms goede resultaten te bereiken.

Men kan bijvoorbeeld de grote massa water met conventionele middelen verwijderen, en het laatste restje langs diëlektrische weg.

Voor huishoudelijk gebruik bestaan magnetronovens, waarbij het echte bakken (bruine korst) langs conventionele weg (bijvoorbeeld met hete lucht) plaatsvindt.

2.4 Nadelen diëlektrische technieken

Natuurlijk zijn er, behalve de genoemde voordelen, ook een aantal niet te veronachtzamen nadelen verbonden aan de toepassing van diëlektrische behandelingsmethoden. De meest belangrijke en evidente nadelen zijn:

- Professionele diëlektrische verhittingsinstallaties zijn over het algemeen kostbaar.

Afhankelijk van de complexiteit van de installaties en regelapparatuur moet men al gauw rekenen op een bedrag per effectueel opgewekte kW vermogen in het materiaal van rond de f 6.000,- voor complete radiofrequente installaties, en van rond de f 9.000,- voor complete microgolfinstallaties.

- Een diëlektrische verhittingmethode is materiaal selectief; daarom is niet elk materiaal met deze methode te verhitten.

In bepaalde gevallen kan dit een voordeel zijn, maar men zal altijd eerst moeten testen of een bepaalde stof zich überhaupt leent voor diëlektrische verhitting, of hij ontvankelijk is voor microgolf of radiofrequente golven. Dit hangt niet alleen van de eigenschappen, maar ook van de dimensies van het object af.

- Door verontreinigingen in het basismateriaal kan plaatselijke inbranding of vonkoverslag optreden.

Dergelijke verschijnselen zijn het gevolg van een plaatselijk afwijkend diëlektrisch gedrag van het materiaal. Dit probleem kwam onder andere voor bij proeven met papierdrogen, waarbij in eerste instantie ontmoedigende resultaten werden bereikt met microgolven; op de papierbaan ontstonden overal zwarte 'inbrandpuntjes'. Verbeterde keuze van procesparameters leidde later tot bevredigende resultaten.

- Vooralsnog worden diëlektrische ovens en drogers slechts tot een beperkte capaciteit geleverd: voor microgolf tot circa 200 kW, voor hoogfrequent tot circa 2000 kW.

Deze belangrijke beperking houdt in, dat de methode slechts bij uitzondering geschikt is om als enige methode in bulkprocessen toe te passen. Grotere vermogens zijn technisch niet onmogelijk, maar economisch onaanvaardbaar. Diëlektrische technieken kunnen door hun specifieke eigenschappen wel worden toegepast als onderdeel in een bulkproces, bijvoorbeeld om het laatste restje water uit een stof te verdampen.

Daarnaast is bij de fabrikanten een bescheiden neiging tot capaciteitsvergroting aanwezig.

- De optredende temperatuur is niet altijd goed beheersbaar

Doordat de verhitting in het materiaal zelf plaatsvindt, is soms het aanbrengen van een bovenste temperatuurbegrenzing onmogelijk.

- Onvoorspelbare verontreinigingen, respectievelijk onbekende samenstellingen, geven een onvoorspelbaar opwarmgedrag

Voor milieutechnische toepassingen kan het een probleem zijn, dat de te behandelen stof een aantal niet nader geïdentificeerde componenten bevat. Omdat het verhittingseffect afhankelijk is van de diëlektrische eigenschappen van de stof, is met name de temperatuurstijging bij een bepaald aangebracht vermogen niet nauwkeurig voorspelbaar. Wanneer bovendien de verliesfactor stijgt bij toename van de temperatuur, kan de

temperatuur plotseling zeer snel oplopen ('thermische runaway'). Een wisselend vochtgehalte van de stof heeft eveneens grote consequenties voor de verliesfactor van het materiaal.

- Voor het milieutechnische toepassingen is er sprake van een typische 'high tech' oplossing voor een juist zeer laagwaardige stof.

In principe behoeft dit geen nadeel te zijn, maar omdat economische aspecten meestal doorslaggevend zullen zijn, kan dit toch een belangrijke drempel vormen. Alleen wanneer aan diëlektrische behandeling specifieke voordelen verbonden zijn, die de hoge kosten van deze techniek rechtvaardigen, zal zij worden toegepast.

- Diëlektrische verhitting is een onbekend proces in de milieutechnologie, waardoor zich allerlei onverwachte problemen zullen voordoen.

Het doel van dit evaluatie-onderzoek is mede het onderkennen van dergelijke problemen. Dit zal echter niet altijd mogelijk zijn, en vaak zal men moeten leren door ervaring.

In tabel 2 worden de voor- en nadelen van diëlektrische technieken nog eens kort samengevat.

Tabel 2 Algemeen overzicht van de voor- en nadelen van de toepassing van diëlektrische technieken in de milieutechnologie

Voordelen	Nadelen
Lokale warmteontwikkeling, nl. in het materiaal zelf, met hoge energiedichtheden	Dure installatie
Hoge snelheid warmteontwikkeling	Materiaalselectief; niet elk materiaal is geschikt
Relatief kleine installaties	Onbekend proces in milieutechnologie
Bedrijfs- en onderhoudskosten zijn relatief laag	Door verontreiniging in materiaal vonkoverslag of inbranding mogelijk
Selectieve warmte bv. alleen op water gericht	Beperkte capaciteit ovens/drogers
Geen vermenging met verbrandingsgassen	MG:0,2 MW; RF:2 MW
Procescontrole goed te realiseren	High tech oplossing voor laagwaardige stoffen
Vaak zeer hoog energierendement mogelijk	Onvoorspelbare verontreinigingen geven onvoorspelbaar opwarmgedrag
Soms zeer specifieke voordelen haalbaar	
Combinatie van conventionele verwarming met diëlektrische soms aantrekkelijk	

Al met al kan voorlopig worden geconcludeerd dat de bruikbaarheid van de techniek tot op zekere hoogte op ad hoc basis, van geval tot geval moet worden gezien, waarbij in tabel 2 genoemde voor- en nadelen echter wel richtingbepalend zijn. Toch zal het in concrete situaties vaak niet mogelijk zijn, op voorhand te stellen dat diëlektrische methoden niet bruikbaar zijn vanwege genoemde nadelen, of anderzijds, dat zij DE oplossing vormen voor het betreffende probleem.

Indien het gebruik van diëlektrische technieken wordt overwogen, is het van belang de volgende kernvragen te stellen:

- Wat is er mis met het huidige verhittings proces, waarom voldoet dat niet?
- Kan het proces überhaupt met diëlektrische technieken?
- Wat zijn de kosten van het huidige proces?
- Hoeveel kost het proces met microgolf of radiofrequent methoden?
- Beschouw de meer- of minderkosten ten opzichte van de bereikbare voordelen, de waarde van de procesverbetering. Levert dit een 'return on investment'?

Een heel belangrijke vuistregel, die zelfs door fabrikanten van diëlektrische apparatuur wordt gehanteerd, is:

Pas alleen diëlektrische techniek toe, wanneer die unieke voordelen bezit boven andere technieken.

Een belangrijk probleem bij het interpreteren van meerwaarden en kosten-effectiviteit van milieumaatregelen is overigens het ontbreken van voldoende objectieve criteria. Om de meerwaarde van een betere behandelingsmethode in geld uit te drukken moet men ook de vermindering van de milieuschade die daardoor onstaat monetair kwantificeren.

Dit probleem krijgt de laatste jaren meer aandacht dan voorheen; de oplossing staat echter nog in de kinderschoenen, en het is zeer de vraag of hij daar ooit uit komt.

Het gevolg is, dat in vele gevallen ook de beslissing om op diëlektrische behandeling over te gaan, uiteindelijk mede op basis van subjectieve overwegingen moet worden genomen.

Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat, vanwege de specifieke eigenschappen van de diëlektrische verwarmingstechniek soms geheel nieuwe produkten worden ontwikkeld. Een voorbeeld betreft de zogenaamde fast food verpakkingen.

3. DE HUIDIGE POSITIE VAN DIËLEKTRISCHE TECHNIEK

3.1 Radiofrequente verhitting

Momenteel worden radiofrequente verhittingstechnieken hoofzakelijk ingezet in de kunststoffenbranche, waarbij de techniek met name gebruikt wordt om thermoplasten aan elkaar te versmelten (het 'lassen' van kunststoffen). Daarnaast wordt deze techniek in de houtindustrie toegepast om lijmverbindingen versneld te laten uitharden.

Verder worden, veelal in buitenlandse literatuur, diverse, fraaie succes-story's verteld van toepassingen van deze techniek. Een paar voorbeelden daarvan worden gegeven in [3] en [4].

Hierna wordt op enkele belangrijke toepassingen kort nader ingegaan.

- Het vulcaniseren van rubber

Dit is één van de belangrijkste toepassingen in de industrie tot nu toe. Omdat met conventionele verwarmingsmethoden het slecht geleidende rubber slechts zeer langzaam opgewarmd kan worden (van buitenaf), betekent de directe diëlektrische (radiofrequent) verhitting van binnenuit een enorme reductie van de proces-(cyclus-)tijd.

Rubberprofielen worden nog vrijwel uitsluitend met microgolf (2450 MHz) gevulcaniseerd.

Opmerkelijk is in dit verband, dat men zelfs aan de produktzijde (namelijk de rubbersamenstelling) tot verandering overgaat om te bevorderen, dat het materiaal zich optimaal leent voor diëlektrische verhitting. Het is namelijk mogelijk door 'dopes' toe te voegen, het materiaal meer ontvankelijk te maken voor diëlektrische behandeling (hogere diëlektrische verliesfactor).

- Het versneld uitharden van lijmverbindingen

Eén van de eerste toepassingen van radiofrequente technieken betrof het versneld uitharden van lijm in houtverbindingen. Deze techniek wordt ook in Nederland door fabrikanten van meubels, deuren, kozijnen en dergelijke, toegepast.

Toepassen van diëlektrische techniek betekent in dit geval dat de lijm binnen enkele minuten in plaats van binnen enkele uren uitgehard is, en

dat daarna houtbewerkingen als frezen, schaven, schuren en dergelijke kunnen worden uitgevoerd op het gelijmde hout - zonder lange wachttijden en opslag van de gelijmde delen.

- Het versmelten (lassen) van plastics

Dit is, in vermogen uitgedrukt, samen met versneld uitharden van gelijmde houtverbindingen, momenteel de belangrijkste toepassing van diëlektrische verwarming. Hiervoor wordt meestal radiofrequente verhitting toegepast.

3.2 Microgolf verhitting

Alhoewel het principe van microgolf verhitting eigenlijk al bekend is sinds de tweede wereldoorlog, en er al vanaf het prille begin veel ophef werd gemaakt over de potentiële mogelijkheden, heeft de grote doorbraak van de techniek voor industriële processen vooralsnog niet plaatsgevonden. Wel is ondertussen de microgolfoven niet meer weg te denken uit de Amerikaanse huishouding, terwijl ook in enkele Europese landen de microgolfoven voor huishoudelijk gebruik aan zijn opmars begint. In Nederland is de penetratie van deze ovens in huishoudens ondertussen sterk toegenomen, maar de groei is toch minder explosief dan werd verwacht. Waarschijnlijk is dit onder andere het gevolg van een aversie voor iets dat met 'straling' te maken heeft. Daarnaast heeft Nederland geen traditie op het gebied van 'fast-foods'. Verder is er onlangs vanuit de Consumentenbond nogal wat negatieve publiciteit geweest over inhomogene verwarming in huishoudovens, waardoor bacteriën niet afdoende werden gedood, en de voedselkwaliteit verdacht was [2].

Wat industriële toepassingen betreft staat Nederland nog geheel aan het begin van een mogelijke algemene acceptatie van microgolfverhitting. Er zijn, gesteund door NOVEM, enkele projecten uitgevoerd waarbij, met name in de voedingsmiddelenbranche, microgolfovens binnen industriële processen werden toegepast. Ook de KEMA en TNO hebben voor enkele geïnteresseerde industrieën activiteiten ontplooid waarbij mogelijkheden voor toepassingen werden onderzocht. Vooralsnog is de implementatie van industriële microgolfovens/drogers in Nederland beperkt.

Uit het buitenland zijn echter verschillende voorbeelden bekend, waarbij microgolfovens en -drogers met veel succes zijn ingezet voor industriële processen. Enkele gerealiseerde toepassingen van diëlektrische ovens en drogers, voor zover uit literatuur en andere bronnen kon worden getraceerd, worden in 3.3 gegeven.

3.3 Enkele toepassingsvoorbeelden

In [5] worden een groot aantal toepassingsmogelijkheden genoemd, waarmee de afgelopen jaren is geëxperimenteerd en/of waarvoor momenteel commerciële installaties beschikbaar zijn. Daarbij worden zowel radiofrequente als microgolftoepassingen genoemd. Uitgedrukt in geïnstalleerd vermogen en in aantallen installaties (huishoudelijk gebruik uitgezonderd) speelt radiofrequente verhitting de hoofdrol.

In dit verband zijn de volgende voorbeelden vermeldenswaard:

- 1 - Het drogen van diverse soorten voedingsmiddelen.
Zowel microgolf als radiofrequente verhitting.
- 2 - Het drogen van keramische producten.
Microgolf en radiofrequent, ondertussen vrij algemeen.
- 3 - Het drogen van vloerbedekking.
Radiofrequent, 1982.
- 4 - Het drogen van hout.
Microgolf en radiofrequent, enkele toepassingen bekend.
- 5 - Het drogen van granulaire anorganische stoffen.
Microgolf, 1982.
- 6 - Het restaureren van asfalt-wegdek.
Mobiele microgolf-installatie, 1974, 1988.
- 7 - Het voorverwarmen en behandelen van PVC.
Microgolf en radiofrequent.

90-250/R.22/HVG

33

8 - Het voorverwarmen van rubber.

Microgolf, 1976.

9 - Drogen van inkten in de grafische industrie. Toepassing van IR, UV (voor uitharden) en diëlektrische droging zou tegen elkaar moeten worden afgewogen.

10- Pasteuriseren, steriliseren, blancheren (kort koken) van voedingsmiddelen. Ook in andere industrietakken denkbaar? Wat zijn de voordelen?

In hoofdstuk 6 zal op enkele (van de nu nog zeer schaarse) in ontwikkeling zijnde milieutechnologische toepassingen worden ingegaan.

4. EERSTE SELECTIE VAN KANSRIJKE AFVALSTOFFEN

4.1 De keuzeproblematiek

Om de mogelijkheden van diëlektrische verhitting in de milieutechnologie te kunnen evalueren moeten voorbeeldstoffen worden geselecteerd, die zo mogelijk representatief zijn voor een grotere klasse van stoffen. Uitgangspunt van de keuze van deze stoffen is de lijst van prioritaire afvalstoffen, die in het zogenaamde PRIAF-project van VROM is opgesteld. Dit betreft een verzameling van 78 afvalstoffen. Eveneens in het kader van PRIAF is een kleinere lijst opgesteld, van 22 stoffen met de naar verhouding hoogste prioriteit.

Een ander uitgangspunt bij de selectie is geweest, dat bij het diëlektrisch verwarmen van een stof verschillende doeleinden kunnen worden nagestreefd. Met name kunnen de functies drogen, uitdampen, ontleden, katalytische werking, breken, scheiden en infrarood detectie worden onderscheiden.

Bij de selectie is er in de eerste plaats naar gestreefd, van elk van deze functies een voorbeeld op te nemen. Waar mogelijk is dat voorbeeld gekozen uit de kleine PRIAF-lijst. Was daar geen geschikte stof voorhanden, dan werd er één uit de grote PRIAF-lijst geselecteerd. En wanneer ook dat niet lukte is een voorbeeldstof buiten de PRIAF-stoffen gekozen. In dit verband speelt de eerder genoemde overweging, dat diëlektrische behandeling qua vermogen minder geschikt is voor bulk(afval)stoffen mede een rol. Echter, niet alle in de PRIAF-lijst voorkomende stoffen zijn bulkafvalstoffen. Bovendien zal behandeling in de praktijk op meer locaties, respectievelijk in meerdere parallelle units plaatsvinden. En tenslotte moet nog in aanmerking worden genomen, dat allerlei 'stoffen' uit de PRIAF-lijst in werkelijkheid uit vele, onderling zeer verschillende componenten bestaan, die men in het nieuwe afvalbeleid juist gescheiden tracht te houden (bijvoorbeeld bouw- en sloopafval).

Op deze basis zijn in tabel 3 afvalstoffen aangegeven, waarmee 'iets' gedaan kan worden met behulp van diëlektrische verhitting. Daarbij is de nummering van de grote PRIAF-lijst aangehouden. Stoffen, die tevens op de kleine PRIAF-lijst voorkomen, zijn met een pijl in de kantlijn aangegeven. Verder zijn de totale hoeveelheden in tonnen per jaar vermeld,

alsmede de hoeveelheden droge stof in tonnen per jaar.

Ook zijn in enkele woorden de huidige knelpunten van deze stoffen aangeduid. De volgende kolom geeft de principiële geschiktheid van deze stoffen voor diëlektrische behandeling weer. Daarbij staat de verliesfactor centraal; in dat verband speelt de mate, waarin zo'n stof kan worden aangepast ten behoeve van diëlektrische behandeling, bijvoorbeeld door toevoegingen, mede een rol (zie ook bijlage 1).

In de daaropvolgende kolom worden de klassen van diëlektrische behandelingen aangegeven. De verklaring van de daarbij gebruikte letters staat onderaan tabel 3 vermeld. Ter toelichting het volgende:

Drogen (D).

Dit betreft het uitdampen of -koken van water. De hoge verliesfactor van water maakt het mogelijk, om kleine hoeveelheden water, die zich in andere stoffen bevinden, te verwijderen. Die 'andere stoffen' kunnen vloeistoffen zijn, of korrels, of een gesteentematrix. Zelfs kristalwater kan op die manier worden verwijderd.

Het unieke van deze methode is het verschijnsel van gedifferentieerde verhitting. Het water wordt heet; andere stoffen blijven, als hun verliesfactor voldoende laag is, relatief koud. Zij worden slechts verwarmd als gevolg van de warmteoverdracht (geleiding en convection) uit het water.

Daarom kan, wanneer het uitdampen of -koken voldoende snel plaatsvindt, met deze methode in principe energie worden bespaard.

Uitdampen (U).

Bij uitdampen gaat het om vluchtige bestanddelen, zoals koolwaterstoffen, halogenen en halogeenverbindingen, en andere vluchtige verbindingen, die op deze manier uit een vloeistof of uit een matrix worden verwijderd.

Vaak zal het verwijderen van water aan dit uitdampen voorafgaan.

Ontleden (O).

Bij ontleden gaat het in het algemeen om chemische stoffen, die boven een bepaalde temperatuur worden afgebroken. Daarbij kan de betreffende stof rechtstreeks, danwel via de omgeving, diëlektrisch worden verhit.

Katalytische werking (K).

Behalve door de temperatuur kan de afbraak van een stof ook door de diëlektrische (elektromagnetische) straling zelf rechtstreeks worden beïnvloed. In dat geval is er sprake van een katalytische werking. Over dit effect is nog weinig bekend. Het is namelijk moeilijk om na te gaan, of de effecten die optreden toe te schrijven zijn aan druk- en/of temperatuurverhoging danwel aan katalytische werking. Het is mogelijk dat in de toekomst blijkt, dat alle effecten met betrekking tot versnelling van de reacties toe te schrijven zijn aan uitsluitend het effect van temperatuur- en drukverhoging. Daarom wordt een eventuele katalytische werking van diëlektrische golven in dit stadium min of meer pro memorie genoemd.

Breken (B).

Bij breken maakt men in het algemeen gebruik van het feit, dat ook kristalwater door diëlektrische verhitting wordt verwarmd. Door de aldus inwendig gevormde stoom treedt breuk op, bijvoorbeeld van beton. (Dit kan bijvoorbeeld van belang zijn voor selectieve sloopwerkzaamheden bij kerncentrales).

Scheiden (S).

Scheiden van stoffen kan plaatsvinden door het differentiële verhittingseffect van diëlektrische verwarming te benutten. Op deze wijze zou bijvoorbeeld 'gefractioneerd smelten' van kunststoffen kunnen worden werkstelligd.

Infrarood detektie (I).

Hierbij maakt men eveneens gebruik van de verschillen in stofeigenschappen, die leiden tot temperatuurverschillen bij diëlektrische verwarming. Die temperatuurverschillen worden vervolgens door een IR-detektor gemeten, en op basis van die meting kan vervolgens scheiding plaatsvinden.

Tabel 3 Selectie van afvalstoffen ten behoeve van onderzoek diëlektrische verhitting

Nummer PRIAF- lijst	Afvalstroom	Hoeveelheid t/j	Hoeveelheid ds t/j	Huidige knelpunten	Geschiktheid voor diëlektrische be- handeling	Klasse diëlektr. behandeling	Opmerkingen
1	afgewerkte olie	110,000	110,000	hoogwaardige grondstof; bodemverontr.; zuivering			fabriek voor verwerking is al in oprichting
2/3	aktief kool			vergiftiging kool met geabsorb. materiaal	regeneren; kan goede diël. toepassing zijn	U, 0	*in combinatie met 55
15/16	bestrijdingsmiddelen	950	950	toxiciteit	ontleden mogelijk	0	weinig bekend over ver- liesfactor
17	bilge olie	30,000	30,000	emulgatoren, evt. water; als 1		U	zeer kleine verliesfac- tor voor olie/grote ver- liesfactor van water
18	afgewerkte bleekarde- slurry	30,000	15,000	scheiden diatomeenaarde van olie	eerst grof drogen; diël. drogen, olie winnen	D, U	
19	residu boorspoeling	225,000	20,000	als 18		D, U	
21	condensatoren	130	130	PCB's		0	
22	produktie-afval bestr. middelen	14,000	14,000	als 15/16		0	
24	filterkaarsen + slib aardgaszuivering	125	125	kwik		U	
25	fluorescentie poederafval (tl + beeldbuizen-prod.)			als 24		U	

Tabel 3 (vervolg)

Nummer PRIAF- lijst	Afvalstroom	Hoeveelheid t/j	Hoeveelheid ds t/j	Huidige knelpunten	Geschiktheid voor diëlektrische be- handeling	Klasse diëlektr. behandeling	Opmerkingen
26	fluorescentie slib	100	30	als 24		U, D	
28	gasontladingsbuizen	4,200	4,200	als 24		U	
30	bouw- en sloopafval	7,500,000	7,500,000	vele	breken van beton	B	*
35	afval houtverduurzaming	1,000	1,000	PAK's		O, U	weinig bekend over ver- liesfactoren
→ 36	jarosiet	300,000	100,000	Cd-probleem;	ontsluiting	B	industrie is op weg naar een oplossing
→ 37	batterijen	4,000	4,000	als 24		U, D	
38	kwikgevulde thermometers	6	6	als 24		U	
→ 43	kunststofafval	400,000	400,000	menging	homogeniseren? scheiden door ge- fractioneerd smelten?	S, I	
44	pvc weekmakerrestanten				omzetting	O, K	
45	vinylchloride monomeer- afval		800	als 44		O, K	
47	ladingsrest.; chem. (incl. eetb. olie) ballastwater	94,000	1,400	mengsel van stoffen	eerst voordrogen; diël. water verwijde- ren, nadrogen/zui- veren	D,O,U,K	
→ 48	ladingsrest.; waswater chem. + eetb. olie	185,000	9,000	als 47			
49	ladingsrest.; (olie ge- concentreerd) waswater	1,010,000	500,000	als 47			

Tabel 3 (vervolg)

Nummer PRIAF- lijst	Afvalstroom	Hoeveelheid t/j	Hoeveelheid ds t/j	Huidige knelpunten	Geschiktheid voor diëlektrische be- handeling	Klasse diëlektr. behandeling	Opmerkingen
50	ladingsrest.; ballast water/olie	650,000	10,000	als 47			
55	vluchtige halogeen- koolwaterstoffen	47,000	47,000	toxiciteit	ontleden, bv. CFK's	U, 0	* enkele demonstratie- stoffen uitzoeken
→ 61	verpakkingsafval huish.	950,000	780,000	mengsel van stoffen	differentiële ver- hitting, IR-detektie	I	*
76	verontreinigde grond	400,000	200,000	vloeib. verontreini- gingen	in situ behandeling	D,U,0	* reeds is VS gereali- seerd op pilotplant- schaal
-	in situ rookgassen			stankcomponenten, dioxinen?	speciale λ nodig? (afschermen)	0, K	* p.m.; vermoedelijk niet in dit project realiseerbaar
-	autobanden	65,000	65,000	verbrandingsemissies; belasting deponieën	uitsmelten metalen delen	S	*
<u>Codering diël. behandeling</u> D = Drogen U = Uitdampen 0 = Ontleden k = Katalytische werking B = Breken S = Scheiden I = Infrarood detectie → komt ook voor op "kleine PRIAF-lijst" * eerste selectie							

4.2 De selectie van afvalstoffen

Aan de screening van de PRIAF lijst (met aanvullingen) (tabel 3), zoals die in 4.1 heeft plaatsgevonden, lagen twee overwegingen ten grondslag. Ten eerste is getracht langs deze weg een aantal stoffen te kiezen, die geschikt waren voor het uitvoeren van enkele eenvoudige proeven binnen het kader van dit project. En ten tweede lag het in de bedoeling, in bredere zin te evalueren, welke afvalstoffen voor diëlektrische behandeling in aanmerking zouden kunnen komen. Immers, de mogelijkheden om in dit project experimenteel werk te verrichten, zijn beperkt.

De als positief aangeduide stoffen (* in tabel 3) zijn:

- actief kool
- bouw- en sloopafval
- vluchtige halogeenkoolwaterstoffen
- huishoudelijk verpakkingsafval
- verontreinigde grond
- in situ rookgassen
- autobanden

Het is duidelijk, dat deze lijst nog een 'vertaalslag' behoeft om monsters op te leveren die geschikt zijn voor het uitvoeren van eenvoudige proeven in een laboratoriumsituatie. Ook al omdat de KEMA niet over de faciliteiten beschikt voor het adequaat hanteren van afvalstoffen, wanneer daar bijvoorbeeld gevaarlijke emissies bij zouden optreden. KEMA beschikt over een professionele radiofrequentie (RF) installatie en over een semi-professionele Microgolf (MG) installatie (zie hoofdstuk 5).

Hierna volgen enige bijzonderheden over de eerder genoemde geselecteerde stoffen.

1. Actief kool

Actief kool komt in vele soorten en maten voor, afhankelijk van de toepassing. De werking van het actief kool in de verschillende toepassingen betreft vrijwel steeds het afvangen van vluchtige koolwaterstoffen. Het belangrijkste onderscheid dat in dit verband kan worden gemaakt is toepassing in water of lucht.

De functie van diëlektrisch verwarmen zou kunnen liggen in het regenereren van actief kool. In het algemeen zullen koolwaterstoffen dan samen met water (indien aanwezig), of als pure damp vrijkomen. Voor deze studie is het daarom voldoende, om twee soorten kool te nemen, bestemd voor respectievelijk filtering van water en van lucht. Beide worden met water verzadigd en diëlektrisch verwarmd. Daarnaast wordt een proef uitgevoerd met het droog aan diëlektrische straling blootstellen van beide koolsoorten (2 proeven). Gemeten wordt de temperatuur als functie van de tijd en het gewicht voor en na de behandeling. Norit heeft twee soorten actief kool ter beschikking gesteld.

2. Beton

Beton bevat kristalwater en vrij water. Door beton aan diëlektrische straling bloot te stellen wordt het vrije water, en mogelijk het kristalwater, verhit en damp uit of veroorzaakt spanning. De structuur van het beton wordt daardoor verbroken.

Bijvoorbeeld voor sloopwerkzaamheden op moeilijk toegankelijke plaatsen, zoals bij kerncentrales, kan deze methode van belang zijn, onder andere omdat mobiele robots goed kunnen worden gebruikt als dragers van diëlektrische apparatuur.

Enkele stukken beton zijn door het IBBC-TNO ¹⁾ geleverd. De proeven kunnen worden uitgevoerd met droog beton (zonder vrij water) en met nat beton.

3. Vluchtige halogeenkoolwaterstoffen (p.m.)

De meest interessante vraag is in dit verband of zich, bij diëlektrische verwarming in de dampfase, radicalen vormen. Om dit te onderzoeken is echter een vrij uitgebreide experimentele opstelling nodig, waarvan de realisatie buiten de mogelijkheden van dit project valt. Een noodzakelijke, maar niet voldoende voorwaarde voor deze radicalenvorming is

¹⁾ Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, TNO, Rijswijk

echter, dat de betreffende stoffen überhaupt door diëlektriek worden verwarmd. Hierover zijn wel gegevens voorhanden (bijlage 2). Het is overigens de vraag of voor ontleding daarvan de verliesfactor de belangrijkste parameter is.

De genoemde stoffen worden waarschijnlijk minder gemakkelijk tengevolge van hoogfrequent straling verwarmd, maar wellicht beter door microgolven. Het onderzoek aan deze stoffen zou moeten worden uitgevoerd in een zuurkast. Mede vanwege de beschikbaarheid van voornoemde gegevens, is besloten in het kader van dit project geen proeven met deze stoffen uit te voeren.

4. 'Huishoudelijk verpakkingsafval' (p.m.)

De gedachte, die oorspronkelijk ten grondslag lag aan het uitvoeren van proeven met huishoudelijk verpakkingsafval, was die van het aanbrengen van temperatuurverschillen om aldus, met IR-detectie, verschillende materiaalsoorten te kunnen onderscheiden. In tweede instantie werd niet voor deze weg gekozen. Een reden hiervoor is, dat veel verpakkingsresten nog wat water bevatten. De verliesfactor van water is veel hoger dan die van allerlei verpakkingsmaterialen, zodat voornoemde differentiële verhitting niet zal plaatsvinden. Een tweede reden is, dat huisvuilscheidingsinstallaties tegenwoordig minder populair worden, omdat scheiding aan de bron goedkoper en veel doelmatiger blijkt te zijn. Als alternatief voor deze proeven zijn daarom twee andere gekozen, namelijk:

4a. Kunststofafvallen

Door diverse soorten kunststofafvallen aan hoogfrequent of microgolfstraling bloot te stellen, worden zij verschillend verhit, en kunnen daarna met IR-detectie worden onderscheiden. Voor deze studie is het meten van de opwarming voldoende ($T(t)$). CPM-TNO ²⁾ heeft voor dit doel enkele materialen ter beschikking gesteld.

2) Centrum voor Polymere Materialen TNO, Delft

4b. Afsmelten van PVC-kabels

Omdat PVC door diëlektrische straling verwarmd wordt is het mogelijk, langs deze weg de isolatie van elektriciteitskabels af te smelten, en aldus kunststof en koper van elkaar te scheiden. Hiermee is in het kader van deze studie een proef uitgevoerd. KEMA heeft daartoe enkele stukken sterkstroomkabel ter beschikking gesteld.

5. Verontreinigde grond

Het onderzoek naar de mogelijkheden van diëlektrische behandeling ten aanzien van verontreinigde grond vertoont gelijkenis met dat van actief kool. Ook in dit geval gaat het om een poreuze massa, waarin zich water en verontreinigingen bevinden. Veel verontreinigingen zullen samen met het water uitdampen. De proef zou kunnen bestaan uit het diëlektrisch verwarmen van met water verzadigde grond, en van grond in droge toestand, met meting van $T(t)$ en gewicht vóór en na de bestraling. MiT ³⁾ heeft voor enkele soorten grond en slib gezord.

6. Autobanden

Er is een aanzienlijk verschil tussen banden van personenauto's en die van bedrijfswagens; die van bedrijfswagens zijn namelijk van een hogere kwaliteit, bevatten minder vulstof en meer rubber. Bovendien is het rubber van de banden van personenauto's synthetisch (SBR), terwijl bedrijfswagenbanden van natuurrubber zijn vervaardigd.

CPM-TNO heeft beide soorten monsters voor dit project ter beschikking gesteld. Van beide soorten zal worden onderzocht, in hoeverre langs deze weg verwarming kan plaatsvinden. Het uiteindelijke doel is om na te gaan, of pyrolyse/verkoling kan worden gerealiseerd.

³⁾ Afdeling Milieutechnologie, TNO, Apeldoorn

5. KEMA-ONDERZOEK

In de voorgaande hoofdstukken is reeds geconstateerd, dat de toepassing van diëlektrische technieken bij de behandeling van afvalstoffen tot nu toe nog weinig of geen aandacht heeft gekregen. Om enig inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden zijn door KEMA oriënterende proeven uitgevoerd aan de in het vorige hoofdstuk genoemde, geselecteerde afvalstoffen, die enerzijds een redelijke prioriteit bezitten en die zich anderzijds lenen voor het uitvoeren van eenvoudige proeven. Dit laatste vanwege het beperkte budget en het oriënterende karakter van het onderzoek.

De intentie van de uitgevoerde proeven was om na te gaan, of de aangeleverde afvalstoffen op diëlektrische wijze kunnen worden verwarmd. Voor de functies, die aan deze behandeling kunnen worden toegekend, wordt verwezen naar het vorige hoofdstuk.

Aangezien dit een oriënterende studie is, valt het meten en bepalen van de vermogens- en energiebalans, alsmede het bepalen van de meest optimale verwarmingsgeometrie buiten het kader van dit onderzoek.

Voor de achtergronden van de diëlektrische techniek wordt in dit verband mede verwezen naar [1]. Deze publicatie is als bijlage 3 in dit rapport opgenomen.

Hierna worden de belangrijkste gegevens van het uitgevoerde onderzoek gegeven. Voor een uitgebreider beschrijving van het KEMA-onderzoek wordt verwezen naar het KEMA-rapport 90-3035 [6].

5.1 Afvalstoffen

De experimenten zijn uitgevoerd met de volgende afvalstoffen:

- Actief kool

Voor deze studie zijn twee soorten kool gebruikt, bestemd voor respectievelijk filtering van water (2 mm korrelgrootte) en van lucht (0,8 mm korrelgrootte).

De experimenten zijn uitgevoerd met kleine hoeveelheden van zowel droog als nat materiaal. Ter verkrijging van met water verzadigd materiaal zijn zowel de 2 mm als de 0,8 mm korrels gedurende 5 dagen in water geweekt.

- Beton

De proeven zijn uitgevoerd aan enkele plakken droog beton.

- Kunststofafval

De proeven zijn uitgevoerd aan polyetheen van lage (LDPE) en hoge (HDPE) dichtheid, aan nylon en aan PVC. In alle gevallen in de vorm van folie en plaat.

- Kabel

Proeven zijn uitgevoerd aan stukken sterkstroomkabel met een isolatie van vernet polyetheen (XLPE) en een mantel van PVC.

- Extractieslib

De fijne (meest vervuilde) fractie van slib van een aantal waterbodems.

- Verontreinigde grond

Experimenten zijn uitgevoerd aan tuingrond, en aan grond met PAK's ¹⁾.

- Autobanden

Proeven zijn uitgevoerd aan materiaal afkomstig uit banden van personenauto's en van bedrijfswagens.

5.2 Experimentele aanpak

5.2.1 Diëlektrische installaties

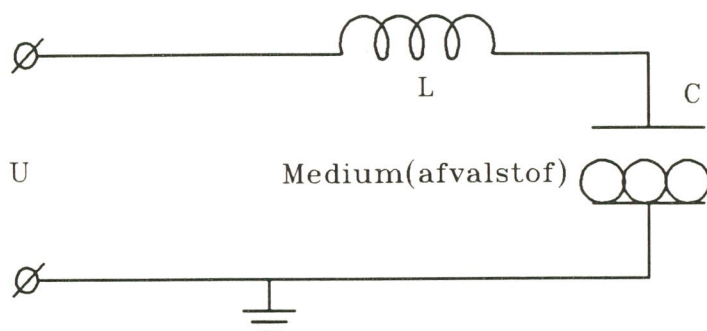
Voornoemde oriënterende proeven zijn uitgevoerd in twee installaties te weten:

- radiofrequente installatie (10kW, 27 MHz)
- microgolfoven (2 kW, 2450 MHz)

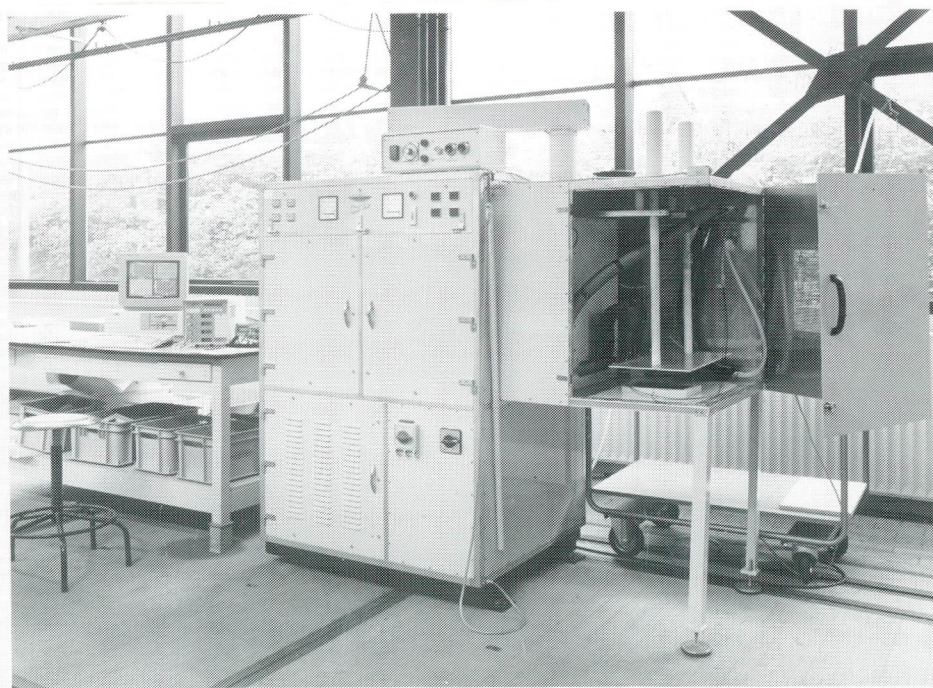
¹⁾ Polycyclisch Aromatische Koolwaterstoffen

5.2.2 De radiofrequente installatie (27 MHz)

De radiofrequente generator levert een hoge spanning met een frequentie van 27 MHz, welke aan de belasting wordt aangeboden. Een vereenvoudigd schema van generator en belasting is afgebeeld in figuur 2. De opstelling zelf wordt in figuur 3 getoond.



Figuur 2 Schema van een 27 MHz installatie met belasting



Figuur 3 De radiofrequente installatie (KEMA) (de op de foto zichtbare computer was ten tijde van de experimenten nog niet operationeel)

De afvalstof bevindt zich tussen de platen van de condensator C in een wisselend elektrisch veld. Tengevolge van de veldsterkte in de afvalstof zal er vermogensontwikkeling in de afvalstof optreden. Afhankelijk van de grootte van de capacitieve belasting C wordt een spoel L voorgeschakeld die voor resonantie moet zorgen (LC-kring) zodat er een optimale vermogensontwikkeling in de afvalstof plaatsvindt.

De waarde van C wordt bepaald door de diëlektrische eigenschappen van de verschillende afvalstoffen en de opstelling tussen de platen.

Aangezien de belasting zeer variabel is, moet proefondervindelijk een afgestemde LC-kring worden bepaald voor optimale verwarming. Tijdens de uitgevoerde experimenten is echter slechts gebruik gemaakt van één en dezelfde inductiviteit L.

Met behulp van een optische temperatuurmeter (LUXTRON; 4-kanaals) is de temperatuur gemeten; deze is met behulp van een schrijver vastgelegd. Hieruit is de temperatuurstijging per tijdseenheid bepaald. Tevens zijn spanningsmetingen over de elektroden uitgevoerd, om inzicht te verkrijgen in de veldsterkte tussen de elektroden.

5.2.3 De microgolfoven (2450 MHz)

De microgolfoven is een semi-professionele installatie, waarvan het vermogen op verschillende manieren te regelen is. Met behulp van een optische temperatuurmeter (ASEA; 1-kanaals) is de temperatuur in de afvalstof gemeten; deze is met een op de sensor aangesloten computer verwerkt. Ook nu is de temperatuurstijging per tijdseenheid bepaald. Figuur 4 toont een foto van de microgolf installatie en het temperatuurmeetsysteem.



Figuur 4 De microgolfoven en het temperatuurmeetsysteem (KEMA)

5.2.4 Werkwijze

De diverse afvalstoffen hebben een behandeling ondergaan in de radiofrequente installatie en/of de microgolfoven.

Aangezien dit een oriënterende studie betreft, is in dit stadium afgezien van de bepaling van energiestromen en rendementen. Dit zou uitgebreider metingen vereisen, die met elkaar vergeleken dienen te worden. Beide installaties vereisen specifieke vormen van de proefmonsters; deze worden hieronder toegelicht.

- Configuratie radiofrequente installatie

Bij de experimenten met de 27 MHz installatie is op de bodemelektrode ter bescherming melinex (kunststof) aangebracht. Dit isolerend medium verkleint tevens de kans op een snelle doorslag. Om de niet compacte afvalstoffen een constante, eenduidige blokvorm te geven, is gebruik gemaakt van een styrodeen raamwerk. Dit raamwerk werd, afhankelijk van het te beproeven afvalmateriaal, al dan niet uitgevoerd met een alumi-

nium bodem. De temperatuursensor is meestal geplaatst in het midden van het styrodeen bakje.

Bij veel experimenten zijn voor en na de proeven gewichtsmetingen uitgevoerd, om het verlies aan water en het verlies door eventuele emissies te bepalen.

- Configuratie microgolfoven

Bij de experimenten met de 2450 MHz installaties werd in eerste instantie het afvalmateriaal in een glazen bakje gedeponeerd. In het midden van dit bakje werd de temperatuur gemeten. Bij de diverse verontreinigde slibsubstanties gaf dit aanzienlijke problemen. Daarom is later overgegaan op beproeving in de origineel aangeleverde kunststoffles. De metingen aan slib uit de rivier de Dommel zijn, in verband met mogelijke schadelijke emissies, uitgevoerd in een zuurkast.

Bij de experimenten zijn eveneens, voor en na de proeven, gewichtsmetingen uitgevoerd om het verlies aan water en het verlies door eventuele emissies te bepalen.

5.3 Verwerking resultaten hoogfrequent installatie (27 MHz)

In bijlage 4 zijn in de tabellen 4.1 tot en met 4.3 de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde radiofrequente proeven weergegeven. Een samenvattend overzicht wordt gegeven in tabel 4, bladzijde 57.

5.3.1 Resultaten proeven

De resultaten van droog en verzadigd actief kool worden respectievelijk in de tabellen 4.1 en 4.2 van bijlage 4 weergegeven. Nagenoeg alle experimenten zijn uitgevoerd met behulp van het uit styrodeen vervaardigd bakje met een aluminium bodemplaat.

In tabel 4.3 van bijlage 4 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste proeven, die aan de andere geselecteerde afvalstoffen zijn verricht. Bij proeven met de afvalstoffen grond en rubber is gebruik gemaakt van het eerder genoemde styrodeen bakje. Bij de proeven aan het

beton en aan de kabelstukken is de bovinelektrode rechtstreeks op de afvalstof geplaatst.

5.3.2 Analyse resultaten radiofrequente proeven

Achtereenvolgens zullen per afvalstof de resultaten van de experimenten, uitgevoerd in de 27 MHz installatie, worden geanalyseerd.

- Actief kool (droog)

Droog actief kool is diëlektrisch te verwarmen; het effect van de invloed van de korrelgrootte is niet significant aantoonbaar. Een gewichtsafname tengevolge van het uitgetreden vocht is gemeten.

- Actief kool (verzadigd met water)

Ondanks het feit dat het verzadigde actieve kool veel water opgenomen heeft (286 gram kool en 331 gram water) is bij de uitgevoerde experimenten nauwelijks verwarming opgetreden.

Met een universeel meter werd de weerstand van het met water verzadigde actief kool bepaald. Deze bleek relatief laag te zijn. Daardoor is de warmteontwikkeling, bij toepassing van een luchtlaag boven het kool, klein. Bij proeven zonder luchtlaag is in feite de generator min of meer kortgesloten. Dit leidde tijdens de proeven snel tot doorslag in het kool. Nat actief kool leent zich daarom mogelijk beter voor directe weerstandsverwarming (stroom door het kool) dan voor diëlektrisch verwarmen.

- Beton

De 1574 gram zware plak beton laat zich goed verwarmen.

Tijdens de proeven verloor het beton vocht. Temperaturen tot circa 80 °C werden binnen enkele minuten bereikt.

- Kabel

De kabelstukken (DRAKA kabel; type Vult-Gmb, 5 * 16 mm²) laten zich goed verwarmen. De kabelstukken zijn soepel; de afzonderlijke aders kunnen

gemakkelijk van de mantelisolatie (PVC) worden gescheiden. De geleiderisolatie (vernet polyetheen, XLPE) is echter niet van de geslagen koperen geleiders te scheiden. Polyetheen heeft een lage verliesfactor en wordt niet verwarmd door een radiofrequent elektrisch veld. Alleen door geleiding van de in de PVC-mantel ontwikkelde warmte zal de XLPE-geleiderisolatie in temperatuur stijgen.

- Tuinaarde

De te beproeven grond voelt voor de proef vrij vochtig aan. De grond blijkt zeer goed te verwarmen, waarbij de warmte gelijkmatig verdeeld is. Naast het uittredende vocht is er een duidelijke 'grondlucht' te ruiken.

- Rubber

De beide rubbermonsters (personenautobanden c.q. vrachtwagenbanden) zijn goed te verwarmen. Daarbij treedt een gelijkmatige warmteverdeling op.

5.4 Verwerking resultaten microgolfoven (2450 MHz)

In bijlage 4 zijn in de tabellen 4.4 en 4.5 de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde proeven in de microgolfoven gegeven. Een samenvattend overzicht wordt gegeven in tabel 4, blz. 57.

5.4.1 Resultaten proeven (buiten de zuurkast)

In tabel 4.4 (bijlage 4) zijn de resultaten weergegeven van de uitgevoerde metingen buiten de zuurkast. Tijdens alle uitgevoerde proeven zijn de afvalstoffen, uitgezonderd het kunststofafval, geplaatst in een rond glazen bakje.

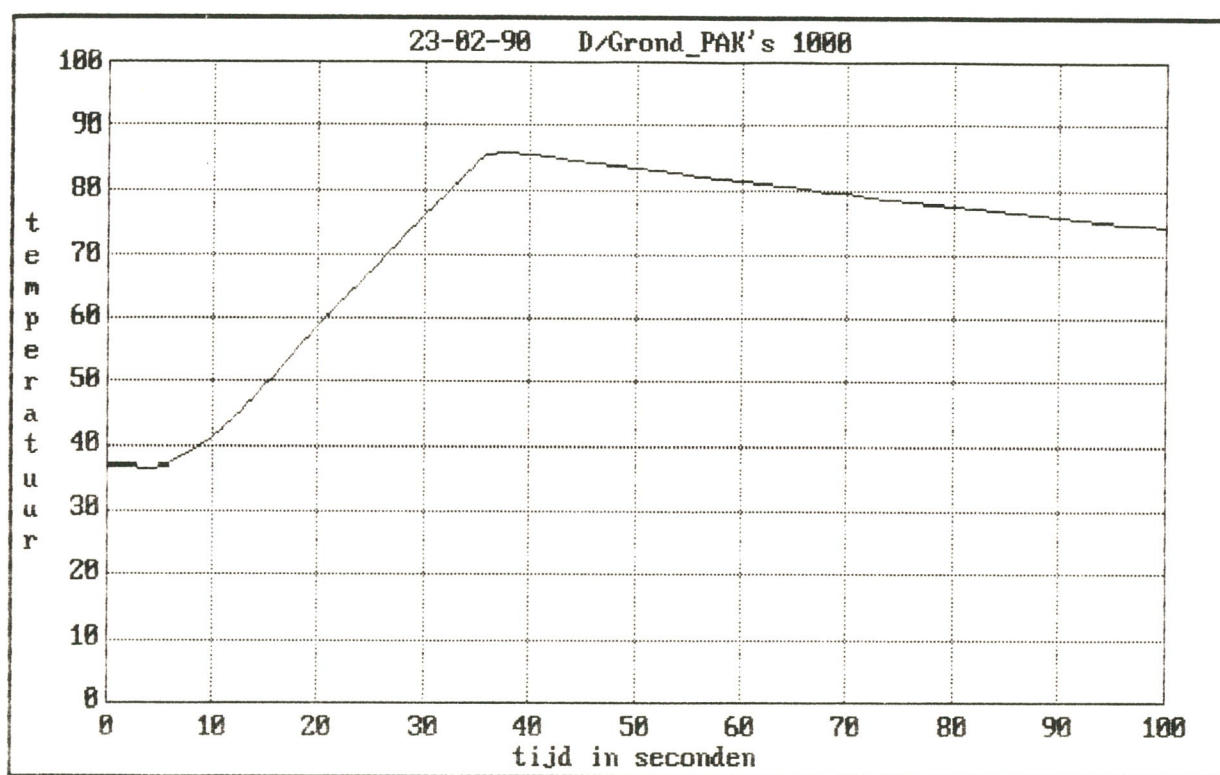
5.4.2 Resultaten proeven (in zuurkast)

Bij de voorbereidingen voor een eerste proef aan het baggerslib geplaatst in het tot nu toe gebruikte glazen bakje, ontstond een hevige

stank. Na voltooiing van de eerste proef is besloten de volgende stoffen te verwerken in de kunststofflessen, waarin het slib is aangeleverd.

Tijdens de proef werd de dop verwijderd voor de temperatuurmeting. De resultaten worden gegeven in tabel 4.5 van bijlage 4.

In figuur 5 wordt een voorbeeld gegeven van een temperatuurregistratie. Bij deze proef, uitgevoerd aan grond voorzien van PAK's, werd bij een ingesteld vermogen van 1000 W een temperatuurstijging van 50 °C in 35 seconden bereikt. Daarna werd de installatie uitgeschakeld.



Figuur 5 Temperatuurregistratie van grond met PAK's in de microgolfoven (2450 MHz)

5.4.3 Analyse resultaten microgolfproeven

De resultaten van de experimenten, uitgevoerd in de microgolfoven, worden hierna per afvalstof besproken.

- Actief kool (droog)

Actief kool (droog) is diëlektrisch goed te verwarmen; de invloed van de korrelgrootte is waarneembaar. De verwarming is niet geheel homogeen; hij varieerde van 50 °C tot 80 °C op verschillende plaatsen, wat wijst op verschillende veldsterkten in het staande golfpatroon.

Na het afschakelen bij 60 °C bleef de temperatuur stijgen tot ruim 85 °C, mogelijk ten gevolge van een optredende chemische reactie, of doordat er een warmtestroom in het materiaal plaatsvond.

Er trad een gewichtsafname op ten gevolge van het uitgetreden vocht.

Tijdens de experimenten traden weer partiële ontladingen tussen de korrels onderling. Bij de kleinere korrelgrootte (0,8 mm) traden er minder ontladingen op dan bij de grotere (2 mm) korrel.

- Actief kool (verzadigd met water)

Ondanks het feit dat het verzadigde actieve kool veel water opgenomen had (214 gram water in 286 gram kool), is bij de uitgevoerde experimenten nauwelijks verwarming opgetreden.

In het kool waren partiële ontladingen zichtbaar. De geringe verwarming en de ontladingen zijn het gevolg van de relatief lage weerstand van het met water verzadigde actieve kool. Hierdoor wordt het elektrische veld als het ware kortgesloten. Na afloop van de proefnemingen is handmatig de temperatuur op meerdere plaatsen bepaald; de temperatuur van het kool nam toe naarmate dichterbij de rand werd gemeten.

Ten gevolge van de optredende ontladingen waren kleine kraters in het korreloppervlak waarneembaar.

- Beton

De 1572 gram zware plak beton liet zich goed verwarmen. Enig vocht blijkt te zijn uitgetreden. Ook hier loopt de temperatuur na het afschakelen nog op van 80 °C tot ruim 100 °C. Er is niet geprobeerd het beton zover te verhitten dat het verbroeukt.

- Tuinaarde

De te beproeven grond voelde voor de proef vrij vochtig aan. De grond blijkt zeer goed te verwarmen, waarbij de warmte redelijk gelijkmatig is verdeeld. Naast het uittredende vocht is er een duidelijke 'grondlucht' waarneembaar.

- Rubber

Het rubbermonster afkomstig van bedrijfswagenbanden blijkt goed te verwarmen, waarbij een gelijkmatige warmteverdeling optreedt.

Het rubbermonster van personenwagenbanden vat zelfs bij het laagste vermogen (500 W) direct vlam, doordat het aanwezige canvas snel in brand vliegt.

- Kunststofafvallen

Het bleek niet mogelijk om de verschillende aangeleverde folie-achtige kunststofmaterialen in de microgolfoven te verwarmen. De folies zijn in verschillende vormen in de oven geplaatst, echter zonder resultaat. Waarschijnlijk vormde de kleine volumina kunststof (dikten < 0,1 mm) een te geringe belasting voor de oven.

- Slib

De resultaten van de proeven met de verschillende aangeleverde soorten slib zullen hierna kort worden besproken (zie tabel 4.5, bijlage 4).

- Dommelslib

Het slib liet zich redelijk verwarmen; er was geen gewichtsafname waarneembaar.

- Steinslib

Het slib liet zich redelijk tot goed verwarmen. De temperatuur is, vanwege de moeilijk doordringbare substantie gemeten in de toplaag van het slib. De substantie ruikt verre van aangenaam; er werd geen gewichtsafname geconstateerd.

- Geulhavenslib - onderstroom 2)

Het slib liet zich goed verwarmen. De temperatuur is gemeten in de toplaag (olielaag). Na verwarming werd met de hand geconstateerd dat de temperatuur van het zich onderin bevindende slib aanzienlijk hoger is. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door grote verschillen in diëlektrische eigenschappen van het slib en de olie. Er werd een gewichtsafname geconstateerd.

- Geulhavenslib - bovenstroom 3)

Het slib liet zich heel goed verwarmen. Ook hier is de temperatuur bepaald in de toplaag. Er is geen afname in gewicht geconstateerd.

- PAK-grond

De experimenten met grond, verontreinigd met PAK's, zijn uitgevoerd in een glazen bakje. De PAK-grond was uitstekend te verhitten. Na de proef is er gewichtsverlies geconstateerd, meer gewichtsafname dan bij andere proeven aan slib. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het grotere beschikbare oppervlak voor uitdamping. De PAK-grond stinkt verschrikkelijk (tot vomeren toe), en is enigszins vastgekoekt aan het bakje.

2) 'Onderstroom': zware fractie (vooral zand), na scheiding met behulp van een hydrocycloon

3) 'Bovenstroom': lichte fractie (organische stof en kleideeltjes), na scheiding met behulp van een hydrocycloon

5.5 Overzicht resultaten diëlektrisch verwarmen

In tabel 4 zijn de resultaten van de proeven samengevat. Dit overzicht is globaal en mag niet zonder meer voor vergelijkingsdoeleinden worden aangewend, omdat de diverse proeven onder verschillende omstandigheden werden uitgevoerd. Uit de resultaten blijkt welke stoffen met radiofrequente en/of microgolftechnieken goed zijn te verwarmen.

Tabel 4 Samenvattend overzicht proeven diëlektrische verwarming

Stof	RADIOFREQUENT	MICROGOLF
	ΔT °C/min	ΔT °C/min
actief kool - droog - nat	$6 < \Delta < 22$ -	21/48 -
beton - droog	13	37
kunststoffen	x	0
kabel	4	x
verontr. grond - tuinaarde - slib	28 x	118 $4 < \Delta < 75$
rubber	9	28
x niet beproefd - niet redelijk meetbaar 0 nul (zeer dunne folies beproefd, waardoor slechte afstemming met generator, leidend tot geringe vermogensopname)		

Overzicht resultaten:

- Met radiofrequente technieken zijn droog actief kool, beton, kabel, tuinaarde en rubber goed te verwarmen.
- Met microgolftechnieken zijn droog actief kool, beton, tuinaarde, slib en rubber goed te verwarmen.
- De temperatuurstijging per tijdseenheid is bij microgolfverwarming, zoals te verwachten, groter dan bij radiofrequente verwarming.
- Nat actief kool is waarschijnlijk geschikter om verwarmd te worden door directe weerstandsverwarming dan via diëlektrische verwarming.

Enkele opmerkingen

- De proeven in de radiofrequente installatie zijn uitgevoerd met gebruikmaking van een gekozen (standaard) zelfinductie. Voor het uitvoeren van meer op praktijk gerichte experimenten dienen meerdere parameters te worden geoptimaliseerd.
- Vergeleken met radiofrequente installaties zijn microgolfinstallaties in het algemeen duurder.
Bij de keuze tussen radiogolven en microgolven moet onder andere rekening worden gehouden met het feit, dat de indringdiepte van radiogolven groter is, zodat daarmee een groter volume kan worden verwarmd.
- Essentieel voor een goede beoordeling van de toepassings mogelijkheid van diëlektrische technieken is de gewenste behandelingswijze van de afvalstof. Op welke wijze en voor welk doel moet de diëlektrische verwarming worden gebruikt? Om de afvalstoffen af te breken, te scheiden, te regenereren of op andere wijze tot milieuvriendelijke stoffen te verwerken?

6. EXTRAPOLATIE RESULTATEN KEMA-ONDERZOEK

In hoofdstuk 4 zijn de principieel bruikbare functies van de diëlektrische technologie weergegeven, en een aantal afvalstoffen, die geschikt leken voor diëlektrische behandeling geselecteerd. In de milieutechnologie speelt de basisfunctie 'verhitten' een belangrijke rol. Bij zeer veel reinigings- en verwerkingstechnieken dient het basismateriaal te worden verwarmd om de gewenste effecten te bereiken. Vaak wordt bij milieutechnische installaties gebruik gemaakt van (roterende) ovens, waarin de schadelijke stoffen uitdampen, verbranden of ontleden.

Alhoewel dergelijke ovens in het algemeen een vrij grote capaciteit bezitten in verhouding tot de mogelijke capaciteit van diëlektrische ovens, zijn er toch een aantal toepassingen bekend, waarbij veel kleinere volumina moeten worden behandeld. In bepaalde situaties veroorzaken de bestaande verhittingsprocessen namelijk problemen (onder andere grote vervuilde afgasstromen), waarbij door toepassing van diëlektrische verhitting de procesvoering in principe sterk kan worden verbeterd.

De belangrijkste vraag daarbij is in dit stadium, of de geselecteerde afvalstof zich voor diëlektrische verhitting leent. Ten behoeve van een evaluatie zullen echter een aantal aspecten van verschillende bewerkingsmethoden naast elkaar moeten worden gezet. In deze studie zullen daartoe een aantal vaste beoordelingscriteria worden gebruikt. Op basis daarvan zullen de consequenties worden getrokken uit de proeven, die in hoofdstuk 5 zijn beschreven (6.2). Vervolgens zullen hieruit de meestbelovende toepassingen worden geselecteerd (6.3).

6.1 Beoordelingscriteria

Naar aanleiding van de eigenschappen van het diëlektrisch verhittingsprincipe, zoals deze in hoofdstuk 2 zijn gegeven, kunnen een aantal toetsingscriteria opgesteld worden. Omdat het in de doelstelling uiteindelijk gaat om een evaluatie van de bruikbaarheid van de techniek, zullen daarnaast de huidige, dan wel in ontwikkeling zijnde, behandelingsmethoden moeten worden gezien, waarmee het gewenste resultaat

eveneens kan worden bereikt. De kosten van de diverse behandelingswijzen worden daarbij uiteraard niet uit het oog verloren.

Bij de vergelijking van de verschillende geselecteerde afvalstoffen zijn de volgende aspecten van belang.

- Materiaal:

- aard van het materiaal (stof)
- aard van de milieuproblematiek
- omvang van de markt (tonnen/jaar)

De beschrijving van deze onderdelen geeft een idee van het belang van de markt van het betreffende milieuprobleem. Vooral de omvang van de markt is van belang, omdat de diëlektrische methode in principe minder geschikt voor bulkstoffen.

- Huidige behandelingswijze

- methodiek
- restprodukten
- (reinigings)rendement
- specifieke problemen

Deze criteria zijn van belang om een vergelijking te kunnen maken met de marktperspectieven voor de diëlektrische methode. Het feit dat diëlektrische technieken meestal duurder zijn dan conventionele geeft al aan, dat de diëlektrische methode op één van deze punten positief zou moeten scoren.

- Resultaten proeven diëlektrische verhitting

- snelheid opwarming
- indringingsdiepte
- effect vocht
- bereikbare temperatuur

De resultaten van de beproevingen zijn van essentieel belang, omdat er uit blijkt of de stof zich überhaupt voor diëlektrische verhitting leent. De indringdiepte hangt sterk samen met de verliesfactor van het

materiaal, en wordt vaak bepaald door het vochtgehalte.

Voorspellingen hierover zijn in het kader van dit oriënterende onderzoek niet te geven omdat geen verliesfactoren zijn bepaald. Ook de te behalen temperatuur is q.q. van groot belang.

- Voordelen diëlektrische methode

- verschillen met huidige methode
- rendementen
- processnelheid
- kwaliteit

Met dit aspect wordt aangegeven, waarmee de diëlektrische methode zich positief onderscheidt ten opzichte van de huidige. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om voordelen ten aanzien van restprodukten, of het opheffen van problemen van de huidige methode.

- Schatting kosten huidige methode

- kosten installatie
- kosten materials handling
- energiekosten

Het belang van dit aspect voor een evaluatie is evident. Helaas zijn van een aantal bewerkingsmethoden nog nauwelijks kosten bekend, omdat zij zich nog in een pilot-stadium bevinden. In hoofdstuk 8 worden enkele gegevens over kosten vermeld.

- Schatting kosten diëlektrische methode

- kosten installatie
- kosten materials handling
- energiekosten

Een schatting van de kosten van een diëlektrische bewerkingsmethode blijft vrij grof, omdat er sprake is van een techniek die nog niet geïmplementeerd is. Weliswaar bestaan er enkele richtwaarden voor kosten van diëlektrische ovens of drogers, maar voor milieutoepassingen moet er

zeker rekening gehouden worden met additionele kosten ten gevolge van afscherming van de omgeving, in verband met emissies. Zie verder eveneens hoofdstuk 8.

- Problemen diëlektrische methode

- kwetsbaarheid apparatuur
- veiligheid

In enkele gevallen zal er wellicht sprake zijn van bepaalde problemen ten aanzien van verwarming met diëlektrische methoden. Overigens is optimalisering van de verwarmingsmethode in dit kader niet bezien.

Bepaalde nadelige effecten die tijdens de diëlektrische verhitting zijn opgetreden kunnen wellicht door een betere afstemming van de oven/droger op het materiaal worden geëlimineerd.

- Beschikbare voorbeelden/literatuur

In enkele gevallen zijn er in de literatuur of uit de praktijk reeds toepassingen van diëlektrische milieutechnieken bekend. Er is getracht reeds bekende voorbeelden te vinden, zodat onnodige dubblures worden voorkomen.

- Perspectieven diëlektrische techniek

Aan de hand van de resultaten van de voorgaande criteria kan een voorlopige conclusie getrokken worden met betrekking tot de bruikbaarheid van de diëlektrische methode. Daarnaast zullen echter, van geval tot geval, steeds weer andere (ad hoc) overwegingen de keuze van een proces mede bepalen.

In bijlage 5 zijn voor de onderzochte materialen de diverse beoordelingsresultaten in tabelvorm weergegeven. De discussie hierover volgt hierna.

6.2 Toetsing geselecteerde stoffen aan beoordelingscriteria

- Actief kool, droog

Actief kool wordt momenteel veelvuldig toegepast als filtermateriaal om diverse soorten verontreinigingen in gasstromen af te vangen. Het betreft hier allerlei organische stoffen, en daarnaast onder andere H_2S , SO_2 , en CO_2 . Momenteel wordt actief kool het meest ingezet voor het afvangen van Vluchtige Organische Stoffen (VOS). Na een bepaalde standtijd van het koolfilter is de concentratie van verontreinigingen in het kool zo groot geworden (orde van grootte van 5 mg/m^3), dat het rendement van het filter sterk afneemt.

Het kool dient dan te worden vervangen. Het verzadigde kool dat uit het filter komt wordt vervolgens geregenereerd, ten behoeve van het hergebruik. In de praktijk worden hier verschillende methoden voor toegepast. Indien regeneratie bij de gebruiker zelf plaatsvindt, wordt meestal met stoom geregenereerd. Aldus kunnen componenten met verdampingstemperaturen tot 130°C worden verwijderd. Bij de gebruikers ontstaan echter in toenemende mate problemen met vergunningen in verband met de emissies van dit regeneratieproces. Daarom wordt de kool steeds vaker voor regeneratie teruggestuurd naar de leverancier. In Nederland is NORIT verreweg de belangrijkste leverancier. De kool wordt daar geregenereerd op 900°C , in een inerte atmosfeer. Vervolgens worden de gassen naverbrand op 1200°C .

Een groot probleem bij (stoom-)regeneratie bij de gebruiker is de menging van gecondenseerde stoom met de verontreinigingen uit het kool. Bij andere regeneratiemethoden ontstaan vrij grote hoeveelheden spoelgas, die moeten worden naverbrand.

De resultaten van de proeven met zowel radiofrequente als microgolf technieken gaven een vrij grote spreiding in opwarmsnelheid te zien. Geconcludeerd kan worden dat de stof zich in principe leent voor diëlektrische verhitting.

Het belangrijkste voordeel van toepassing van diëlektrische verhitting is de relatief kleine hoeveelheid spoelgas, die daarbij ontstaat. Een

kleine hoeveelheid spoelgas blijft echter noodzakelijk, omdat dit 'dra-gergas' de verontreinigingen moet kunnen opnemen. Dit betekent echter ook een nadeel. Omdat er slechts kleine hoeveelheden spoelgas gebruikt worden, kunnen de concentraties VOS ¹⁾ oplopen tot boven de onderste explosiegrens (Lower Explosion Level). Er zullen dus maatregelen moeten worden genomen (inert gas deken) om explosieve ontbranding te voorkómen.

- Actief kool, nat

Dit materiaal is afkomstig van filters voor waterreiniging. Het kool is na gebruik verzadigd met organische verbindingen, en soms met zware metalen. Ook hier gaat het om de regeneratie van dit filtermateriaal. Momenteel wordt bij regeneratie onderscheid gemaakt tussen thermische-, stoom-, chemische en solvent-regeneratie. Een probleem dat hierbij optreedt is de reiniging van de grote hoeveelheden spoelvloeistof, terwijl bovendien regeneratie maar in een beperkt aantal gevallen mogelijk blijkt.

De resultaten van de proeven geven helaas duidelijk aan dat deze stof zich niet leent voor diëlektrische verhitting. Hoogstwaarschijnlijk omdat natte kool sterk (elektrisch) geleidend wordt. Verdere uitdieping van deze optie is dan ook niet zinvol.

- Beton

In dit verband wordt vooral gedacht aan beton, dat zich in de directe omgeving van een nucleaire stralingsbron heeft bevonden (bouwconstructie van nucleaire centrale), en dat daardoor radioactief besmet is. In de praktijk blijkt, dat vooral de toplaag een hoge radioactiviteit bezit. Bij de ontmanteling van nucleaire elektriciteitscentrales wil men het beton van de bouwconstructie in verschillende radioactiviteitsklassen scheiden. Daartoe zal de oppervlaktelaag apart moeten worden verwijderd. De meest voor de hand liggende methode zou zijn met pneumatische werktuigen, maar hierbij ontstaan ontoelaatbare hoeveelheden radioactief

¹⁾ Vluchtige Organische Stoffen

stof, terwijl bovendien de trillingen in de constructie ongewenst zijn. Een andere methode is het verwijderen van de toplaag van de betonwand door met behulp van microgolfttechniek beton te breken. Hierbij wordt een op afstand bestuurd golf'hoorn' toegepast, die op enkele millimeters van het beton werd gehouden ([7, 8]).

Uit de proeven is gebleken, dat beton zowel radiofrequent als microgolf kan worden verhit. Het beschreven breekgedrag wordt waarschijnlijk veroorzaakt door grote krachten die ontstaan bij de snelle expansie van het aanwezige vocht tot damp. In die zin heeft het vochtgehalte van het beton, alsmede de vochtgradiënt in het beton, waarschijnlijk grote invloed op het breekgedrag.

De praktische betekenis van deze methode voor Nederland is nu nog klein. Nederland bezit slechts twee commerciële centrales waarvan vooralsnog niet wordt overwogen ze buiten gebruik te stellen. Voor de kleine proefinstallaties (Petten, Delft) is de methode hoogstens als experiment interessant. In principe kan men na sluiten van een kerncentrale direct tot ontmanteling overgaan, danwel een lange 'afkoelperiode' hanteren. Men laat het gebouw dan eerst enkele (tientallen) jaren onder strenge afschermingsmaatregelen rusten ('afkoelen'), waardoor de radioactiviteit ten gevolge van de kortlevende radionucliden sterk vermindert. Dit zou diëlektrische verwijdering van de toplaag misschien overbodig kunnen maken. Verder wordt in het buitenland in enkele gevallen een 'mausoleum'-methode overwogen. Daarbij wordt de gehele centrale in beton gestort.

De perspectieven voor deze diëlektrische 'breek'methode zijn sterk afhankelijk van de toekomstige ontwikkelingen van de nucleaire industrie. Deze techniek kan op soortgelijke wijze worden gebruikt voor de afbraak van chemisch verontreinigde gebouwen.

- Kunststof-afval

Het doel was het creëren van een selectieve verhitting van verschillende types kunststoffen. Uit de literatuur wordt duidelijk dat met name polyvinylchloride (PVC) een relatief hoge verliesfactor bezit ten opzichte van andere kunststoffen, zoals polyethyleen (PE), polypropyleen (PP), en polyamiden. Past men nu hoogfrequent verhitting toe op een kunststofmengsel, dan zou met behulp van infrarooddetectie scheiding van PVC uit een mengsel van kunststoffen kunnen plaatsvinden.

Uit de proeven bleek echter, dat deze preferente verhitting van PVC niet opgaat bij kunststoffoliën (dikte < 0,1 mm). Zelfs indien de folie wordt 'opgefrommeld' blijkt geen warmteontwikkeling van betekenis op te treden. Dikkere plakken PVC vertonen wel het gewenste effect; blijkbaar bezitten de dunne lagen in de gebruikte oven onvoldoende vermogen om de golfenergie in te vangen. Door een betere afstemming van een generator op de relatief kleine belasting, gevormd door de folie, zou de energieoverdracht verbeterd kunnen worden, waardoor het gewenste effect wellicht wel zou kunnen ontstaan.

Momenteel is bij de afdeling Milieutechnologie een project gaande, waarin een andere scheidingsmethode wordt ontwikkeld. Daarbij maakt men gebruik van het verschil in soortelijk gewicht van de kunststoffen. Juist PVC blijkt aldus zeer eenvoudig te scheiden van de overige soorten. Daarom is een nieuwe, gecompliceerder techniek om PVC te scheiden van andere kunststoffen weinig zinvol.

- Kabel met PVC buitenmantel

Ook bij dit materiaal wordt gebruik gemaakt van de hoge verliesfactor van PVC. Doordat dit type kunststof preferent verhit wordt is met behulp van diëlektrische methoden de PVC ommanteling wellicht eenvoudig van de PE geleiderisolatie te verwijderen.

Tijdens de proeven is het PVC niet tot het smeltpunt verhit. Doet men dat wel, dan ontstaat waarschijnlijk een stroperige massa, die aan de binnenmantel kleeft.

Door verhitting in de radiofrequent oven verweekte de PVC-buitenmantel.

Mede door de uitzetting was de buitenmantel toen eenvoudig van de geleiderisolatie te scheiden.

Een praktisch probleem is in dit verband, dat PVC-kabel in diverse afmetingen en diameters wordt aangeboden, wat grootschalige toepassing van deze methode bemoeilijkt.

Er worden thans studies verricht naar andere methoden van kabelverwerking. Hierbij wordt de kabel eerst in kleine stukjes vershredderd, daarna worden in een scheidingsproces de verschillende componenten uitgefilterd. Voor dit scheidingsproces kan men bijvoorbeeld gebruik maken van de (eenvoudige) scheidingstechniek op basis van de soortelijke massa. Zo zijn dan wellicht ook PVC en PE van elkaar te scheiden. Daarnaast zijn ook speciale striptechnieken in ontwikkeling, die zich lenen voor zowel olie- als voor PVC kabel. Het zal duidelijk zijn, dat de diëlektrische methode heel weinig kansen heeft ten opzichte van deze veel eenvoudiger en universeler methoden. Wel moet nadrukkelijk worden gesteld, dat deze alternatieve methoden nog in ontwikkeling zijn. De perspectieven van deze technieken zijn dan weliswaar goed, maar er zijn nog geen installaties in de praktijk uitgetest. Mocht blijken, dat de alternatieve methoden het op een bepaald punt toch laten afweten, dan heeft de diëlektrische verhitting/scheidingsmethode alsnog kansen.

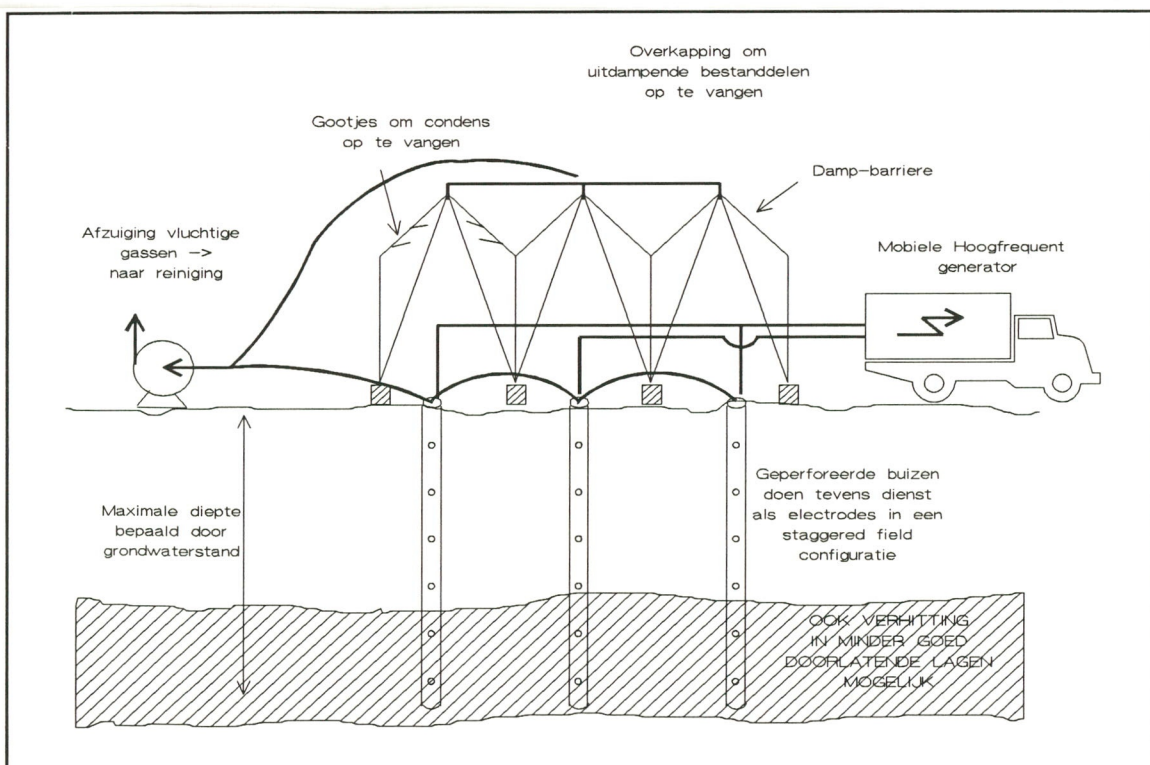
- Grond, verontreinigd met vluchtige organo(chloor)verbindingen

Deze probleemstoffen, waarvan jaarlijks ca. 400.000 ton verwerkt wordt, worden meestal in roterende trommelovens behandeld. Daarbij wordt zowel directe verhitting (verbrandingsgassen direct in oven) als indirecte verhitting (opwarming via hete wand) toegepast. In dergelijke trommelovens worden bij 300 tot 700°C de componenten uitgedampt, waarna de gassen worden naverbrand en gereinigd. Met deze beproefde methode doen zich problemen voor bij klei-achtige grondmatrices. Wanneer de grond meer dan 20% slibdeeltjes bevat, gaat hij kleven aan de ovenwand, wat leidt tot onder andere onbalans en verstoppingen.

Uit proeven, zowel in de radiofrequente als de microgolfoven, bleek dat deze grond zich goed leent voor diëlektrische verhitting. De voordelen

die bereikt kunnen worden met diëlektrische verhitting zijn redelijk. Ten opzichte van de direct gestookte oven is diëlektrische verhitting een schoon proces; er behoeven geen grote hoeveelheden afgassen meer te worden gereinigd. Ten opzichte van de indirect gestookte techniek is de diëlektrische methode vooral veel sneller. Indien inderdaad meteen ontleding van de vervuilde gassen kan plaatsvinden in een diëlektrische oven, biedt de techniek duidelijke perspectieven. Hierdoor zou de gehele naverbrandingsfase achterwege kunnen blijven. Voorlopig lijken de berichten over mogelijke chemische omzetting sterk speculatief.

Uit [9] kwam wel een zeer interessante optie naar voren, waarbij diëlektrische methoden worden gebruikt voor IN SITU grondreiniging. Een Amerikaans bedrijf, (West Chester Inc), heeft in samenwerking met een Amerikaans Research instituut (Illinois Institute of Technology, Chigaco) een methode ontwikkeld om met behulp van radiofrequente technieken grond te verhitten tot circa 600°C, waardoor vrijwel alle koolwaterstoffen uit dampen. Hiertoe worden een aantal buisvormige elektroden in de grond gebracht, en een overkapping aangebracht over het te behandelen stuk grond. Na het aanbrengen van het elektrisch veld tussen de buisvormige elektroden warmt de grond langzaam op, waarbij vocht en aanwezige organische componenten uitdampen (figuur 7).



Figuur 7 IIT in situ grondreinigingsmethode

De IIT-methode bevindt zich thans nog in het experimentele stadium. Indien we deze diëlektrische methode vergelijken met andere in situ technieken, zoals stoomstrippen en luchtstrippen, dan zou de radiofrequente methode een aantal zeer interessante voordelen kunnen bieden. Radiofrequente uitdampen lijkt, in tegenstelling tot de beide genoemde stripmethode's, ook toepasbaar in minder goed doorlatende bodems. Ook wordt in [9] aangegeven dat de methode relatief goedkoop is ten opzichte van de concurrerende technieken. Er is in deze publikatie een uitgebreid rekenvoorbeeld verwerkt; in 8.4 wordt daar nader op ingegaan. Het in situ diëlektrisch (radiofrequent) reinigen van grond is in de Verenigde Staten inmiddels bij enkele projecten met succes uitgevoerd. Een installatie hiervoor wordt commercieel geëxploiteerd door Weston Inc. Men stelt hier tegen relatief lage kosten een hoog reinigingsrendement mee te bereiken, althans in het geval van organische verontreiniging.

- Slib

Een aantal slibmonsters is door de KEMA beproefd. Het betrof hier slib van waterbodems, vervuild met organische componenten, en zogenaamd extractieslib. Dit extractieslib is het resultaat van een hydrocyclogenaproces, waarbij verontreinigde grond met hoge slibgehaltes wordt gescheiden in een zandfractie en een slibfractie. Deze scheiding vindt plaats, omdat de verontreinigingen vooral aan de slibdeeltjes zijn gebonden. Hierdoor is de zandfractie na dit scheidingsproces relatief schoon, terwijl de slibfractie een geconcentreerde hoeveelheid verontreinigingen bevat.

Momenteel bestaan er voor het verwerken van slib nauwelijks acceptabele methoden. Diverse verbrandingsovens hebben grote problemen met kleven en aankoeken van slib. Indien het slib eerst een aparte droogstap ondergaat, kunnen bepaalde soorten slib daarna endotherm worden verbrand, maar deze optie is lang niet altijd beschikbaar. Bovendien bevatten veel soorten slib ook nog eens een forse concentratie zware metalen, zodat er bij de verwerking een dubbel probleem ontstaat.

Uit de proeven blijkt, dat slib uitstekend diëlektrische kan worden verwarmd. Tijdens deze verhitting zullen, behalve de organische componenten, ook grote hoeveelheden water uitdampen, ten koste van veel energie. Voor de procesvoering is het dus van groot belang dat het vochtgehalte van het slib zo laag mogelijk gehouden wordt. Hiertoe kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van een mechanische ontwateringsstap, eventueel gevolgd door een conventionele (hete lucht) droogmethode, om water uit het slib te verwijderen.

Bevat het slib ook zware metalen, dan zal er bovendien een processtap nodig zijn om het slib daarvan te ontdoen. Momenteel zijn methoden in ontwikkeling waarbij deze metalen worden ge-extraheerd met behulp van bijvoorbeeld zuren. Deze techniek staat nog in de kinderschoenen, maar het is denkbaar dat in de toekomst beide reinigingsstappen (zware metalen uitspoelen en organische componenten uitdampen) in één installatie kunnen plaatsvinden. Men kan daarbij bijvoorbeeld denken aan een combinatie van bandfilter/bandpers met microgolf-naverhitter. Momenteel is een Nederlands bedrijf bezig met een dergelijke ontwikkeling. Het is echter de vraag of het haalbaar is, om zo'n geavanceerde installatie voor zo'n laagwaardig produkt in te zetten. De stortkosten voor slib zullen waarschijnlijk nog flink moeten stijgen eer deze werkwijze economisch rendabel is.

Een andere methode, die wellicht perspectieven biedt in de situatie waarbij het slib zowel organische componenten als zware metalen bevat, is het immobiliseren van de zware metalen door ze vast te smelten in een rooster van silicaat. Men kan daarbij denken aan versinteren of verglazen van slib, nadat in een eerste stap het water en de organische componenten zijn uitgedampt. Deze methode wordt ook toegepast voor het verglazen en immobiliseren van radioactief afval [10, 11].

In de keramische industrie worden momenteel eveneens diëlektrische methoden gebruikt om keramiek te sinteren. Een gecombineerde uitdamp/sinter oven is technisch waarschijnlijk goed te realiseren. Wel dient aandacht te worden geschonken aan de eigenschappen van de brokken keramiek die uit dit slib ontstaan. Hoe hoog moet het materiaal verhit worden opdat de metalen niet meer uitlogen? Wat zijn eventuele verouderingseffecten?

- Autobanden

Bij autobanden dient onderscheid te worden gemaakt tussen personenwagen banden, die uit SBR zijn vervaardigd, en bedrijfswagenbanden waarvoor natuurrubber wordt gebruikt.

Personenautobanden

De toenemende stroom van afgedankte personenautobanden levert steeds meer problemen op. Tot nog toe worden deze banden meestal verzameld op grote stortplaatsen, of hergebruikt, als stootkussen of afdekkingsmateriaal in de landbouw. Daarnaast vindt shredderen van autobanden tot korrels steeds vaker plaats. Gemalen rubber kan onder andere worden toegepast in kunstgrasvelden, in diverse rubberprodukten, ze als rubbermatten, slangen en schoeisel, en in asfalt-rubber composities ('fluisterasfalt'). Omdat deze rubberkorrels in vergelijking tot de natuurrubberkorrels van vrachtwagenbanden van lagere kwaliteit zijn, is de belangstelling hiervoor vrij klein. Daar het probleem steeds nijpender wordt, en verbranding in AVI's ²⁾ niet acceptabel wordt geacht, denkt men onder andere aan een centrale verbrandingsfaciliteit. Personenautobanden worden momenteel nog niet geregenereerd.

Bedrijfswagenbanden

Bij bedrijfswagenbanden wordt wél gebruik gemaakt van regeneratie. Bedrijfswagenbanden worden minder snel afgeschreven, en vaker van een nieuw loopvlak voorzien. Bij regeneratie wordt het ge vulcaniseerde rubber, bij een temperatuur boven de 200°C, chemisch en/of mechanisch verweekt. Het rubber afkomstig van bedrijfswagens wordt dan gemengd met kleine hoeveelheden 'reclaim agents' en oliën. Er is slechts een beperkte toeslag van het regeneraat mogelijk, omdat de mechanische eigenschappen hierdoor sterk teruglopen.

Bij de proeven bleek, dat zowel het SBR als het natuurrubber goed

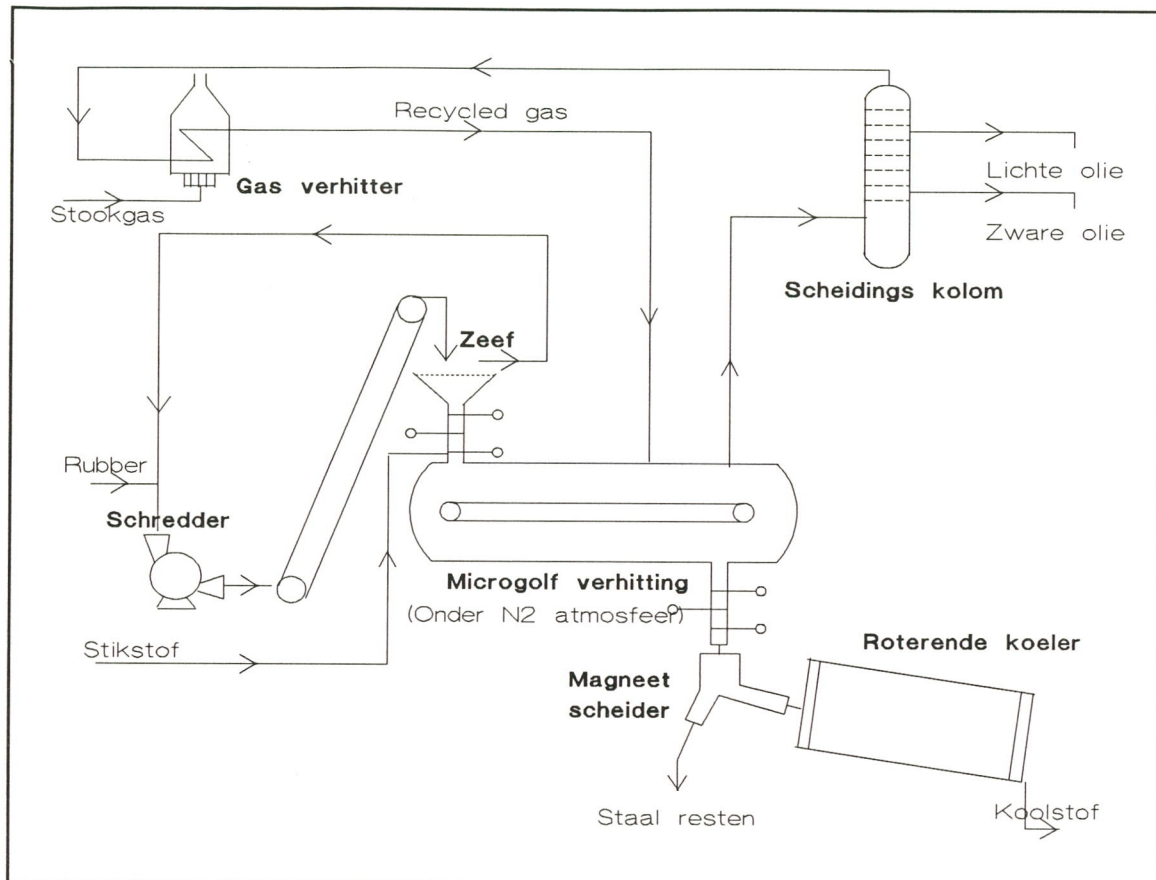
²⁾ Afval Verbrandings Installaties

opwarmt met diëlektrische methoden. Bij SBR moesten de proeven met microgolfverhitting zelfs voortijdig worden afgebroken vanwege ontbrandingsverschijnselen.

Door het Engelse bedrijf BRC Environmental Ltd is een methode ontwikkeld, waarbij autobanden worden geshredderd, en vervolgens in een microgolfoven op pyrolysetemperatuur wordt gebracht (figuur 8). Daarbij ontstaan als eindprodukten koolstof, staalafval, lichte en zware oliën. Al deze stoffen kunnen weer dienen als grondstof bij de fabricage van nieuwe banden [12]. Uit [12] wordt overigens niet duidelijk of inderdaad beide soorten rubber in zo'n installatie verwerkt kunnen worden.

Een tweede methode betreft microgolf devulcanisatie. Daarbij wordt rubbergranulaat, onder toevoeging van reclaim agents geregenereerd tot een plastische massa. Enkele bedrijven bezitten patenten op batchinstallaties voor dit proces. Deze batchgewijze devulcanisatie methoden zijn voor het verwerken van grote hoeveelheden rubbergranulaat minder interessant. Bovendien zijn de afzetmogelijkheden van dit reclaimrubber beperkt. Op nieuwe banden is slechts een toeslag van 2 à 4% mogelijk.

Voor Nederland is het van belang, dat VROM in principe de voorkeur geeft aan hergebruik van het rubber als granulaat. Bij het Centrum voor Polymere Materialen TNO verwacht men overigens dat de BRC methode erg duur is, en dat de kraakprodukten niet meer bruikbaar zijn voor de productie van nieuwe banden. De 'kringloop' wordt dus niet echt gesloten; de restprodukten moeten voor andere, laagwaardigere toepassingen worden gebruikt.



Figuur 8 BRC Rubber pyrolyseproces

6.3 Veelbelovende toepassingen

Uit de evaluatie blijkt dat, op grond van de KEMA-proeven, uiteindelijk drie materialen/processen overblijven waarvan verwacht mag worden, dat toepassing van diëlektrische technieken veelbelovend is: in situ grondreiniging, pyrolyse van autobandengranulaat, en slibverwerking. Wat betreft de eerste twee optie's blijken er al (semi-commerciële) pilot-installaties te bestaan (figuur 7, 8).

Voor de optie 'slibverwerking' blijven er nog een groot aantal vraagtekens open. Er is hierbij echt sprake van een nieuw idee, waarbij een totaal nieuw proces zou moeten worden ontwikkeld. Vooralsnog is bijvoorbeeld onduidelijk hoe zware metalen in slib het best kunnen worden behandeld. Uitspoelen met zuren moet uiteindelijk echt schoon slib leveren, maar ontwikkelingen op dit gebied zijn nog gaande. Bovendien wordt de vervuiling daarbij verplaatst naar het zuur. Ziet men kans de zware metalen te immobiliseren, door ze in het slib te versinteren of te verglazen, dan blijft het eindmateriaal voor de wet voorlopig toch nog chemisch afval. Dat kan in de toekomst veranderen, maar dan zal eerst moeten worden aangetoond, dat de vastgesmolten verontreinigingen inderdaad niet meer uitlogen.

Vast staat echter dat er een dringende behoefte bestaat aan een techniek waarmee slib op een verantwoorde manier kan worden behandeld. De diëlektrische techniek kan daarbij wellicht een bijdrage leveren.

7. OVERIGE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN

In het voorgaande zijn een aantal afvalstoffen gezien, die in aanmerking zouden kunnen komen voor diëlektrische behandeling. Met enkele stoffen waarbij dat, gezien de beschikbare mogelijkheden en financiën, haalbaar was, zijn door de KEMA oriënterende proeven uitgevoerd om na te gaan of diëlektrische behandeling inderdaad realiseerbaar zou kunnen zijn.

Het zou echter onjuist zijn te concluderen dat de mogelijkheden van diëlektrische toepassingen in de milieutechnologie daarmee wel 'zo ongeveer' zouden zijn opgesomd. Immers, zowel de milieutechnologie als de toepassing van diëlektrische behandeling staan nog in de kinderschoenen, en het totaal van potentiële, mogelijkheden is thans nog in 't geheel niet te overzien. Op grond van deze situatie is aan diverse collega's in TNO gevraagd, hun visie te geven over milieutechnische toepassingen van deze techniek. Hun ideeën - die q.q. vaak speculatief van karakter waren - zijn in dit hoofdstuk samengevat.

Aan de betreffende suggesties kunnen in dit stadium uiteraard geen bindende conclusies worden verbonden. Sommige ideeën liggen erg voor de hand; andere zullen nader moeten worden geëvalueerd en uitgewerkt. Weer andere zijn in literatuuresignaleerd, en/of in feite al ergens geïmplementeerd.

Principieel is wel, dat de navolgende suggesties zich niet beperken tot end-of-pipe technologie, maar dat ook mogelijkheden worden genoemd in de sfeer van procesgeïntegreerde toepassingen ¹⁾.

Vele van de hier genoemde onderwerpen zullen nooit worden gerealiseerd. De suggesties bezitten in dit vroege stadium het karakter van 'long shots'. Anderzijds dient men zich te realiseren, dat de hieronder

¹⁾ Dit is in feite een verruimde interpretatie van de oorspronkelijke opdracht. Deze wordt gerechtvaardigd door de thans gangbare brede opvatting van het begrip 'milieutechnologie', zoals die onder andere uit het NMP en het IOP Milieutechnologie naar voren komt.

beschreven potentiële mogelijkheden voortkomen uit een aanzienlijke hoeveelheid kennis en ervaring, die in TNO is opgebouwd op het gebied van milieutechnologie, en daarbuiten.

Dit neemt niet weg, dat bij nadere analyse vele van deze onderwerpen weer zullen komen te vervallen. Uitgangspunt is echter geweest, dat het in dit ontwikkelingsstadium beter is, opties ten onrechte te noemen dan ze ten onrechte weg te laten.

De onderwerpen zijn in eerste instantie gerangschikt op basis van de milieucompartimenten: lucht, water en bodem. Daarnaast zijn de paragrafen 'afval' en 'procesgeïntegreerde technologie' toegevoegd. Binnen elke paragraaf is de opsomming willekeurig.

Een echte analyse van de haalbaarheid van al deze opties kon in het kader van deze studie niet plaatsvinden. Echter, de toepassingen die volgens het projectteam - en volgens diverse andere experts op deelgebieden - als het meest veelbelovend werden beschouwd, zijn met een * in de kantlijn aangegeven. Vervolgens zijn in hoofdstuk 8 een zestal opties nader bezien voor wat betreft hun marktmogelijkheden. Hiervoor is zowel materiaal uit hoofdstuk 6 als uit hoofdstuk 7 gebruikt.

Tenslotte moet nog worden opgemerkt, dat de indeling van de onderwerpen in voornoemde paragrafen niet altijd 'hard' is. Diverse onderwerpen horen in meerdere paragrafen tegelijk thuis.

Een opsomming als deze is uiteraard nooit 'compleet'. Zij geeft echter wel aan, dat in principe zeer veel toepassingen denkbaar zijn, en dat het daarbij zowel om vrij grote hoeveelheden kan gaan als om kleine hoeveelheden 'specialties'.

En zelfs wanneer slechts een beperkt deel van deze opties levensvatbaar blijkt, kan nog gesteld worden dat diëlektrische methoden meer aandacht verdienen dan zij tot nu toe hebben gekregen.

7.1 Lucht

* 2) a. In situ reiniging rookgassen

Gassen als SO₂, NO en NO₂, die voorkomen in de afgassen van fossiele brandstoffen, zijn weinig reactief. De afvangst van deze gassen vereist dus media met speciale eigenschappen: reactieve vloeistoffen en adsorbentia, katalysatoren, etc.

Men kan ook de reactiviteit van de te verwijderen deeltjes vergroten door ze te bestralen. Een effectieve manier is, de verontreinigingen te laten reageren met radicalen. Deze radicalen kunnen worden gevormd, door het rookgas met een electronenbundel te bestralen. Het belangrijkste mechanisme hierbij loopt via de reactie met watermoleculen, die in het rookgas aanwezig zijn:



De verontreinigingen worden vervolgens door het OH radicaal geoxideerd tot zuren:



Deze zuren zijn, met ammoniak bijvoorbeeld, eenvoudig neer te slaan tot zouten.

Ook het aanleggen van een sterk inhomogeen elektrisch veld kan, via zogenaamde coronaontladingen, ionisatie veroorzaken. Daarbij kunnen, door versnelling van electronen in dat veld, aan de kop van een streamerontlading ³⁾ radicalen worden gegenereerd, die met de veront-

2) * betekent: veelbelovende optie

3) De kop van een ionenwolk, waaromheen zich een zeer lokaal sterk elektrisch veld bevindt. De elektronen worden daar dus sterk versneld, en genereren daardoor radicalen.

reinigingen reageren. Een dergelijke chemische omzetting blijkt men alleen te kunnen verkrijgen door korte hoogspanningspulsen toe te dienen aan het rookgas.

Chemische reiniging van verbrandingsgassen van elektrische centrales door bestraling met elektronenbundels bevindt zich thans in de demonstratie fase en zal, naar het zich laat aanzien, op den duur commercieel worden toegepast.

De mogelijkheden van chemische rookgasreiniging door gepulste corona zijn op laboratoriumschaal aangetoond. De eerste prototype installaties zijn, onder andere bij KEMA in Arnhem, in voorbereiding.

Het toedienen van diëlektrische energie aan een rookgas zal in principe een algemene toename van de energie-inhoud van het gehele gas geven, inclusief de zuurstof- en stikstofmoleculen, waarbij uiteindelijk een plasma van ionen en radicalen zal ontstaan. Hier is echter meer energie voor nodig, omdat de meeste energie gaat zitten in het aanslaan van moleculen in plaats van in het creëren van hete elektronen, die genoeg energie bezitten om radicalen te vormen. Het is echter niet ondenkbaar, dat men met microgolf verhitting een bijdrage zou kunnen geven aan stofreiniging, bijvoorbeeld door in een gasstroom meegevoerde deeltjes gefractioneerd te verweken. Men zou dan dus gebruik maken van de differentiële verhitting, die diëlektrische verwarming met zich meebrengt.

b. Renegereren adsorptie-installaties

Heeft diëlektrische straling voordelen bij het regenereren van adsorptie installaties? Bijvoorbeeld bij moleculaire zeven ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) voor gasreiniging, als alternatief voor stoomreiniging? (Bij snel verhitten kan men het aantal desorbers verminderen).

* c. Stankbestrijding

Kan diëlektrische techniek een rol spelen bij stankbestrijding? Bijvoorbeeld bij uitlaatgassen? Of bij het ontdooien van produkten? (diëlektrisch en/of gepulste coronaontladingen)

d. Toepassingen in motoren

Er worden experimenten opgezet/uitgevoerd aangaande katalytische verbranding van mengsels in motoren, en ontleding van schadelijke componenten van auto-uitlaatgassen met behulp van diëlektrische technieken. Dit onderwerp wordt thans bij het Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO nader bezien.

7.2 Water

a. Vergistingsprocessen

Worden methanogene bacteriën door het elektromagnetische veld gestimuleerd tot het opstarten van hun biogasproductie? (vooral bij batchgewijze productie interessant).

7.3 Bodem

* a. Sinteren, verglazen

Kunnen milieuschadelijke componenten, zoals zware metalen, in situ worden vastgelegd door diëlektrische behandeling, zodat zij niet meer uitloggen? Voor andere toepassingen, bijvoorbeeld radioactieve afvallen, is (diëlektrische) verglazing een gerealiseerde toepassingsmogelijkheid [10].

7.4 Afval

* a. Hergebruik van asfalt

Hergebruik van asfalt is nu tot 50% mogelijk, omdat het oude door het nieuwe moet worden verwarmd. Als men het oude asfalt diëlektrisch kan voorverwarmen is een hoger percentage hergebruik mogelijk. De temperatuur van de smelt kan dan lager zijn, waardoor de koolwaterstof emissies afnemen. (De warmteoverdracht van asfalt is slecht, daarom heeft diëlektrische verwarmen voordelen).

* b. Mobiliseren zware metalen

Bepaalde verbindingen van zware metalen zijn in een oplosbare stof om te zetten, na een thermische - diëlektrische - behandeling met HCl, bijvoorbeeld $\text{PbO} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{PbCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$. De aldus mobiel gemaakte verbinding kan door een vervolgbehandeling (electrolyse, electroforese, magnetische behandeling) worden verwijderd.

Een aantal geïmmobiliseerde zware metalen kunnen worden gemobiliseerd door het materiaal onder (diëlektrische) verhitting te reduceren. Bijvoorbeeld $\text{CrO}_3 \rightarrow \text{Cr}^{3+}$, etcetera.

c. Selectief slopen van woningen en gebouwen

Is het mogelijk, een kit te ontwikkelen die diëlektrisch kan worden verweekt, waarmee ramen in kozijnen worden bevestigd? Bij selectief slopen kunnen deze dan weer diëlektrisch worden losgenomen, waardoor glas en sponning onbeschadigd kunnen blijven. (zie ook punt j en k).

* d. Afgewerkte smeerolie

Het verwijderen van water en organochloorverbindingen uit afgewerkte smeerolie, als onderdeel van een recyclingproces van smeerolie.

* e. Vitrificatie van afvalfen die zware metalen bevatten

Bij een aantal afvalsoorten, die zware metalen bevatten, kan uitloging in principe worden voorkómen door ze te vitrificeren (verglazen). Het betreft hier niet alleen vervuilde grond (zie 7.3 a), maar ook fracties van waterbodems, en allerlei WCA-slib. Daarnaast bestaan diverse andere mogelijkheden, die nader zouden moeten worden onderzocht.

* f. Onsluiten van anorganische en organische afvalfen

Het diëlektrisch bewerken van afval, teneinde chemische reacties te bewerkstelligen, waardoor het milieuvriendelijker, of beter verwerkbaar, of herbruikbaar wordt.

* g. Lopende band drogen van afvallen

Het bestaande concept van diëlektrische drogers (met lopende band in- en uitvoer) is vermoedelijk goed bruikbaar voor verwerking van afvallen: slibben, dikvloeibare stoffen, brokjes vaste materialen.

* h. Detecteren chloorverbindingen

Door hun relatief hoge verliesfactor kunnen allerlei organische chloorverbindingen in mengsels selectief worden verwarmd, vervolgens IR worden gedetecteerd en worden verwijderd.

i. Verwerking groente- en fruitafval van huishoudens

Indrogen van groente- en fruitafval van huishoudens door het inbouwen van een diëlektrische droger in de afvalbak. Hierdoor minder stank, minder ruimtebeslag en hoogwaardiger toepassing van het afval (als veevoer) mogelijk.

* j. Demontage van kunststof onderdelen

Door (bijvoorbeeld in auto's) kunststoffen te bevestigen met een kit die een hoge verliesfactor bezit, kan snelle demontage door diëlektrische verwarming plaatsvinden.

k. Alternatief voor cement

Door bakstenen aan elkaar te hechten met een diëlektrisch te verwarmen kit is eenvoudige sloop en verbeterd hergebruik van sloopafval mogelijk.

* l. Verwijdering onkruid

Het op niet-chemische wijze verwijderen van onkruid tussen bijvoorbeeld stoeptegels (niet-selectief doden van planten). Ook het doden van aard-appelloof kan op deze manier plaatsvinden.

7.5 Procesgeïntegreerde technologie

* a. Droogprocessen

Toepassing van diëlektrische technieken kan een aantal voordelen bieden in vergelijking tot conventionele droogprocessen:

- Doordat de warmte, benodigd voor het verdampen van het vocht, niet door middel van hete lucht in het materiaal gebracht wordt, hoeft er alleen met lucht gespoeld te worden om het vocht te kunnen absorberen. Hiervoor is een veel kleiner luchtdebiet nodig. Een belangrijke consequentie hiervan is, dat er in het algemeen veel minder stof, geur, of andere emissieproblemen zullen optreden. Men zou hierbij kunnen denken aan toepassingen in de voedingsmiddelenindustrie (suiker, zetmeel, veevoederindustrie), chemische industrie (drogen van poeders) en farmaceutische industrie.
- Diëlektrische technieken zijn met name geschikt om het laatste restje vocht uit materialen te verwijderen, omdat de energie zich preferent richt op de watermoleculen. Bij conventionele processen moet men vaak met een vrij hoge temperatuur nadrogen om het gewenste (hoge) droge-tofpercentage te verkrijgen. Hierdoor ontstaat vaak produktschade, door plaatselijke oververhitting. Door toepassing van diëlektrische technieken kan produktuitval beperkt worden, en bovendien een belangrijke energiebesparing worden verkregen.

* b. Verhittingsprocessen

In diverse takken van de industrie worden verhittingsprocessen gebruikt om produkten te verwarmen. Toepassing van diëlektrische technieken kan ook hier aantrekkelijkke voordelen bieden.

- In de voedingsmiddelenbranch wordt vaak verhitting van het produkte toegepast om de houdbaarheid te vergroten (blancheren, steriliseren, pasteuriseren). Soms gebeurt dit in de eindverpakking, soms in een direct contact warmtewisselaar. In beide gevallen kan vervuiling van het contactoppervlak ('aankoeken' door lokale oververhitting) proble-

men geven. Met name in de zuivelindustrie hebben noodzakelijke additionele reinigingsprocessen gevolgen voor het milieu; er moeten grote hoeveelheden stoom, danwel agressieve schoonmaakmiddelen worden gebruikt. Bij toepassing van diëlektrische technieken ontstaat de warmte in het produkt zelf en kan vervuiling van het contactoppervlak worden voorkómen.

- Voor verhitting van produkten worden meestal hete gassen toegepast, die soms in direct contact komen met het te behandelen produkt. Hierdoor ontstaat een sterk vervuilde afgasstroom, waardoor weer extra filters en rookgasreinigers noodzakelijk zijn. Door gebruik te maken van diëlektrische technieken komen er geen gassen in aanraking met eventueel vervuilde produkten, en kunnen emissies tot een minimum worden teruggebracht.

c. Chemische processen

Wellicht kunnen diëlektrische technieken ingezet worden bij chemische omzettingsprocessen:

- Katalytische werking:
Opstarten van katalytische reacties, bijvoorbeeld katalytische oxydatie door een zeer snelle temperatuurstijging?
- Initiatie van reacties:
Kan initiatie van reacties worden gestimuleerd door diëlektrische technieken, bijvoorbeeld ald gevolg van de hoge energiedichtheid?
- Hydrolyse van organische chloorverbindingen:
Is het kookpunt van organische chloorverbindingen hoog, dan kan men deze met NaOH behandelen en met diëlektrische technieken hydrolyseren tot alcoholen, die minder milieu-onvriendelijk zijn. Dit heeft wellicht voordelen boven conventionele verwarmingsmethoden.

8. ENKELE MARKTMOGELIJKHEDEN (SELECTIE UIT HOOFDSTUK 6 EN 7)

In dit hoofdstuk zullen enkele marktmogelijkheden van diëlektrische behandelingsmethoden in de milieutechnologie worden geëvalueerd. Voorafgaand hieraan zullen een aantal aspecten van de marktkwaliteit van milieutechnologische processen in het algemeen worden gezien. Verder zal aandacht worden besteed aan de problematiek van de economische vergelijkingsbasis. Vervolgens worden voor de drie geselecteerden kansrijke opties uit hoofdstuk 6,

- * In situ grondreiniging,
- * Pyrolyse van autobanden en granulaat,
- * Slibverwerking,

de marktmogelijkheden nader gezien. Tenslotte zullen enkele in hoofdstuk 7 genoemde toepassingsmogelijkheden van diëlektrische behandeling op milieugebied worden gezien, te weten:

- * Afgedankte smeerolie, snij-olie en dergelijke.
- * Vitrificatie (verglazing) van zware metalen bevattende afvallen.
- * Ontsluiten van anorganische en organische afvallen.

Bij de analyse is een leidraad gekozen aan de hand van de volgende vragen:

- Welke mogelijkheden zijn er voor de afzet van de produkten ontstaan door toepassing van de huidige beschikbare technologie?
- Welke marktmogelijkheden zijn er voor de afzet van produkten, verkregen op basis van het beschouwde diëlektrische proces?
- Hoe ligt de markt voor het betreffende diëlektrische proces?
- Wat kan er gezegd worden over de gerelateerde R&D markt?
- Zijn er nog speciale kanttekeningen bij het vorige te maken? (bijvoorbeeld: Waar liggen de belangrijkste problemen?)

8.1 De marktproblematiek van milieutechnologische processen

In het kader van deze studie is het van belang (zowel uit het oogpunt van de economie als vanuit het overheidsbeleid) de marktkwaliteit van milieutechnologische verwerkings- en recyclingsprocessen te gezien. Daarbij staat de vraag centraal, of het beschouwde proces (ongeveer)

dezelfde producten als de gebruikelijke huidige verwerkingsprocessen, levert danwel meer- of minder-waardige produkten. Gezien de hoge kosten van diëlektrische processen is het welhaast een vereiste, dat zij leiden tot hoogwaardiger produkten dan die, welke bij conventionele verwerking ontstaan.

In dit kader moet ook rekening worden gehouden met het (toekomstig) beleid van de overheid. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat een thans toegestane verwerkingsmethode in de overzienbare toekomst niet meer toegelaten zal worden, zodat men dan voor de keuze komt te staan:

- een beschikbaar, maar duurder proces, dan momenteel gebruikelijk is, te benutten (bijvoorbeeld verbranden)
- een nieuw proces ontwikkelen
- de produktie, waarbij de betreffende afvalstof vrijkomt, te staken

Hierna zullen in het algemeen de kosten van verbranden van de beschouwde afvalstof als economische vergelijkingsbasis voor de marktbeschouwing dienen.

Verder zijn de volgende vragen van belang:

- Wat mag het alternatieve proces kosten?
- Wat wil of zal de overheid in de overzienbare toekomst voor randvoorwaarden stellen aan de verwerking van afvalstoffen?

8.2 Rubberafvallen

Bij rubberafvallen gaat het, voor de situatie rond het jaar 2000, minimaal om een hoeveelheid van circa 80 kt/a, waarvan dan naar schatting 40 kt/a zal worden verbrand, 20kt/a gestort en 20kt/a hergebruikt (bijvoorbeeld in 'fluisterasfalt', als stootkussen in de scheepvaart, als tegels voor blindengeleiding en speelplaatsen etc.) [13]. De huidige toepassingen van afgedankte banden en dergelijke zijn laagwaardig. Het verbranden van autobanden kost (inclusief inzameling en transport) f 140/t. Als dit materiaal gestort mag worden geldt als all-in prijs f 70/t [13].

Voor een hoogwaardige verwerking van rubber afvallen valt te denken aan twee processen:

- Een conventioneel pyrolyseproces. Volgens [14] levert een bedrijf met een capaciteit van 4kt/a een positieve opbrengst van circa f 100/t rubberafval. De producten uit dit proces (gas, olie, roet, benzeen en metalen kunnen als grondstof of als brandstof worden verkocht.
- Een diëlektrisch pyrolyseproces (volgens [12] leidt tot een winst van circa f 73/t voor een bedrijf van 50 kt/a, met een investering van circa Mf 31. Rond het jaar 2000 zou men in Nederland twee van dergelijke installaties nodig kunnen hebben. Dit betekent een totale investering van rond Mf 60 in pyrolyse van rubberafvallen in Nederland rond het jaar 2000.

Beide typen pyrolyseprocessen, het conventionele en dat met diëlektrische verhitting, lijken economisch duidelijk gunstiger te liggen dan storten of verbranden van rubber. In een nader onderzoek zouden deze twee processen moeten worden vergeleken op hun technische en economische mérites.

Voor beide (nu nog in het pilot-stadium verkerende) technieken geldt verder, dat R&D nodig is om voor Nederland pasklaar te maken, zowel in technisch als in milieutechnologisch opzicht. Dit geldt ook voor de planning van de logistiek, verbonden aan de aanvoer van rubberafvallen en de voor afvoer van pyrolyseproducten (systeemstudies).

8.3 Extractieslib

Extractieslib is afval, afkomstig uit de behandeling van vervuilde grond of waterbodems. Totaal komt er circa 150 kton/a vrij. Na het scheiden (in een hydrocycloon) blijft daarvan uiteindelijk 30 kton/a (met 50% water) aan extractieslib over.

Het afdampen van de verontreinigingen uit de genoemde kleifractie door verhitting in een roterende oven is niet mogelijk, omdat de klei reeds bij een relatief lage temperatuur bakt. Daardoor wordt het genoemde organische materiaal ingesloten. Momenteel is geen betere werkmethode beschikbaar dan verbranden. De betreffende kosten belopen f 405/t, exclusief inzameling en transport [15]. Het materiaal wordt nog gestort zolang dit wettelijk is toegestaan. Minimaal bedragen de kosten voor storten f 375/t [15].

Deze kosten liggen zo hoog, dat er een duidelijke prikkel bestaat om een goedkopere verwerkingsmethode te vinden. Als het om een diëlektrische behandeling gaat, valt te denken aan de volgende processtappen:

- * Drogen
- * Uitdampen van de verontreinigingen
- * Zuivering van de afgassen
- * Eventueel sinteren, als het kleimateriaal zware metalen zou bevatten.

De kostenschatting voor zo'n diëlektrisch proces (startconditie: 50% watergehalte) verloopt als volgt:

- Het drogen kost circa f 160/t droge stof; (waarvan circa f 40/t electriciteitskosten, bij een kWh-prijs van f 0,12) [17] ¹⁾.
- Voor het afdampen van de nog aanwezige chloorkoolwaterstoffen wordt met een extra toevoeging van energie van nog eens rond f 40/t droge kleistof gerekend, en voor de afgasreiniging f 30/t [18].
- De totale kosten voor een diëlektrische behandeling van klei worden dan naar schatting $f\ 160 + f\ 40 + f\ 30 = f\ 230/t$ droge kleistof.

De aldus geschatte kostprijs voor diëlektrische behandeling van verontreinigde kleifracties ligt beduidend onder de huidige kosten voor storten of voor thermische behandeling. Er is dus een positieve indicatie gevonden om hiervoor een diëlektrisch proces te ontwikkelen.

Opmerkingen

- Het ligt in de lijn van de verwachtingen [19, 40] dat men de eventueel in dergelijke kleifracties aanwezige zware metalen kan insmelten. De betreffende soort klei zal boven 700°C gaan sinteren [20]. Vermoedelijk zal deze behandeling nog eens circa f 40/t aan kosten vergen.
- Volgens inlichtingen [20] bestaat een diëlektrisch apparaat voor een dergelijke toepassing reeds in Canada. Het betreft een semi-continu

¹⁾ Geschat naar analogie van praktijkgegevens over het drogen van textielwaren.

proces, waarbij de te behandelen stof zich in (diëlektrisch neutrale) keramische bakken bevindt. Deze zijn op een lopende band bevestigd, die zich door de diëlektrische oven beweegt. De diëlektrische instraling is zodanig gerealiseerd, en de verblijfstijd zodanig gekozen, dat de teflon transportband niet te heet wordt.

- Wanneer het om de behandeling van waterbodems gaat, zou de diëlektrische apparatuur op een baggerwerktuig gemonteerd kunnen worden. Het betreffende behandelingsproces zou men zich dan als volgt kunnen voorstellen:

- Nadat de bagger met behulp van een hydrocycloonsysteem is gescheiden in een (schone) zandfractie en in een verontreinigde kleifractie, wordt de laatstgenoemde stroom verder behandeld.
- Mogelijk kan men eerst met behulp van een filterbandpers mechanisch het meeste water uit de kleifractie verwijderen, voordat het materiaal diëlektrisch verder wordt bewerkt.
- De genoemde klei ondergaat een diëlektrische droging, gevolgd door het diëlektrisch afdampen van organische verontreinigingen.
- Eventueel zou men het anorganische materiaal nog kunnen sinteren om de zware metalen vast te leggen.
- Tenslotte wordt het (gesinterde) materiaal (na koeling) nuttig gebruikt, of eventueel gestort.

Een optie zou misschien kunnen zijn, dit product af te zetten bij steen- of dakpanfabrieken, die veelal langs rivieren gelegen zijn. Ook kunnen dit soort kleiprodukten als wegomateriaal of ophoogmateriaal worden verkocht.

Het gepresenteerde diëlektrische proces levert mogelijk hoogwaardiger materialen op dan de huidige verwerkings/verwijderingsmethoden voor dit soort kleimaterialen. De geschetste opzet houdt tevens in, dat de inzamelings- en transportkosten laag blijven.

In de R&D-sfeer zouden de volgende activiteiten van belang kunnen zijn:

- Opzetten van een proefinstallatie op laboratoriumschaal en, bij positief resultaat:
- Het ontwerpen van een semi-technische installatie
- Onderzoek van de kwaliteit van het verkregen kleiprodukt

- Aangeven van marktmogelijkheden voor dit kleiproduct
- Onderzoek naar de optimale verwerking van het materiaal uit de afgas-zuiveringsstap
- Analyse van de logistieke achtergrond van de diëlektrische verwerking van kleimaterialen (centrale of decentrale verwerking op de vervuilde is, mogelijk samen met andere werkzaamheden zoals baggeren, die toch periodiek moeten plaatsvinden).

8.4 In situ reiniging van de bodem door uitdampen vluchtige verontreinigingen

Het blijkt dat de grondsoort en de bodemgesteldheid van grote invloed zijn op de resultaten en kosten van de grondreinigingsmethoden [21].

Voor een vergelijkend overzicht wordt verwezen naar tabel 5. De oorspronkelijke tabel, uit [22], is aangevuld met gegevens over de in situ ²⁾ diëlektrische behandeling van de bodem [23, 24] en over de thermische behandeling van uitgegraven ('on site') grond [25]. Deze laatste methode geldt als vergelijkingsbasis.

Men kan uit de genoemde tabel concluderen, dat de kosten van in situ technieken voor bodemreiniging in het algemeen lager liggen dan die voor een on site, of verder afgelegen (off site), thermische behandeling - waarschijnlijk door het ontbreken van uitgravings-, transport- en stortkosten. Anderzijds maakt men kosten bij in situ reiniging, doordat men met een mobiel zuiveringssysteem moet werken.

Opvallend is verder de relatief lange duur van een in situ project (enige maanden), behalve bij de diëlektrische methoden (circa 14 dagen). Uit tabel 5 blijkt dat de diëlektrische bodemreinigingsoptie duidelijk gunstiger ligt, zowel qua kosten als tijdsduur.

De bodemsaneringsmarkt heeft, naar verwachting, voor Nederland een aanzienlijke omvang. Men mag daarbij denken aan een omzet van ca. 1 mld gulden/a [21].

2) 'In situ' : grond blijft bij de behandeling op zijn plaats.
'On site' : grond wordt uitgegraven en ter plekke behandeld.
'Off site' : de grond wordt uitgegraven en elders behandeld.

Daarbij moet men echter rekening houden met vertragende factoren, bijvoorbeeld doordat vervuilde locaties worden afgedekt of 'ingepakt' - of gebrek aan financiële middelen.

Afrondend wordt opgemerkt dat, wanneer grond niet alleen maar gecontamineerd is met vluchtige stoffen, maar ook met zware metalen, de diëlektrische methode mogelijk te combineren is met elektroreclamatie, en wel elektroforese [26, 27]. Afhankelijk van de elektrische bodemweerstand en het soort aarde ligt de reinigingsprijs van elektroforese tussen f 110/t en f 300/t [26].

Ten aanzien van IIT-methode (zie 6.2) worden in [9] nog de volgende details vermeld:

Voor een installatie waarmee 4047 m² (1 acre) tot 6,1 meter diepte werd behandeld tot een temperatuur van 300 tot 400°C wordt een installatie gebruikt met 10 stuks 2 Megawatt radiofrequente generatoren. De grond bevat 5 tot 20 massaprocent vluchtige bestanddelen, waarvan 10 procent organisch. Men gaat ervan uit dat hiermee 2,6 stukken grond per jaar kunnen worden behandeld. De totale behandelingsduur is 60 tot 90 dagen, in het totaal is men circa 9 maanden op locatie bezig met het opbouwen en afbreken van de installatie. De mobiele RF installatie is slechts gedurende 60 tot 90 dagen benodigd. Omdat een aantal andere componenten van de installatie dubbel zijn uitgevoerd, kan de (dure) RF installatie ondertussen doorverhuizen naar een volgende locatie. Inclusief deze dubbel uitgevoerde componenten komt men op totale apparatuurkosten van 27,5 miljoen dollar.

Aldus denkt men tot een prijs van 50 tot 90 dollar per ton grond te komen.

In vergelijking tot de kosten voor afgraven en thermische behandeling in roterende ovens is dit bedrag vrij laag. Deze in situ methode kan, indien de kostenberekening niet al te geflatteerd is, dus inderdaad concurrerend werken.

In de R&D sfeer zou het zinvol zijn, de reeds bestaande diëlektrische methode om grond insitu te schonen te beproeven voor de Nederlandse

situatie. Zo kan de opzet van IIT worden getest voor verschillende soorten gecontamineerde Nederlandse bodems, c.q. grond. Bij een positief resultaat kunnen vervolgens een aantal demo's worden georganiseerd. Het is dan beter mogelijk, de economische haalbaarheid van de diëlektrische methode(n) vast te stellen.

Tabel 5 Economisch overzicht bodem/grondreinigingsprocessen

Firma	t [bearbeitet]	t [abgeschlossenen mit Referenz]	in wievielen Projekten	t [aktuelle Bearbeitung]	Kontamination	Verfahren	Mobilität Anlage	Durchsatz Bearbeitungszeit	Reststoffe zum Deponie Verbrennung	Preis ca. pro t	Schnittstelle für den preis
Biodetox	26.700 69.500	11.500 30.500	7 16	13.200 21.000	Heizöl, Diesel Phenol, Benzol Toluol, Xylo PAK	Microbiologisch Beet in situ	keine Begrenzung	2 - 4 Monaten 2 - 36 Monaten	keine	20-45 DM 20-75 DM	Beet liegt vor komplett
Hut	4 Mio	1.5 Mio	312	2,5 Mio	CKW CFKW Benzol Toluol	Bodenluftabsaugung + in situ Strippen	keine Begrenzung	6 - 30 Monaten	A-Kohle zur Verbrennung oder Rege- nerierung	<10 DM	komplett
Mannesmann Anlagenbau	1.300	1.300 Sept. 88	1	1.300	Mineralöl H 18	Microbiologisch Beet	keine Begrenzung	max. 12 Monaten	keine	90-110 DM	inkl. Transport und Beeteinrichtung
SKW	3.760	3.160	4	600	Kerosin Heizöl Diesel	Microbiologisch Beet	keine Begrenzung	max. 1 Monat	keine	30-80 DM	inkl. Beeteinrichtung
Umweltschutz Nord	40.200 4.100	11.200 3.100	15 4	29.000 1.100	Diesel Rohöl Benzin PAK Ethylamin	Microbiologisch Beet in situ	keine Begrenzung Einrichtg nach Bedarf	6 - 18 Monaten 6 - 9 Monaten	keine	180-250 DM 50-100 DM	Bodenmischung und Beeteinrichtung komplett
Züblin	Pilot >1000t	>1000t	Unterschied- lichste Böden	Auslastung	Gasswerkboden Kokereiboden Mineralöl CKW PCB u.a.	thermisches Verfahren mit 4-stufiger Ab- gasreinigung	mobiles Containersystem	0,5 t/h	Filterstäube ca. 5%/100 des eingesetzten Bodens	250 DM	Eingang Anlage inkl. Entsorgung der reststoffe
ATM (Ned.)										f 250 tot f 400	
IIT	30				Organ chloor, Olie	Diä- lektr. RF	Mobiel			\$ 30 tot \$ 50	180 °C
IIT					Organ chloor, Olie	Diä- lektr.	Mobiel	14 d.		½ tot ¼ Prijs therm.	300 tot 400°C

8.5 Afgewerkte smeerolie

In Nederland wordt circa 165 kt/a nieuwe smeerolie gekocht. Daarvan komt naar schatting 100 kt/a aan afgewerkte smeerolie vrij, waarvan ongeveer 45 kt/a verdwijnt [28]. Volgens inlichtingen [29] vraagt het gereed maken van afgewerkte smeerolie voor gebruik als:

- smeerolie: f 300/t tot 400/t
- kraakgrondstof voor olie-industrie of brandstof: f 120/t tot 130/t.

In Nederland heeft in principe men voor de laatstgenoemde weg gekozen - hoewel de implementatie op dit moment nog een probleem vormt, door diverse verschillen van inzicht bij de betrokken partijen [41]. De betreffende behandeling bestaat uit het verwijderen van:

- grove deeltjes en metalen
- water
- organochloorverbindingen

Men zou zich kunnen voorstellen, dat de beide laatst genoemde componenten ook diëlektrisch uit de afgewerkte smeerolie zijn af te scheiden - vergelijkbaar met de behandeling van de met organochloorverbindingen gecontamineerde natte kleifractie (zie 8.3). Gezien het lage watergehalte van afgewerkte smeerolie kan men denken aan een prijs rond f 160/t tot f 200/t (inclusief kosten voor de behandeling van de afgassen).

In dit kader zouden enige laboratoriumproeven moeten worden uitgevoerd om inzicht te krijgen in de mate, waarin allerlei ongewenste componenten van afgewerkte smeerolie diëlektrisch zijn af te scheiden. Mogelijk is zo een goedkopere weg te vinden om afgewerkte olie te recyclen tot nieuwe smeerolie. De verkoopprijs van nieuwe smeerolie bedraagt circa f 10.000/t. Dit bedrag moet een duidelijke prikkel zijn om afgewerkte olie als smeerolie te recyclen. Het ligt namelijk in de lijn van de verwachting (gezien de bereidingswijze van de smeerolie uit primaire grondstoffen [30]) dat de produktiekosten van primaire smeerolie ongeveer even hoog zullen zijn als die van het zuiveren van afgewerkte olie tot smeeroliekwaliteit. De inzamelingskosten worden bij het nieuwe overheidsbeleid gedekt door het te heffen statiegeld op nieuwe smeerolie (circa f 220/t) [31].

Vermoedelijk is de thans gekozen weg tot hergebruik van afgewerkte smeerolie eerder gekozen uit conservatisme ('men wenst geen secundaire grondstoffen te gebruiken') dan op basis van echte rationele argumenten. Er kan in dit kader gewezen worden op een parallel, namelijk de tot voor kort geldende opvatting, dat het gebruik van loodvrije benzine niet haalbaar zou zijn.

Het zou daarom zinvol zijn, dat onderzoek wordt uitgevoerd hoe de inzameling van afgewerkte smeerolie selectiever kan geschieden. Het gaat er daarbij onder andere om dat diverse soorten, zoals carter olie, hydraulische olie en remvloeistof van auto's, apart worden ingezameld.

8.6 Vitrificatie van afvalstoffen die zware metalen bevatten

De prikkel om in dit kader naar nieuwe technieken te zoeken komt voort uit het streven van de overheid, de mobiliteit (uitloogbaarheid) van ongewenste verontreinigingen in afval als één van de criteria te gebruiken om afvalstoffen te klassificeren [31]. Dit betekent, dat het vastleggen van bijvoorbeeld zware metalen in een afvalstof de verwijderingskosten (transport-, verwerkings- en stortkosten) aanzienlijk kan verminderen. Zelfs verwacht men van bepaalde - als chemische afval gekwalificeerde - afvalstoffen, door middel van een thermische behandeling, marktwaardige producten te kunnen maken, wanneer het nieuwe overheidsbeleid wordt geëffectueerd [32]. Men zoekt daarbij onder andere aansluiting op het Bouwstoffenbesluit van de overheid.

De thermische behandeling van waterbodem materiaal tot een eco-grind zou circa f 200/t kunnen kosten [33].

Het potentiële diëlektrische proces om zulke materialen te behandelen is reeds in 8.3 besproken. De geschatte kostprijs van diëlektrische vitrificatie belooft rond f 230/t (exclusief drogen van het materiaal). Het storten in een C2 deponie vraagt minimaal f 375/t [16]. Er blijkt dus een aanzienlijke marge te bestaan tussen dit storten en de vitrificatie. De potentiële hoeveelheden zijn daarbij aanzienlijk (zie tabel 6 [33]). Het zou daarom nuttig kunnen zijn de stoffen, genoemd in de tabel 6 nader te evalueren voor diëlektrische behandeling. Voor verdere aanbevelingen wordt verwezen naar 8.3.

90-250/R.22/HVG

95

Tabel 6 Overzicht van afvalstoffen die mogelijk in aanmerking komen voor vitrificatie in Nederland ([26], 1985; zie ook [40], 1989)

WCA-RESTSTROMEN		<u>huidige reststroom (t/a)</u> recuperatie verwijdering	
<u>Grote bedrijven</u>			
- jarosiet-zinkfabrieken		100.000	
- as uit zinkwit ovens			
- oxykalkslik-hoogovens		100.000	
- metallurische slakken		5.000	
- slib rayonfabricage, Akzo		12.000	
- asbestcementafval (Eternit)		10.000	
Polyfosfatenfilterkoek		7.000	
Kalkhoudende restanten (chemiegipsen)		22.000	
Slakken		50.000	
Bleekaarde			
Katalysatorresten		400	
Smeltzouten (Aluminium)		5.000	
<u>Gieterijen</u>			
- ovenlakken		19.000	
		600	
- koepelovenstof		26.000	
- vormzand		93.000	
- straal-, snijstof	4.600	600	
<u>Metaalproductenindustrie + machine-industrie</u>			
- schroot (ferro-metaal)	182.000	2.500	
- schroot (non-ferro)	13.600		
- zand, klei		17.500	
- hardingszouten		200	
WCA slibs (10% d.s.)		400.000	
- galvanisch	10.000 ton		
- pigment	1.000 ton		
- fluoride	1.000 ton		
- metaal	2.000 ton		
- hydroxiden	2.000 ton		
- etc.			

8.7 Ontsluiten van anorganische en organische afval

In dit kader zou men in drie richtingen kunnen denken, namelijk:

- a) Chemische omzetting van afval in een milieuvriendelijker materiaal, dat eventueel verder is te verwerken. (Bijvoorbeeld het hydrolyseren van organohalogeenvverbindingen, zoals PBC's, dioxines en pesticiden.) De totaal geschatte hoeveelheden waar het hier om gaat zijn:

- laag gechlloreerd: 35000 t/a [26]
- hoog gechlloreerd: 8000 t/a [26]

Het diëlektrisch ontsluiten van materialen ten behoeve van chemische analyse is bekend [34]. Voor de conventionele verwerking van organohalogeenvverbindingen is nog geen economisch bevredigende oplossing gevonden. Momenteel worden dergelijke afvalstoffen verbrand. De betreffende kosten zijn hoog, namelijk f 400/t of meer [15, 21].

- b) Losmaken van milieugevaarlijke, of waardevolle bestanddelen uit een afvalstof, zodat de componenten economisch verder zijn te verwerken tot verkoopbare produkten.

Als voorbeelden gelden in dit kader mogelijk:

- Losmaken van (dure) zware metalen uit afval, afkomstig van afgedankte (micro) electronica.
- Winnen van eetbare oliën uit 'schone' plantaardige en/of dierlijke afval

Verder is bekend, dat men aardolie versneld uit gesteenten kan afscheiden door toepassing van microgolven.

Meestal wordt het afval van grondstoffen uit de spijsolie-industrie afgezet in de veevoederbranche. Mogelijk kan langs diëlektrische weg eerst nog hoogwaardiger spijsolie uit zulke afval

- c) Het beter verteerbaar c.q. acceptabel maken voor dierlijke consumptie van bepaalde afval

Langs biotechnische weg wordt reeds gewerkt aan het beter verteerbaar maken van grondstoffen voor de veevoederindustrie [37]. Vermoedelijk

is in dit kader ook een diëlektrisch proces op economische basis toepasbaar. Reeds worden producten zoals graan, aardappelen en tomaten kort diëlektrisch verhit (geblancheerd) in de voedingsmiddelenindustrie [37].

Het betreffende diëlektrisch onderzoek is ten dele verwant aan research op gebied van diëlektrische toepassingen in de procesindustrie. Daarom zou het nuttig kunnen zijn, het werk op dit gebied daarmee af te stemmen. Diëlektrische toepassingen in procesindustrie verkeren echter nog in de ontwikkelingsfase, zodat in dit stadium nog nauwelijks kostprijzen bekend zijn.

9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

1. Diëlektrische technieken zijn naar verhouding kostbaar; zij zijn daarom alleen economisch aantrekkelijk, wanneer zij essentiële voordelen bezitten ten opzichte van de conventionele behandelingswijzen.
2. In de milieutechnologie zijn diverse zinvolle toepassingen van diëlektrische methoden mogelijk. Daarbij kan het gaan om het benutten van de gunstige eigenschappen van diëlektrische technieken ten aanzien van de wijze van warmteontwikkeling, (in het materiaal zelf, selectief), betere procesbeheersing, afmeting van de installatie, ontbreken van verbrandingsgassen, etc.
3. Voor grote vermogens is diëlektrische verwarming om economische redenen minder geschikt (microgolf: tot 0,2 MW, radiofrequent: tot 2 MW).
4. Van de materialen, die uit de PRIAF lijst werden geselecteerd en beproefd, zijn
 - rubberafval,
 - verontreinigde grond (in situ), en
 - slibkansrijke opties voor toepassing van diëlektrische technieken.
5. Uit de overige toepassingsmogelijkheden lijken de opties:
 - versinteren/verglazen van grond en slib (immobiliseren)
 - rookgasreiniging (plasma-werking)
 - verwerking afgewerkte smeerolie
 - hergebruik van asfaltinteressant genoeg om nader te onderzoeken.
6. Onderzoek op het gebied van verontreinigde grond zou moeten aansluiten op ontwikkelingen in binnen- en buitenland, waar reeds gewerkt wordt aan commerciële versies voor radiofrequente in situ grondreiniging.

7. Gezien de aard en omvang van de problematiek met betrekking tot extractieslib, kan nader onderzoek naar de mogelijkheden voor diëlektrische verwerking interessant zijn. Daarbij zou het met name kunnen gaan om:
 - Onderzoek naar het bereikbare reinigingsrendement met betrekking tot vluchtige organische stoffen, aanwezig in extractieslib.
 - Onderzoek naar noodzakelijke nabehandeling van ontstane gassen.
 - Onderzoek naar de mogelijkheid om zware metalen te immobiliseren door ze vast te sinteren of te verglazen met behulp van diëlektrische technieken.
 - Onderzoek naar de economisch meest aantrekkelijke uitvoeringsvorm voor een diëlektrische slibverwerkingsoven, waarbij ook logistieke aspecten worden betrokken (mobiel systeem, op een drijvend platform, aaneengesloten systeem, meest aantrekkelijk vorm van het gesinterde restprodukt).
8. Voor een onderzoek, zoals genoemd onder conclusie 7 is tenminste een beproevingsfaciliteit noodzakelijk, waarbij daadwerkelijk extractieslib kan worden verhit tot aan de verglazingstemperatuur, terwijl de ontstane gassen op verantwoorde wijze worden opgevangen en behandeld.
9. Nader (literatuur)onderzoek naar de mogelijkheid om met behulp van diëlektrische technieken rookgassen te reinigen lijkt zinvol, temeer daar er inmiddels Japanse patenten zijn gesignaleerd, waarin dergelijke processen worden gesuggereerd. Ook kan, op grond van enkele oriënterende berekeningen (door Fysisch Elektronisch Laboratorium van T.N.O. hoofdgroep Defensieonderzoek), wellicht worden aangegeven, in hoeverre zo'n techniek bruikbaar is voor grote afgasstromen. Het ligt voor de hand, bij deze studie andere elektrische methoden van rookgasreiniging (onder andere elektrostatische stofafvang, corona pulsontlading) mede te bezien.
10. Een haalbaarheidsstudie naar het diëlektrisch recyclen van verontreinigde oliën lijkt alleszins gerechtvaardigd.

11. Een studie naar de mogelijkheden van verhoging van het hergebruikspercentage van oud asfalt door toepassing van diëlektrische smelttechnieken, samen met een wegenbouwer, moet zinvol worden geacht. Ook de emissiebeheersing dient daarbij te worden gezien.
12. Een onderzoek naar diëlektrische pyrolyse van rubberafval (met inachtneming van buitenlandse ervaringen), in combinatie met een marktonderzoek naar de afzetmogelijkheden van de pyrolyseproducten, wordt aanbevolen.
13. Uit de voorgaande aanbevelingen mag niet worden geconcludeerd, dat de mogelijkheden van diëlektrische toepassingen in de milieutechnologie daarmee wel 'zo ongeveer' zijn uitgeput. Bij de verdere ontwikkeling van de milieutechnologie zullen zich steeds nieuwe diëlektrische toepassingsmogelijkheden voordoen. Bij de afweging daarvan ten opzichte van andere technieken staan criteria als vermeld in conclusies 2 en 3 centraal.

90-250/R.22/HVG

101

10. REFERENTIES

[1] Jansen, W.J.L.

Diëlektrische technologie in de industrie
Elektrotechniek 67 (1989) 7 juli, blz. 641-648
(Bijlage 3 van dit rapport)

[2] Consumentengids, maart 1990, blz. 142-145, en
januari 1991, blz. 34-39.[3] High frequency/microwave processing and heating,
Conference papers International Conference Arnhem 26-29
september 1989[4] Technologiedag microgolftheorie 16 december 1988, Elektrum, Arnhem;
Syllabus.[5] Dielectric heating for industrial processes
publication British National Committee for Electroheat (1983)

[6] G.J. Meyer,

Diëlektrische toepassingen in de milieutechnologie
KEMA-rapport 70376-E18 90-3035,
8 mei 1990

[7] Microwave irradiation technology for contaminated concrete surface
removal

H. Yasunaka, Y Iwasaki, T Yamate, M. Shibamoto
M. Hatakeyama, T. Momma and E. Tachikawa
Department of Japan Power Demonstration Reactor,
Japan Atomic Energy Research Institute.

- [8] Study of a method for crushing concrete with microwave energy
Masayoshi Kakizaki, Minoru Harada
Kajima Corporation, Kajima
Institute of construction technology, Japan
Isokazu Nishikawa
Kajima Corporation, Japan.
- [9] Dev,H., Bridges, J.E., Sresty, G.C., Decontamination of hazardous waste substances from spills and uncontrolled waste sites by radio frequency IN SITU heating, paper 1984 Hazardous Material Spills Conference, 1984
- [10] Morell M.S., Hardwick W.H., Murphy V., Wace P.F.
A pilot plant demonstration of the vitrification of radioactive solutions using microwave power.
Nuclear and chemical waste management, vol 6,
p 193-195, 1986
- [11] Shibata C., Tamai H.
A new microwave volume reducing method for radio active waste ashes.
Conference on High Frequency/Microwave Processing and Heating, KEMA, Arnhem, The Netherlands, 1989
- [12] Robinson, S., Wave goodbye to scrap tyres, European rubber Journal september 1989
- [13] D. Nagelhout, K. Wieringa en J.M. Joosten (RIVM),
Afval 2000 (maart 1989)
- [14] Tebodin/NOVEM
Verwerkingsmogelijkheden bedrijfsafvalstoffen (1984),
bijlage 2, blad 3
- [15] AVR, Prijsopgave verwerking afvalstoffen 1990
- [16] B.L. van der Ven (TNO/MT), mededeling, juli 1990

- [17] Anoniem, Textile Horizons, Drying (1987)
- [18] G.J.R. Nales (Directeur AVR), mededeling, juli 1989
- [19] J. Emsley, New Scientist, 12/11/1988, blz 56-60
The chemist's quick cookbook
- [20] A.H. de Vries (TNO/TPD), mededeling, juli 1990
- [21] W.F. Kooper en W. Klein, PT Energie & Afvalbeheer,
Verontreiniging afvalterreinen
43 (1988) 2, blz 36-39
- [22] C. Möller-Bremer, Energie 40 (3) 24-26 (1988)
Es gibt keine Standardlösung
Energie, 40 (1988) 3, blz 24-26
- [23] Radio waves can cook toxic wastes right out the soil
Anoniem, Business Week 21/11/1988, p. 89,
- [24] H. Dev e.a.,
The contamination of hazardous waste substances from spills and
uncontrolled waste sites by radio frequency in situ heating
Hazardous Material Spill Conference 1984 blz 57-63
- [25] Afvalstoffen Terminal Moerdijk (ATM),
inlichtingen, juli 1990
- [26] Geocientics B.V., Elektro-reclamatie,
Stand van zaken en toekomstige ontwikkelingen (1990)
- [27] M. de Boo,
Gif in de grond met stroom op te ruimen
NRC Handelsbald 01/04/1988
- [28] Alders van plan statiegeld op smeerolie in te voeren
Anoniem, De Volkskrant 07/07/1990 blz 3
- [29] H.A.W. Arink (Laura B.V.), mededeling, juli 1990

- [30] Shreve's Chemical Process Industrials, blz 730-732
- [31] C.L. van Deelen (TNO/MT), mededeling, juli 1990
- [32] G.T. Lutterman (Ecotechniek), mededeling, juli 1990
- [33] Heidemij, Rationeel energiegebruik reststromen
industriële bedrijven, voorkomen, regenereren,
hergebruik (nov. 1985)
- [34] Microgolf-techniek voor ontsluiting (Stokvis Chemicaliën B.V.)
Anoniem, NCI 01/03/1989, blz 22
- [35] W. Rosenberg en W. Bögel;
Micro wave pasteurization, sterilization, bleaching and pest
control in the food industry
Food Technology juni 1987, blz 92-95
- [37] O.V. Decareau, Food Technology, juni 1990, blz 99-105
- [38] L. de Vries en F. Stein (MT Zeist),
Project Diëlektrisch Proces Industrie (1990),
NOVEM project
- [39] Schiffmann, R.F.,
Microwave Technology
Course papers on the International Course on Microwave Technology,
Center for Professional Advancement, The Hague 9- 11 May 1989
- [40] Verwerking van afvalstoffen middels een smeltprocédé;
Rapport nummer R.89-018;
PBI, Maastricht, oktober 1989.
- [41] K. Knip;
Opwerking van smeerolie smooit in chaos;
NRC Handelsblad, 19 december 1990.

11. VERANTWOORDING

Bij het tot stand komen van de lijst van potentiële mogelijkheden van hoofdstuk 7 hebben vele collega's hun medewerking verleend.

Zonder de anderen te kort te willen doen, betuigen de auteurs in dezen in het bijzonder hun dank aan Dr.Ir. J.A. Don (afdeling Milieutechnologie), Ir. J.F.F. Klinkhamer (Produktcentrum TNO) en Drs.Ing. H.J. Munter (afdeling Zakelijke Verbintenissen en Marketing) voor de vele originele ideeën die zij in dit verband hebben aangereikt.

- Naam en adres van de opdrachtgever:

NOVEM B.V; Siemens Nederland B.V.; B.V. Kon. Mij 'De Schelde'

- Namen en functies van de medewerkers:

Ing. H. Boot, medewerker afd. Warmte en Koude Techniek

Ir. M. Hinsenveld, medewerker afd. Milieutechnologie (thans Univ. Of Cincinatti, USA)

Ir. W.J.L. Jansen, projectingenieur afdeling EIO, KEMA, Arnhem

Ing. G.J. Meijer, medewerker afdeling EIO, KEMA, Arnhem

Dr.Ir. E. Mot, stafingenieur afd. Milieutechnologie, projectleider

Drs.Ing. H.J. Munter, afd. Zakelijke Verbintenissen en Marketing

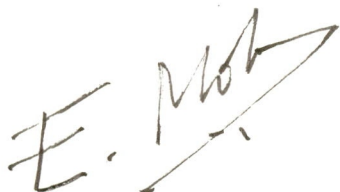
- Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

KEMA, Arnhem

- Datum waarop, of tijdbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

oktober 1989 - januari 1991

- Ondertekening:



Dr.Ir. E. Mot
onderzoekleider

Goedgekeurd door:



Ir. B.L. van der Ven
werkgroep leider

90-250/R.22/HVG

bijlage 1-1

Bijlage 1 ENKELE GEGEVENS BETREFFENDE VERLIESFACTOREN VAN AFVALSTOFFEN

De bekende literatuur op het gebied van diëlektrische verhitting richt zich voornamelijk op voedingsmiddelen. Gegevens betreffende afvalstoffen die een inzicht geven in de behandelbaarheid van deze afvalstoffen met diëlektrische verhittingstechnieken (DV) zijn daardoor zeer moeilijk uit de literatuur te verkrijgen. Ook het voorspellen van de verliesfactor op grond van fundamentele eigenschappen van de materie is niet op eenvoudige wijze mogelijk.

De in deze bijlage vermelde informatie is voor het merendeel afkomstig uit de publicaties van Metaxas.

De warmtedissipatie per volume-eenheid in een materiaal kan worden berekend met:

$$P = \text{Constante} * f * \epsilon'' * E^2 \quad [\text{W/m}^3]$$

Hierin is: f = de frequentie van het elektromagnetische veld [Hz]

E = de grootte van het elektrische veld binnen het materiaal
(afhankelijk van het extern aangelegde veld en de diëlektrische constante) [V/m]

ϵ'' = de effectieve verliesfactor (frequentieafhankelijk) [-]

De effectieve verliesfactor is in dit verband een van de belangrijkste eigenschappen van het materiaal en geeft een indicatie voor de ontvankelijkheid van dit materiaal voor diëlektrische verwarming. Hierna is per afvalstof aangegeven of er informatie omtrent deze verliesfactor bekend is.

Beschikbare waarden worden vermeld. Voor een eerste indicatie kan ervan worden uitgegaan dat een materiaal ontvankelijk is voor diëlektrische behandeling indien:

$$0,01 < \epsilon'' < 5$$

Wordt de ondergrens bereikt dan zijn zeer hoge veldsterktes nodig voor verhitting. Bij het bereiken van de bovengrens wordt de indringdiepte van de straling zeer gering, bij toepassing van microgolf frequenties.

90-250/R.22/HVG

bijlage 1-2

Ter oriëntatie: voor zuiver water geldt bij 27 MHz $\epsilon'' = 0,4$ en bij 2450 MHz geldt $\epsilon'' = 12$. Voor leidingwater geldt bij 27 MHz $\epsilon'' = 100$ en bij 2450 Hz geldt $\epsilon'' = 18$.

Afgewerkte olie

Kabelolie: ϵ'' is 0,04 à 0,09

Oktaan : ϵ'' is 0,02 à 0,03

Deze stoffen zijn, ofschoon de verliesfactoren enigszins aan de lage kant zijn, voldoende ontvankelijk voor DV om verhit te kunnen worden.

Actief kool

Poederkool wordt in de autobandenindustrie gebruikt voor het verhogen van de verliesfactor. De waarde hiervan is niet bekend voor actief kool, maar relatief eenvoudig experimenteel te bepalen. Het uitdampen van verontreinigingen en water uit de kool zonder de kool zelf te verwarmen is waarschijnlijk niet mogelijk.

Bestrijdingsmiddelen

Geen informatie beschikbaar op dit ogenblik. Gezien de verscheidenheid aan stoffen in deze groep is niet zonder meer een algemene uitspraak mogelijk over de behandelbaarheid. Veel van de stoffen bestaan uit asymmetrische moleculen en kunnen daardoor mogelijkerwijs in aanmerking komen voor DV behandeling.

Bilgeolie

Bevat veel water. Olie is in verhouding tot water weinig ontvankelijk voor DV. Mogelijk behoort voorbehandeling (ontwateren) door middel van conventionele methoden en een verdere uitdamping van water door middel van DV tot de mogelijkheden. DV is naar verwachting wel erg duur in verhouding tot de waarde van de ontwaterde bilgeolie.

Bleekaardeslurry

Drogen van zand wordt pas rendabel bij een vochtgehalte van minder dan circa 2%. Voor zandige grond geldt: ϵ'' is 0,02 à 0,04. Dit betekent dat de verliescoëfficiënt van zandige grond iets kleiner is dan die van olie. Hieruit volgt, dat het uitdampen van olie zonder dat de zanddeeltjes warm worden tot de mogelijkheden behoort. Het verschil tussen de

90-250/R.22/HVG

bijlage 1-3

verliesfactoren is echter niet dusdanig groot, dat zonder meer gezegd kan worden of deze mogelijkheid reëel is.

Residu boorspoeling

Zie Bilgeolie.

Condensatoren

Er zijn zeer veel verschillende typen condensatoren. Deze vertonen een verschillend gedrag ten aanzien van de ontvankelijkheid voor DV. Het breken van veel typen condensatoren is mogelijk doordat in deze condensatoren gebruik wordt gemaakt van olie en zuren (elektrolyt). Elektrolyten bezitten over het algemeen een hoge verliesfactor. Een inventarisatie van typen condensatoren is wenselijk.

Produktieafval bestrijdingsmiddelen

Geen informatie. Over deze groep afvalstoffen wordt vaak geheimzinnig gedaan. Het is een zeer diverse groep, die c.q. te vergelijken is met de groep bestrijdingsmiddelen zelf. In dit stadium is met name het verkrijgen van informatie en monsters een probleem.

Filterkaarsen

Deze bevatten kwik en kwikverbindingen. Hiervan zijn geen verliesfactoren bekend. Ook bij de NAM komt kwikbevattend filtermateriaal vrij. Nadere gegevens omtrent samenstelling van het materiaal is nodig.

Fluorescentieafval

Droge laag bevat cadmium. Geen verliesfactoren bekend.

Fluorescentieslib

Idem.

Gasontladingsbuizen

Kwikdampen. Geen verliesfactor kwik en kwikverbindingen bekend.

Bouw- en sloopafval

Breken van het afval wordt over het algemeen niet als probleem ervaren. Mogelijkheden voor DV zouden waarschijnlijk niet liggen in een prijsvoordeel, wel in minder stof en in de mogelijkheid in situ beton te bre-

90-250/R.22/HVG

bijlage 1-4

ken. Breken van de binnenmantel van kernenergiecentrales verontreinigd met radioactief materiaal behoort tot de mogelijkheden. In Japan, en ook in Nederland, wordt hiernaar onderzoek uitgevoerd. Het blijkt dat het mogelijk is zelfs relatief dikke betonlagen te breken.

Afval houtverduurzaming

Hangt van het verduurzamingsmiddel af (organische verbindingen, zouten).
Geen informatie bekend.

Jarosiet

Geen informatie bekend.

Batterijen

Batterijen bevatten veel vocht (zuur) zowel door elektrolyt als door water heeft het materiaal in een batterij een hoge verliesfactor. Het breken van deze batterijen met behulp van DV behoort zeker tot de mogelijkheden.

Kwikgevulde thermometers

Inzamelen is een probleem. De verwerking ervan in minder mate (thermische methode).

PVC-weekmakers

Geen informatie bekend.

Vinylchloride monomeer

Sterk toxisch. Asymmetrisch molecuul met waarschijnlijk tamelijk hoge verliesfactor. Mogelijkheden voor DV afhankelijk van de samenstelling van het mengsel.

Ladingsrest ballastwater

Zie Bilgewater.

90-250/R.22/HVG

bijlage 1-5

Vluchtige HKW's ¹⁾

Geen informatie over het ontleden. De mogelijkheden van het uitdampen van HKW's hangt af van het materiaal waarin deze zich bevinden.

Verpakkingsafval huishoudelijk afval

In huishoudelijk afval komen componenten voor met zeer verschillende verliesfactoren. Hierdoor is een scheiding van deze componenten op ontvankelijkheid voor DV in principe mogelijk. Onderstaand zijn enkele verliesfactoren van veel voorkomende componenten bij circa 10^9 Hz vermeld.

Papier	0,22
Glas	0,0002
Plastics	
Fiberglas	0,11
Formaldehyde	0,23
Celluloseacetaat	0,072
Nylon FM 10001	0,043
Polyethyleen	0,0024
Plexiglas/perspex	0,017
Polyester	0,14

Een probleem is wel, dat verpakkingsafval uit huishoudelijk afval vaak water zal bevatten.

Verontreinigde grond

Wordt reeds toegepast in de USA voor in situ grondreiniging (uitdampen van vluchtige verbindingen).

Autobanden

Door aanwezigheid van koolstof waarschijnlijk hoge verliesfactor.
Conventionele techniek mogelijk economisch aantrekkelijker.

1) Halogeen Koolwaterstoffen

90-250/R.22/HVG

bijlage 2-1

Bijlage 2 FYSISCHE GEGEVENS VAN ENKELE GEHALOGENEERDE KOOLWATERSTOFFEN
 VERZAMELD IN 1977, UNIVERSITY OF KENT M. BOOIJ, NOVEM,
 UTRECHT, 1990 ¹⁾

		diel. const. 20°C (ϵ')	tangens delta ($\tan \delta$)	dipool moment in Debye	smelt punt
$C_{10}H_{21}Br$	1-BROOMDECAAN		0.247		-29.2
$C_{10}H_{21}Cl$	1-CHLOORDECAAN				-34.0
$C_{10}H_7Cl$	1-CHLOORNAFTALEEN	5.04	0.204		-2.3
$C_{10}C_2Cl$	1, 1, 1-TRICHLOORETHAAN	7.20	0.226	1.78	-30.4
$C_2H_3Cl_3$	1, 1, 1-TRICHLOORETHAAN	10.65			-37.0
C_2H_3N	ACETONITRIL	37.00			-45.0
$C_2H_4Cl_2$	1, 2-DICHLOORETHAAN	10.65	0.310		-35.4
$C_2H_4Cl_2$	1, 1-DICHLOORETHAAN			2.06	
C_2HCl_3	TRICHLOORETHEEN				-87.0
$C_3H_6Cl_2$	1, 3-DICHLOORPROPAAN	11.40	0.130	2.08	-99.5
$C_3H_6Cl_2$	1, 2-DICHLOORPROPAAN				-100.0
$C_3H_6Cl_2$	2, 2-DICHLOORPROPAAN	11.40	0.380	2.27	-33.8
C_3H_7Br	1-BROOMPROPAAN		0.270		-110.0
C_3H_7Br	2-BROOMPROPAAN		0.233		-89.0
$C_4H_{10}O$	DIETHYLETHER	4.33	0.070		-116.2
C_4H_9Br	2-BROOM-2-METHYLPROPAAN (T-BUTYLBROMIDE)		0.282		
C_4H_9Br	1-BROOM-2-METHYLPROPAAN (ISOBUTYLBROMIDE)		0.320		
C_4H_9Cl	1-CHLOORBUTAAN	7.20	0.107		-123.0
C_4H_9Cl	2-CHLOORBUTAAN				-131.0
C_4H_9Cl	2-CHLOOR-2-METHYLPROPAAN (T-BUTYLCHLORIDE)	9.00	0.211		-25.0
C_4H_9Cl	1-CHLOOR-2-METHYLPROPAAN				131.0
C_4H_9Br	2-BROOMBUTAAN		0.332		
C_4H_9Br	1-BROOMPENTAAN		0.353		

1) $\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$, zie bijlage 3.

90-250/R.22/HVG

bijlage 2-2

		diel. const. 20°C (ϵ')	tangens delta ($\tan \delta$)	dipool moment in Debye	smelt punt
$C_5H_{11}Cl$	2-CHLOOR-2-METHYLBUTAAN	9.10	0.095		
$C_5H_{11}Cl$	1-CHLOORPENTAAN	5.00			
$C_5H_{11}Cl$	1-CHLOOR-3-METHYLBUTAAN				-104.0
$C_6H_{11}Cl$	CHLOORCYCLOHEXAAN				-43.9
$C_6H_{11}N$	1-CYAAANPENTAAN (CAPRONITRIL)	15.00			-80.0
$C_6H_{13}Br$	1-BROOMHEXAAN		0.340		-56.5
$C_6H_{13}Cl$	1-CHLOORHEXAAN				
C_6H_5Br	BROOMBENZEEN	5.39	0.342	1.70	-30.8
C_6H_5Cl	CHLOORBENZEEN	5.63	0.304	1.69	-45.6
C_6H_5F	FLUOROBENZEEN	5.44	0.187	1.60	-39.2
C_6H_5I	JOODBENZEEN	4.64	0.264	1.70	-31.3
$C_7H_{15}Br$	1-BROOMBENZEEN		0.312		-58.0
$C_7H_5F_3$	TRIFLUORTOLUEEN	9.55		2.86	-29.0
C_7H_7Cl	BENZYLCHLORIDE	7.00			-39.0
C_7H_7Cl	2-CHLOORTOLUEEN	4.45		1.56	-35.0
C_7H_7Cl	3-CHLOORTOLUEEN	5.55			-48.0
C_7H_7Cl	4-CHLOORTOLUEEN	6.08		2.21	7.0
$C_8H_{16}O$	DIBUTYLETHER	3.06			-95.3
$C_8H_{17}Br$	1-BROOMOCTAAN		0.276		
$C_8H_{17}Cl$	1-CHLOOROCTAAN				-61.0
$C_9H_{19}Br$	1-BROOMNONAAN		0.269		
$CBrCl_3$	BROOMTRICHLOORMETHAAN	2.44	0.006		-6.0
CCl_3F	TRICHLOORFLUORMETHAAN	2.28		0.45	-111.0
CH_2Cl_2	DICHLOORMETHAAN	9.08		1.60	
CH_3NO	FORMAMIDE	110.00	1.150		2.3
$CHCl_3$	CHLOROFORM	4.81	0.076		-63.5

90-250/R.22/HVG

bijlage 3-1

Bijlage 3 DIËLEKTRISCHE TECHNOLOGIE IN DE INDUSTRIE

(ELEKTROTECHNIEK 67 (1989) 7 JULI, BLZ. 641-648)

Diëlektrische technologie in de industrie

1 Inleiding

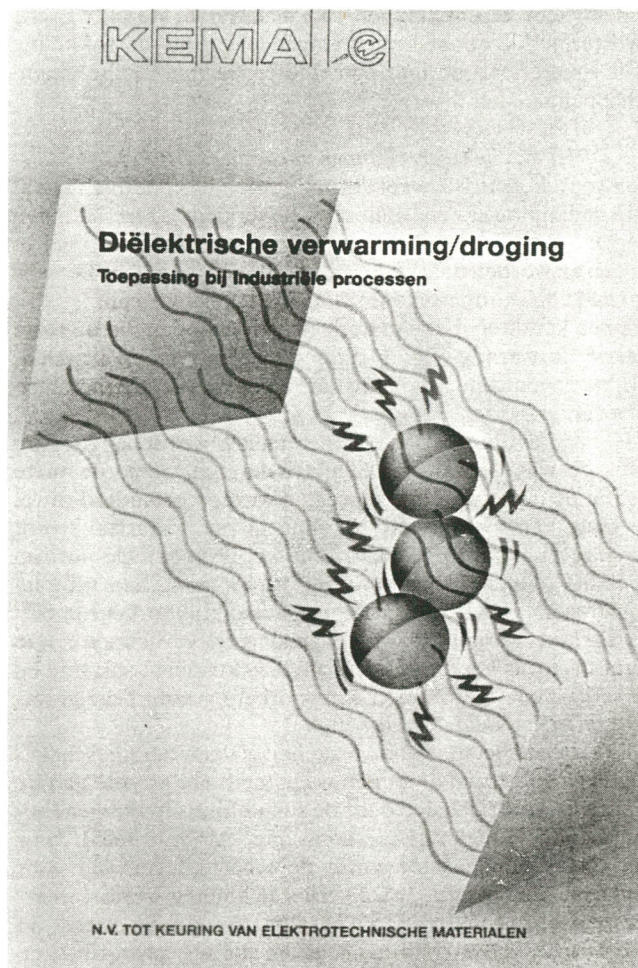
De industrie streeft voortdurend naar een verlaging van de produktiekosten en een verbetering van de kwaliteit van het geleverde produkt. Toepassing van een hoogwaardige en veelzijdige energiedrager als elektriciteit biedt, dank zij een aantal voordelen, hiervoor mogelijkheden. In het volgende zal daar een aantal voorbeelden van worden gegeven. Toepassing van elektriciteit in industriële processen is in Nederland nog weinig bekend en wordt hier daarom nog relatief weinig toegepast. Dit in tegenstelling met de ons omringende landen.

Elektriciteit is het produkt van de elektriciteitsbedrijven. Bij een marktgerichte instelling is kennis op het gebied van de nuttige toepassingsmogelijkheden van het produkt elektriciteit noodzakelijk. Als centraal instituut van de elektriciteitsbedrijven wil de KEMA een adviserende taak vervullen op het gebied van hoogwaardige toepassing van elektriciteit in industriële productieprocessen. Om de aanwezige kennis op dit gebied te verdiepen wordt onderzoek uitgevoerd. Toepassing van elektriciteit is in velerlei vormen mogelijk, zoals weerstandsverwarming, infrarood- en ultravioletverwarming, diëlektrische verwarming, inductieverwarming, plasma, laser, vonkerosie, mechanische dampcompressie en warmtepompen. Van deze mogelijkheden heeft het onderzoek zich in eerste instantie toegespitst op diëlektrische verwarming.

Via het nuttig toepassen van diëlektrische warmte in daarvoor geschikte industriële processen kan op produktiekosten worden bespaard, ondanks relatief hoge investeringskosten. De kostenbesparing kan bijvoorbeeld bereikt worden door een versnelling van het proces, door minder warmteverlies als gevolg van zeer lokale verwarming, door vermindering van de benodigde installatieruimte. Diëlektrische verwarming kan lokale verbrandingsprocessen vervangen, wat leidt tot betere werkomstandigheden. Op gebied van verwarmen en drogen biedt diëlektrische verwarming mogelijkheden die met conventionele verwarming niet haalbaar zijn. Tenslotte kan met diëlektrische verwarming in veel gevallen een betere produktkwaliteit worden bereikt door de betere beheersbaarheid van het proces.

De keuze van diëlektrische verwarming als aandachtsgebied voor onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van elektriciteit wordt met name ingegeven door het feit dat enerzijds, althans in Nederland, deze techniek nog onvoldoende bekend is en anderzijds er een duidelijke behoefte aan deskundigheid op dit gebied wordt gesignaleerd bij degenen die deze techniek willen toepassen. Uit onderzoekspunt is diëlektrische verwarming interessant omdat het zich bij uitstek leent voor modellering met behulp van computerprogrammatuur. Modellering geeft meer inzicht in diëlektrische verwarmingsprocessen. Gebaseerd op modelstu-

* N.V. KEMA.



dies kunnen waardevolle adviezen over het toepassen van diëlektrische verwarmingstechnieken worden gegeven.

In het volgende zal eerst een aantal basisbegrippen van diëlektrische verwarming worden besproken. Op basis hiervan wordt een aantal randvoorwaarden voor een succesvolle toepassing van diëlektrische verwarming vastgesteld. Verschillende verschijningsvormen van verwarmingsapparatuur worden gegeven en hun toepassingsmogelijkheden. Ingegaan zal worden op de systeemkeuze en de rol die de computer daarin kan spelen. Als laatste zal worden gesproken over advisering door de NV KEMA bij de systeemkeuze.

2 Basisbegrippen

2.1 Omschrijving basisbegrippen

Bij conventionele verwarmingsprocessen wordt de warmte van buitenaf via convector, geleiding of straling aan het oppervlak van het te verwarmen materiaal toegevoerd. Vanaf

het oppervlak dringt de warmte door geleiding verder het materiaal in. De voordelen van diëlektrische verwarming berusten grotendeels op het feit dat de warmte direct in het materiaal zelf wordt opgewekt en dat er geen warmte-overdrachtmedium noodzakelijk is. De energie voor verwarming wordt via een hoogfrequent elektrisch veld aan het materiaal toegevoerd.

De beschrijving van diëlektrische verwarmingsprocessen berust op de bekende wetten van Maxwell. Behandeling hiervan zou in dit kader te ver voeren, volstaan wordt met het formuleren van een aantal basisbegrippen dat nuttig is om de toepassingsmogelijkheden van diëlektrische verwarming te onderkennen. Deze basisbegrippen zijn achtereenvolgens de diëlektrische eigenschappen van materialen, de elektrische veldsterkte, de ermee samenhangende warmte-ontwikkeling in het materiaal, de indringdiepte en de thermische eigenschappen.

2.2 Diëlektrische eigenschappen van materialen

Een voor diëlektrische verwarming geschikt materiaal, bevat vrije ladingdragers en/of elektrische dipolen. Deze ladingen trachten de richting van het wisselende elektrische veld te volgen en worden daarbij gehinderd door hun buren. Dit veroorzaakt de warmte-ontwikkeling in het diëlektricum.

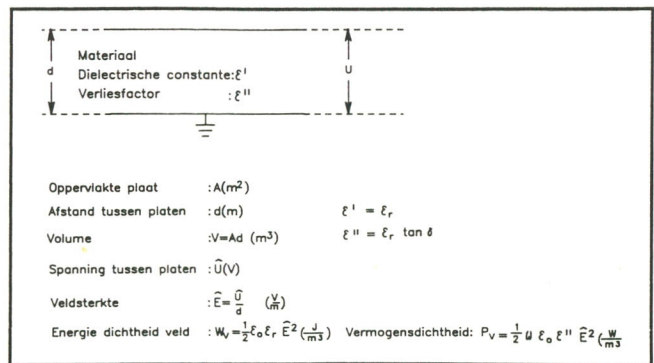
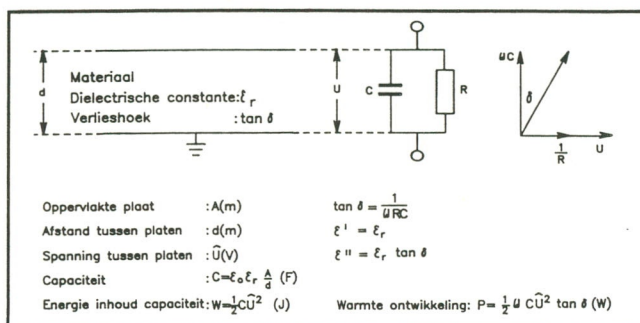
Twee karakteristieke materiaaleigenschappen die de mate waarin de warmte-ontwikkeling kan plaatsvinden bepalen, zijn de zogenaamde diëlektrische constante en de diëlektrische verliesfactor.

Het aantal dipolen per volume-eenheid wordt aangegeven door de waarde van de diëlektrische constante, de mate waarin de dipolen in hun beweging worden gehinderd ofwel de mate van warmte-ontwikkeling in het materiaal wordt aangegeven door de diëlektrische verlieshoek. De verlieshoek bevat eveneens de verliezen veroorzaakt door vrije ladingdragers. Een derde grootheid welke bij voorkeur in diëlektrisch verwarmen wordt gebruikt is de verliesfactor. De verliesfactor is het produkt van de diëlektrische constante en de verlieshoek. Waarom er een voorkeur is voor deze grootheid zal in het volgende bliken.

Een diëlektricum is voor te stellen als een parallelschakeling van een capaciteit en een weerstand. De grootte van de capaciteit wordt behalve door de ruimtelijke afmetingen, bepaald door de diëlektrische constante. Als voorbeeld: voor een vlakke condensator wordt de capaciteit gegeven door $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$, zie **afb. 1**. De verliezen kunnen worden weergegeven als een weerstand parallel aan de capaciteit, in **afb. 1** is de verlieshoek aangegeven die als gevolg van de weerstand ontstaat. Verder worden in **afb. 1** de uitdrukkingen voor de verliesfactor ϵ'' , de energie-inhoud en de warmte-ontwikkeling in de capaciteit gegeven.

Uit **afb. 1** blijkt dat de warmte-ontwikkeling onder andere

Afb. 1 Schematische voorstelling en basisgrootheden van diëlektrische verwarming.



Afb. 2 Diëlektrisch verwarmen en het elektrische veld.

wordt bepaald door de frequentie ω , de capaciteit C en de verlieshoek $\tan \delta$ van het materiaal. De laatste twee hangen af van het soort materiaal, van de frequentie en van de temperatuur.

In tabel 1 worden de diëlektrische constante en de verliesfactor voor een aantal materialen gegeven bij een tweetal veel voorkomende frequenties, welke in gebruik zijn voor diëlektrisch verwarmen.

TABEL 1 Waarden voor diëlektrische constante ϵ' en de verliesfactor ϵ''

Materiaal	Temperatuur °C	27 MHz		2450 MHz	
		ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
Teflon	22	2.1	0.0003	2.1	0.0003
Polytheen	24	2.3	0.0004	2.3	0.0007
Pyrex	25	4.8	0.015	4.8	0.025
IJs (zuiver)	-12	3.7	0.07	3.2	0.003
Water (zuiver)	25	78	0.4	77	12
Water	25	78	100	75	18
Aardappel (ongekookt)	25	80	48	54	16
Bliefstuk	25	50	1300	40	12

2.3 Elektrische veldsterkte en vermogensontwikkeling

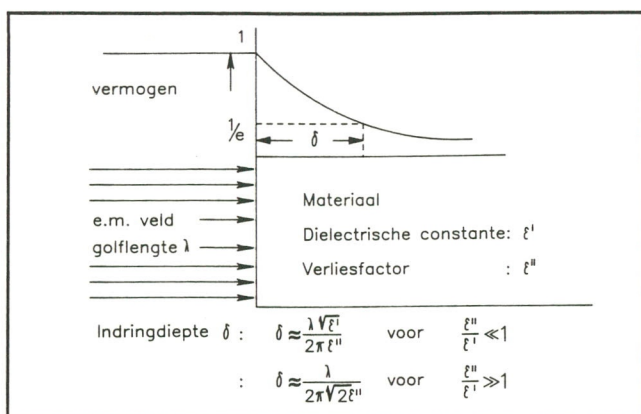
De elektrische veldsterkte wordt bepaald door de spanning per lengte-eenheid. In het voorbeeld van **afb. 1** wordt de veldsterkte in de vlakke condensator gegeven door $E=U/d$. De veldsterkte is in een diëlektrische verwarmingssysteem de belangrijkste grootheid. De veldsterkte is in grote mate bepalend voor de warmte-ontwikkeling in het medium; via de elektrische veldsterkte wordt energie uit het net aan het medium overgedragen.

De in een diëlektricum, onder invloed van een elektrisch veld E, gegenereerde warmte per volume-eenheid P_v , wordt gegeven door de uitdrukking in **afb. 2**. Hieruit blijkt dat de vermogensontwikkeling evenredig is met het kwadraat van de veldsterkte, tevens blijkt dat de vermogensontwikkeling eveneens evenredig is met de verliesfactor. Dit is de reden dat de verliesfactor in de diëlektrische verwarmingstechniek bij voorkeur wordt gebruikt om het diëlektricum te karakteriseren.

De energiedichtheid van het elektrische veld wordt gegeven door $W_v = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2$. In samengestelde media worden de energiedichtheden in de verschillende media bepaald door de verhouding van de verschillende diëlektrische constanten.

2.4 Indringdiepte

Het elektrische veld kan maar tot een bepaalde diepte in een diëlektricum doordringen. Als gevolg van de verliezen neemt het elektrische veld en daardoor ook de vermogensontwikkeling, in het materiaal af. Het elektrische veld draagt zijn



Afb. 3 De indringdiepte van het elektromagnetisch veld in materialen.

energie over aan het materiaal in de vorm van warmte. Zoals veel zaken in de elektrotechniek verloopt de afname van het vermogen via een e-macht: de diepte waarbij het vermogen tot $1/e$ is afgenomen is gedefinieerd als de indringdiepte. De indringdiepte wordt bij benadering bepaald door de uitdrukkingen gegeven in **afb. 3**.

In tabel 2 wordt een aantal waarden voor de indringdiepte gegeven voor de frequenties en de materialen genoemd in tabel 1.

TABEL 2 Waarden voor indringdiepte δ voor twee frequenties

Materiaal	Temperatuur °C	27 MHz δ in m	2450 MHz δ in m
Teflon	22	8500	94
Polytheen	24	6700	42
Pyrex	25	258	1,7
IJs (zuiver)	-12	49	13
Water (zuiver)	25	39	0,014
Water	25	0,18	0,009
Aardappel (ongekookt)	25	0,34	0,008
Biefstuk	25	0,035	0,010

2.5 Thermische grootheden

Naast de diverse elektrische grootheden zijn ook een tweetal thermische grootheden van belang voor het gedrag bij verwarmen namelijk de warmtecapaciteit en de thermische geleidbaarheid van de verschillende materialen. Samen met het ontwikkelde vermogen in het materiaal en de omgevingstemperatuur bepalen deze grootheden met welke snelheid en tot welke waarde de temperatuur in het materiaal toeneemt.

3 Diëlektrisch verwarmen

3.1 Toepassing basisbegrippen op diëlektrisch verwarmen

Uit de bovengenoemde basisbegrippen is een aantal wetmatigheden voor het toepassen van diëlektrisch verwarmen te onderkennen. Aan de hand van deze basisgrootheden kan bij voorbaat worden geconcludeerd dat sommige teassingen met diëlektrisch verwarmen niet mogelijk zijn en andere juist wel. In het volgende zullen de toegestane frequenties voor diëlektrisch verwarmen worden gegeven. Verder zal worden ingegaan op de radiostorings- en veiligheidseisen die aan radiofrequente- en microgolfinstallaties worden gesteld.

3.2 Diëlektrische eigenschappen

Uit de relatie voor de vermogensontwikkeling (**afb. 2**) blijkt dat diëlektrische verwarming van een materiaal alleen mogelijk is als dit een relatief hoge verliesfactor heeft. Gegeven de voorbeelden in tabel 1 kan bijvoorbeeld worden opgemerkt

dat teflon geen geschikt materiaal is om diëlektrische warmte in te ontwikkelen, dat water hier echter uitstekend voor geschikt is. Dit laatste biedt veel mogelijkheden voor allerlei droogprocessen. Dit wordt in 4.4 behandeld.

3.3 Elektrische veldsterkte

Als de diëlektrische verliesfactor laag is, is de warmte-ontwikkeling in het medium gering. Door het verhogen van de elektrische veldsterkte zou deze warmte-ontwikkeling vergroot kunnen worden. Aan deze veldsterkte zijn echter grenzen gesteld, vanwege het feit dat ieder materiaal maar een bepaalde veldsterkte kan weerstaan. Daarboven treedt doorslag op in het materiaal. Voor lucht bijvoorbeeld ligt, bij normale atmosferische omstandigheden, deze doorslagveldsterkte op ongeveer 30 kV/cm.

In de constructie van installaties moet ook rekening gehouden worden met de elektrische veldsterkte om de kans op doorslag te voorkomen.

3.4 Frequentie

Het ontwikkelde vermogen kan ook worden vergroot door de frequentie te verhogen. Uit de relatie voor de vermogensontwikkeling blijkt dat deze toeneemt evenredig met de frequentie. Dit is het gevolg van het harder trillen van de dipolen in het materiaal.

Internationaal zijn de frequenties 13, 27, 41, 2450, 5800 en 24125 MHz vastgelegd in CISPR-publikatie nr. 11 [CISPR, 1975]. Deze frequenties zijn vastgelegd voor gebruik in industriële, wetenschappelijke en medische toepassingen. De zogenaamde ISM-frequenties.

Tot 300 MHz wordt gesproken over radiogolffrequenties, daarboven over microgolffrequenties. Bij de hierboven genoemde frequenties is geen grens gelegd aan de maximale stralingsenergie die de installatie af mag geven met het oog op radiostoringsen.

Naast de hierboven genoemde algemene frequenties is er nog een aantal andere frequenties in diverse landen toegestaan. In Nederland is dit 3.3 MHz, in een aantal landen ook 434 MHz. In Amerika en in Engeland is eveneens een frequentie van rond de 900 MHz beschikbaar voor diëlektrische verwarmingsdoeleinden. De in de praktijk meest gebruikte frequenties zijn 13, 27, rond 900 en 2450 MHz. In Nederland wordt een frequentie van rond de 900 MHz ook toegepast in industriële processen voor diëlektrisch verwarmen en drogen. Deze frequentie is hier op dit moment echter alleen toegestaan, indien voldaan wordt aan de radiostoringsen.

Technieken rond 900 MHz bieden in specifieke gevallen veel voordelen boven technieken rond 2450 MHz, daarnaast zijn de rendementen beter en zijn 900 MHz-installaties relatief goedkoper dan 2450 MHz installaties. 900 MHz installaties zijn in ruime mate commercieel verkrijgbaar [Meredith, 1988]. Het is dus gewenst dat ook in Nederland een frequentie van rond de 900 MHz officieel ter beschikking komt voor dit type toepassingen. In een concept-versie van IEC CISPR-publikatie nr. 11 wordt, in Europees verband, voorgesteld de frequentieband 931,5 t/m 936,5 MHz hiervoor te bestemmen.

3.5 Indringdiepte

Het ontwikkelde vermogen neemt toe met de frequentie. Echter ook de frequentie kan niet onbeperkt opgevoerd worden. Bij hogere frequenties neemt de indringdiepte af, waardoor in het inwendige van het materiaal de vermogensontwikkeling klein is. De energie-overdracht van het elektrische veld aan het materiaal vindt alleen plaats aan de buitenzijde van het materiaal, alleen de buitenkant wordt verwarmd.

In tabel 2 wordt de indringdiepte voor een aantal materialen gegeven. Uit de waarden blijkt duidelijk dat het bijvoorbeeld niet raadzaam is dikke lagen aardappelen met microgolven te verwarmen. In het algemeen zullen radiofrequenties worden toegepast voor grote objecten met kleine vermogensdichtheden: kleine objecten en hoge gewenste vermogensdichtheden leiden tot microgolftoepassingen.

3.6 Verwarmingsgeometrie

De energiedichtheid van een elektrisch veld wordt gegeven door

$$W_V = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon' E^2$$

De meeste verwarmingsopstellingen zijn samengesteld uit verschillende diëlektrika met verschillende diëlektrische constanten ϵ' . Het te verwarmen materiaal ligt bijvoorbeeld in een buis tussen twee elektroden waarbij de tussenruimten gevuld zijn met lucht.

Afb. 4 geeft een voorbeeld van een dergelijke geometrie, in dit geval voor het pasteuriseren van worstdegen [Houben et al, 1989].

In de geometrie zijn drie verschillende diëlektrika te onderscheiden. De totale energie-inhoud van het veld van een gedeeld diëlektricum wordt bij benadering gegeven door

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon'_1 E_1^2 V_1 + \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon'_2 E_2^2 V_2 + \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon'_3 E_3^2 V_3$$

In het algemeen hebben de materialen die diëlektrisch verwarmd kunnen worden een hoge diëlektrische constante zoals uit tabel 1 blijkt.

Uit bovenstaande vergelijking volgt dan een probleem. Een fysisch systeem streeft naar een minimale energie-inhoud. Een hoge ϵ' in het materiaal en een relatief lage ϵ' in het omringende medium betekent dan een lage veldsterkte in het materiaal en een hoge elektrische veldsterkte in het medium. Bij de constructie van de apparatuur moet daar rekening mee worden gehouden. Bij zeer ongunstige verhoudingen in de diëlektrische constante kan de elektrische veldsterkte plaatselijk zo hoog worden dat de doorslagveldsterkte wordt overschreden en doorslag plaats vindt.

3.7 Eisen: radiostoringsniveaus, veiligheidseisen en stoorspanningsniveaus

3.7.1 Radiostoringsniveaus

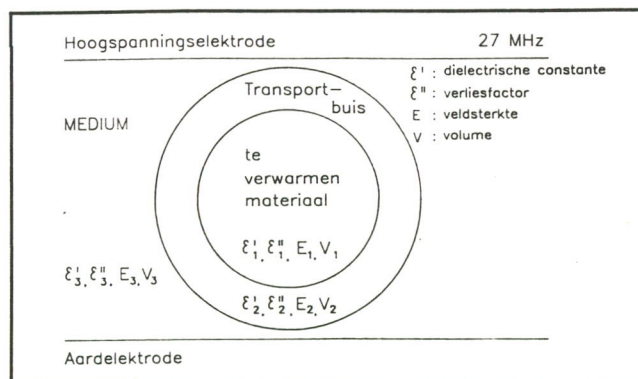
In 3.4 zijn eisen gegeven die gesteld worden aan de diëlektrische installatie met betrekking tot radiostoringsniveaus. Een aantal van deze frequenties wordt in tabel 3 gegeven, voor zover van belang voor diëlektrisch verwarmen. Ze werden ontleend aan de genoemde IEC CISPR-publikatie nr. 11 [CISPR, 1975]

TABEL 3 Een aantal frequenties vastgesteld voor industriële toepassingen

Centrum frequentie	Frequentie-band	Maximum toegelaten stralingsniveau
13.560	13.553-13.567	onbeperkt
27.120	26.957-27.283	onbeperkt
915.000	902-928	onbeperkt*)
2450	2400-2500	onbeperkt

*) Alleen in onder andere Noord- en Zuid-Amerika. Voor Europa wordt voorgesteld een frequentiegebied van 931.5 MHz t/m 936.5 MHz met een stralingslimiet van 60 dB ($\mu\text{V/m}$) op 30 m afstand vast te stellen.

Het ongelimiteerd stralingsniveau geldt alleen in de gegeven frequentieband. Daarbuiten worden limieten gesteld aan het uitgezonden stralingsniveau. Deze limieten liggen tussen de



Afb. 4 Voorbeeld van een verwarmingsgeometrie.

30 en 60 dB ($\mu\text{V/m}$), afhankelijk van de frequentie. Eventuele harmonische welke door de radiofrequentie- of microgolfinstallatie worden opgewerkt en buiten de toegestane frequentieband vallen moeten dus aan deze eisen voldoen.

Naast eisen aan het uitgestraalde veld worden in IEC CISPR-publikatie nr. 11 ook eisen gesteld aan de optredende stoorspanningen op het net. De eisen liggen op dit moment in de orde van 1 à 3 mV buiten de frequentiegebieden voor zover ze, ten dele, in tabel 3 zijn gegeven.

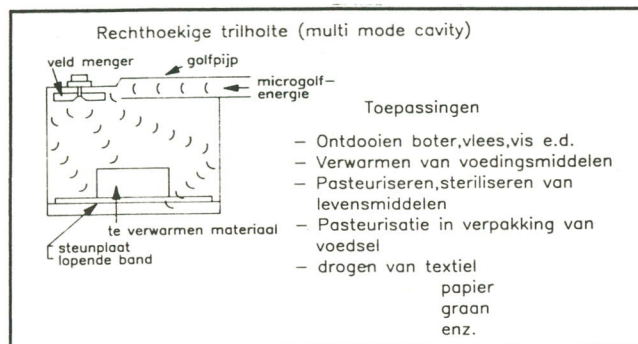
3.7.2 Veiligheidseisen

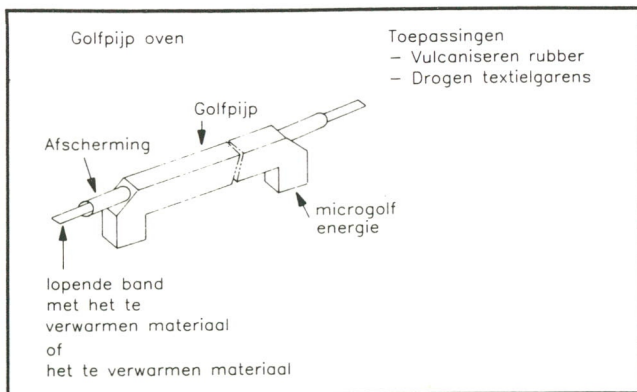
In IEC 519-6 worden eisen gegeven die een grens stellen aan de maximaal vrijkomende stralingsenergie in het microgolfg gebied met het oog op de menselijke veiligheid. Het gevaar van microgolffstraling schuilt niet zo zeer in de microgolffstraling zelf, maar in het effect dat gebruikt wordt bij diëlektrisch verwarmen, namelijk de warmte-ontwikkeling. In levende weefsels kunnen als gevolg van te hoge energiedichtheden beschadigingen worden veroorzaakt, door te hoge temperaturen. In IEC 519-6 wordt gesteld dat buiten een gebied van 5 cm vanaf het apparaat, de vermogensdichtheid niet boven de 5 mW/cm² mag komen [IEC, 1982].

Voor andere frequentiegebieden buiten het microgolfg gebied worden door verschillende landen diverse eisen gehanteerd. Er is geen overeenstemming over bijvoorbeeld eisen te stellen aan radiofrequentie apparatuur ten aanzien van menselijke veiligheid.

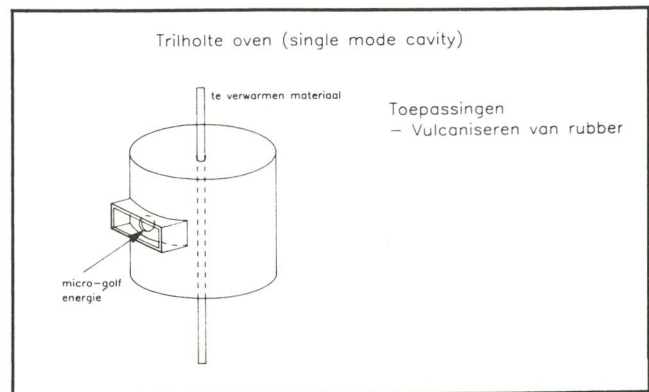
De huidige veiligheidsniveaus zijn gebaseerd op kortdurende blootstelling aan E.M.-velden. De gevolgen van langdurige, continue blootstelling aan straling zijn niet duidelijk. Er is eveneens geen overeenstemming over een veiligheidseis voor wat betreft langdurige blootstelling. Een niveau beneden de 1 mW/cm² wordt over het algemeen als acceptabel beschouwd in industriële omgeving.

Afb. 5 Rechthoekige microgolfoven met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.





Afb. 6 Microgolfpijpen met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.



Afb. 8 De trilholte-microgolfoven met een voorbeeld van een gerealiseerde toepassing.

3.7.3 Stoorspanningen (EMC)

Diëlektrische verwarmingsinstallaties worden niet ruimtelijk geïsoleerd bedreven, maar zijn omringd door andere apparatuur. De uitgestraalde elektromagnetische energie zal de in de omgeving staande elektronische apparatuur, als computers, meet- en regelapparatuur beïnvloeden. Om deze redenen is het raadzaam om, buiten de radiostoringseisen aanvullende eisen te stellen aan de uitgestraalde energie en aan de door de installatie veroorzaakte stoorspanningen op het net. Internationale eisen op het gebied van de elektromagnetische compatibiliteit (EMC) zijn in ontwikkeling. Door de KEMA worden voorlopig, op het gebied van elektromagnetische interferentie, de volgende richtwaarden gehanteerd. De bij de werkfrequentie optredende stoorspanning op het net moet kleiner zijn dan 1 volt; de bij de werkfrequentie optredende maximale uitstraling op 2 m afstand, dient kleiner te zijn dan 1 V/m; de harmonische componenten op het net dienen te voldoen aan Europese Norm EN 50.006. Voldoet een diëlektrische verwarmingsinstallatie aan deze normen, dan kan met vrij grote zekerheid worden aangenomen dat elektronische apparatuur buiten een straal van 2 m naar behoren zijn functie blijft vervullen.

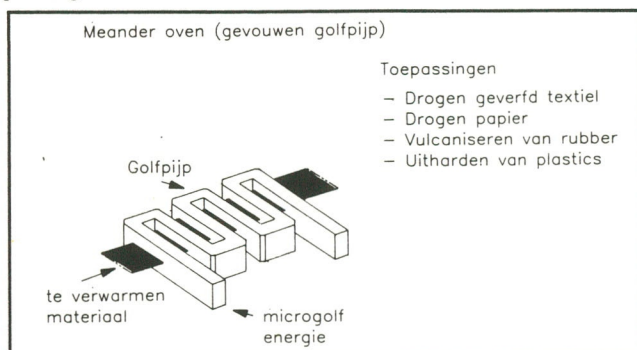
Elektronische apparatuur is veel gevoeliger voor elektromagnetische straling dan het menselijk lichaam. Een bijkomend voordeel van bovengenoemde EMC-eisen is dat de menselijke veiligheid gewaarborgd is als aan bovengenoemde niveaus wordt voldaan.

4 Constructie en toepassing

4.1 Algemeen

Uit de verschillende relaties werd geconstateerd dat radio-golfverwarming vooral kan worden toegepast bij grote ob-

Afb. 7 Meander-microgolfoven met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.



jecten en lagere energiedichtheden en microgolfverwarming bij kleine objecten en grotere energiedichtheden. Daarnaast spelen constructieve problemen en uiteraard economische afwegingen een rol, waarbij de laatste doorslaggevend zijn voor een succesvolle toepassing van diëlektrische verwarmingstechnieken. De kosten van microgolfovens zijn in het algemeen hoger dan van radiofrequente ovens, uitgezonderd voor de kleine vermogens.

Er is een verschil in bouwwijze tussen de microgolfoven en een radiogolfoven ten aanzien van de applicator, dat gedeelte van het systeem waarin de warmte-ontwikkeling wordt opgewekt. Bij een microgolfoven bestaat de applicator uit een gesloten metalen kast waar de energie ingestraald wordt vanuit een golfpijp. Bij de radiofrequente oven bestaat de applicator uit twee of meerdere elektroden waartussen of waarboven zich het te verwarmen materiaal bevindt. In het volgende zullen de verschillende vormen van applicatoren worden beschreven, enkele toepassingsgebieden zullen worden genoemd.

4.2 Microgolfovens en hun toepassingen

De applicator, de gesloten metalen doos voor microgolftoepassingen, kan verschillende vormen aannemen. De meest gebruikelijke vorm is de metalen rechthoekige trilholte, zoals die onder andere bij de huishoudelijke oven gebruikelijk is (multi mode cavity) (afb. 5). De afmetingen zijn groot ten opzichte van de golflengte. Deze oven wordt in de industrie onder andere toegepast voor het drogen van farmaceutische poeders al of niet in vacuüm.

Een andere vorm is de lange golfpijp waarin zich het te verwarmen of te drogen materiaal bevindt. Een dergelijke applicator wordt onder andere gebruikt voor het drogen van textielgarens (afb. 6).

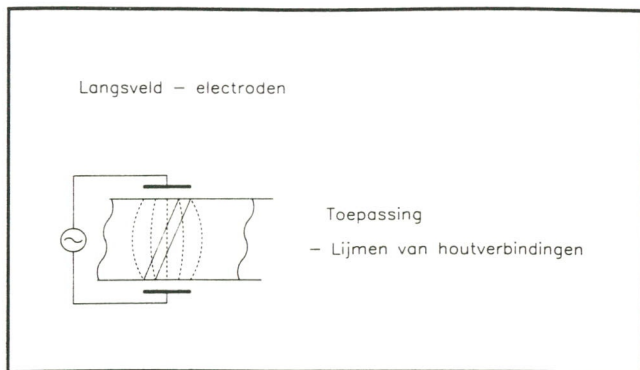
De golfpijp kan worden opgebouwd in de vorm van een meander applicator. Dit type wordt gebruikt voor het behandelen van dunne folie-achtige materialen als rubber, papier en textiel (afb. 7).

Als laatste wordt hier genoemd de trilholte-oven (single mode cavity) (afb. 8). Dit type oven wordt onder andere gebruikt voor het vulcaniseren van rubber.

4.3 Radiofrequente ovens en hun toepassingen

Bij radiofrequente ovens wordt de energie opgewekt tussen twee of meerdere elektroden. Deze kunnen al naar de aard van het te verwarmen materiaal eveneens verschillende vormen aannemen.

Vlakke plaatelektroden voor langs- en dwarsveldverwarming en buisvormige, zogenaamde strooiveldelektroden,



Afb. 9 R.F.-langsveldverwarming en een gerealiseerde toepassing.

voor verwarmen of drogen van dunne materialen. De laatste elektroden kunnen aan beide zijden van het materiaal of slechts aan één zijde worden gegroepeerd.

Vlakke elektroden voor langsveldverwarming worden onder andere toegepast bij het lijmen van hout (afb. 9). De warmte kan zeer plaatselijk worden toegevoerd daar de lijm een relatief hoge en het hout een relatief lage verliesfactor heeft. Dit betekent een zeer efficiënt energieverbruik en een grote versnelling van het proces, daar relatief veel energie aan de lijm kan worden toegevoerd, terwijl het hout daarbij nauwelijks in temperatuur stijgt. Ten opzichte van een conventioneel proces wordt er eveneens een energiebesparing bereikt.

De meest gebruikelijke uitvoeringsvorm is een applicator, bestaande uit twee vlakke elektroden (zie afb. 10). Dit type applicator wordt voor een groot aantal toepassingen gebruikt welke varieert van het lassen van kunststoffen als PVC, het verwarmen en drogen van textiel, voedingsmiddelen en kunststoffen, tot en met het pasteuriseren en steriliseren van voedingsmiddelen, al of niet in verpakking.

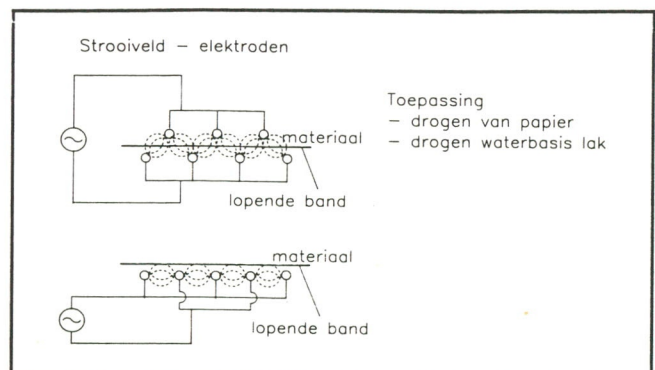
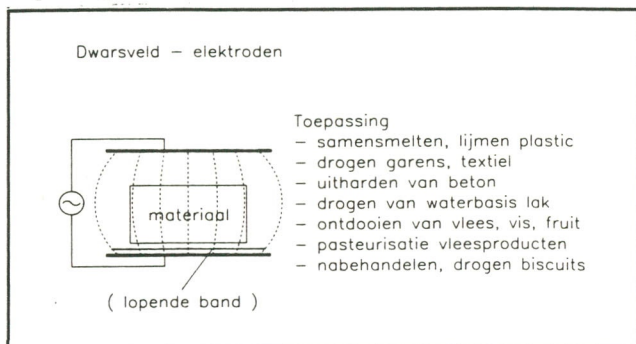
Als laatste de strooiveldapplicator, die wordt vooral gebruikt voor het drogen en verwarmen van dunne lagen, als papier, textiel en dergelijke (afb. 11).

4.4 Droogprocessen

Bij droogprocessen kan diëlektrisch verwarmen vaak succesvol worden toegepast in de laatste droogfase. Een algemeen verloop van een droogproces wordt gegeven in afb. 12.

Na drogen tot een bepaalde lage vochtigheid kost een verdere droging van een materiaal via conventionele middelen onevenredig veel energie en neemt de droogtijd snel toe. De warmte moet namelijk van buitenaf het materiaal ingebracht worden, deze buitenlaag heeft, omdat de laag relatief droog

Afb. 10 R.F.-dwarsveldverwarming en enkele gerealiseerde toepassingen.



Afb. 11 R.F.-strooiveldapplicator en enkele gerealiseerde toepassingen.

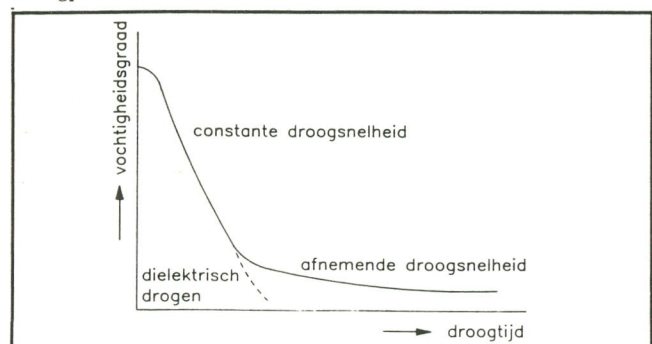
is, een hoge thermische weerstand, wat de reden is voor het lagere rendement en de langere droogtijden. Toepassing van diëlektrisch verwarmen resulteert in een efficiënt gebruik van energie omdat de energie daar wordt opgewekt waar het nodig is, namelijk in het vocht. Door een combinatie van diëlektrisch verwarmen met hete lucht, om het vocht af te voeren, kan de droogtijd aanzienlijk, met een factor 2 à 5, worden teruggebracht. Behalve als gevolg van energiebesparing treedt een verdere proceskostenbesparing op door de kortere procestijd.

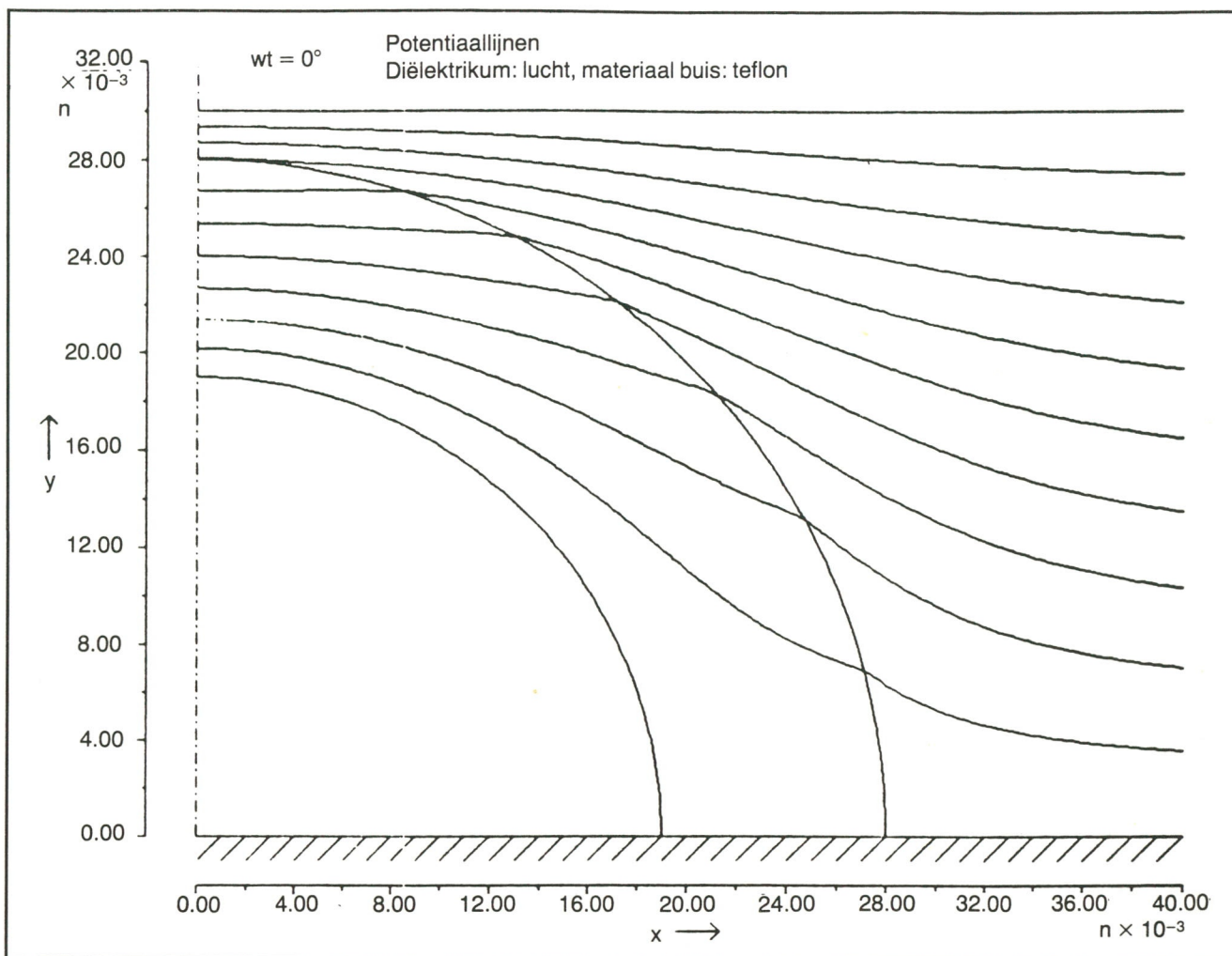
5 Systeemkeuze

Indien in een productieproces diëlektrische verwarmings-technieken kunnen worden toegepast en uit een economische evaluatie blijkt dat dit rendabel is, dan is uit het voorgaande duidelijk dat er vele mogelijkheden en uitvoeringsvormen zijn.

Het proces bepaalt de hoeveelheid energie die toegevoerd moet worden. Hieruit volgt het vermogen van de generator die de energie uit het net moet omzetten in de hoogfrequente veldenergie. Het vermogen van de benodigde generator levert een eerste schatting van de kosten. Op basis van deze kosten kan een eerste evaluatie worden uitgevoerd om te beoordelen of toepassing van diëlektrische verwarmings-technieken rendabel is. Afhankelijk van de procesparameters, het gevraagde vermogen, de diëlektrische en thermische eigenschappen van het te behandelen materiaal en de afmetingen van het produkt, moet een keuze gedaan worden uit de veelheid van mogelijkheden en moet de juiste constructie van de generator worden vastgesteld. De computer is daarbij een belangrijk hulpmiddel. Op de KEMA is een computer-model ontwikkeld waarmee verschillende diëlektrische verwarmingsprocessen kunnen worden nagebootst. Met de mo-

Afb. 12 Het vochtpercentage in relatie met de droogtijd bij droogprocessen.





Afb. 13 Equipotentiaallijnen in de verwarmingsgeometrie zoals gegeven in afb. 4.

derne computerapparatuur en programmatuur is het mogelijk om de diverse mogelijke configuraties van een systeem door te rekenen. Als eerste stap wordt de meest belovende verwarmingsgeometrie bepaald en in de computer gemodelleerd. Op basis van deze geometrie wordt de elektrische veldsterkte in de geometrie numeriek bepaald.

Afb. 13 geeft een voorbeeld van een dergelijke berekening zoals is uitgevoerd voor het behandelen van voedselproducten in de geometrie, zoals gegeven in afb. 4. Getoond worden de equipotentiaallijnen. [Jansen, Michelis, 1989].

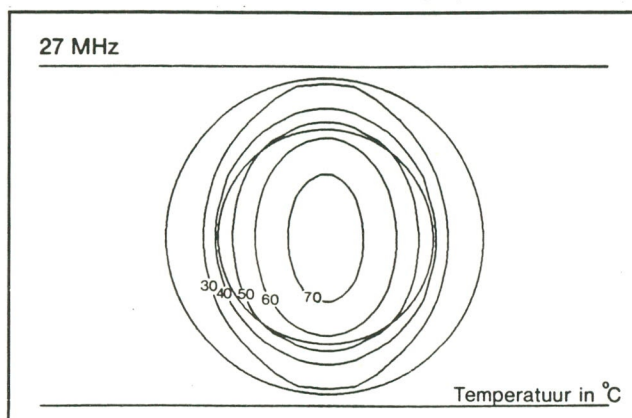
Als gevolg van de hoge diëlektrische constante van het voedselprodukt ($\epsilon_r = 120$) is de spanning over het te verwarmen materiaal zeer laag, dit resulteert in een lage elektrische veldsterkte. Dat de veldsterkte laag is kan ook worden afgeleid uit een beschouwing van de energie-inhoud van het veld zoals gedaan in 3.6.

Gegeven de elektrische veldsterkte kan de warmte-ontwikkeling op ieder punt in de geometrie worden berekend. Op basis van deze warmte-ontwikkeling en samen met de thermische eigenschappen als warmtecapaciteit en geleidbaarheid van de toegepaste materialen, kan het temperatuurverloop in de tijd van dit proces worden berekend. Afb. 14 geeft een voorbeeld van een berekeningsresultaat. [Jansen, Michelis, 1989].

De kracht van modelleren is dat, wanneer het probleem eenmaal is omschreven en gemodelleerd, op snelle wijze door parametervariaties een indruk verkregen kan worden

van het belang van de diverse procesparameters voor het proces. Het alternatief is deze parameters experimenteel vast te stellen, dit kost over het algemeen meer tijd en geeft minder inzicht in het proces. Anderzijds moet worden vastgesteld dat modelleren niet in alle gevallen mogelijk is, waardoor dan de experimentele benadering de enig begaanbare weg is om, binnen redelijke tijd, tot snelle resultaten te komen. Voor experimenteel onderzoek beschikt de KEMA

Afb. 14 Isothermen in de verwarmingsgeometrie zoals gegeven in afb. 4 na een bepaalde verwarmingstijd.



over een microgolf- en een radiofrequente oven en de noodzakelijke meetapparatuur zoals optische temperatuursensoren en dergelijke.

6 Advisering

De KEMA heeft kennis op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen opgebouwd. Op basis van de verkregen expertise en in voorkomende gevallen samenwerkend met andere instituten kan advies over de toepassing van diëlektrische verwarmingsprocessen worden gegeven. In de advisering zijn vier fasen te onderscheiden.

Als eerste geeft de aanvrager een beschrijving van het proces en het produkt dat met het proces wordt behandeld. De KEMA geeft daarna een algemeen inzicht in de toepassingsmogelijkheden van diëlektrische technieken. Dit geschiedt kosteloos. Als uit de eerste oriëntatie blijkt dat diëlektrische technieken toepasbaar lijken en economisch haalbaar zijn, gaat een volgende niet kosteloze fase in.

In de tweede fase wordt een technische haalbaarheidsstudie uitgevoerd. Dit geeft antwoord op de vraag of een diëlektrische installatie haalbaar is en zo ja, in welke techniek deze uitgevoerd moet worden, microgolf- of radiofrequente technieken. De volgende stap is dan de bepaling van het type applicator. De technische haalbaarheidsstudie kan zowel modelmatig als experimenteel worden uitgevoerd, afhankelijk van het type proces en het type materiaal. Op dit moment kan de modellering alleen voor radiofrequente verwarmingsprocessen worden uitgevoerd, in de toekomst is dit echter ook mogelijk voor microgolfprocessen.

Voor een juiste modellering moeten de diëlektrische eigenschappen van het te verwarmen materiaal bekend zijn. Indien dit niet het geval is worden deze globaal, experimenteel, bepaald. Zonodig wordt de modellering ondersteund of aangevuld met experimenteel onderzoek op kleine schaal in een microgolf- of radiofrequente oven.

Als uit de verschillende resultaten blijkt dat diëlektrisch verwarmen of drogen technisch en economisch haalbaar is, gaat een derde fase in. Op basis van de uitgevoerde economische en technische evaluatie wordt een leveringsbestek opgesteld, aangevuld met radiostorings- en EMC-eisen. Voor de uiteindelijke realisatie van het proces wordt samenwerking gezocht met een of meerdere fabrikanten van diëlektrische apparatuur. In onderhandelingen tussen de toekomstige gebruiker en de fabrikant van diëlektrische installaties kan de KEMA als adviseur optreden.

Als vierde en laatste fase kan de KEMA de afnamekeuring van de installatie uitvoeren. Hier wordt gecontroleerd of de installatie aan de eisen in het leveringsbestek voldoet.

7 Samenvatting

De toepassing van diëlektrische verwarming of droging bij industriële processen kan aantrekkelijk zijn vanwege de volgende voordelen:

- besparing van energiekosten;
- grotere productiecapaciteit;
- verbeterde werkomstandigheden;
- verhoging van de produktkwaliteit;
- betere regelbaarheid van het proces;
- mogelijkheid van procesautomatisering;
- geringer ruimtebeslag procesinstallatie.

Deze voordelen leiden tot lagere proceskosten. Bij de KEMA is kennis op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen aanwezig. Het thermisch gedrag van een radiofrequent verwarmingsproces kan worden doorgerekend, in de toekomst zullen ook microgolfprocessen kunnen worden gemodelleerd. De diëlektrische eigenschappen van materialen kunnen worden bepaald. Als laatste kan er experimenteel onderzoek worden verricht om te beoordelen of bepaalde processen diëlektrisch kunnen worden uitgevoerd. Op basis van deze drie activiteiten kan de KEMA adviseren op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen en hoopt daarmee bij te dragen tot procesverbetering en de samenhangende industriële innovatie, om daarmee de concurrentiekracht van de Nederlandse industrie te bevorderen.

Literatuur

- CISPR, 1975. *IEC CISPR Publication 11, 1975. Limits and methods of measurement of radio interference characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment (excluding surgical diathermy apparatus).*
- IEC, 1982. *IEC Publication 519-6, 1982. Safety in electroheat installations. Part 6: Specifications for safety in industrial microwave heating equipment.*
- R. J. Meredith, 1988. *Comparative review of industrial microwave processing at 900 MHz and 2450 MHz. Technologiedag 'Recent trends in industrial microwave applications', CEMT 17 juni 1988.*
- J. H. Houben, P. S. van Roon, B. Krol and W. J. L. Jansen, 1989. *Continuous radio frequency pasteurization of sausage emulsions. International Conference High Frequency/Microwave Processing and Heating. Arnhem 1989.*
- W. J. L. Jansen and E. J. Michelis, 1989. *Computer modelling of dielectric heating. International Conference High Frequency/Microwave Processing and Heating. Arnhem 1989.*

90-250/R.22/HVG

bijlage 4-1

Bijlage 4 BELANGRIJKSTE GEGEVENS VAN DE BIJ KEMA UITGEVOERDE
PROEVEN [6]

Tabel 4.1 Overzicht proeven met 'droog' actief kool (norit);
hoogfrequent (27 MHz) installatie ('-' betekent dat er geen
aantoonbare verwarming optrad)

proefnr.	afvalstof	doorslag ja/nee	U_{top} (V)	ΔT °C/min	Opmerkingen
n-1	norit	ja	-	-	korrel 2 mm geen melinex onder boven elektrode
n-2	norit	nee	460	7	korrel 2 mm condensatie waarneembaar
n-3	norit	nee	470	22	korrel 2 mm
n-4	norit	ja	-	-	korrel 2 mm $\Delta T > 100$
n-5	norit	nee	240	6	korrel 0,8 mm

Tabel 4.2 Overzicht proeven met 'verzadigd' actief kool;
radiofrequent (27 MHz) installatie

proefnr.	afvalstof	doorslag ja/nee	U_{top} (V)	ΔT °C/min	Opmerkingen
n-6	norit	nee	1300	1	korrel 0,8 mm luchtl. 0,3 cm
n-6a	norit	ja	-	-	korrel 0,8 mm
n-7a	norit	nee	925	0.1	korrel 2 mm luchtl. 0,7 cm
n-7b	norit	ja	-	-	korrel 2 mm luchtl. 0,3 cm
n-7c	norit	ja	461	-	korrel 2 mm

90-250/R.22/HVG

bijlage 4-2

Tabel 4.3 Overzicht proeven andere afvalstoffen;
radiofrequent (27 MHz) installatie

proefnr.	afvalstof	doorslag ja/nee	U_{top} (V)	ΔT °C/min	Opmerkingen
b-1	beton	nee	311	13	1)
c-1	kabel	nee	225	4	2)
t-1	grond	nee	431	28	3)
r-1	rubber	nee	600	8	4)
r-2	rubber	nee	600	11	5)
1) de afmetingen van de plak beton zijn: 15 cm x 15 cm x 3 cm (dikte) de sensor is 2cm diep in het beton aangebracht. 2) vier stukken laagspanningskabel (40 cm) vormen de belasting; de sensor is aangebracht in het vulmiddel. 3) proef uitgevoerd met gebruikmaking van styrodeen bakje; melinex tussen bovenste elektrode en bakje geplaatst 4) zie 3) 5) zie 3)					

90-250/R.22/HVG

bijlage 4-3

Tabel 4.4 Overzicht proeven buiten de zuurkast; microgolfoven
(2450 MHz)

proefnr.	afvalstof	ΔT °C/min	Opmerkingen
norit-1	norit	48	korrel 2 mm droog verm. 500 W
norit-2	norit	21	korrel 0,8 mm droog verm. 500 W
norit-3	norit	-	korrel 2 mm verzadigd verm. 500 W
beton-1a	beton	10	verm. 500 W
beton-1b	beton	37	verm. 2000 W
grond-1	grond	118	verm. 2000 W
rubber-1	rubber	28	verm. 1000 W
rubber-2	rubber	¹⁾	verm. 1000 W
¹⁾ proef afgebroken in verband met ontbranding rubber; bij vermogen 500 W vatte materiaal wederom vlam			

90-250/R.22/HVG

bijlage 4-4

Tabel 4.5 Overzicht proeven in de zuurkast; microgolfoven (2450 MHz)

proefnr.	afvalstof	ΔT °C/min	Opmerkingen
dom-slib	slib	4	baggerslib onderl. met. verm. 1000 W
st-slib	slib	14	st-baggersl. volled. met. verm. 1000 W
go-slib	slib	14	go-baggersl. onderloop olie+PAK's verm. 1000 W
gb-olie	slib	60	gb-baggersl. bovenloop olie + PAK's verm. 1000 W
PAK-grond	slib	75	d/grond voll. PAK's verm. 1000 W

90-250/R.22/HVG

bijlage 5-1

Bijlage 5 EXTRAPOLATIE RESULTATEN KEMA-ONDERZOEK IN TABELVORM

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 1 Actief kool droog, te verwijderen: H ₂ S, Org.stoffen, SO ₂ , CS ₂ , max. 5mg/m ³ , in hoofdzaak VOS Bij NORIT Nederland (alleen de "droge" toepassingen): 3000 ton/jaar
HUDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIEKE PROBLEMEN	Regeneratie bij gebruiker : meestal stoom (tot 130°C) of inert gas spoelen, soms vacuüm desorptie Regeneratie bij leverancier (NORIT) : oven 900°C (zonder zuurstof), naverbranden 1200°C Gebruiker: installatie 10.000 m ³ /h : ca. 1 m ³ actief kool, NORIT: 350 kg/uur Geregenereerd kool + desorptie-mengsel -> condenseren -> evt. scheiden water/VOS 90 %, bepaalde typen stoffen niet te regenereren extra reinigingsstappen op grote hoeveelheden spoelgas, menging stoomcondens met verontreiniging
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	grote spreiding : 48-21 degC/min (500W ...gr) naar schatting enkele centimeters, afh. vochtgehalte, veldsterkte groot : veel vocht geeft doorslag zie proef "nat" kool Niet bekend
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	grote spreiding naar schatting : enkele decimeters, afh. vochtgehalte, veldsterkte groot : veel vocht geeft doorslag Niet bekend
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUDIGE METHODE	Kleine hoeveelheden spoelgas, geen waterdamp in condensaat, wellicht ontleding VOS mogelijk ?
SCHATTING KOSTEN HUDIGE METHODE	Gebruiker: f 90,-/ton geabs.VOS = 3 ton stoom/ton VOS, circa 10-15% massa% VOS geabsorbeerd NORIT: ??, hier worden regeneratie en reactivatie gecombineerd in oven
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Vonkoverslag/doorslag bij grotere vochtgehaltes, explosief mengsel: inert gas toepassen
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Neen
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Niet erg positief; voordelen klein t.o.v. extra kosten, mogelijkheid ontleding met MW/RF van belang !

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 2 Actief kool nat, organische (chloor) verbindingen, zware metalen NORIT ??
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Regeneratie slechts beperkt mogelijk (afh. van geabsorbeerde stof) Onderscheid thermische- stoom- chemische en solvent regeneratie ?? Geregenereerd kool + stoom, gas of oplosmiddel met concentraat verontreiniging ?? extra reinigingsstappen grote hoeveelheden spoelvlloeistof of condensaat
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	niet te verwarmen n.v.t. groot : vocht geeft doorslag n.v.t.
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	niet te verwarmen n.v.t. groot : vocht geeft doorslag n.v.t.
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Geen, niet mogelijk
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	
SCHATTING KOSTEN MW / RF	
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Vonkoverslag/doorslag bij grotere vochtgehaltes
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Neen
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Negatief

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 3 Beton Nucleaire industrie, Nederland vrij beperkt.
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Pneumatische/hydraulische werktuigen, afstand bestuurd (ook de "Mausoleum tactiek" wordt toegepast) Nauwelijks toegepast; onbekend Gebroken radio-actief beton: gescheiden in verschillende radio-activiteitsklassen ?? Moeilijk doseerbaar, trillingen, lawaai
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	10 degC/min (500W, ...gr), 37 degC/min (2000W, ... gr) afh. aangebracht vermogen (veldsterkte), gebruikte stralings"hoorn" (antenne), structuur groot : veel vocht geeft veel absorptie vermogen, effect op breekgedrag onbekend Niet bekend
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	13 degC/min (311V = ...W, ...gr) afh. aangebrachte spanning (veldsterkte), en vochtgehalte + structuur beton groot: veel vocht is veel absorptie vermogen Niet bekend
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Waarschijnlijk goed regelbare diepte, geluidloze en trillingsloze methode
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	Niet boven tafel te krijgen, vnl. bepaald door verwerkings/opslagkosten in stralingsklassen: confidentiële informatie (mag de maatschappij niet weten ??).
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW aanzienlijke additionele kosten afstandsbediening etc.
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	gevoeligheid indringdiepte i.v.m. vochtinhoud beton
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Ja, Japan; Microwave irradiation technology for contaminated concrete removal
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Afhankelijk markt, toekomstige ontwikkelingen nucleaire industrie

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 4 Kunststof-afval, scheiden PVC van PP, PE etc.? 400.000 ton/jaar
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Nog nauwelijks gebruikt, scheiden op basis Soortelijke Massa in ontwikkeling Scheiding PVC van rest is betrekkelijk eenvoudig met deze methode Momenteel Pilot schaal , gedacht wordt aan 1-5 ton/uur, afh infrastructurele maatregelen scheiding PVC en PP/PE aan de andere kant 99% Scheiden overige kunststoffen, hiervan ligt Soortelijke Massa dicht bij elkaar !
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	Foliën: Geen temperatuurstijging waargenomen, wellicht wel aanwezig, grotere stukken? enkele centimeters, afhankelijk veldsterkte nauwelijks aanwezig: geen bij compacte massa kan PVC tot smeltpunt, wellicht tot ontledingstemperatuur verhit worden
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	Niet uitgevoerd ? ? ?
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Materiaal blijft droog, levert meteen smelt
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	Globale schatting f 100-200/ton, afh. fractie PVC, streven naar scheiden bij bron
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Foliën blijken niet ontvankelijk, dwz ze verhitten nauwelijks sneller, overige kunststoffen niet gevoelig
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Neen
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Negatief: erg dure methode voor slechts beperkte voordelen

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 5 Kabel met PVC mantel 5000 ton/jaar
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Verbranden kabel zodat geleidermateriaal overblijft, In ontwikkeling: schredderen + mechanisch scheiden metaal/kunststof, daarna scheiding PVC/rest mogelijk. Ook strippers in ontwikkeling 1-3 ton/uur Momenteel: As, dioxine verdachte rookgassen, verontreinigde metalen. 99% Sterk vervuilde rookgassen, gevaar voor dioxine-vorming
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	niet uitgevoerd ? ? ?
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	4 degC/min bij 225 Volt enkele decimeters, afh. veldsterkte PVC neemt geen vocht op smeltpunt PVC en hoger
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Scheiding mogelijk zonder verbranding, waarbij PVC buitenmantel van binnenmantel te scheiden is; t.o.v. schreddermethode weinig voordelen
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	nihil, vaak illegale verbranding !, nieuwe schreddermethode schatting: f 100/ton
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Testfase; weinig bekend, Mechanische bewerking om (weke) mantel te strippen noodzakelijk: diameter-afhankelijke instelling, vereist charges gelijksoortig materiaal
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Neen
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Beperkte kansen: andere methoden, universeler en eenvoudiger, in ontwikkeling

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 6 Grond, verontreinigd met vluchtige (organochloor) verbindingen 400.000 t/jr, 200.000 ton D.S.
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Roterende trommelovens ;verhitten bij 300 - 700 degC : uitdampen verontreinigingen, daarna naverbranden, evt. gasreiniging 15-50 ton/uur geschoonde grond, (giftige) afgassen -> naverbrander -> "geschoonde" gassen 95-99%? Klei-achtige grond (slibgehalte > 20%) niet mogelijk, is ca. 30-40% v/h aanbod
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	118 degC/min 2000 W enkele centimeters, afhankelijk vochtgehalte en aangebrachte veldsterkte vermindering indringingsdiepte enkele honderden graden Celsius
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	28 degC/min enkele decimeters tot ca. 1 meter, afhankelijk vochtgehalte en veldsterkte vermindering doordringingsdiepte enkele honderden graden Celsius
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	"Schoon" proces vergeleken met directe verhitting, snelle opwarming vergeleken met indirecte verhitting
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Zeer dure methode voor laagwaardig produkt, toch naverbranding noodzakelijk (ontleding mogelijk ??).
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Niet voor vervanging roterende trommeloven
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Negatief: Vervanging van roterende trommeldrogers niet aantrekkelijk, tenzij tegelijkertijd ontleding plaatsvindt

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 7 Grond, in situ, verontreiniging: vluchtige organo(chloor)-verbindingen zie blad 6
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Weinig toegepast, luchtstrippen en stoomstrippen worden in BRD wel toegepast ook worden chemische spoelmiddelen gebruikt om spec. stoffen uit te spoelen lucht/stoom strippen: enkele tientallen vierkante meters per keer Vluchtige koolwaterstoffen -> soms naverbranden noodzakelijk tot B-waarde bereikbaar laag verwijderingsrendement, niet geschikt voor ondoorlatende gronden, lekstromen
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	goed, zie blad 6, in situ echter niet aantrekkelijk wegens geringe doordringingsdiepte ? ? ?
RESULTAAT PROEVEN RF:	zie blad 6, voor IN SITU wordt een staggered field van holle pijpen in de grond gebracht, waarmee een veld in de grond wordt gecreëerd, deze pijpen worden tevens gebruikt voor afzuiging van vluchtige componenten. Bij experimenten in Amerika werden temperaturen tot 400 degC bereikt, en een verwijderingsrendement van 99%. Er werd tot ca. 2m diep verhit.
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Hoog rendement, waarschijnlijk ook voor relatief ondoorlaatbare gronden geschikt, relatief goedkoop ????
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	luchtstrippen: fl. 25-40 /ton grond, echter slechte kwaliteit grond (B-waarde)
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Volgens IIT: \$50-\$90 per ton grond
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Eerst vrij lang maximaal 100 degC, tgv verdamping water, 12 dagen totdat 150 degC werd bereikt
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Ja
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Positief: methode lijkt goed bruikbaar, IN SITU markt in Nederland tot nog toe vrij klein

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 8 Extractieslib, kleifractie gefractioneerde grond ca. 150.000 ton/jaar bevat meer dan 20% slib, fractioneren -> slib
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	ontwateren , DUMPEN: geen verwerkingsmethode beschikbaar, i.h.a. sterk verontreinigde (geconcentreerde) materialen; zowel vluchtige organo-verbindingen als zware metalen e.d. nvt nvt nvt geen oplossing beschikbaar
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	4-60 degC/min enkele centimeters, afh. vochtgehalte, veldsterkte vermindering doordringingsdiepte enkele honderden graden Celsius, na verdamping water
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	niet uitgevoerd i.v.m. moeilijkheid opvang gassen, wel goed mogelijk enkele decimeters, afhankelijk vochtgehalte vermindering doordringingsdiepte enkele honderden graden Celsius, na verdamping water
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	Klei,leem,slib wel te verwarmen
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	dumpen: nu nog fl ../ton, in toekomst waarschijnlijk duurder, maatschappelijk onaanvaardbaar
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Hoogfrequent: ca. fl. 8-10.000/kW, Microgolf ca. fl. 10-13.000/kW
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Hoog vochtgehalte slib 50%: eerst vocht uitdampen voordat temperatuur kan stijgen, ontstaan brandbare vluchtige bestanddelen: inert gas
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Neen: idee combinatie vacuüm bandfilter + MW verhitting: wel dure techniek voor laagwaardig (negatieve waarde) produkt
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Wellicht mogelijkheden, hangt sterk af van toelaatbare kosten v/d verwerkingsmethode

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 9 Autobanden SBR, butylrubber: personenwagen banden totaal banden: 65.000 ton/jaar, waarvan 28.000 ton SBR?
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Verbranden, evt. gebruik andere doeleinden in landbouw, stootkussen etc., regenereren SBR (nog) onmogelijk Schredderen SBR nauwelijks toegepast, weinig afzet (belangstelling) voor deze laagwaardige rubberkorrels Momenteel vooral dumpen. Evt. een centrale rubberverbranding met energieopwekking; geen fraaie oplossing SBR-korrels, staalafval, bij verbranding staal + (vuile) rookgassen: extra maatregelen Verbranding 100 % vermindering rubberprobleem, maar verschuiving naar ander milieucompartiment: lucht vuile rookgassen, vernietiging materiaal
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	proef afgebroken i.v.m. ontbranden, m.n. canvas-delen nvt nvt nvt
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	11 degC/min, 600 V enkele decimeters, afh. veldsterkte vermindering doordringingsdiepte, rubber zelf neemt geen vocht op pyrolysetemperatuur is bereikbaar
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	kan anaëroob gebeuren (pyrolyse): scheiding koolstof, staaldraad en koolwaterstof oliën: te verkopen en koolwaterstofgassen als brandstof gebruiken. Ook microwave devulcaniseren mogelijk (=regeneratie)
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	dumpen: kostenverschuiving in tijd, momenteel nihil, maatschappelijk tzt onaanvaardbaar
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Info aangevraagd: onderscheid MW pyrolyse en MW devulcanisatie (regenereren)
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	Ontbranden canvasdelen: inerte atmosfeer nodig
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Ja, o.a. BRC Environment Ltd. rubber journal sept. 1989
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Zeer positief: kan stofketen daadwerkelijk sluitend maken, rubber is ideale MW toepassing (slechte geleider)

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 10 Autobanden: natuurrubber, vrachtwagenbanden totaal banden: 65.000 ton/jaar, waarvan ca. 37.000 ton vrachtwagenbanden
HUDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIFIEKE PROBLEMEN	Verschillend: Hergebruik 25%, verbranden 50%, storten 25% , hergebruik = gebruik rubberkorrels als vulstof, en (nieuw) regeneratie van rubber. Reclaimrubber heeft minder goede mechanische eigenschappen. ? Staalafval + vuile rookgassen (m.n. roet): nabehandeling rookgassen noodzakelijk 100% Vuile rookgassen (Roet). Regeneratie: slechts beperkte toeslag (5-20%) reclaimrubber mogelijk
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	28 degC/min 1000 W enkele centimeters, afhankelijk veldsterkte neemt geen vocht op pyrolysetemperatuur bereikbaar
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	8 degC/min, 600 V enkele decimeters, afhankelijk veldsterkte neemt geen vocht op pyrolysetemperatuur bereikbaar
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUDIGE METHODE	M.b.t. pyrolyse: volledig hergebruik mogelijk, devulcaniseren: ook hergebruik maar produkt heeft minder goede mechanische eigenschappen (bijv. niet geschikt voor loopvlak)
SCHATTING KOSTEN HUDIGE METHODE	dumpen: kostenverschuiving in tijd, momenteel nihil, maatschappelijk tzt onaanvaardbaar
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Info aangevraagd
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	waarschijnlijk ontbranding bij hogere temperaturen: stikstof noodzakelijk, bij devulcaniseren beperkte toeslag haalbaar
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Ja, hier wordt overigens geen onderscheid SBR/Natuurrubber gemaakt
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Positief: zowel pyrolyse als regeneratie lenen zich goed voor MW toepassingen

MATERIAAL: AARD OMVANG MARKT	blad nr. 10 Autobanden: natuurrubber, vrachtwagenbanden totaal banden: 65.000 ton/jaar, waarvan ca. 37.000 ton vrachtwagenbanden
HUIDIGE BEHANDELINGSWIJZE METHODEN CAPACITEIT RESTPRODUKTEN RENDEMENT SPECIEKE PROBLEMEN	Verschillend: Hergebruik 25%, verbranden 50%, storten 25% , hergebruik = gebruik rubberkorrels als vulstof, en (nieuw) regeneratie van rubber. Reclaimrubber heeft minder goede mechanische eigenschappen. ? Staalafval + vuile rookgassen (m.n. roet): nabehandeling rookgassen noodzakelijk 100% Vuile rookgassen (Roet). Regeneratie: slechts beperkte toeslag (5-20%) reclaimrubber mogelijk
RESULTAAT PROEVEN MW: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	28 degC/min 1000 W enkele centimeters, afhankelijk veldsterkte neemt geen vocht op pyrolysetemperatuur bereikbaar
RESULTAAT PROEVEN RF: SNELHEID DOORDRINGINGSDIEPTE EFFECT VOCHT BEREIKBARE TEMPERATUUR	8 degC/min, 600 V enkele decimeters, afhankelijk veldsterkte neemt geen vocht op pyrolysetemperatuur bereikbaar
VOORDELEN MW/RF t.o.v. HUIDIGE METHODE	M.b.t. pyrolyse: volledig hergebruik mogelijk, devulcaniseren: ook hergebruik maar produkt heeft minder goede mechanische eigenschappen (bijv. niet geschikt voor loopvlak)
SCHATTING KOSTEN HUIDIGE METHODE	dumpen: kostenverschuiving in tijd, momenteel nihil, maatschappelijk tzt onaanvaardbaar
SCHATTING KOSTEN MW / RF	Info aangevraagd
PROBLEMEN DI-ELECTRISCHE METHODE ?	waarschijnlijk ontbranding bij hogere temperaturen: stikstof noodzakelijk, bij devulcaniseren beperkte toeslag haalbaar
BESCHIKBARE VOORBEELDEN/LITERATUUR	Ja, hier wordt overigens geen onderscheid SBR/Natuurrubber gemaakt
VERVOLG / PERSPECTIEVEN MW/RF	Positief: zowel pyrolyse als regeneratie lenen zich goed voor MW toepassingen

Voorgeschied

Diëlektrische technologie in de industrie

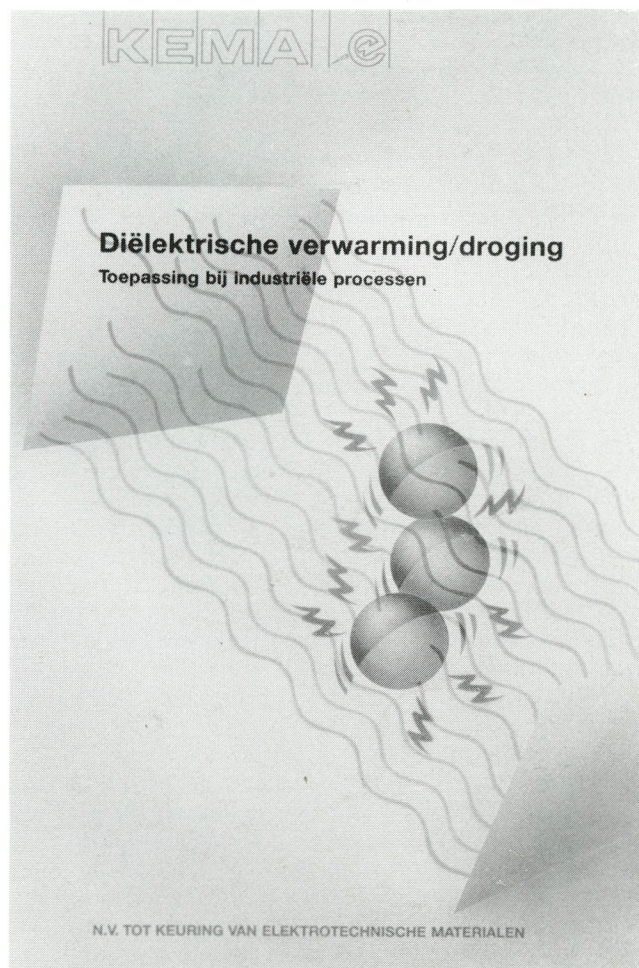
1 Inleiding

De industrie streeft voortdurend naar een verlaging van de produktiekosten en een verbetering van de kwaliteit van het geleverde produkt. Toepassing van een hoogwaardige en veelzijdige energiedrager als elektriciteit biedt, dank zij een aantal voordelen, hiervoor mogelijkheden. In het volgende zal daar een aantal voorbeelden van worden gegeven. Toepassing van elektriciteit in industriële processen is in Nederland nog weinig bekend en wordt hier daarom nog relatief weinig toegepast. Dit in tegenstelling met de ons omringende landen.

Elektriciteit is het produkt van de elektriciteitsbedrijven. Bij een marktgerichte instelling is kennis op het gebied van de nuttige toepassingsmogelijkheden van het produkt elektriciteit noodzakelijk. Als centraal instituut van de elektriciteitsbedrijven wil de KEMA een adviserende taak vervullen op het gebied van hoogwaardige toepassing van elektriciteit in industriële productieprocessen. Om de aanwezige kennis op dit gebied te verdiepen wordt onderzoek uitgevoerd. Toepassing van elektriciteit is in velerlei vormen mogelijk, zoals weerstandsverwarming, infrarood- en ultravioletverwarming, diëlektrische verwarming, inductieverwarming, plasma, laser, vonkerosie, mechanische dampcompressie en warmtepompen. Van deze mogelijkheden heeft het onderzoek zich in eerste instantie toegespitst op diëlektrische verwarming.

Via het nuttig toepassen van diëlektrische warmte in daarvoor geschikte industriële processen kan op produktiekosten worden bespaard, ondanks relatief hoge investeringskosten. De kostenbesparing kan bijvoorbeeld bereikt worden door een versnelling van het proces, door minder warmteverlies als gevolg van zeer lokale verwarming, door vermindering van de benodigde installatieruimte. Diëlektrische verwarming kan lokale verbrandingsprocessen vervangen, wat leidt tot betere werkomstandigheden. Op gebied van verwarmen en drogen biedt diëlektrische verwarming mogelijkheden die met conventionele verwarming niet haalbaar zijn. Tenslotte kan met diëlektrische verwarming in veel gevallen een betere produktkwaliteit worden bereikt door de betere beheersbaarheid van het proces.

De keuze van diëlektrische verwarming als aandachtsg gebied voor onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van elektriciteit wordt met name ingegeven door het feit dat enerzijds, althans in Nederland, deze techniek nog onvoldoende bekend is en anderzijds er een duidelijke behoefte aan deskundigheid op dit gebied wordt gesignaleerd bij degenen die deze techniek willen toepassen. Uit onderzoek-oogpunt is diëlektrische verwarming interessant omdat het zich bij uitstek leent voor modellering met behulp van computerprogramma's. Modelleren geeft meer inzicht in diëlektrische verwarmingsprocessen. Gebaseerd op modelstu-



dies kunnen waardevolle adviezen over het toepassen van diëlektrische verwarmingstechnieken worden gegeven.

In het volgende zal eerst een aantal basisbegrippen van diëlektrische verwarming worden besproken. Op basis hiervan wordt een aantal randvoorwaarden voor een succesvolle toepassing van diëlektrische verwarming vastgesteld. Verschillende verschijningsvormen van verwarmingsapparatuur worden gegeven en hun toepassingsmogelijkheden. Ingegaan zal worden op de systeemkeuze en de rol die de computer daarin kan spelen. Als laatste zal worden gesproken over advisering door de NV KEMA bij de systeemkeuze.

2 Basisbegrippen

2.1 Omschrijving basisbegrippen

Bij conventionele verwarmingsprocessen wordt de warmte van buitenaf via convectie, geleiding of straling aan het oppervlak van het te verwarmen materiaal toegevoerd. Vanaf

* N.V. KEMA.

het oppervlak dringt de warmte door geleiding verder het materiaal in. De voordelen van diëlektrische verwarming berusten grotendeels op het feit dat de warmte direct in het materiaal zelf wordt opgewekt en dat er geen warmte-overdrachtmedium noodzakelijk is. De energie voor verwarming wordt via een hoogfrequent elektrisch veld aan het materiaal toegevoerd.

De beschrijving van diëlektrische verwarmingsprocessen berust op de bekende wetten van Maxwell. Behandeling hiervan zou in dit kader te ver voeren, volstaan wordt met het formuleren van een aantal basisbegrippen dat nuttig is om de toepassingsmogelijkheden van diëlektrische verwarming te onderkennen. Deze basisbegrippen zijn achtereenvolgens de diëlektrische eigenschappen van materialen, de elektrische veldsterkte, de ermee samenhangende warmte-ontwikkeling in het materiaal, de indringdiepte en de thermische eigenschappen.

2.2 Diëlektrische eigenschappen van materialen

Een voor diëlektrische verwarming geschikt materiaal, bevat vrije ladingdragers en/of elektrische dipolen. Deze ladingen trachten de richting van het wisselende elektrische veld te volgen en worden daarbij gehinderd door hun buren. Dit veroorzaakt de warmte-ontwikkeling in het diëlektricum.

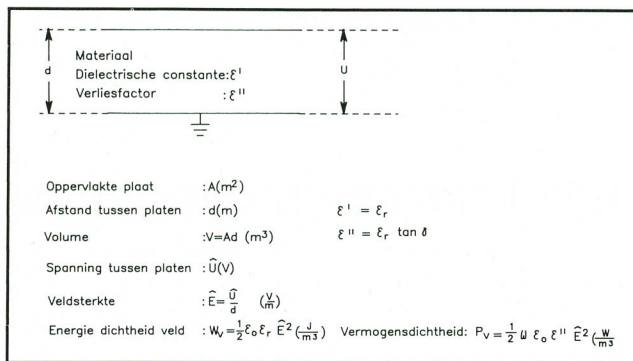
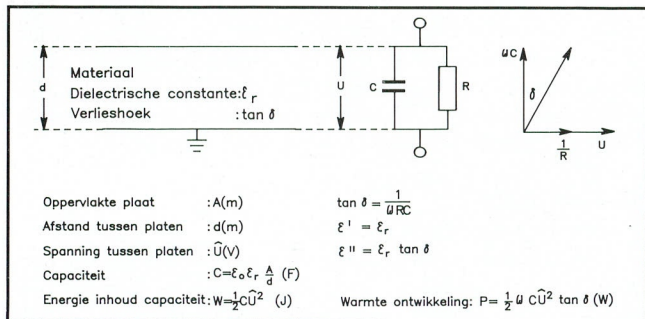
Twee karakteristieke materiaaleigenschappen die de mate waarin de warmte-ontwikkeling kan plaatsvinden bepalen, zijn de zogenaamde diëlektrische constante en de diëlektrische verliesfactor.

Het aantal dipolen per volume-eenheid wordt aangegeven door de waarde van de diëlektrische constante, de mate waarin de dipolen in hun beweging worden gehinderd ofwel de mate van warmte-ontwikkeling in het materiaal wordt aangegeven door de diëlektrische verlieshoek. De verlieshoek bevat eveneens de verliezen veroorzaakt door vrije ladingdragers. Een derde grootte welke bij voorkeur in diëlektrisch verwarmen wordt gebruikt is de verliesfactor. De verliesfactor is het produkt van de diëlektrische constante en de verlieshoek. Waarom er een voorkeur is voor deze grootte zal in het volgende blijken.

Een diëlektricum is voor te stellen als een parallelschakeling van een capaciteit en een weerstand. De grootte van de capaciteit wordt behalve door de ruimtelijke afmetingen, bepaald door de diëlektrische constante. Als voorbeeld: voor een vlakke condensator wordt de capaciteit gegeven door $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$, zie **afb. 1**. De verliezen kunnen worden weergegeven als een weerstand parallel aan de capaciteit, in **afb. 1** is de verlieshoek aangegeven die als gevolg van de weerstand ontstaat. Verder worden in **afb. 1** de uitdrukkingen voor de verliesfactor ϵ'' , de energie-inhoud en de warmte-ontwikkeling in de capaciteit gegeven.

Uit **afb. 1** blijkt dat de warmte-ontwikkeling onder andere

Afb. 1 Schematische voorstelling en basisgrootheden van diëlektrische verwarming.



Afb. 2 Diëlektrisch verwarmen en het elektrische veld.

wordt bepaald door de frequentie ω , de capaciteit C en de verlieshoek $\tan \delta$ van het materiaal. De laatste twee hangen af van het soort materiaal, van de frequentie en van de temperatuur.

In tabel 1 worden de diëlektrische constante en de verliesfactor voor een aantal materialen gegeven bij een tweetal veel voorkomende frequenties, welke in gebruik zijn voor diëlektrisch verwarmen.

TABEL 1 Waarden voor diëlektrische constante ϵ' en de verliesfactor ϵ''

	Temperatuur		27 MHz		2450 MHz
Materiaal	°C	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
Teflon	22	2.1	0.0003	2.1	0.0003
Polytheen	24	2.3	0.0004	2.3	0.0007
Pyrex	25	4.8	0.015	4.8	0.025
IJs (zuiver)	—12	3.7	0.07	3.2	0.003
Water (zuiver)	25	78	0.4	77	12
Water	25	78	100	75	18
Aardappel (ongekookt)	25	80	48	54	16
Biefstuk	25	50	1300	40	12

2.3 Elektrische veldsterkte en vermogensontwikkeling

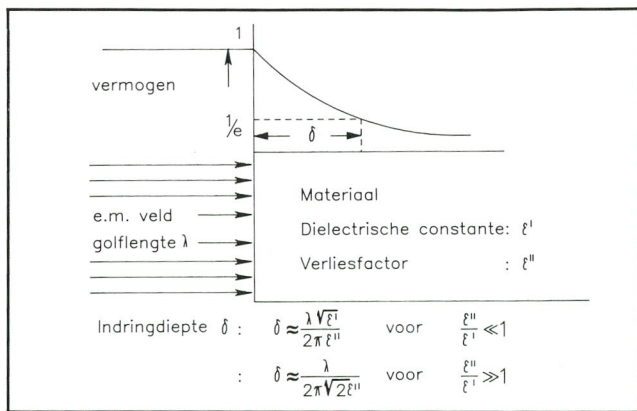
De elektrische veldsterkte wordt bepaald door de spanning per lengte-eenheid. In het voorbeeld van **afb. 1** wordt de veldsterkte in de vlakke condensator gegeven door $E = U/d$. De veldsterkte is in een diëlektrische verwarmingssysteem de belangrijkste grootte. De veldsterkte is in grote mate bepalend voor de warmte-ontwikkeling in het medium; via de elektrische veldsterkte wordt energie uit het net aan het medium overgedragen.

De in een diëlektricum, onder invloed van een elektrisch veld E , gegenereerde warmte per volume-eenheid P_v , wordt gegeven door de uitdrukking in **afb. 2**. Hieruit blijkt dat de vermogensontwikkeling evenredig is met het kwadraat van de veldsterkte, tevens blijkt dat de vermogensontwikkeling eveneens evenredig is met de verliesfactor. Dit is de reden dat de verliesfactor in de diëlektrische verwarmingstechniek bij voorkeur wordt gebruikt om het diëlektricum te karakteriseren.

De energiedichtheid van het elektrische veld wordt gegeven door $W_v = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2$. In samengestelde media worden de energiedichtheden in de verschillende media bepaald door de verhouding van de verschillende diëlektrische constanten.

2.4 Indringdiepte

Het elektrische veld kan maar tot een bepaalde diepte in een diëlektricum doordringen. Als gevolg van de verliezen neemt het elektrische veld en daardoor ook de vermogensontwikkeling, in het materiaal af. Het elektrische veld draagt zijn



Afb. 3 De indringdiepte van het elektromagnetisch veld in materialen.

energie over aan het materiaal in de vorm van warmte. Zoals veel zaken in de elektrotechniek verloopt de afname van het vermogen via een e-macht: de diepte waarbij het vermogen tot $1/e$ is afgenomen is gedefinieerd als de indringdiepte. De indringdiepte wordt bij benadering bepaald door de uitdrukkingen gegeven in **afb. 3**.

In tabel 2 wordt een aantal waarden voor de indringdiepte gegeven voor de frequenties en de materialen genoemd in tabel 1.

TABEL 2 Waarden voor indringdiepte δ voor twee frequenties

Materiaal	Temperatuur °C	27 MHz δ in m	2450 MHz δ in m
Teflon	22	8500	94
Polytheen	24	6700	42
Pyrex	25	258	1,7
IJs (zuiver)	-12	49	13
Water (zuiver)	25	39	0,014
Water	25	0,18	0,009
Aardappel (ongekookt)	25	0,34	0,008
Biefstuk	25	0,035	0,010

2.5 Thermische grootheden

Naast de diverse elektrische grootheden zijn ook een tweetal thermische grootheden van belang voor het gedrag bij verwarmen namelijk de warmtecapaciteit en de thermische geleidbaarheid van de verschillende materialen. Samen met het ontwikkelde vermogen in het materiaal en de omgevingstemperatuur bepalen deze grootheden met welke snelheid en tot welke waarde de temperatuur in het materiaal toeneemt.

3 Diëlektrisch verwarmen

3.1 Toepassing basisbegrippen op diëlektrisch verwarmen

Uit de bovengenoemde basisbegrippen is een aantal wetmatigheden voor het toepassen van diëlektrisch verwarmen te onderkennen. Aan de hand van deze basisgrootheden kan bij voorbaat worden geconcludeerd dat sommige teassingen met diëlektrisch verwarmen niet mogelijk zijn en andere juist wel. In het volgende zullen de toegestane frequenties voor diëlektrisch verwarmen worden gegeven. Verder zal worden ingegaan op de radiostorings- en veiligheidseisen die aan radiofrequente- en microgolfinstallaties worden gesteld.

3.2 Diëlektrische eigenschappen

Uit de relatie voor de vermogensontwikkeling (**afb. 2**) blijkt dat diëlektrische verwarming van een materiaal alleen mogelijk is als dit een relatief hoge verliesfactor heeft. Gegeven de voorbeelden in tabel 1 kan bijvoorbeeld worden opgemerkt

dat teflon geen geschikt materiaal is om diëlektrische warmte in te ontwikkelen, dat water hier echter uitstekend voor geschikt is. Dit laatste biedt veel mogelijkheden voor allerlei droogprocessen. Dit wordt in 4.4 behandeld.

3.3 Elektrische veldsterkte

Als de diëlektrische verliesfactor laag is, is de warmte-ontwikkeling in het medium gering. Door het verhogen van de elektrische veldsterkte zou deze warmte-ontwikkeling vergroot kunnen worden. Aan deze veldsterkte zijn echter grenzen gesteld, vanwege het feit dat ieder materiaal maar een bepaalde veldsterkte kan weerstaan. Daarboven treedt doorslag op in het materiaal. Voor lucht bijvoorbeeld ligt, bij normale atmosferische omstandigheden, deze doorslagveldsterkte op ongeveer 30 kV/cm.

In de constructie van installaties moet ook rekening gehouden worden met de elektrische veldsterkte om de kans op doorslag te voorkomen.

3.4 Frequentie

Het ontwikkelde vermogen kan ook worden vergroot door de frequentie te verhogen. Uit de relatie voor de vermogensontwikkeling blijkt dat deze toeneemt evenredig met de frequentie. Dit is het gevolg van het harder trillen van de dipolen in het materiaal.

Internationaal zijn de frequenties 13, 27, 41, 2450, 5800 en 24125 MHz vastgelegd in CISPR-publikatie nr. 11 [CISPR, 1975]. Deze frequenties zijn vastgelegd voor gebruik in industriële, wetenschappelijke en medische toepassingen. De zogenaamde ISM-frequenties.

Tot 300 MHz wordt gesproken over radiogolffrequenties, daarboven over microgolffrequenties. Bij de hierboven genoemde frequenties is geen grens gelegd aan de maximale stralingsenergie die de installatie af mag geven met het oog op radiostoringen.

Naast de hierboven genoemde algemene frequenties is er nog een aantal andere frequenties in diverse landen toegestaan. In Nederland is dit 3.3 MHz, in een aantal landen ook 434 MHz. In Amerika en in Engeland is eveneens een frequentie van rond de 900 MHz beschikbaar voor diëlektrische verwarmingsdoeleinden. De in de praktijk meest gebruikte frequenties zijn 13, 27, rond 900 en 2450 MHz. In Nederland wordt een frequentie van rond de 900 MHz ook toegepast in industriële processen voor diëlektrisch verwarmen en drogen. Deze frequentie is hier op dit moment echter alleen toegestaan, indien voldaan wordt aan de radiostoringseisen.

Technieken rond 900 MHz bieden in specifieke gevallen veel voordelen boven technieken rond 2450 MHz, daarnaast zijn de rendementen beter en zijn 900 MHz-installaties relatief goedkoper dan 2450 MHz installaties. 900 MHz installaties zijn in ruime mate commercieel verkrijgbaar [Meredith, 1988]. Het is dus gewenst dat ook in Nederland een frequentie van rond de 900 MHz officieel ter beschikking komt voor dit type toepassingen. In een concept-versie van IEC CISPR-publikatie nr. 11 wordt, in Europees verband, voorgesteld de frequentieband 931,5 t/m 936,5 MHz hiervoor te bestemmen.

3.5 Indringdiepte

Het ontwikkelde vermogen neemt toe met de frequentie. Echter ook de frequentie kan niet onbepaald opgevoerd worden. Bij hogere frequenties neemt de indringdiepte af, waardoor in het inwendige van het materiaal de vermogensontwikkeling klein is. De energie-overdracht van het elektrische veld aan het materiaal vindt alleen plaats aan de buitenzijde van het materiaal, alleen de buitenkant wordt verwarmd.

In tabel 2 wordt de indringdiepte voor een aantal materialen gegeven. Uit de waarden blijkt duidelijk dat het bijvoorbeeld niet raadzaam is dikke lagen aardappelen met microgolven te verwarmen. In het algemeen zullen radiofrequenties worden toegepast voor grote objecten met kleine vermogensdichtheden: kleine objecten en hoge gewenste vermogensdichtheden leiden tot microgolftoepassingen.

3.6 Verwarmingsgeometrie

De energiedichtheid van een elektrisch veld wordt gegeven door

$$W_v = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon' E^2$$

De meeste verwarmingsopstellingen zijn samengesteld uit verschillende diëlektrika met verschillende diëlektrische constanten ϵ' . Het te verwarmen materiaal ligt bijvoorbeeld in een buis tussen twee elektroden waarbij de tussenruimten gevuld zijn met lucht.

Afb. 4 geeft een voorbeeld van een dergelijke geometrie, in dit geval voor het pasteuriseren van worstdegen [Houben et al, 1989].

In de geometrie zijn drie verschillende diëlektrika te onderscheiden. De totale energie-inhoud van het veld van een gedeeld diëlektricum wordt bij benadering gegeven door

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_1' E_1^2 V_1 + \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_2' E_2^2 V_2 + \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_3' E_3^2 V_3$$

In het algemeen hebben de materialen die diëlektrisch verwarmd kunnen worden een hoge diëlektrische constante zoals uit tabel 1 blijkt.

Uit bovenstaande vergelijking volgt dan een probleem. Een fysisch systeem streeft naar een minimale energie-inhoud. Een hoge ϵ' in het materiaal en een relatief lage ϵ' in het omringende medium betekent dan een lage veldsterkte in het materiaal en een hoge elektrische veldsterkte in het medium. Bij de constructie van de apparatuur moet daar rekening mee worden gehouden. Bij zeer ongunstige verhoudingen in de diëlektrische constante kan de elektrische veldsterkte plaatselijk zo hoog worden dat de doorslagveldsterkte wordt overschreden en doorslag plaats vindt.

3.7 Eisen: radiostoringsniveaus, veiligheidseisen en stoorspanningsniveaus

3.7.1 Radiostoringsniveaus

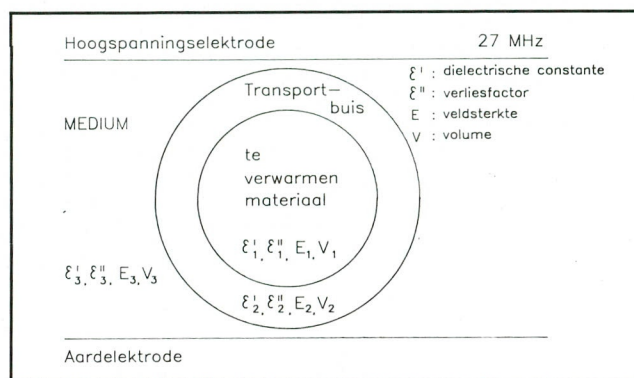
In 3.4 zijn eisen gegeven die gesteld worden aan de diëlektrische installatie met betrekking tot radiostoringsniveaus. Een aantal van deze frequenties wordt in tabel 3 gegeven, voor zover van belang voor diëlektrisch verwarmen. Ze werden ontleend aan de genoemde IEC CISPR-publikatie nr. 11 [CISPR, 1975]

TABEL 3 Een aantal frequenties vastgesteld voor industriële toepassingen

Centrum frequentie	Frequentie-band	Maximum toegelaten stralingsniveau
13.560	13.553-13.567	onbepikt
27.120	26.957-27.283	onbepikt
915.000	902-928	onbepikt*)
2450	2400-2500	onbepikt

*) Alleen in onder andere Noord- en Zuid-Amerika. Voor Europa wordt voorgesteld een frequentiegebied van 931.5 MHz t/m 936.5 MHz met een stralingslimiet van 60 dB ($\mu\text{V/m}$) op 30 m afstand vast te stellen.

Het ongelimiteerd stralingsniveau geldt alleen in de gegeven frequentieband. Daarbuiten worden limieten gesteld aan het uitgezonden stralingsniveau. Deze limieten liggen tussen de



Afb. 4 Voorbeeld van een verwarmingsgeometrie.

30 en 60 dB ($\mu\text{V/m}$), afhankelijk van de frequentie. Eventuele harmonische welke door de radiofrequente- of microgolff-installatie worden opgewerkt en buiten de toegestane frequentieband vallen moeten dus aan deze eisen voldoen.

Naast eisen aan het uitgestraalde veld worden in IEC CISPR-publikatie nr. 11 ook eisen gesteld aan de optredende stoorspanningen op het net. De eisen liggen op dit moment in de orde van 1 à 3 mV buiten de frequentiegebieden voor zo ver ze, ten dele, in tabel 3 zijn gegeven.

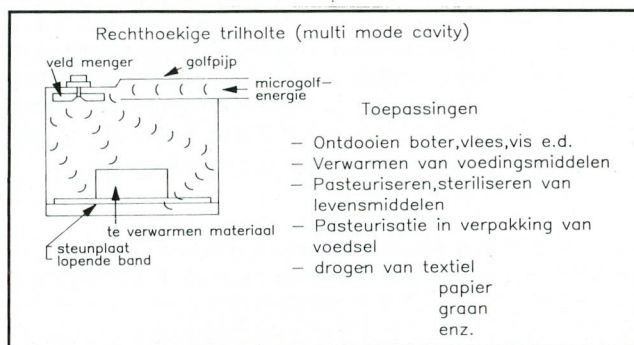
3.7.2 Veiligheidseisen

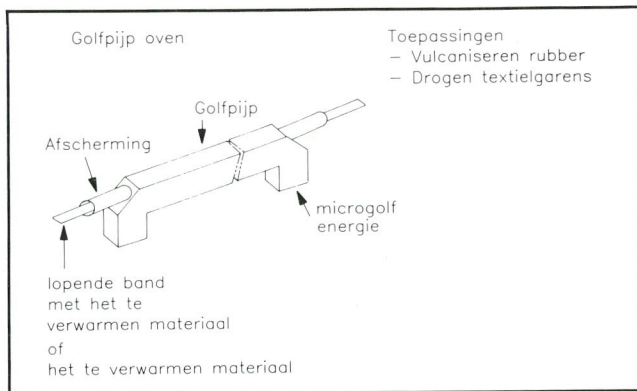
In IEC 519-6 worden eisen gegeven die een grens stellen aan de maximaal vrijkomende stralingsenergie in het microgolff-gebied met het oog op de menselijke veiligheid. Het gevaar van microgolffstraling schuilt niet zo zeer in de microgolffstraling zelf, maar in het effect dat gebruikt wordt bij diëlektrisch verwarmen, namelijk de warmte-ontwikkeling. In levende weefsels kunnen als gevolg van te hoge energiedichtheden beschadigingen worden veroorzaakt, door te hoge temperaturen. In IEC 519-6 wordt gesteld dat buiten een gebied van 5 cm vanaf het apparaat, de vermogensdichtheid niet boven de 5 mW/cm² mag komen [IEC, 1982].

Voor andere frequentiegebieden buiten het microgolff-gebied worden door verschillende landen diverse eisen gehanteerd. Er is geen overeenstemming over bijvoorbeeld eisen te stellen aan radiofrequente apparatuur ten aanzien van menselijke veiligheid.

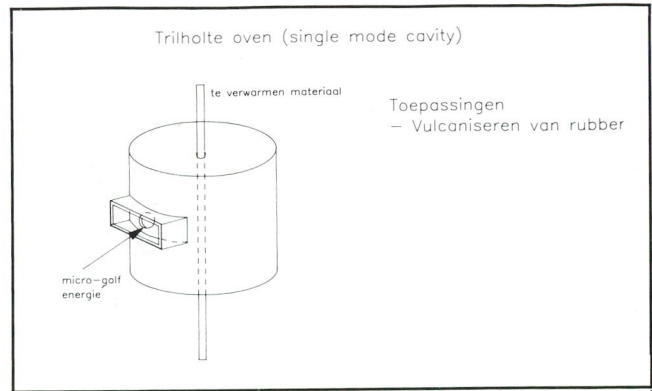
De huidige veiligheidsniveaus zijn gebaseerd op kortdurende blootstelling aan E.M.-velden. De gevolgen van langdurige, continue blootstelling aan straling zijn niet duidelijk. Er is eveneens geen overeenstemming over een veiligheids-eis voor wat betreft langdurige blootstelling. Een niveau beneden de 1 mW/cm² wordt over het algemeen als acceptabel beschouwd in industriële omgeving.

Afb. 5 Rechthoekige microgolfoven met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.





Afb. 6 Microgolfpijpooven met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.



Afb. 8 De trilholte-microgolfoven met een voorbeeld van een gerealiseerde toepassing.

3.7.3 Stoorspanningen (EMC)

Diëlektrische verwarmingsinstallaties worden niet ruimtelijk geïsoleerd bedreven, maar zijn omringd door andere apparatuur. De uitgestraalde elektromagnetische energie zal de in de omgeving staande elektronische apparatuur, als computers, meet- en regelapparatuur beïnvloeden. Om deze redenen is het raadzaam om, buiten de radiostoringseisen aanvullende eisen te stellen aan de uitgestraalde energie en aan de door de installatie veroorzaakte stoorspanningen op het net. Internationale eisen op het gebied van de elektromagnetische compatibiliteit (EMC) zijn in ontwikkeling. Door de KEMA worden voorlopig, op het gebied van elektromagnetische interferentie, de volgende richtwaarden gehanteerd. De bij de werkfrequentie optredende stoorspanning op het net moet kleiner zijn dan 1 volt; de bij de werkfrequentie optredende maximale uitstraling op 2 m afstand, dient kleiner te zijn dan 1 V/m; de harmonische componenten op het net dienen te voldoen aan Europese Norm EN 50.006. Voldoet een diëlektrische verwarmingsinstallatie aan deze normen, dan kan met vrij grote zekerheid worden aangenomen dat elektronische apparatuur buiten een straal van 2 m naar behoren zijn functie blijft vervullen.

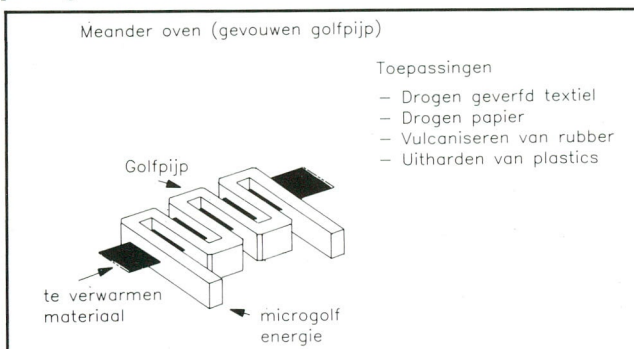
Elektronische apparatuur is veel gevoeliger voor elektromagnetische straling dan het menselijk lichaam. Een bijkomend voordeel van bovengenoemde EMC-eisen is dat de menselijke veiligheid gewaarborgd is als aan bovengenoemde niveaus wordt voldaan.

4 Constructie en toepassing

4.1 Algemeen

Uit de verschillende relaties werd geconstateerd dat radiogolfverwarming vooral kan worden toegepast bij grote ob-

Afb. 7 Meander-microgolfoven met enkele gerealiseerde toepassingsvoorbeelden.



jecten en lagere energiedichtheden en microgolfverwarming bij kleine objecten en grotere energiedichtheden. Daarnaast spelen constructieve problemen en uiteraard economische afwegingen een rol, waarbij de laatste doorslaggevend zijn voor een succesvolle toepassing van diëlektrische verwarmingstechnieken. De kosten van microgolfovens zijn in het algemeen hoger dan van radiofrequente ovens, uitgezonderd voor de kleine vermogens.

Er is een verschil in bouwwijze tussen de microgolfoven en een radiogolfoven ten aanzien van de applicator, dat gedeelte van het systeem waarin de warmte-ontwikkeling wordt opgewekt. Bij een microgolfoven bestaat de applicator uit een gesloten metalen kast waar de energie ingestraald wordt vanuit een golfpijp. Bij de radiofrequente oven bestaat de applicator uit twee of meerdere elektroden waartussen of waarboven zich het te verwarmen materiaal bevindt. In het volgende zullen de verschillende vormen van applicatoren worden beschreven, enkele toepassingsgebieden zullen worden genoemd.

4.2 Microgolfovens en hun toepassingen

De applicator, de gesloten metalen doos voor microgolftoepassingen, kan verschillende vormen aannemen. De meest gebruikelijke vorm is de metalen rechthoekige trilholte, zoals die onder andere bij de huishoudelijke oven gebruikelijk is (multi mode cavity) (afb. 5). De afmetingen zijn groot ten opzichte van de golflengte. Deze oven wordt in de industrie onder andere toegepast voor het drogen van farmaceutische poeders al of niet in vacuüm.

Een andere vorm is de lange golfpijp waarin zich het te verwarmen of te drogen materiaal bevindt. Een dergelijke applicator wordt onder andere gebruikt voor het drogen van textielgarens (afb. 6).

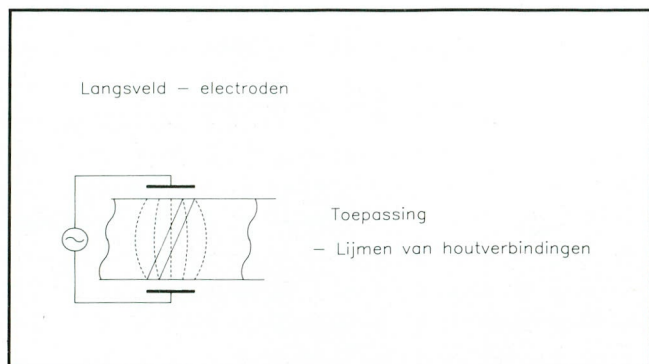
De golfpijp kan worden opgebouwd in de vorm van een meander applicator. Dit type wordt gebruikt voor het behandelen van dunne folie-achtige materialen als rubber, papier en textiel (afb. 7).

Als laatste wordt hier genoemd de trilholte-oven (single mode cavity) (afb. 8). Dit type oven wordt onder andere gebruikt voor het vulcaniseren van rubber.

4.3 Radiofrequente ovens en hun toepassingen

Bij radiofrequente ovens wordt de energie opgewekt tussen twee of meerdere elektroden. Deze kunnen al naar de aard van het te verwarmen materiaal eveneens verschillende vormen aannemen.

Vlakke plaatelektroden voor langs- en dwarsveldverwarming en buisvormige, zogenaamde strooiveldelektroden,



Afb. 9 R.F.-langsveldverwarming en een gerealiseerde toepassing.

voor verwarmen of drogen van dunne materialen. De laatste elektroden kunnen aan beide zijden van het materiaal of slechts aan één zijde worden gegroepeerd.

Vlakke elektroden voor langsveldverwarming worden onder andere toegepast bij het lijmen van hout (afb. 9). De warmte kan zeer plaatselijk worden toegevoerd daar de lijm een relatief hoge en het hout een relatief lage verliesfactor heeft. Dit betekent een zeer efficiënt energieverbruik en een grote versnelling van het proces, daar relatief veel energie aan de lijm kan worden toegevoerd, terwijl het hout daarbij nauwelijks in temperatuur stijgt. Ten opzichte van een conventioneel proces wordt er eveneens een energiebesparing bereikt.

De meest gebruikelijke uitvoeringsvorm is een applicator, bestaande uit twee vlakke elektroden (zie afb. 10). Dit type applicator wordt voor een groot aantal toepassingen gebruikt welke varieert van het lassen van kunststoffen als PVC, het verwarmen en drogen van textiel, voedingsmiddelen en kunststoffen, tot en met het pasteuriseren en steriliseren van voedingsmiddelen, al of niet in verpakking.

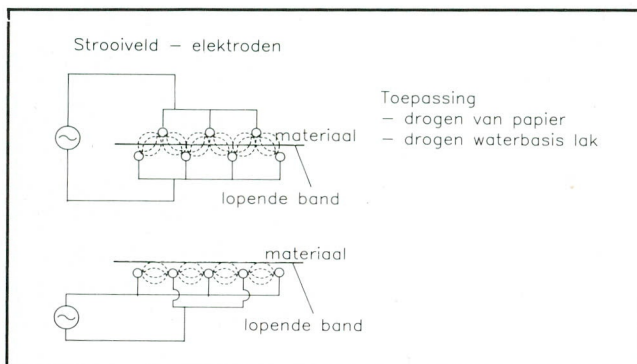
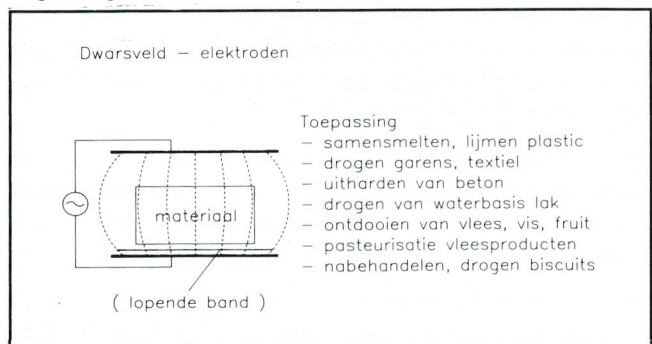
Als laatste de strooiveldapplicator, die wordt vooral gebruikt voor het drogen en verwarmen van dunne lagen, als papier, textiel en dergelijke (afb. 11).

4.4 Droogprocessen

Bij droogprocessen kan diëlektrisch verwarmen vaak succesvol worden toegepast in de laatste droogfase. Een algemeen verloop van een droogproces wordt gegeven in afb. 12.

Na drogen tot een bepaalde lage vochtigheid kost een verdere droging van een materiaal via conventionele middelen onevenredig veel energie en neemt de droogtijd snel toe. De warmte moet namelijk van buitenaf het materiaal ingebracht worden, deze buitenlaag heeft, omdat de laag relatief droog

Afb. 10 R.F.-dwarsveldverwarming en enkele gerealiseerde toepassingen.



Afb. 11 R.F.-strooiveldapplicator en enkele gerealiseerde toepassingen.

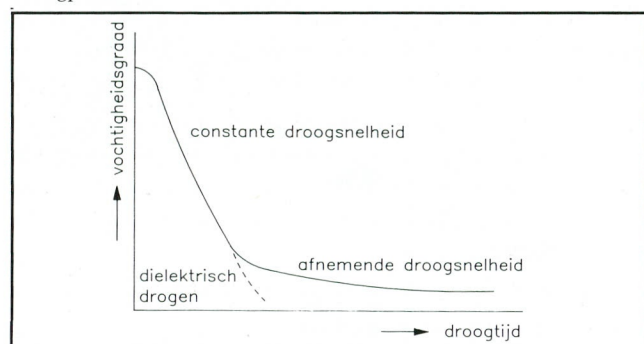
is, een hoge thermische weerstand, wat de reden is voor het lagere rendement en de langere droogtijden. Toepassing van diëlektrisch verwarmen resulteert in een efficiënt gebruik van energie omdat de energie daar wordt opgewekt waar het nodig is, namelijk in het vocht. Door een combinatie van diëlektrisch verwarmen met hete lucht, om het vocht af te voeren, kan de droogtijd aanzienlijk, met een factor 2 à 5, worden teruggebracht. Behalve als gevolg van energiebesparing treedt een verdere proceskostenbesparing op door de kortere procestijd.

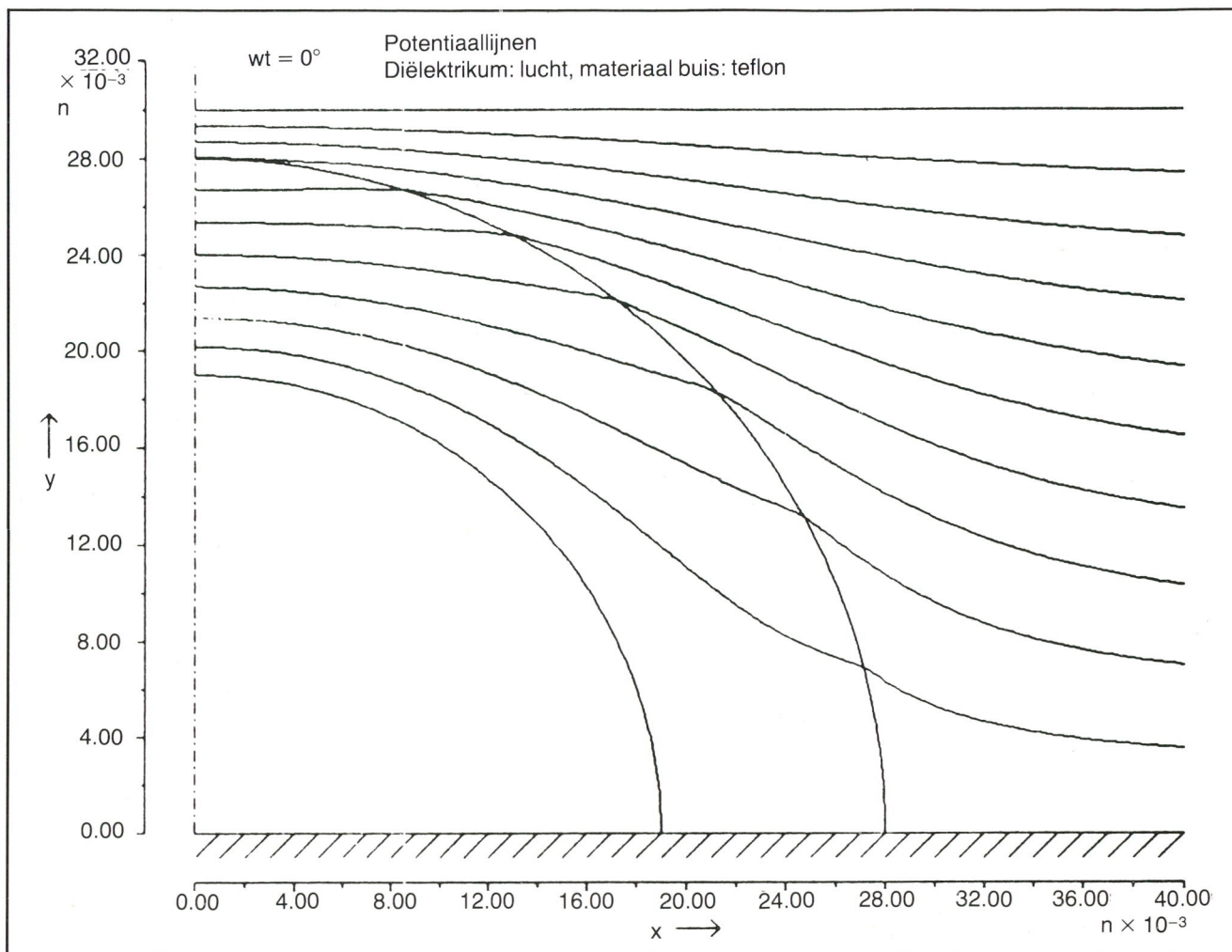
5 Systeemkeuze

Indien in een productieproces diëlektrische verwarmings-technieken kunnen worden toegepast en uit een economische evaluatie blijkt dat dit rendabel is, dan is uit het voorgaande duidelijk dat er vele mogelijkheden en uitvoeringsvormen zijn.

Het proces bepaalt de hoeveelheid energie die toegevoerd moet worden. Hieruit volgt het vermogen van de generator die de energie uit het net moet omzetten in de hoogfrequente veldenergie. Het vermogen van de benodigde generator levert een eerste schatting van de kosten. Op basis van deze kosten kan een eerste evaluatie worden uitgevoerd om te beoordelen of toepassing van diëlektrische verwarmings-technieken rendabel is. Afhankelijk van de procesparameters, het gevraagde vermogen, de diëlektrische en thermische eigenschappen van het te behandelen materiaal en de afmetingen van het produkt, moet een keuze gedaan worden uit de veelheid van mogelijkheden en moet de juiste constructie van de generator worden vastgesteld. De computer is daarbij een belangrijk hulpmiddel. Op de KEMA is een computer-model ontwikkeld waarmee verschillende diëlektrische verwarmingsprocessen kunnen worden nagebootst. Met de mo-

Afb. 12 Het vochtpercentage in relatie met de droogtijd bij droogprocessen.





Afb. 13 Equipotentiaallijnen in de verwarmingsgeometrie zoals gegeven in afb. 4.

derne computerapparatuur en programmatuur is het mogelijk om de diverse mogelijke configuraties van een systeem door te rekenen. Als eerste stap wordt de meest belovende verwarmingsgeometrie bepaald en in de computer gemodelleerd. Op basis van deze geometrie wordt de elektrische veldsterkte in de geometrie numeriek bepaald.

Afb. 13 geeft een voorbeeld van een dergelijke berekening zoals is uitgevoerd voor het behandelen van voedselproducten in de geometrie, zoals gegeven in afb. 4. Getoond worden de equipotentiaallijnen. [Jansen, Michelis, 1989].

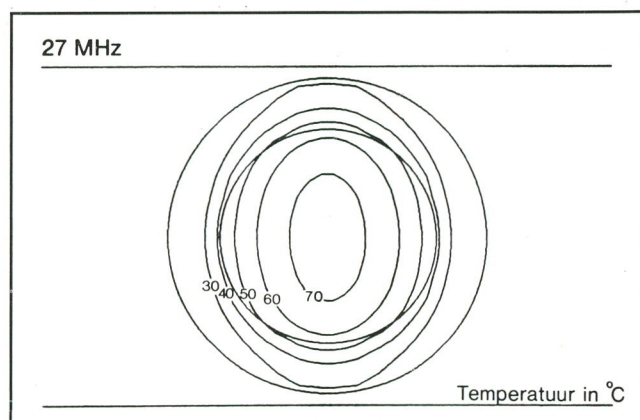
Als gevolg van de hoge diëlektrische constante van het voedselproduct ($E_r = 120$) is de spanning over het te verwarmen materiaal zeer laag, dit resulteert in een lage elektrische veldsterkte. Dat de veldsterkte laag is kan ook worden afgeleid uit een beschouwing van de energie-inhoud van het veld zoals gedaan in 3.6.

Gegeven de elektrische veldsterkte kan de warmte-ontwikkeling op ieder punt in de geometrie worden berekend. Op basis van deze warmte-ontwikkeling en samen met de thermische eigenschappen als warmtecapaciteit en geleidbaarheid van de toegepaste materialen, kan het temperatuurverloop in de tijd van dit proces worden berekend. **Afb. 14** geeft een voorbeeld van een berekeningsresultaat. [Jansen, Michelis, 1989].

De kracht van modelleren is dat, wanneer het probleem eenmaal is omschreven en gemodelleerd, op snelle wijze door parametervariaties een indruk verkregen kan worden

van het belang van de diverse procesparameters voor het proces. Het alternatief is deze parameters experimenteel vast te stellen, dit kost over het algemeen meer tijd en geeft minder inzicht in het proces. Anderzijds moet worden vastgesteld dat modelleren niet in alle gevallen mogelijk is, waardoor dan de experimentele benadering de enig begaanbare weg is om, binnen redelijke tijd, tot snelle resultaten te komen. Voor experimenteel onderzoek beschikt de KEMA

Afb. 14 Isothermen in de verwarmingsgeometrie zoals gegeven in afb. 4 na een bepaalde verwarmingstijd.



over een microgolf- en een radiofrequente oven en de noodzakelijke meetapparatuur zoals optische temperatuursensoren en dergelijke.

6 Advisering

De KEMA heeft kennis op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen opgebouwd. Op basis van de verkregen expertise en in voorkomende gevallen samenwerkend met andere instituten kan advies over de toepassing van diëlektrische verwarmingsprocessen worden gegeven. In de advisering zijn vier fasen te onderscheiden.

Als eerste geeft de aanvrager een beschrijving van het proces en het produkt dat met het proces wordt behandeld. De KEMA geeft daarna een algemeen inzicht in de toepassingsmogelijkheden van diëlektrische technieken. Dit geschiedt kosteloos. Als uit de eerste oriëntatie blijkt dat diëlektrische technieken toepasbaar lijken en economisch haalbaar zijn, gaat een volgende niet kosteloze fase in.

In de tweede fase wordt een technische haalbaarheidsstudie uitgevoerd. Dit geeft antwoord op de vraag of een diëlektrische installatie haalbaar is en zo ja, in welke techniek deze uitgevoerd moet worden, microgolf- of radiofrequente technieken. De volgende stap is dan de bepaling van het type applicator. De technische haalbaarheidsstudie kan zowel modelmatig als experimenteel worden uitgevoerd, afhankelijk van het type proces en het type materiaal. Op dit moment kan de modellering alleen voor radiofrequente verwarmingsprocessen worden uitgevoerd, in de toekomst is dit echter ook mogelijk voor microgolfprocessen.

Voor een juiste modellering moeten de diëlektrische eigenschappen van het te verwarmen materiaal bekend zijn. Indien dit niet het geval is worden deze globaal, experimenteel, bepaald. Zonodig wordt de modellering ondersteund of aangevuld met experimenteel onderzoek op kleine schaal in een microgolf- of radiofrequente oven.

Als uit de verschillende resultaten blijkt dat diëlektrisch verwarmen of drogen technisch en economisch haalbaar is, gaat een derde fase in. Op basis van de uitgevoerde economische en technische evaluatie wordt een leveringsbestek opgesteld, aangevuld met radiostorings- en EMC-eisen. Voor de uiteindelijke realisatie van het proces wordt samenwerking gezocht met een of meerdere fabrikanten van diëlektrische apparatuur. In onderhandelingen tussen de toekomstige gebruiker en de fabrikant van diëlektrische installaties kan de KEMA als adviseur optreden.

Als vierde en laatste fase kan de KEMA de afnamekeuring van de installatie uitvoeren. Hier wordt gecontroleerd of de installatie aan de eisen in het leveringsbestek voldoet.

7 Samenvatting

De toepassing van diëlektrische verwarming of droging bij industriële processen kan aantrekkelijk zijn vanwege de volgende voordelen:

- besparing van energiekosten;
- grotere productiecapaciteit;
- verbeterde werkomstandigheden;
- verhoging van de produktkwaliteit;
- betere regelbaarheid van het proces;
- mogelijkheid van procesautomatisering;
- geringer ruimtebeslag procesinstallatie.

Deze voordelen leiden tot lagere proceskosten. Bij de KEMA is kennis op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen aanwezig. Het thermisch gedrag van een radiofrequent verwarmingsproces kan worden doorgerekend, in de toekomst zullen ook microgolfprocessen kunnen worden gemodelleerd. De diëlektrische eigenschappen van materialen kunnen worden bepaald. Als laatste kan er experimenteel onderzoek worden verricht om te beoordelen of bepaalde processen diëlektrisch kunnen worden uitgevoerd. Op basis van deze drie activiteiten kan de KEMA adviseren op het gebied van diëlektrisch verwarmen en drogen en hoopt daarmee bij te dragen tot procesverbetering en de samenhangende industriële innovatie, om daarmee de concurrentiekracht van de Nederlandse industrie te bevorderen.

Literatuur

- CISPR, 1975. *IEC CISPR Publication 11, 1975. Limits and methods of measurement of radio interference characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment (excluding surgical diathermy apparatus).*
- IEC, 1982. *IEC Publication 519-6, 1982. Safety in electroheat installations. Part 6: Specifications for safety in industrial microwave heating equipment.*
- R. J. Meredith, 1988. *Comparative review of industrial microwave processing at 900 MHz and 2450 MHz. Technologiedag 'Recent trends in industrial microwave applications', CEMT 17 juni 1988.*
- J. H. Houben, P. S. van Roon, B. Krol and W. J. L. Jansen, 1989. *Continuous radio frequency pasteurization of sausage emulsions. International Conference High Frequency/Microwave Processing and Heating. Arnhem 1989.*
- W. J. L. Jansen and E. J. Michelis, 1989. *Computer modelling of dielectric heating. International Conference High Frequency/Microwave Processing and Heating. Arnhem 1989.*