

TNO-rapport

**Reiniging van afvalstoffen en grond
door middel van een continu werkende
vacuümverdamer**

– Samenvattend rapport –

Referentienummer 94-187
Dossiernummer 112322-24094
Datum juni 1994
NP

Auteur
Ir. J.I.A. Koene

Met medewerking van
Ing. H.J.B. Averink
Ir. G.H.W. van Benthem
J.C. Pisa
Dr.Ir. J.A. Zeevalkink

Trefwoorden

- vacuümverdamping
- schroefdroger
- fluorescentiepoeder
- aardgasproduktieslib
- bodemverontreiniging
- kwik
- ftalaten

Bestemd voor
PNEM N.V.
NAM B.V.
DSM
Novem

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Aan dit project is een bijdrage verleend uit de Stimuleringsregeling
Milieutechnologie (1991) die gefinancierd wordt door de Ministeries van
Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Verkeer en
Waterstaat en Landbouw, Natuurbeheer en Visserij. Novem beheert deze
regeling.

Nederlandse organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek

Samenvatting

In opdracht van drie bedrijven, NAM, PNEM en DSM heeft TNO een ontwikkelingsopdracht uitgevoerd naar de toepassing van vacuümtechnologie ten behoeve van het reinigen van verontreinigde grond en afvalstoffen.

Het onderzoek is behalve door de drie bedrijven financieel ondersteund door Novem vanuit de Stimuleringsregeling Milieutechnologie en ook TNO zelf leverde een financiële bijdrage, vanuit de 'Stimuleringsregeling voor Bedrijfgericht Collectief Onderzoek'.

Het doel van het onderzoek is om door middel van een pilot-plant onderzoek een basis te leggen voor het ontwerp van een praktijkinstallatie voor het reinigen van afvalstoffen en verontreinigde grond. Met reiniging wordt bedoeld het verwijderen van de aanwezige vluchtige componenten, zoals kwik en aromatische koolwaterstoffen. Een van de belangrijkste innovatieve uitgangspunten bij de uitvoering van het onderzoek was dat het proces niet batchgewijs, maar op een *continue* wijze wordt bedreven.

In de proefinstallatie, met een capaciteit van 100 - 200 kg/uur, is de verwijdering van de volgende componenten onderzocht:

- ftalaten (weekmakers) en andere aromatische koolwaterstoffen in verontreinigde grond,
- kwik en olie in aardgasproductieslib en
- kwik in fluorescentiepoeder.

Het onderzoeksprogramma is uitgevoerd met een zogenaamde vacuüm-schroefdroger (te noemen unit I), waarmee materiaal onder relatief 'milde' condities is behandeld. Een tweede unit (unit II), waarmee een hogere temperatuur en een dieper vacuüm gerealiseerd kan worden, is niet gebouwd vanwege onvolkomenheden in het ontwerp, de hoge kosten en de lange levertijd voor de bouw van de installatie.

Het pilot-plant onderzoek heeft uitgewezen dat door middel van een continu werkend vacuümverdampingsproces verontreinigde grond en afvalstoffen gereinigd kunnen worden. Het onderzoek heeft uitgewezen dat voor verontreinigde grond en fluorescentiepoeder al onder relatief milde condities, dat wil zeggen bij een temperatuur van 300 °C, goede resultaten behaald kunnen worden. Door de uitvoering van het pilot-plant onderzoek is een grote hoeveelheid informatie verzameld en is er inzicht verkregen in de procestechnische en apparaattechnische ontwerpisen.

Bij het behandelen van natte materialen (slurries) zijn er belangrijke operationele problemen opgetreden, met name tengevolge van onvoldoende 'afdichting op produkt', een verstoord materiaaltransport (aanbakken van slib tijdens het drogen) en stofproblematiek. De geteste schroefdroger is in zijn huidige uitvoeringsvorm niet geschikt bevonden voor het in de praktijk drogen van aardgasproductieslib.

Bij het behandelen van droge of gedroogde materialen zijn geen operationele problemen opgetreden. Wel treedt een sterke vervuiling van de condensor op tengevolge van meegesleurd stof. Door behandeling van gedroogd aardgasproductieslib (beginconcentratie van 20.000 mg Hg/kg droge stof) bij een temperatuur van 280 °C en een druk van circa 90 mbara gedurende 120 minuten kan het kwikgehalte aanzienlijk worden teruggebracht. Het kwikgehalte daalt echter niet tot ver beneden 50 mg/kg, de grenswaarde volgens het 'Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen' (BAGA).

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
– Samenvattend rapport –

Bij behandeling van fluorescentiepoeder (beginconcentratie van 85 - 3.000 mg Hg/kg droge stof) bij een temperatuur van 280 °C en een druk van 40 mbara gedurende 120 minuten wordt het kwikgehalte verlaagd tot beneden de grenswaarde van 50 mg/kg. De (verwachte) invloed van de druk op de verwijderingsrendementen is duidelijk aangetoond. Voor een verdere kwikverwijdering uit gedroogd aardgasproductieslib of fluorescentiepoeder is een apparaat nodig, waarmee een hogere temperatuur en/of een dieper vacuüm bereikt kan worden.

Bij behandeling van verontreinigde grond (beginconcentratie ftalaten van 20 - 200 mg/kg en een vochtgehalte van 25 - 20%) bij een temperatuur van 250 °C en een druk van 150 mbara gedurende 40 minuten is de verwijdering van ftalaten zodanig dat deze niet meer kunnen worden aangetoond (concentraties ftalaten beneden 0,1 mg/kg, DEHP beneden 0,5 mg/kg). Ftalaten kunnen dus door middel van vacuümverdamper uit verontreinigde grond worden verwijderd tot beneden de A-waarde volgens de leidraad Bodemsanering, zijnde 0,1 mg/kg droge stof. De stijging van de fenolconcentratie is een gevolg van de afbraak van ftalaten. Fenol en benzeen kunnen door het voortzetten van de behandeling onder vacuüm worden verwijderd tot beneden de A-waarde.

Voor drie cases zijn met behulp van onder andere het rekenprogramma ASPEN materiaal- en energiebalansen opgesteld en is een ontwerp gemaakt van de verschillende onderdelen van de installatie. Er zijn drie cases doorgerekend: case A (capaciteit 1500 ton/jaar, de geschatte maximale hoeveelheid kwikhoudend materiaal die in Nederland geproduceerd wordt), case B (capaciteit 5000 ton/jaar, bij import van kwikhoudend materiaal) en case C (capaciteit 48.000 ton/jaar, met organische componenten verontreinigde grond). Voor het verwerken van het aardgasproductieslib is het ontwerp van case A en case B door cost estimators van NAM gebruikt voor het berekenen van de investering van een installatie op industriële schaal (twee units in serie) en voor de behandeling van verontreinigde grond is het ontwerp van case C door Recycling Nederland B.V. en een Duitse apparatenbouwer gebruikt voor het maken van een investeringschatting van een schroefdroger (alleen unit I).

De investering voor case A wordt geschat op Mf 7,0,= en voor case B op Mf 11,4,= (inclusief projectmanagement, engineering en contingencies). Voor case C wordt de investering van een schroefdroger door Recycling Nederland B.V. geschat op Mf 3,75,= en door TNO op kf 5,0,=.

Voor de behandeling van kwikhoudende afvalstoffen (case A en B) worden de verwerkingskosten bepaald door de kapitaals- en arbeidskosten. Ze bestaan voor circa de helft uit kapitaalskosten ('capital charge') en voor een derde deel uit personele kosten. Hierdoor ontstaat een sterk schaalgrootte-effect, waardoor de kostprijs voor case B (f 900,=/ton) aanzienlijk lager uitvalt dan voor case A (f 1.900,=/ton). De kosten voor energie en utilities bedragen slechts een fractie van de verwerkingskosten.

Voor de behandeling van verontreinigde grond in een schroefdroger, waarbij de capaciteit van een installatie zeer groot is (case C), zijn de energiekosten relatief hoog ten opzichte van de kapitaalskosten en de personele kosten. De verwerkingskosten bedragen dan volgens een eerste globale berekening circa Hf 80,= per ton. Hierbij is ervan uitgegaan dat een installatie met een capaciteit van 10 ton/uur technisch realiseerbaar en gedurende 65% van de tijd operationeel inzetbaar is.

Summary

TNO was commissioned by three companies, viz. NAM, PNEM and DSM to conduct a research project into the use of vacuum technology for decontaminating contaminated soil and waste materials. In addition to the above-mentioned three companies, Novem [Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu B.V. - Dutch Company for Energy and Environment] supported this research financially through the *Stimuleringsregeling Milieutechnologie* [Promotion Scheme for Environmental Technology] and TNO itself also provided a grant from the *Stimuleringsregeling voor Bedrijfsgericht Collectief Onderzoek* [Promotion Scheme for Near-Market Collective Research].

The objective of the research is to provide a basis via pilot-scale trials for designing an industrial-scale plant for decontaminating waste materials and contaminated soil. 'Decontamination' is used to mean the elimination of the volatile components present such as mercury and aromatic hydrocarbons. One of the major innovative features of the research was that this was not a batch process but was *continuously* operated.

The elimination of the following components was investigated in the pilot plant which had a capacity of 100 - 200 kg/h:

- phthalates (plasticisers) and other aromatic hydrocarbons in contaminated soil;
- mercury and oil in natural gas production sludge;
- mercury in fluorescent powder.

The research program was carried out with a vacuum screw drier (called unit I) with which material was treated under relatively 'gentle' conditions. A second unit (unit II), which would enable a higher temperature and greater vacuum to be achieved, was not built because of design deficiencies, the high costs and the long lead time for construction of the plant.

The pilot-scale research demonstrated that contaminated soil and waste materials can be decontaminated using a continuous vacuum vaporisation process. The research indicated that even under relatively gentle conditions, i.e. up to 300 °C, good results can be achieved. The trials with the pilot plant yielded a large amount of information about the requirements which the apparatus must comply with and knowledge of the process engineering and plant design specifications.

Major operational difficulties occurred in the treatment of wet materials (slurries), particularly as a result of inadequate 'sealing by means of product', material conveying problems (baking-on of sludge while drying), and dust problems. The screw drier tested was found not to be suitable in its present form for industrial scale drying of natural gas production sludge.

No operational problems occurred in the treatment of dry or dried materials, though there was a substantial degree of soiling of the condenser as a result of entrained dust. Considerable reductions in the mercury content proved possible by treating dried natural gas production sludge (initial concentration 20,000 mg Hg/kg dry matter) at a temperature of 280 °C and a pressure of approx. 90 mbar for 120 minutes. The mercury content did not, however, fall much below 50 mg/kg, the threshold value according to the *Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen* [BAGA - Designation of Hazardous Wastes Order].

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
– Samenvattend rapport –

In the treatment of fluorescent powder (initial concentration of 85 - 3,000 mg Hg/kg dry matter) at a temperature of 280 °C and a pressure of 40 mbar for 120 minutes, the mercury content was reduced to below the threshold value of 50 mg/kg, mentioned in the BAGA. The (anticipated) effect of pressure on the elimination efficiency was clearly demonstrated. To eliminate even more mercury from dried natural gas production sludge a machine is required which will enable a higher temperature and/or greater vacuum to be achieved.

When treating contaminated soil (initial phthalate concentration of 20 - 200 mg/kg and a moisture content of 20 - 25%) at a temperature of 250 °C and a pressure of 150 mbar for 40 minutes, the elimination of phthalates was such that their presence could no longer be detected (phthalate concentration below 0.1 mg/kg, DEHP below 0.5 mg/kg). Phthalates can thus be eliminated from contaminated soil by means of vacuum vaporisation to below the so called A value according to the *Leidraad Bodemsanering* [Soil Protection Guidelines]. The increase in the phenol concentration is a consequence of the breakdown of phthalates. Phenol and benzene can be eliminated to below the A value by continuing the process under vacuum.

Material and energy balances were determined with the assistance, among other things, of the ASPEN computer program for three cases, and the various components of the plant were modelled. Three cases were computed: case A (capacity 1500 t/yr, the estimated maximum quantity of mercury-containing material produced in the Netherlands), case B (capacity 5000 t/yr, import of mercury containing material) and case C (capacity 48000 t/yr, contaminated soil). For processing the natural gas production sludge the design of cases A and B was used by NAM cost estimators for calculating the investment costs of an industrial-scale plant (two units operating in series), and for treating contaminated soil the design of case C was used by Recycling Nederland B.V. and a German machinery manufacturer for producing a cost estimate for a screw drier (unit I only).

The investment costs for case A were estimated at NLG 7,000,000 and for case B NLG 11,400,000 (including project management, engineering and contingencies). For case C the investment costs for a screw drier were estimated NLG 5,000,000.

For treating mercury-containing waste materials, the process for low capacities (cases A and B) in a two-stage plant (units I and II) appears to be very capital- and labour-intensive. Approximately half the cost price consists of the capital charge, and about a third is taken up by personnel costs. This clearly illustrates the effect of economies of scale in that the cost price for case B (NLG 900/tonne) is substantially lower than for case A (NLG 1900/tonne). The costs for energy and utilities represent only a fraction of the processing costs.

With regard to the treatment of contaminated soil in a screw drier in which the plant capacity is very high (case C), the energy costs are fairly high relative to the capital costs and the personnel costs. The processing costs according to TNO's calculation are approx. NLG 80/t. This calculation assumes that a plant with a capacity of 10 t/h is technically feasible and can be operated for 65% of the time.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Summary	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrondinformatie met betrekking tot het project	8
1.2	Achtergrondinformatie met betrekking tot de behandelde afvalstoffen en verontreinigde grond	9
1.3	Voor- en nadelen van vacuümverdamping	10
2	Beschrijving van het vacuümverdampingssysteem	11
3	Het technisch functioneren van de schroefdroger	14
4	Behandeling van met ftalaten verontreinigde grond	17
4.1	Berekeningen	17
4.1.1	Berekening van de benodigde lengte en de invloed van een aanbaklaag	17
4.1.2	Berekening van de verdamping van ftalaten uit verontreinigde grond, gesimuleerd met ASPEN	20
4.2	Technisch functioneren van de schroefdroger bij behandeling van verontreinigde grond	21
4.3	Resultaten met betrekking tot de reiniging van verontreinigde grond in de proefinstallatie	21
4.4	Conclusies met betrekking tot de verwijdering van ftalaten uit verontreinigde grond	22
5	Het drogen van nat aardgasproduktieslib met de schroefdroger	24
5.1	Berekeningen	24
5.2	Technisch functioneren van de schroefdroger bij het drogen van aardgasproduktieslib	27
5.3	Resultaten met betrekking tot het drogen van aardgasproduktieslib	28
5.4	Conclusies met betrekking tot het drogen van aardgasproduktieslib	28
6	Behandeling van kwikhoudende afvalstoffen; het verwijderen van kwik	29
6.1	Behandeling van gedroogde of droge materialen	29
6.2	Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit gedroogd aardgasproduktieslib	29
6.3	Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit fluorescentiepoeder	30
6.4	Conclusies met betrekking tot de verwijdering van kwik uit kwikhoudende afvalstoffen	31

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

7	Uitgangspunten en kostenberekeningen van een continu werkend vacuümsysteem	32
7.1	Aanpak	32
7.2	Capaciteit installaties.....	32
7.3	Uitgangsmateriaal, produkt- en proceseisen.....	33
7.4	Dimensionering van de apparatuur	34
7.5	Resultaten economische evaluatie	36
8	Aanbevelingen	40
9	Conclusies	42
10	Referenties	44
11	Verantwoording	46

1 Inleiding

1.1 Achtergrondinformatie met betrekking tot het project

Onderzoek op laboratoriumschaal

Sinds 1991 is door TNO onderzoek uitgevoerd naar de verdamping, onder vacuüm, van vluchtige stoffen uit afvalstoffen en verontreinigde grond. Met een batch reactor op laboratoriumschaal zijn onder meer goede resultaten bereikt met betrekking tot de verwijdering van kwik uit fluorescentiepoeder [1], aardgasproduktieslib [2, 3] en de verwijdering van PAK's en ftalaten uit verontreinigde grond [4]. Om deze techniek op grotere schaal te kunnen toepassen is een onderzoek gestart op semi-technische schaal. Een belangrijk uitgangspunt bij de uitvoering van dit onderzoek was dat de pilot-plant (en de 'full-scale' installatie) continu bedreven moest worden.

Financiering

Het onderzoek werd gefinancierd door drie bedrijven, NAM, PNEM en DSM. Het onderzoek werd financieel ondersteund door Novem vanuit de Stimuleringsregeling Milieutechnologie en ook TNO zelf leverde een financiële bijdrage vanuit de 'Stimuleringsregeling voor Bedrijfsgericht Collectief Onderzoek'.

Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek was om een basis te leggen voor het ontwerp van een praktijkinstallatie voor de verwijdering van vluchtige componenten, zoals kwik, aromatische koolwaterstoffen en olie uit afvalstoffen en verontreinigde grond. Daartoe diende het onderzoek informatie te verschaffen omtrent de volgende aspecten [1]:

- de rendementen met betrekking tot verwijdering van vluchtige componenten, die gehaald kunnen worden met continu werkende vacuümdestillatie op semi-technische schaal;
- de procesomstandigheden (verblijftijd, temperatuur en onderdruk), waaronder deze rendementen gehaald worden;
- de verwerkingskosten.

Achtergrondinformatie over het onderzochte vacuümverdampingssysteem en het uitgevoerde experimentele programma wordt gegeven in hoofdstuk 2 en informatie over de bedrijfsvoering van de installatie in hoofdstuk 3. De resultaten die betrekking hebben op de behandeling van met ftalaten verontreinigde grond worden beschreven in hoofdstuk 4, de resultaten die betrekking hebben op het drogen van aardgasproduktieslib in hoofdstuk 5 en die betrekking hebben op de verwijdering van kwik uit gedroogd aardgasproduktieslib en fluorescentiepoeder in hoofdstuk 6. De berekening van de kosten van behandeling in een vacuümsysteem wordt in hoofdstuk 7 gegeven. De conclusies zijn tenslotte in hoofdstuk 8 weergegeven.

1.2 Achtergrondinformatie met betrekking tot de behandelde afvalstoffen en verontreinigde grond

Algemeen

In de proefinstallatie is de verwijdering van volgende verontreinigingen onderzocht:

- ftalaten (weekmakers) en andere aromatische koolwaterstoffen in verontreinigde grond,
- kwik en olie in aardgasproduktieslib en
- kwik in fluorescentiepoeder.

De met ftalaten verontreinigde grond bestaat uit een 'éénmalige' partij, de beide andere stromen zijn stromen, die jaarlijks vrijkomen. In tabel 1 zijn globaal de jaarlijks geproduceerde hoeveelheden en kwikconcentraties in aardgasproduktieslib en fluorescentiepoeder weergegeven.

Door de behandeling moeten ftalaten verwijderd worden tot beneden de detectielimiet volgens de leidraad Bodemsanering. Deze detectielimiet bedraagt voor alle ftalaten 0,1 mg/kg droge stof. Echter voor di(2-ethylhexyl)-ftalaat (DEHP) bedraagt de bepalingsgrens 0,5 mg/kg droge stof en is daarom als detectielimiet aangehouden. Kwik dient voor acceptatie in de C-2 deponie zo ver verwijderd te zijn dat er geen kwikemissies optreden. Dit betekent dat metallisch kwik uit de *onderzochte* afvalstromen verwijderd moet worden tot ver beneden de 50 mg/kg droge stof (volgens BAGA). Indien een deel van het kwik aanwezig zou zijn in de vorm van kwikverbindingen zou een hogere concentratie in principe acceptabel zijn.

Tabel 1 Hoeveelheden fluorescentiepoeder en aardgasproduktieslib die per jaar vrijkomen, met de daarin aanwezige hoeveelheden kwik

Afvalstroom	Hoeveelheid afval (ton/jaar)	Kwikconcentratie (%)	Gemiddelde concentratie (%)	Hoeveelheid kwik (ton/jaar)
Fluorescentiepoeder	300 - 400	0,01 - 0,1	0,075	0,3
Aardgasproduktieslib	300	0,02 - 5	1,0	3

Verontreinigde grond

Bij DSM Resins is bij een ontgraving een hoeveelheid van 15.000 ton met ftalaten verontreinigde grond vrijgekomen. Er wordt gezocht naar reinigingstechnieken voor deze grond. In het kader van het project zijn twee typen verontreinigde grond onderzocht, een zandachtig en een leemachtig materiaal.

Het type ftalaat dat in de hoogste concentraties wordt aangetroffen is di(2-ethylhexyl)-ftalaat (DEHP). In het leemachtige materiaal is de concentratie hoger (150 - 170 mg/kg) dan in het zandachtig materiaal (20 mg/kg). Naast ftalaten komen geringe hoeveelheden aromatische koolwaterstoffen (benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen) en fenolen voor.

Fluorescentiepoeder

Oude TL-lampen worden sinds enige jaren ingezameld. Door LumenEx, een 100% dochter van de Provinciale Noordbrabantse Electriciteits Maatschappij (N.V. PNEM) is een industriële installatie gebouwd om deze lampen te verwerken. Ze wor-

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

den hier vershredderd en dit materiaal wordt gescheiden in een glasfractie, een ferro-fractie, een non-ferro fractie (aluminium) en een fractie fluorescentiepoeder.

Er worden twee categorieën fluorescentiepoeder onderscheiden: 'zeefdoorvalpoeder' en 'ontstoffingspoeder'. Het 'zeefdoorvalpoeder' bestaat voor circa 90% uit fijne glasdeeltjes en het kwikgehalte is laag (ongeveer 100 mg/kg droge stof) ten opzichte van dat van het 'ontstoffingspoeder' (ongeveer 1000 mg/kg droge stof). 'Ontstoffingspoeder' bestaat voor 65% uit glas. De geproduceerde hoeveelheden van deze stromen verhouden zich als 1:2.

Het fluorescentiepoeder zelf bestaat voornamelijk uit Ca en halofosfaten (CaO 20 - 50%; P₂O₅ 30 - 45%). Ook SrO en MgO kunnen in redelijke concentraties voorkomen. Antimoon (Sb₂O₃) wordt toegepast in hoeveelheden van 0,4 tot 0,7%. Daarnaast kunnen fluorescentiepoeders zeldzame aarden, lood en yttrium bevatten. Cadmium en arseen worden in de huidige lampen niet meer toegepast, maar kunnen in oude en geïmporteerde lampen nog wel voorkomen en dus ook in het fluorescentiepoeder.

Aardgasproduktieslib

De Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM B.V.) wint sedert enige decennia aardgas uit het Groningen veld en andere kleinere velden op het land en het Nederlandse deel van het continentale plat. In de bovengronds gelegen installatie vindt de behandeling van het gewonnen aardgas plaats. In dit Groningse gas bevindt zich van nature kwik. Bij de winning en de behandeling van het aardgas vinden drukverlaging, droging en koeling van het gas plaats en worden formatiewater, aardgascondensaat (koolwaterstoffen) en kwik afgescheiden uit de gasstroom. In het gevormde slib bevindt zich een zand/klei-fractie en chemicaliën die gebruikt worden bij de gaswinning. Op dit moment worden deze kwikhoudende reststromen door de NAM B.V. centraal ingezameld, opgeslagen en verpakt, waarna afvoer plaatsvindt naar Duitsland voor ondergrondse berging. Het slib wordt gecentrifugeerd vanwege eisen die de ondergrondse berging stelt ten aanzien van vochtgehalte, stabiliteit en transporteerbaarheid.

1.3 Voor- en nadelen van vacuümverdamping

Het toepassen van vacuüm kan in een aantal gevallen voordelen opleveren ten opzichte van behandeling onder atmosferische condities. Een van de voordelen is dat het kookpunt van een groot aantal stoffen onder vacuüm aanzienlijk lager ligt dan onder atmosferische condities en dat de temperatuur van de behandeling daarom minder hoog hoeft te zijn om deze componenten te vervluchtigen. Door de relatief lage behandelingstemperatuur blijft de structuur (organische fractie) van een behandelde bodem behouden, waardoor de biologische activiteit sneller zal terugkeren. De verontreinigingen worden na condensatie in een residustroom geconcentreerd, die vervolgens onder optimale condities vernietigd kan worden of mogelijk zelfs hergebruikt. Doordat bij de behandeling onder vacuüm nauwelijks zuurstof aanwezig is en er bovendien een volledig inerte atmosfeer kan worden gecreëerd door de additie van stikstofgas, wordt de kans op de vorming van toxische afbraakprodukten aanzienlijk verkleind. Slechts een beperkte hoeveelheid 'afgassen' hoeft te worden gereinigd. Nadelen van het werken onder vacuüm zijn de benodigde vacuümbestendige apparatuur en extra apparatuur en energie om het vacuüm in stand te houden. Tenslotte is onder vacuüm de warmte-overdracht in de condensors slecht en deze moeten dus groter zijn dan onder atmosferische condities.

2 Beschrijving van het vacuümverdampingssysteem

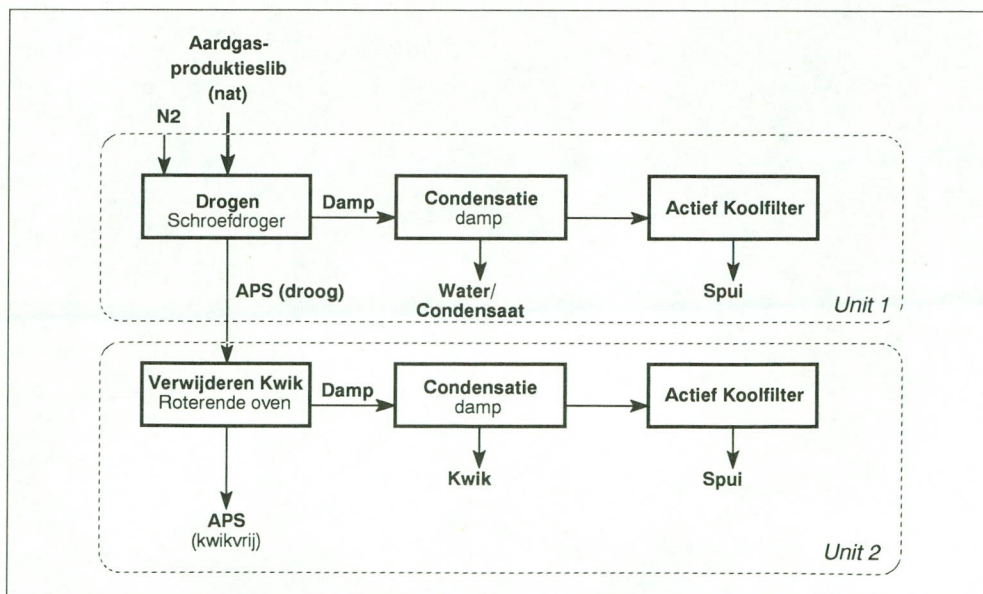
Het bij de start van het project beoogde vacuümverdampingssysteem is een tweetrapsproces, bestaande uit een drooggedeelte en een hoge temperatuur eenheid. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het totaal systeem er uitziet (als tweetrapsbehandeling) en welk gedeelte van het proces in het kader van het project beproefd is.

In figuur 1 is schematisch het concept van de continu werkende vacuümverdamping weergegeven. Het vacuümverdampingssysteem bestaat uit twee units in serie geschakeld: unit I (de schroefdroger) en unit II (hoog-temperatuur-unit); deze kunnen onafhankelijk van elkaar bedreven worden.

Beschrijving van de schroefdroger (unit I)

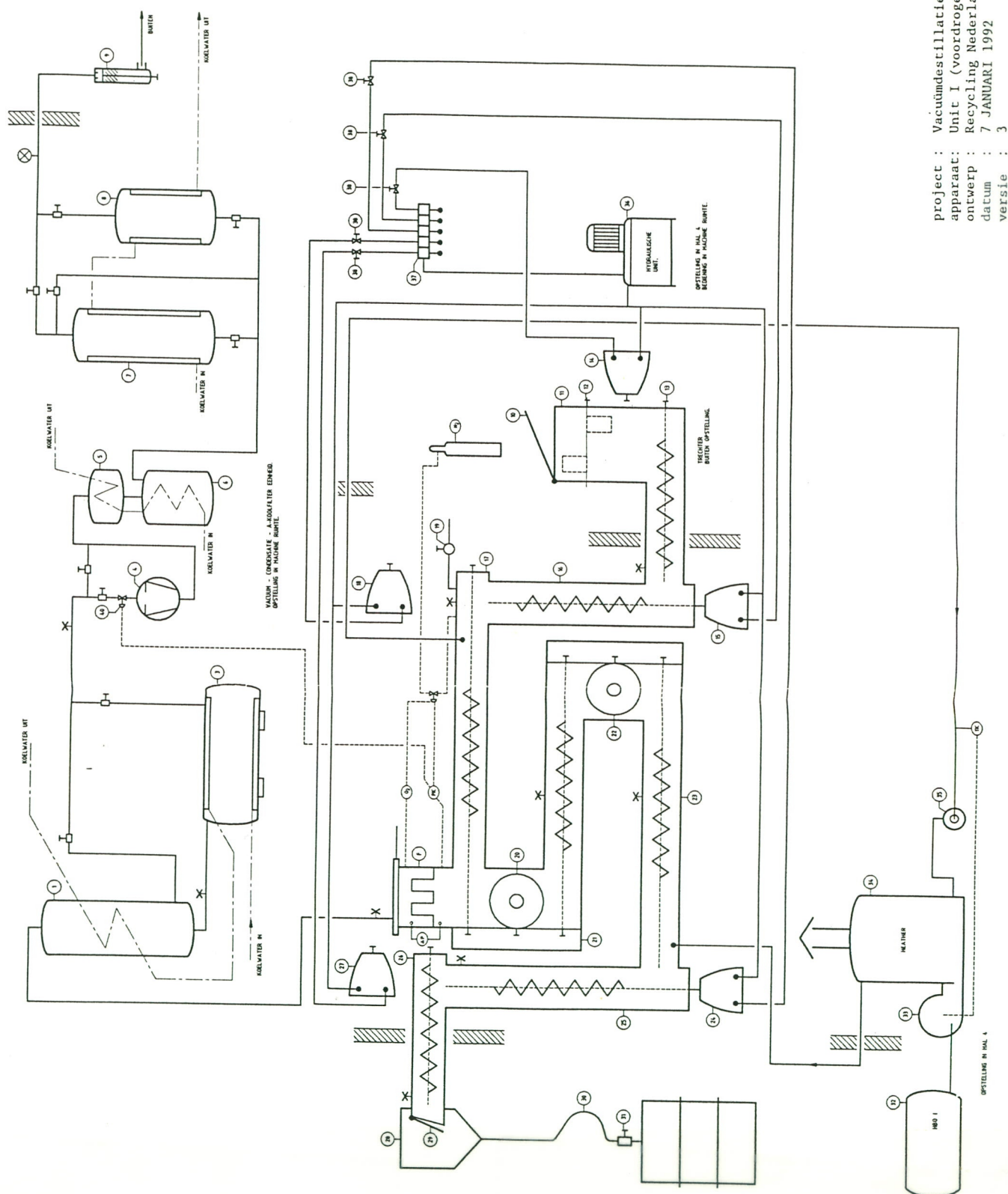
Verontreinigde grond en aardgasproductieslib worden eerst behandeld in unit I, (de schroefdroger) met als doel water en relatief vluchtige organische componenten te verwijderen. Indien er kwik aanwezig is, moet zo weinig mogelijk tijdens deze behandelingsstap worden verwijderd.

Het te behandelen materiaal wordt verwarmd met behulp van thermische olie, die gecirculeerd wordt en niet in contact komt met de afvalstoffen of de verontreinigde grond. Deze thermische olie mag verhit worden tot maximaal 300 °C. De druk in de installatie kan ingesteld worden afhankelijk van de te behandelen materialen tussen 90 en 900 mbara (= mbar absoluut). In figuur 2 is een schematische voorstelling gegeven van unit I.



Figuur 1 De procesroute voor de verwerking van aardgasproductieslib

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
 – Samenvattend rapport –



Figuur 2 Overzicht van de schroefdroger

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
– Samenvattend rapport –

Beschrijving van de hoog temperatuurunit (unit II)

De tweede unit kan een veel hogere temperatuur bereiken door de elektrische verhit-ting en tevens kan een dieper vacuüm aangelegd worden. De temperatuur van deze unit is 500 à 600 °C en de druk circa 10 mbara. Het te behandelen materiaal kan tot 500 °C worden verhit. In de tweede unit worden kwik en de minder vluchtige organi-sche componenten verwijderd. Fluorescentiepoeder wordt zonder voorbehandeling in de schroefdroger direct in de tweede unit behandeld aangezien het materiaal nau-welijks vocht bevat. Deze tweede unit is in het kader van dit project niet gebouwd en dus ook niet getest.

Constructie van de proefinstallatie

Unit I is gebouwd door Recycling Nederland B.V. te Zegveld. Met deze unit is con-form het projectvoorstel een aanzienlijk proevenprogramma met verontreinigde grond en vervolgens met het drogen van aardgasproductieslib doorlopen. Voor de verontreinigde grond die voor de testen is geselecteerd, blijkt unit I al te voldoen.

In het ontwerp van de 'hoog-temperatuur' unit (unit II) zijn een aantal ernstige ont-werpfouten geconstateerd in een door TNO uitgevoerde storingsanalyse. Het ont-werp is vervolgens door Recycling Nederland B.V. herzien, maar na het uitvoeren van een nieuwe storingsanalyse en een technische evaluatie door deskundigen van TNO, NAM en DSM uiteindelijk als niet haalbaar beoordeeld. Gesignaleerde knelpunten zijn onder andere: de sealafdichting, de opspanning van de trommel, de lagering en de materiaalkeuze.

Tenslotte is contact opgenomen met een Duitse apparatenbouwer. Deze firma heeft in overleg met een fabrikant van verwarmingsapparatuur, een sealfabrikant en Recy-cling Nederland B.V. het ontwerp herzien en (via Recycling Nederland B.V.) laten weten dat een dergelijke installatie constructietechnisch na de nodige aanpassingen in principe realiseerbaar is. Een pilot-plant zou onder andere vanwege het innovatieve karakter echter slechts tegen aanzienlijke kosten geconstrueerd kunnen worden (circa DM 750.000,-). Voor ontwerp, engineering en constructie zijn 9 - 12 maanden no-dig.

Vanwege deze lange levertijd en de hoge investeringskosten is besloten om deze unit niet direct te (laten) bouwen, maar eerst een zo gedetailleerd mogelijke kostenschat-ting te maken van een continu werkend verdampingsproces, er voorlopig van uitgaan-de dat een dergelijk apparaat inderdaad constructietechnisch mogelijk is en de installatie operationeel inzetbaar kan zijn.

Op basis van het PT-diagram van kwik, in het verleden uitgevoerd laboratoriumon-derzoek en in het kader van dit project uitgevoerde aanvullende laboratoriumexperi-menten [10] kan geconcludeerd worden dat ook onder de relatief 'milde' condities in de geconstrueerde unit I een aanzienlijke kwikverwijdering mogelijk moet zijn. Beslo-ten is om een aantal experimenten uit te voeren om na te gaan welke kwikverwijdering in unit I gerealiseerd kan worden.

Daarom zijn in tweede instantie experimenten uitgevoerd met gedroogd aardgaspro-dukteslib en fluorescentiepoeder bij een druk van 40 - 200 mbara, een temperatuur van 250 - 280 °C en een verblijftijd van 40 - 120 minuten. Deze condities zijn ten op-zichte van de condities zoals die in unit II te realiseren zouden zijn (500 °C, 10 mbara) als 'mild' te beschouwen. In tegenstelling tot hetgeen in de projectomschrijving ver-meld is, is niet unit II maar unit I gebruikt voor behandeling van deze laatst genoemde afvalstoffen. Zoals reeds eerder vermeld is was op het moment van wijziging van het proevenprogramma reeds bekend dat de condities in unit I voldoende waren voor een effectieve verwijdering van ftalaten uit verontreinigde grond.

3 Het technisch functioneren van de schroefdroger

Voordat het experimentele programma werd gestart is de installatie opgestart en getest op technisch functioneren. Tijdens de opstartfase zijn een groot aantal wijzigingen aan de installatie aangebracht en problemen opgelost. Bij deze opstart werden de volgende aspecten onderzocht.

Voorbehandeling

Om problemen met het te behandelen materiaal te voorkomen moet een voorbehandeling plaatsvinden. Grove materialen, zoals stenen groter dan 1 cm, bouten en moeren moeten worden verwijderd om operationele problemen (vastlopen van de schroeven) te voorkomen.

'Afdichting op produkt'

Het oorspronkelijke concept behelst een installatie, als een volledig continu systeem te bedrijven, waarbij het ingevoerde materiaal zorgt voor de afdichting (als vacuüm-slot). Dit concept is tijdens de periode van de technische opstart niet realiseerbaar gebleken. De 'prop' in het invoersysteem houdt stand tot een drukverschil van 400 à 500 mbara afhankelijk van de samenstelling van het ingevoerde materiaal. De 'prop' (afdichting op produkt) in het uitvoersysteem wordt reeds verbroken bij een drukverschil kleiner dan 100 mbara (bij zowel zand als löss). Het naar binnen gezogen materiaal zorgt vervolgens voor overbelasting van de transportschroeven en deze lopen dan vast. Diverse aanpassingen aan spoed en verwijdering van de schroefbladen op het einde van de schroeven hebben niet tot een verbeterde afdichting geleid. In een industriële installatie kan een continue bedrijfsvoering worden gerealiseerd door gebruik te maken van een conventioneel sluizensysteem of een alternerend werkend toevoersysteem (twee toevoerbunkers en twee afvoerbunkers).

Door het aanbrengen van een afsluitbare uitvoerbunker op het einde van de schroefdroger kan de proefinstallatie wel op semi-continu wijze bedreven worden. Bij het bedrijven van de schroefdroger als een semi-continu systeem is dan een druk van circa 90 mbara bereikbaar. In tweede instantie is een rootspomp aangesloten, waardoor de druk verder verlaagd wordt tot circa 20 - 30 mbara bij een niet verwarmde installatie zonder doorvoer van materiaal en tot 40 mbara in een verwarmde unit onder bedrijfscondities. Op deze wijze zijn de in dit rapport beschreven experimenten uitgevoerd.

Transport van materiaal in de schroefdroger

Het transportsysteem (materiaaltransport) is in eerste instantie getest met rivierzand, in tweede instantie is löss als relatief droog materiaal en tenslotte als slurrie ingevoerd om de installatie te testen. Zand is gebruikt om het transportsysteem in zijn algemeenheid te testen, zonder gevaar voor aanbakken van materiaal in de unit. Op deze wijze kan de doorzet, het afstemmen van de toerentallen van de verschillende schroeven en eventuele brugvorming vastgesteld worden. Het gebruikte rivierzand heeft een droge stof gehalte van ongeveer 90% (variatie van 85 - 95%). In een incidenteel geval is extra nat zand gebruikt voor de experimenten.

De experimenten met relatief droge löss (vochtgehalte van 20%) hadden als doel vast te stellen of de schroefdroger in staat is om dit type materiaal te behandelen. Bij de experimenten met een slurrie van löss (vochtgehalte van 50%) is ervan uitgegaan dat

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
– Samenvattend rapport –

een slurrie van löss een zelfde transportgedrag zal hebben als aardgasproduktieslib, waarin een kleifractie (tot circa 50%) aanwezig is.

Na het aanpassen van het transportsysteem worden rivierzand en relatief droge löss (90% d.s.) zonder grote problemen getransporteerd in de schroefdroger. Een slurrie van löss levert bij het doorlopen van de kleeffase transportproblemen op. Er treedt aanzienlijke 'scaling' op aan de wand en op de schroefbladen. Daarnaast heeft een dergelijk aanbaklaag op de hete wand consequenties voor de warmte-overdracht. Op grond van deze resultaten kan verwacht worden dat bij de behandeling van vloeibare materiaalstromen op basis van klei/slib (zoals aardgasproduktieslib) problemen optreden. Bij de behandeling van aardgasproduktieslib is daarom gecentrifugeerd slib met een relatief hoog droge stof gehalte (circa 60% droge stof) als voeding gebruikt. Voor de behandeling van natte slibben en slurries dient een hiervoor ontwikkeld apparaat gebruikt te worden.

Temperatuur

De meeste experimenten zijn uitgevoerd bij een schroeftemperatuur (manteltemperatuur) van 270 °C. In dat geval is de brandertemperatuur 290 °C en wordt de grond verhit tot een temperatuur van circa 250 °C. Later zijn experimenten uitgevoerd waarbij het materiaal tot 280 °C wordt verhit (betere isolatie).

Doorzet

De minimale doorzet van de installatie wordt bepaald door het minimale toerental van de horizontale invoerschroef waarbij de invoer nog constant is. De minimale capaciteit bedraagt circa 140 kg droge stof/uur. De maximale doorzet wordt bepaald door het thermische vermogen van de installatie. Door de grote afstand tussen ketel en schroefdroger zijn de warmteverliezen tamelijk groot en kan bij benadering worden bepaald uit de volgende empirisch vastgestelde formule:

$$\Phi_{h, \text{verlies}} \approx 215 * (T_{\text{schroef}} - T_{\text{omgeving}})$$

Hierbij is Φ_h in Watt gegeven.

Het totale vermogen van de brander bedraagt circa 82 kW. Bij een schroeftemperatuur van 270 °C is nog ongeveer 28 kW beschikbaar voor overdracht aan de verontreinigde grond. Voor het verwarmen van grond met een vochtgehalte van 15% is 165 kW/ton nodig. Dit betekent dat met het geleverde vermogen van 28 kW een hoeveelheid (natte) grond van circa 164 kg/uur behandeld kan worden (140 kg/uur droog materiaal). In deze situatie is het maximale vermogen benodigd en moet de brander continu in werking zijn. Dit is experimenteel bevestigd. De meeste experimenten zijn uitgevoerd bij een doorzet van 140 kg droge stof/uur.

Verblijftijd en vullingsgraad

De verblijftijd van het zand in de eerste twee verwarmde schroeven, gemeten met kleine stukjes metaaldraad, is 22 à 30 minuten, waarbij de meeste stukjes draad na 24 à 25 minuten worden waargenomen. Dit betekent dat de verblijftijd voor de drie verwarmde schroeven, bij de aangegeven toerentallen, circa 40 minuten bedraagt. Een langere verblijftijd kan in principe worden gerealiseerd door de vullingsgraad te ver-

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
– Samenvattend rapport –

groten (door variatie van de toerentallen) of door de schroeven slechts een gedeelte van de tijd te laten draaien, bijvoorbeeld 5 minuten aan - 5 minuten uit. De vullingsgraad is bij de meeste experimenten ongeveer 15%.

Stikstoftoevoer en luchtinlek

Om veiligheidsredenen moet bij de behandeling van aardgasproduktielslib een zuurstofpercentage van maximaal 1% worden aangehouden. Dit wordt gecontroleerd door een (continue) zuurstofmeting, gekoppeld aan een stikstofsuppletie. Tijdens de experimenten wordt circa 4 m³/uur stikstofgas toegevoerd aan de schroeven. De luchtinlek bedraagt ongeveer 0,4 m³/uur.

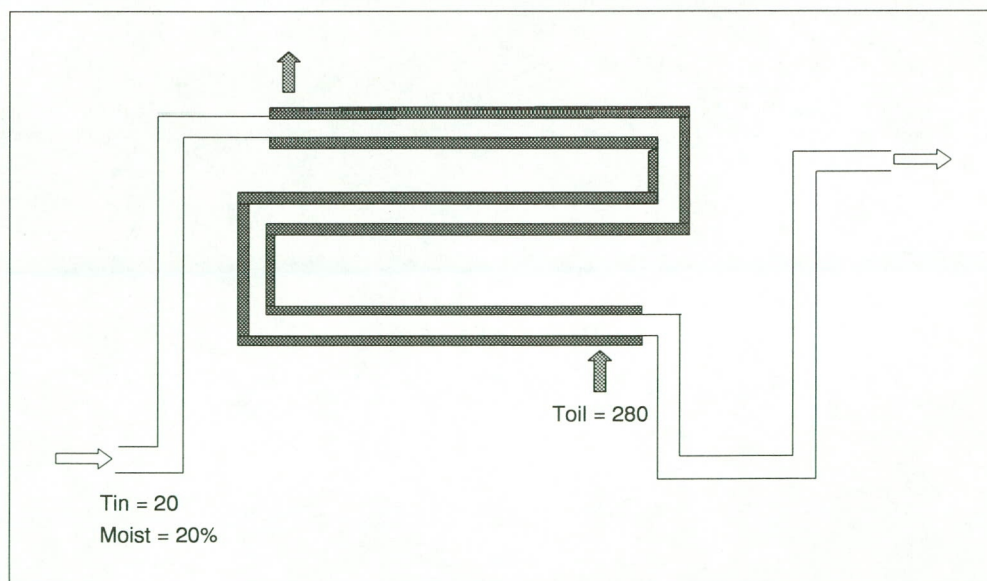
4 Behandeling van met ftalaten verontreinigde grond

4.1 Berekeningen

Voordat de schroefdroger gebouwd werd, is door middel van berekeningen vastgesteld wat de benodigde lengte van de schroefdroger is om een bepaalde doorzet te realiseren. Daarnaast is berekend wat de invloed is van een aanbaklaag op de doorzet. De resultaten van deze berekeningen zijn vermeld in § 4.1.1. Vervolgens is de verdamping van ftalaten uit verontreinigde grond gesimuleerd met behulp van ASPEN. Het doel van de simulaties is om een indruk te krijgen van het temperatuurverloop, de samenstelling van de grond tijdens droging en de benodigde temperatuur en druk voor de verwijdering van DEHP. De resultaten worden later vergeleken met de resultaten van de experimenten met de pilot-plant. Als sleutelcomponenten zijn water, m-xyleen en DEHP gebruikt. De resultaten van deze berekeningen zijn vermeld in § 4.1.2.

4.1.1 Berekening van de benodigde lengte en de invloed van een aanbaklaag

Een aanbak- of kleeftlaag zal een sterke vergroting op de warmte-overdrachtsweerstand hebben. Een schematische voorstelling van de droogsectie van de installatie is gegeven in figuur 3.



Figuur 3 Schematische overzicht schroefdroger

De droger bestaat uit een drietal transportschroeven, ieder omgeven door een tweetal concentrische buizen. Door de annulaire ruimte tussen deze buizen wordt, in tegen-

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
– Samenvattend rapport –

stroom, de thermische olie rondgepompt, waardoor de vaste stof in de binnenste buis wordt verwarmd.

Een praktisch probleem bij de opwarming van de vaste stof is hierbij de mogelijke opbouw van een schaal van vaste stof tussen de schroeven en de wand van de binnenste buis. Hierdoor ontstaat in deze stagnante ‘kleeflaag’ een extra warmte-overdrachtsweerstand.

De berekeningen zijn in grote lijnen als volgt opgezet:

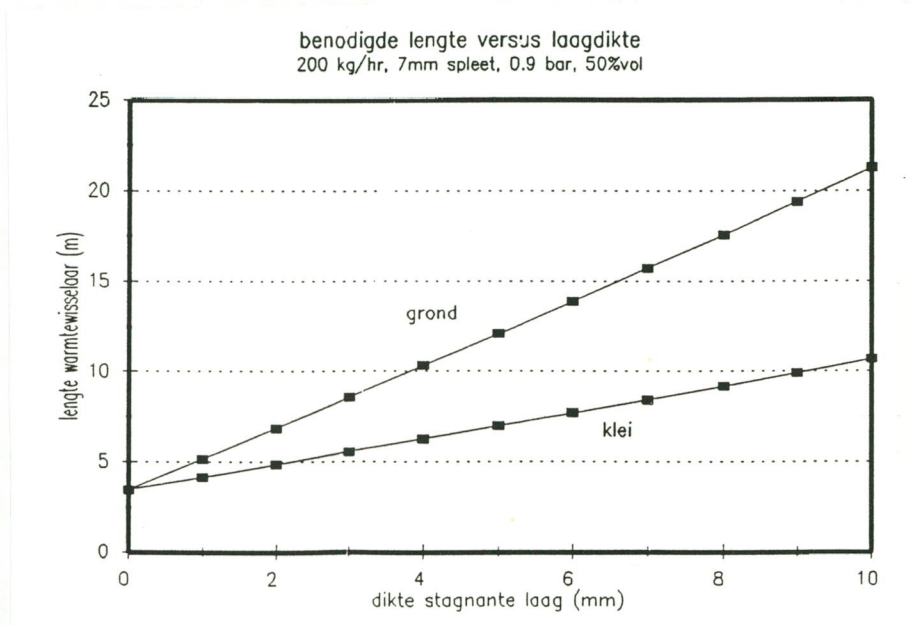
1. In de berekeningen wordt de droger in drie delen opgesplitst (opwarmen/verdamper/opwarmen);
2. Voor elk van de drie delen wordt de ‘overall’-energiebalans opgesteld. Hiermee worden de olie- en grondtemperaturen aan de in-en uitgang berekend;
3. Voor elk van de drie delen worden de warmtewisselaar relaties (NTU-relaties) afgeleid. Hiermee worden de temperaturen uit (2) gerelateerd aan de warmte-overdrachtscoëfficiënt en het warmte-overdragend oppervlak;
4. De warmte-overdrachtscoëfficiënten zijn vervolgens afzonderlijk bepaald met behulp van Nusselt-relaties en met de warmtegeleidingscoëfficiënten;
5. Door combinatie van (3) en (4) kan het benodigd warmte-overdragend oppervlak berekend worden, waarmee de lengte van de warmtewisselaar is vastgelegd.

Uit de berekeningen wordt het volgende geconcludeerd:

Indien de warmteweerstand oliezijdig bepaald wordt, moet het mogelijk zijn om met een wisselaar van 12 meter lengte een hoeveelheid verontreinigde grond van 200 kg/uur te behandelen. Belangrijk is daarbij de invloed van de grootte van de olievoerende ring. Deze moet zo nauw mogelijk gehouden worden. Van belang is tevens de grootte van de oliefLOW, aangezien deze bepalend is voor laminaire dan wel turbulente stroming.

Bovenstaande mag alleen geconcludeerd worden indien de warmteweerstand oliezijdig wordt gelimiteerd. Een tweede serie berekeningen, waarbij een stagnante laag materiaal wordt aangenomen, liet zien dat deze stagnante laag materiaal een sterke vergroting van de warmte-overdrachtsweerstand kan veroorzaken. Hierdoor kan de benodigde lengte een factor drie tot vijf groter worden. De benodigde lengte van de schroefdroger bij verschillende laagdikte van de stagnante laag bij gelijkblijvende doorzet is weergegeven in figuur 4.

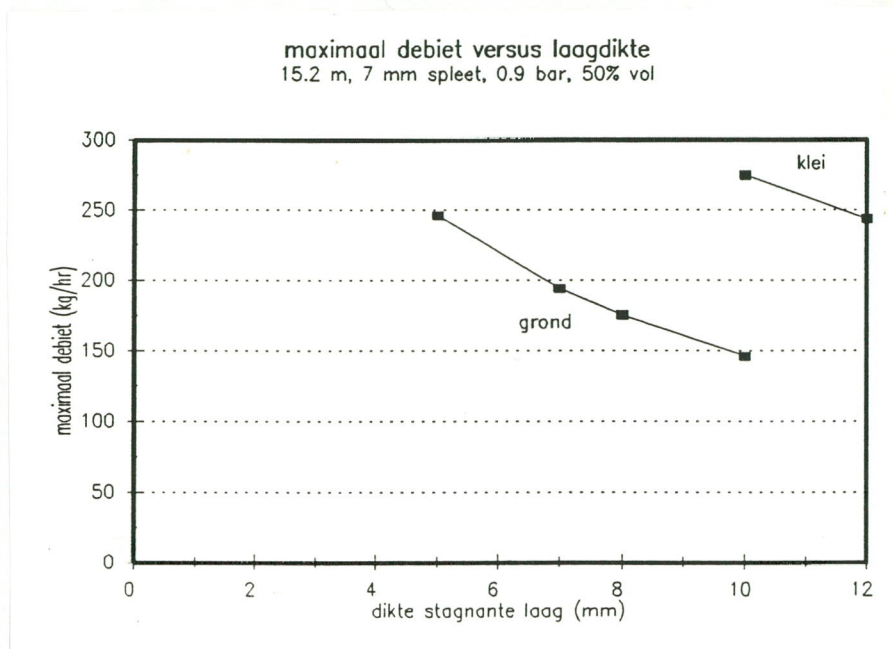
Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
– Samenvattend rapport –



Figuur 4 Invloed van een stagnante kleeflaag op de benodigde lengte van de warmtewisselaar bij gelijkblijvende doorzet/capaciteit

Aan de hand van de experimentele gegevens met betrekking tot de lengte van de schroef en de diameter van de annulaire spleet is berekend dat zelfs bij een stagnante laag van 10 mm en een half gevulde schroef, de doorzet circa 150 kg/uur bedraagt. De warmte-overdracht van de wand naar deze stagnante laag moet dan wel verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de overige weerstanden, hetgeen waarschijnlijk is. Het effect van de dikte van de stagnante laag op de maximale doorzet van de schroefdroger is weergegeven in figuur 5.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –



Figuur 5 Maximale capaciteit van de droger, indien het materiaal aanbakt

4.1.2 Berekening van de verdamping van ftalaten uit verontreinigde grond, gesimuleerd met ASPEN

Uit de simulaties met het flowsheeting-programma ASPEN blijkt dat de verdamping van water en DEHP na elkaar plaatsvinden door de lage dampspanning van DEHP. Van een stoomstrijpeffect is waarschijnlijk geen sprake. De lichte aromatische componenten worden vrijwel direct verwijderd.

De invloed van het aantal evenwichtsstappen op de verwijderingsefficiëncies blijkt verwaarloosbaar klein te zijn. Een klein effect op de temperaturen is wel zichtbaar en wordt veroorzaakt door een verschil in oververhitting van de dampfase bij 1 en 3 evenwichtsstappen.

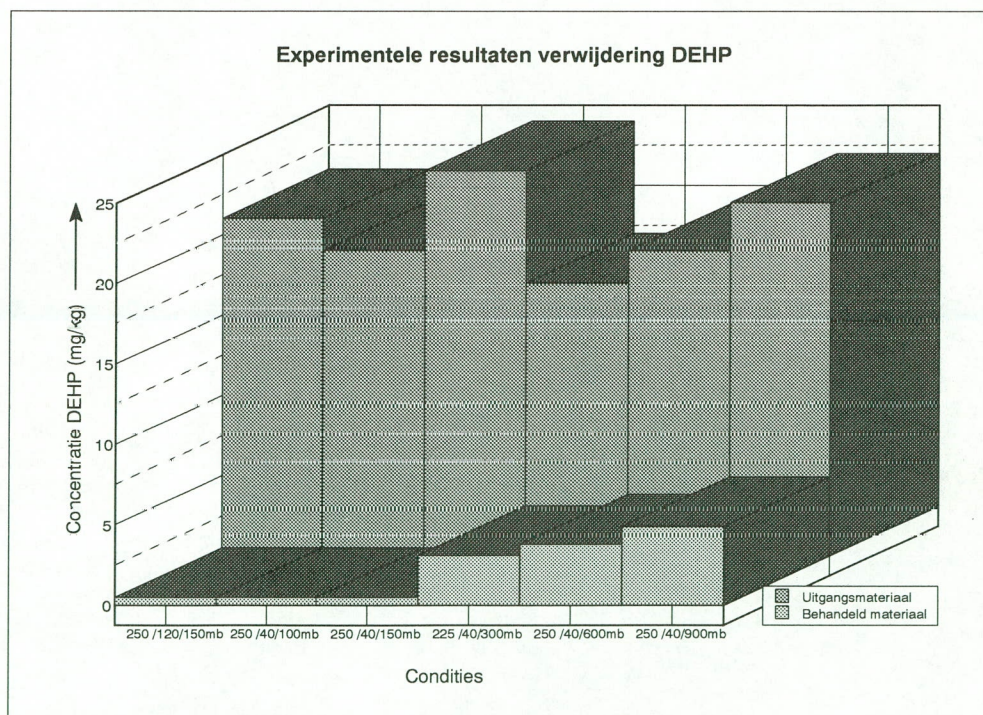
De invloed van de druk waarbij de verdamping plaatsvindt heeft met name effect op het kookpunt van water en de temperatuur waarbij alle DEHP verwijderd is. Bij een druk van 10 mbara wordt DEHP volledig verwijderd bij een eindtemperatuur van circa 125 °C, bij 900 mbara is een temperatuur van circa 175 °C nodig. Volgens ASPEN moet DEHP dus ook bij 900 mbara verwijderd kunnen worden. Aangezien alleen fysische *evenwichten* berekend worden, geldt dit onder voorwaarde dat diffusielimiteringen in de vaste stof of adsorptieverschijnselen aan het oppervlak of in de poriën geen overheersende rol spelen. Op grond van de resultaten met de pilot-plant kan geconcludeerd worden dat deze processen wel degelijk een rol spelen en dat toch stingentere condities nodig zijn dan op basis van de berekeningen zou mogen worden verwacht.

4.2 Technisch functioneren van de schroefdroger bij behandeling van verontreinigde grond

Voordat de verontreinigde grond behandeld werd in de proefinstallatie wordt ze eerst gezeefd. Er zijn in de grond aanzienlijke hoeveelheden stenen (groter dan 1 cm), harde brokken en metalen delen (bouten en moeren) aanwezig. Ondanks deze voorbehandeling is de installatie een aantal keren vastgelopen en is de eerste vergruizer beschadigd.

4.3 Resultaten met betrekking tot de reiniging van verontreinigde grond in de proefinstallatie

Door middel van behandeling in een schroefdroger worden ftalaten volledig verwijderd uit de verontreinigde grond. Bij verwarming van de verontreinigde grond tot een temperatuur van 250 °C en een druk van 150 mbara bij een verblijftijd van 40 minuten is de verwijdering van ftalaten zodanig dat deze niet meer kunnen worden aangetoond (concentraties beneden 0,1 mg/kg, behalve voor Di(2-ethylhexyl)-ftalaat (DEHP) beneden 0,5 mg/kg). Dit betekent dat ftalaten verwijderd worden tot beneden de A-waarde volgens de leidraad Bodemsanering. Deze resultaten zijn verkregen zowel met leemachtig materiaal als met zandachtige bodem (figuur 6). Een overzicht van de resultaten met betrekking tot de verwijdering van DEHP is weergegeven in tabel 2.



Figuur 6 Experimentele resultaten verwijdering DEHP

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
 – Samenvattend rapport –

Tengevolge van de behandeling stijgt de 'fenol-index' (een maat voor het aantal fenolen) en de concentratie aromaten (BTEX). Door hydrolyse van de ftalaten tot ftaalzuur en vervolgens door een dubbele decarboxylering ontstaan de fenolen. Een GCMS analyse heeft inderdaad de tussenprodukten van deze kraakreactie aangetoond. Voor deze componenten wordt door behandeling onder vacuüm de A-waarde niet gehaald. De stijging van de fenolconcentratie is dus een gevolg van de afbraak van ftalaten. Naast vervluchtiging spelen dus ook kraakreacties een rol bij de verwijdering van ftalaten. Dit is op zich opmerkelijk, omdat ftalaten bekend staan als redelijk stabiele verbindingen. Voorzover nu bekend is worden er geen milieubelastende componenten gevormd, die een groter risico vormen dan de reeds in het uitgangsmateriaal aanwezige componenten.

Bij een temperatuur *lager* dan 250 °C of een druk *hoger* dan 150 mbara is de verwijdering van ftalaten weliswaar vergaand, maar niet volledig. Onder deze omstandigheden worden worden ftalaten niet verwijderd tot beneden de A-waarde. Het pilot-plant onderzoek bevestigt daarmee de resultaten van de eerder uitgevoerde laboratorium-experimenten.

Emissiemetingen hebben aangetoond dat de verwijderde ftalaten en andere organische componenten in de koelsectie, bestaande uit een tweetal condensoren, maar gedeeltelijk condenseren; afgassen zullen in een naverbrander nabehandeld moeten worden.

Tabel 2 Overzicht van de belangrijkste condities (druk, temperatuur, verblijftijd) en eindconcentraties DEHP

Exp.	Temp. °C	Tijd min.	Druk mbara	DEHP eindconc. mg/kg	DEHP verw. (%)	Opmerkingen
2	250	40	150	< 0,5	> 98%	
5	250	120	150	< 2,5	> 88%	
6	250	40	100	< 0,5	> 97%	
7 ¹⁾	250	80	150	< 0,5	> 99%	
9	250	40	900	4,9	78%	Hogere druk
10 ¹⁾	200	40	150	1,6	99%	Lagere temp.
11	225	40	300	3,1	82%	Combinatie
12	250	40	600	3,8	80%	Ten behoeve van afgasmeting

¹⁾ Experiment met leemachtig materiaal.

4.4 Conclusies met betrekking tot de verwijdering van ftalaten uit verontreinigde grond

Door middel van behandeling in een schroefdroger kunnen ftalaten volledig verwijderd worden uit verontreinigde grond. Bij verwarming van de verontreinigde grond (met een totaalconcentratie aan ftalaten tussen 20 en 200 mg/kg) tot een temperatuur van 250 °C en een druk van 150 mbara bij een verblijftijd van 40 minuten is de verwijdering van ftalaten zodanig dat deze niet meer kunnen worden aangetoond

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

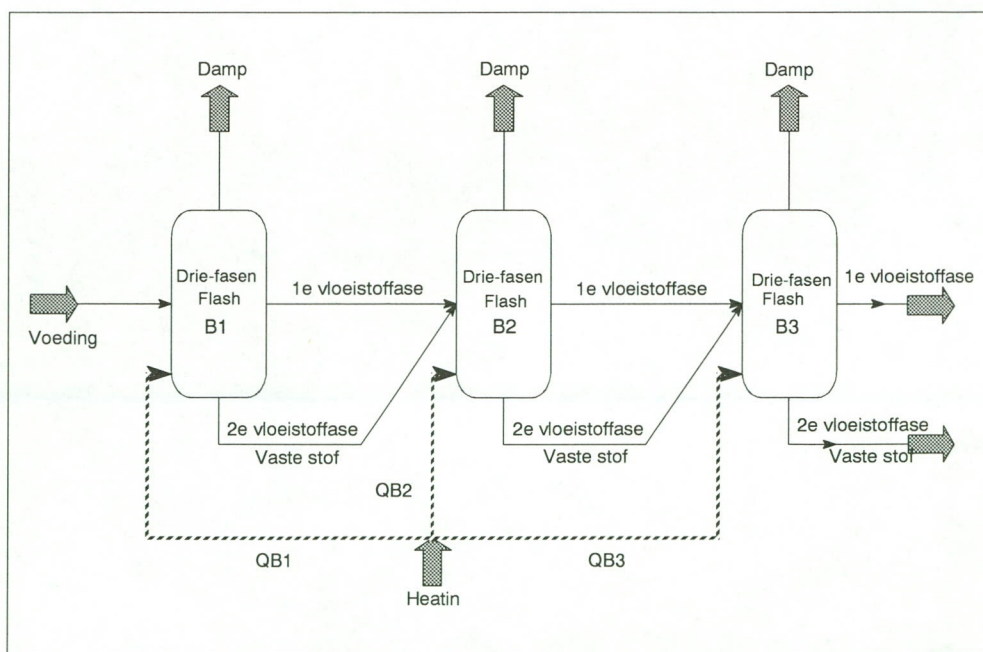
(concentraties beneden 0,1 mg/kg, behalve voor DEHP beneden 0,5 mg/kg). Dit betekent dat de met ftalaten verontreinigde grond door middel van vacuümverdamping gereinigd kan worden tot beneden de A-waarde volgens de leidraad Bodemsanering. Voor fenolen en benzeen wordt door behandeling onder vacuüm de A-waarde net niet gehaald. De stijging van de fenolconcentratie is een gevolg van de afbraak van ftalaten.

5 Het drogen van nat aardgasproductieslib met de schroefdroger

5.1 Berekeningen

In het kader van het project is met behulp van ASPEN een berekening uitgevoerd naar het verdampingsgedrag van water en minerale olie uit aardgasproductieslib dat verontreinigd is met kwik. Het doel van deze berekening is om een indruk te krijgen van het temperatuurverloop en de samenstelling van het slib tijdens het drogen.

De berekeningen die door ASPEN worden uitgevoerd zijn alle gebaseerd op *evenwichten*. Dit houdt in dat effecten als diffusielimiteringen, warmte-overdrachtslimiteringen en stoomstrippen niet kunnen worden meegenomen in de berekeningen. In de proefinstallatie worden de verdampte componenten op verschillende plaatsen afgezogen. Er is dan sprake van meer dan een evenwichtsstap tussen vloeistof en damp. Om dit te simuleren zijn een drietal flashblokken in serie gezet, waar in de berekening drie verschillende gassamenstellingen uit volgen. Het geheel is vergelijkbaar met drie ‘ideaal geroerde’ verdampers (de drie verwarmde schroeven) in serie en wordt geïllustreerd in figuur 7.



Figuur 7 Voorstelling van de drie verdampers in serie

Het vermogen is, op basis van voorafgaande schattingen, gevarieerd tussen de 0 en de 40 kW en is er uitgegaan van een druk van 900 mbara. De samenstelling van het slib als functie van de toegevoerde energie wordt geïllustreerd in tabel 3.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

Tabel 3 Samenstelling en temperatuur slib na behandeling, als functie van de toegevoerde energie ($P = 0,9$ bar)

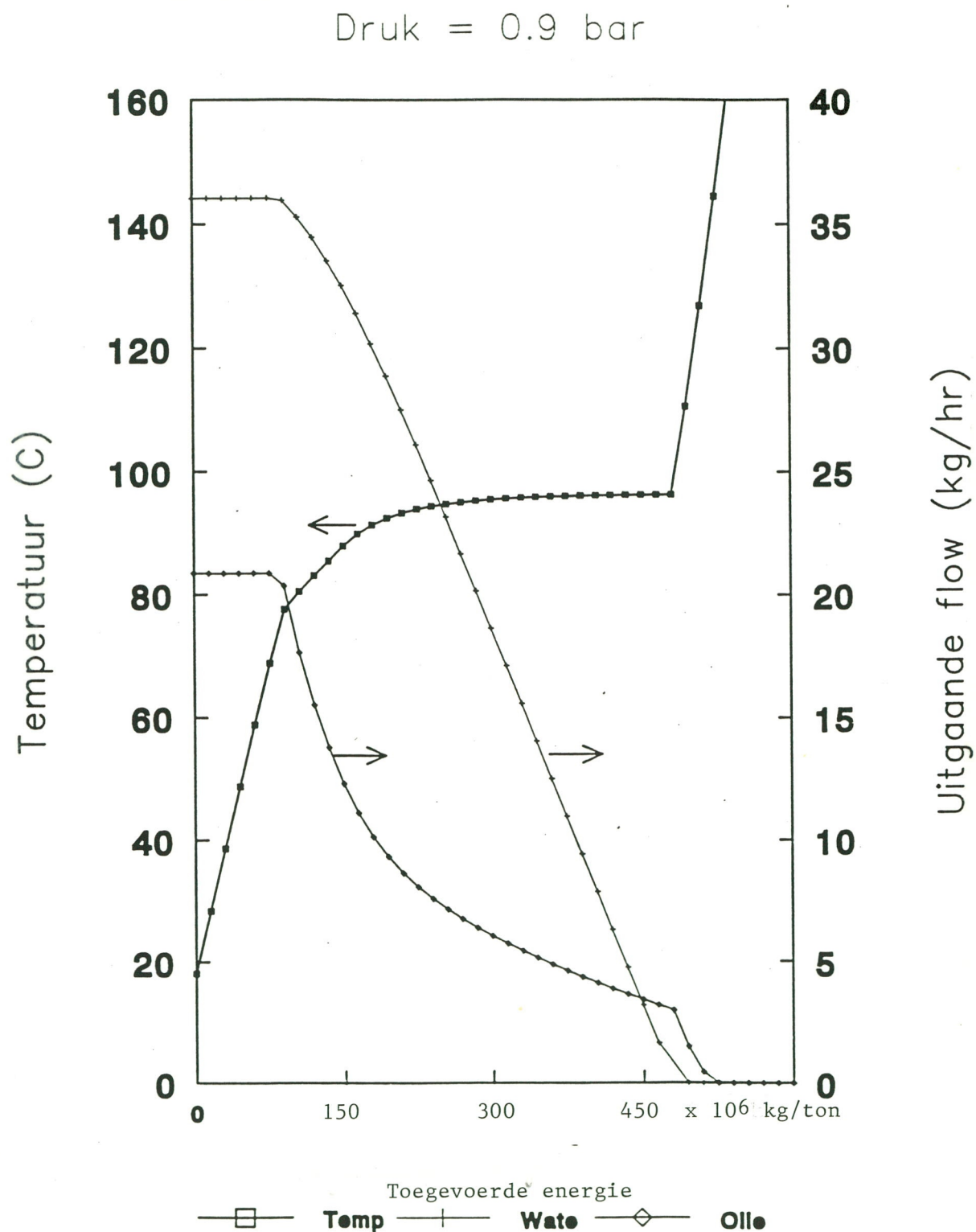
Toegevoerde energie (kW)	0	10	20	30
Water (kg/hr)	36,03	32,50	18,62	3,20
Olie (kg/hr)	20,88	12,26	6,04	3,40
Vaste stof (kg/hr)	193,08	193,08	193,08	193,08
Temperatuur °C	18	87,9	95,5	96,2

Uit de simulaties met ASPEN blijkt dat de verdamping van water en olie uit aardgas-produktieslib *tegelijkertijd* plaatsvinden. Bij verwarming zal een deel van het water (circa 25%) en de olie (40 - 50%) al verdampen voordat het slib de kooktemperatuur van water benadert. Op het punt waarbij alle water is verdampt, is de minerale olie voor circa 85% verwijderd. Als een temperatuur van circa 145 °C is bereikt, zijn ook de zwaardere oliefracties verdampt.

De invloed van het aantal evenwichtsstappen ('ideaal geroerde' verdampers) in serie blijkt vrij gering te zijn. Het verschil tussen één en drie stappen komt tot uiting in een kleine verhoging van de verwijderingsefficiëntie van minerale olie en een verhoging van de temperatuur met enkele graden. Door de verhouding van de verdampingsenthalpieën van water en minerale olie is het effect op de verdamping van water zeer klein. Het totale effect is waarschijnlijk verwaarloosbaar ten opzichte van de nauwkeurigheid van de berekeningen.

Het effect van een hogere verdampingsdruk (1,0 in plaats van 0,9 bar) komt alleen tot uiting in een verhoogde temperatuur voor de verdamping van water. De verdampingscurves van water en minerale olie zijn verder identiek.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamper
 – Samenvattend rapport –



Figuur 8 Het verloop van de verdamping van water en olie als functie van de toegevoerde energie volgens ASPEN

5.2 Technisch functioneren van de schroefdroger bij het drogen van aardgasproductieslib

Bij het bedrijven van de installatie zijn een groot aantal operationele problemen opgetreden tengevolge van kleef en aanbakgedrag tijdens het drogen (van aardgasproductieslib) en tengevolge van entrainment van stof. Door deze problemen is er diverse malen ernstige schade aan de installatie ontstaan. Een overzicht van de belangrijkste storingen en de mogelijke oorzaak daarvan is opgenomen in tabel 4.

Tabel 4 Overzicht van de belangrijkste storingen aan de verschillende onderdelen tijdens het drogen van aardgasproductieslib

Onderdeel	Aanbakken	Mechanische schade	Verstopping
Hor. invoerschroef	-	-	-
Vert. invoerschroef	-	-	-
Eerste transportschroef.	+	+++ ¹⁾	+ ⁷⁾
Eerste vergruizer	-	-	+ ⁷⁾
Tweede transportschroef	+	+ ⁶⁾	+ ²
Tweede vergruizer	+	-	+++ ^{2), 3), 4)}
Derde transportschroef.	-	-	+ ⁵⁾
Vert. uitvoerschroef	-	+ ¹⁾	+ ⁵⁾
Hor. invoerschroef	-	-	-

- 1) Gebroken as.
- 2) Brugvorming (tengevolge van onvoldoende afvoer vocht).
- 3) Brugvorming (onbekende oorzaak).
- 4) Brugvorming (tengevolge van harde klonten).
- 5) Verstopping bij de bocht.
- 6) Schroefblad laat los.
- 7) Oorzaak onbekend.

Aanbak- en kleefgedrag

Tijdens het drogen moet een zogenaamde kleeffase worden doorlopen. Het slib blijft dan aan wand en schroeven plakken, waardoor het transport verstoord wordt. Nadat het water verwijderd is, hardt het materiaal zodanig uit dat het alleen nog met hamer en beitel verwijderd kan worden. Indien er brokken losraken, kunnen ze de vergruizers verstopen.

'Entrainment' van stof

Het stoffilter dat tussen de schroeven en de condensor geplaatst is, houdt onvoldoende stof tegen, waardoor de achter het filter geplaatste condensor regelmatig gereinigd moet worden. Het meegesleurd stof blijft namelijk direct plakken in de natte pijpen van de condensor. Bovendien blijkt de trilmotor die gemonteerd was met het doel om het filter van stoflaag te ontdoen, in het geheel niet te voldoen. Mogelijk is het stofprobleem op te lossen door toepassen van een cycloon in combinatie met een efficiënter stoffilter voor de condensor. De stofproblematiek wordt voorlopig nog als een

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
 – Samenvattend rapport –

ernstige 'bottle-neck' in de bedrijfsvoering van de schroefdroger beschouwd, omdat een ernstige vervuiling van de condensors niet acceptabel is.

5.3 Resultaten met betrekking tot het drogen van aardgasproductieslib

Tijdens de behandeling stijgt de gloeirest van het slib van 60% naar circa 83% en daalt het kwikgehalte (gebaseerd op gloeirest) van 2,9% naar 1,2 - 1,7% (zie tabel 5). Dit betekent dat na het drogen nog een fractie van circa 17% organische componenten aanwezig is. Het materiaal is na een droogstap poedervormig en er zijn geen klontjes aanwezig.

Tabel 5 Analyseresultaten voor en na het drogen van aardgasproductieslib

Monster	Uitgangsmateriaal (voor behandeling)			Materiaal (na behandeling)		
	Kwik op totaal	Gloeirest	Kwik op gloeir.	Kwik op totaal	Gloeirest	Kwik op gloeir.
1	1,8%	60%	3,0%	1,0%	84%	1,2%
2	1,7%	61% ¹⁾	2,8%	1,4%	84%	1,7%
3	1,8%	60%	3,0%	1,2%	82%	1,5%
4	n.b.	n.b.	n.b.	1,1%	83%	1,3%

¹⁾ Koolstofgehalte was 16,8% op basis van gloeirest.
 n.b. = niet bepaald.

Door de behandeling wordt circa de helft van het kwik verwijderd, ondanks de lage temperatuur (200 °C) en de kleine onderdruk (900 mbara) tijdens de behandeling. Een stoomstripeffect moet hier verantwoordelijk voor gehouden worden.

Het opgevangen condensaat vormt geen emulsie; het kwikgehalte bedraagt in de waterfractie circa 3 mg/l en in de organische fractie circa 60 mg/kg. Een behandeling van deze stromen is vereist voor respectievelijk lozing op het oppervlaktewater en een verzekerde afzet van het organisch materiaal.

5.4 Conclusies met betrekking tot het drogen van aardgasproductieslib

Bij het behandelen van natte materialen (slurries) ontstaan er grote operationele problemen, met name tengevolge van een verstoord materiaaltransport en tengevolge van de stofproblematiek (ernstige vervuiling van het stoffilter en de condensor). De geteste schroefdroger is in zijn huidige uitvoeringsvorm dus niet geschikt voor het drogen van aardgasproductieslib.

6 Behandeling van kwikhoudende afvalstoffen; het verwijderen van kwik

6.1 Behandeling van gedroogde of droge materialen

Om het kwik te verwijderen wordt het eerder gedroogde aardgasproductieslib voor een tweede keer door de schroefdroger gevoerd. Bij geen van de experimenten met gedroogd slib zijn transportproblemen geconstateerd. Ook fluorescentiepoeder wordt zonder problemen door de schroeven getransporteerd. Wel zijn bij de behandeling van zowel fluorescentiepoeder als aardgasproductieslib problemen geconstateerd met meegesleurd stof, dat niet in voldoende mate door het filter tegengehouden wordt. Als gevolg hiervan verontreinigt de condensor zeer snel.

6.2 Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit gedroogd aardgasproductieslib

Onder een viertal verschillende condities is gedroogd aardgasproductieslib behandeld. De condities waarbij de experimenten werden uitgevoerd, zijn vermeld in tabel 6.

Tabel 6 Procescondities bij de experimenten met gedroogd aardgasproductieslib

Experiment	Temperatuur (°C)	Druk (mbara)	Tijd (min.)	Doorzet (kg/uur)
1	250	90	120	50
2	250	90	40	150
3	270	50 - 100	120	50
4	280	80 - 130	120	50

Uit de analyseresultaten, weergegeven in tabel 7, blijkt dat bij een temperatuur van 250 °C een laag (kwik)verwijderingsrendement gerealiseerd wordt en dat het kwikgehalte na behandeling nog respectievelijk 3700 en 7600 mg/kg bedraagt. Het verwijderingsrendement bedraagt dan slechts respectievelijk 76 en 50%. Door een kleine verhoging van de temperatuur (tot 270 en 280 °C), daalde het kwikgehalte tot respectievelijk 540 en 260 mg/kg, hetgeen een verwijderingsrendement van respectievelijk 97 en 96% betekent.

Tijdens de behandeling stijgt de gloeirest van gemiddeld 83% naar 91%. Dit betekent dat na de behandeling nog een fractie van circa 9% organische componenten aanwezig is. Dat er inderdaad nog een hoeveelheid organisch materiaal na behandeling in het gedroogde slib aanwezig is, blijkt ook uit een koolstofanalyse. Het koolstofgehalte van het gedroogde slib bedraagt 4,75%.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

Tabel 7 Resultaten met betrekking tot het verwijderen van kwik uit aardgasproductieslib

Exp.	Gedroogd aardgasproductieslib, voor behandeling			Materiaal na behandeling		
	Kwik op totaal (mg/kg)	Gloeirest	Kwik op gloeirest (mg/kg)	Kwik op totaal (mg/kg)	Gloeirest	Kwik op gloeirest (mg/kg)
1	14.000	84%	17.000	3.300	92%	3.700
2	12.000	82%	15.000	6.800	90%	7.600
3	4650	92%	5054	520	97%	536
4	3860	95%	4063	248	96%	258

Uit de analyseresultaten blijkt dat de kwikverwijdering niet volledig is. De condities die in de huidige apparatuur gehaald worden, zijn net niet voldoende voor verwijdering tot een acceptabel niveau.

Daarvoor is een installatie nodig, waarmee een hogere temperatuur en/of een dieper vacuüm bereikt kan worden. Experimenten op laboratoriumschaal geven duidelijk aan dat een reductie van het kwikgehalte tot ver beneden 50 mg/kg haalbaar is bij een verhoging van de temperatuur tot boven 300 °C [10].

Een met zwavel geïmpregneerd actief-koolfilter is noodzakelijk om aan de wettelijke emissienormen voor *kwik* te voldoen. Voor de volledige verwijdering van *organische* componenten (aromatische koolwaterstoffen) voldoet alleen een standaard actief koolfilter waarschijnlijk niet. Er wordt voor deze componenten een alternatieve reinigingsmethode geadviseerd, bijvoorbeeld naverbranding.

6.3 Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit fluorescentiepoeder

De eerste serie experimenten om fluorescentiepoeder te behandelen is uitgevoerd in een nog niet met kwik verontreinigde installatie (vóór de proevenseries met aardgasproductieslib). Het voor dit experiment gebruikte fluorescentiepoeder ('zeefdoorvalpoeder') heeft een laag kwikgehalte (83 mg/kg). Bij relatief 'milde' condities (250 °C, 80 mbara) wordt het kwikgehalte gereduceerd tot 6 mg/kg, hetgeen een verwijderingsrendement van 92% betekent.

Tabel 8 Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit fluorescentiepoeder van het type 'zeefdoorval'

Kwikgehalte voor behandeling in mg/kg	Condities	Kwikgehalte na behandeling (mg/kg)	Rendement (%)
83	250 °C / 80 mbara/ 120 min.	6,4	92

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

De analysegegevens met de experimenten met 'ontstoffingspoeder' maken de (verwachte) invloed van de druk op de verwijderingsrendementen duidelijk zichtbaar (zie tabel 9). Bij het eerste experiment bij een druk van 200 mbara wordt een verwijderingsrendement van 88% bereikt. Bij het tweede experiment bij een druk van 100 mbara wordt een verwijderingsrendement van 91% bereikt en bij het derde experiment, waarbij de druk door het gebruik van de rootspomp verlaagd kon worden tot 40 mbara, een verwijderingsrendement van 98%. Bij de laatste twee experimenten wordt kwik verwijderd tot beneden de grenswaarde van 50 mg/kg, volgens het Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen (BAGA).

Tabel 9 Resultaten met betrekking tot de verwijdering van kwik uit fluorescentiepoeder van het type 'ontstoffingspoeder'

Kwikgehalte in uitgangsmat. in mg/kg	Conditie	Kwikgehalte na behandeling (mg/kg)	Rendement (%)
900	285 °C / 200 mbar / 120 min.	102	88%
500	275 °C / 100 mbar / 120 min.	46	91%
2840 ¹⁾	280 °C / 40 mbar / 120 min.	43	98%

¹⁾ Het kwikgehalte is hoger dan normaal door condensatie van kwik bij een eerdere behandeling.

6.4 Conclusies met betrekking tot de verwijdering van kwik uit kwikhoudende afvalstoffen

Bij het behandelen van droog of gedroogd materiaal ontstaan er geen operationele problemen. Wel vindt er een sterke vervuiling van de condensor plaats ten gevolge van stof.

Door behandeling van gedroogd aardgasproductieslib bij een temperatuur van 280 °C bij een druk van circa 90 mbara gedurende 120 minuten blijkt het kwikgehalte aanzienlijk te kunnen worden teruggebracht, echter niet beneden de grenswaarde van 50 mg/kg.

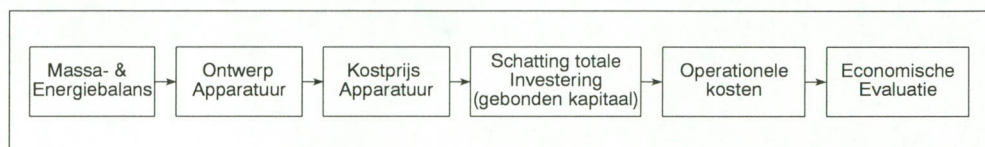
Behandeling van fluorescentiepoeder bij een temperatuur van 280 °C, bij een druk van 40 mbara gedurende 120 minuten leidt wel tot een kwikgehalte beneden de grenswaarde van 50 mg/kg.

De (verwachte) invloed van de druk op de verwijderingsrendementen wordt duidelijk aangetoond. De apparatuur blijkt hier de belemmering te zijn voor een verdere kwikverwijdering. Om deze te realiseren is een apparaat nodig, waarmee een hogere temperatuur en/of een dieper vacuüm bereikt kan worden. In een installatie waarmee een diep vacuüm gerealiseerd kan worden (bijvoorbeeld < 10 mbara) voldoet naar verwachting een verwarmingssysteem gebaseerd op thermische olie (maximale temperatuur circa 320 °C) voor behandeling van fluorescentiepoeder.

7 Uitgangspunten en kostenberekeningen van een continu werkend vacuümsysteem

7.1 Aanpak

Als deel van het onderzoek is een economische evaluatie van een continu werkend vacuümsysteem uitgevoerd. Er is daarbij uitgegaan van een technische uitontwikkelde systeem, met andere woorden de technische problemen, die bij de uitvoering van het in dit rapport beschreven onderzoek naar voren kwamen, zijn opgelost. Aan de economische evaluatie liggen een aantal voorbereidende stappen ten grondslag. In de eerste plaats zijn een processchema en massa- en energiebalansen opgesteld. Voor een drietal cases, weergegeven in tabel 10, zijn vervolgens de ruwe ontwerpen gemaakt, waarbij grootte van onderdelen, de capaciteit en dergelijke berekend zijn. Op basis van deze design-gegevens zijn door onder andere de NAM investeringsschattingen gemaakt. Hierbij zijn ook additionele kostenposten (zoals engineering en projectmanagement) meegenomen. Voor een volledig overzicht van de ontwerpen wordt verwezen naar deelrapport 6 [11].



7.2 Capaciteit installaties

Voor het ontwerp van de installaties is uitgegaan van een drietal cases. De capaciteit van case A is gebaseerd op de maximale hoeveelheid kwikhoudend afval die per jaar in Nederland geproduceerd wordt, inclusief een overcapaciteit om oude lasten te verwerken. Bij case B is ervan uitgegaan dat er kwikhoudend afval vanuit het buitenland geïmporteerd kan worden, waardoor de verwerking economisch doelmatiger uitgevoerd zou kunnen worden. Voor de verwerking van verontreinigde grond, case C, is alleen een ontwerp gemaakt van de eerste unit.

Tabel 10 Beschrijving case A, B en C

Case	Capaciteit ton/jaar ¹⁾	Materiaal
A	1500	Kwikhoudend aardgasproductieslib
B	5000	Kwikhoudend aardgasproductieslib
C	48000	Grond verontreinigd met ftalaten

¹⁾ Op basis van 200 dagen continu/jaar.

7.3 Uitgangsmateriaal, produkt- en proceseisen

Voor de ontwerpberekeningen is uitgegaan van de samenstellingen zoals weergegeven in tabel 11.

Tabel 11 Specificaties uitgangsmateriaal ten behoeve van de ontwerpberekeningen

Case		A	B	C
Samenstelling				
Water	%	15	15	15
Organisch condensaat	%	20	20	-
DEHP	mg/kg	-	-	200
Kwik %	%	2	2	-
Droge stof	%	73	73	85
Debiet	kg/uur	312,5	1042	10000

* Gebaseerd op 200 dagen continu/jaar.

Voor aardgasproductieslib geldt dat het water en de organische fractie geheel verwijderd moeten worden. De kwikconcentratie in het produkt moet na de behandeling kleiner zijn dan 10 mg/kg. Voor verontreinigde grond geldt dat de ftalaten verwijderd moeten worden tot op de detectiegrens ($< 0,5$ mg/kg voor DEHP en $< 0,1$ mg/kg voor de overige ftalaten).

De condities, waaronder het materiaal behandeld moet worden, staan vermeld in tabel 12. Deze condities volgen uit de pilot-plant experimenten en de experimenten met de statische reactor. In de tabel is tevens de geschatte dampstroom inert gas (lucht en toegevoerd stikstof) vermeld. Dit gegeven is belangrijk omdat onder vacuüm wordt gewerkt en de zuurstofconcentratie in unit 1 maximaal 1% mag zijn. Naast deze eisen moet de afgasstroom na behandeling aan de wettelijk gestelde emissie eisen voor kwik voldoen (maximaal 0,20 mg kwik/m³). Door de leverancier (fa. Norit) is een maximale concentratie van circa 80 gram organisch per m³ damp gegeven bij een temperatuur van 35 °C. De relatieve vochtigheid mag maximaal 90% zijn. Door de aanwezigheid van relatief lichte organische componenten in het aardgasproductieslib is een zeer goede condensatie noodzakelijk om aan deze eisen te voldoen.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

Tabel 12 Condities unit 1 en 2

		Schroefdroger Unit 1		Roterende oven Unit 2
		Case A & B	Case C	Case A & B
Bedrijfsdruk	mbar	900	150	10
Temperatuur produkt	°C	180	250	380
Temperatuur wand	°C	200	280	450
Temperatuur damp	°C	150	100	400
Maximale O ₂ concentratie	%	1	-	-
Inlek lucht + toegevoegd N ₂	kg N ₂ / uur ¹⁾	21,8	20	10 (A) 22,3 (B)

¹⁾ Deze gegevens zijn geschat op basis van de luchtinlek. Een zeer goede afdichting is noodzakelijk omdat anders de dampstromen in de apparatuur te groot worden.

7.4 Dimensionering van de apparatuur

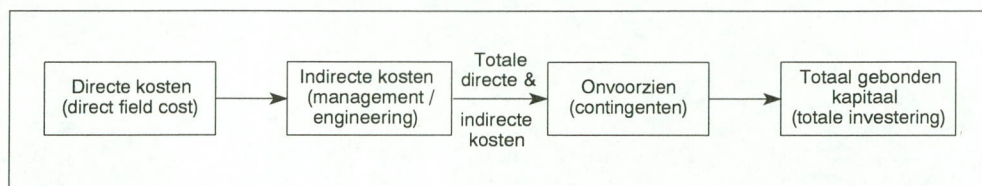
Op basis van de berekeningen en de ervaringen met de pilot-plant is een flowsheet ontworpen voor de verwerking van aardgasproduktieslib en verontreinigde grond. De materiaal- en energiebalans is opgesteld door alle apparaten sequentieel door te rekenen. Bij de berekening van de vloeistof-damp evenwichten in de apparatuur is uitgegaan van de ideale situatie (verzadigde damp, ideaal gas). Voor de damp-behandelingssectie van unit 1 (sectie 200) is het flowsheetingprogramma ASPEN gebruikt. Dit programma is ook gebruikt voor een beschrijving van de *verdamping* van ftalaten (§ 4.1.2), water en minerale olie (§ 5.1) en is hier gebruikt voor de beschrijving van de *condensatie*.

Aan de hand van de materiaal- en energiebalans is een globaal ontwerp gemaakt van de diverse apparaten. Als basis hiervoor zijn de methoden uit Coulson & Richardson (1983) gebruikt. Voor een uitgebreid overzicht van de ontwerpen wordt verwezen naar deelrapport 6 [11]. Voor case A, de verwerking van aardgasproduktieslib, is de Process Index Flowsheet opgenomen in figuur 9. De samenstelling en de condities van alle processtromen zijn hierin aangegeven.



7.5 Resultaten economische evaluatie

De schatting van de investeringen voor case A en B zijn uitgevoerd door de NAM. De basis van de berekeningen is de prijs van de diverse apparaten. Deze is voor zover mogelijk berekend op basis van het gewicht. Voor de minder gebruikelijke apparatuur en de thermische unit is een prijs bij fabrikanten aangevraagd ('Vendor quotes').



Bovenop de kostprijs van de kale apparatuur is een opslag berekend voor materialen voor instrumentatie, 'piping' en elektra, de 'commodities'. Voor de installatie van de fundering, instrumentatie, elektriciteit, isolatie en dergelijke is een opslag berekend voor 'sub-contracts'. De som van de apparatuurkosten, de commodities en de sub-contracts is de 'direct field cost' of de directe investering.

Naast de directe kosten voor installatie van de apparatuur is er sprake van project management en engineering kosten. Voor deze indirecte kosten is de directe investering verhoogd met een opslag van 25% voor management en 15% voor engineering.

De uiteindelijke totale investering is verkregen door de directe en indirecte kosten te verhogen met een opslag voor onvoorziene kosten. De grootte van deze opslag is afhankelijk van de fase van het project ten tijde van de investeringsschatting en de onzekerheden in het ontwerp. In dit geval is een opslag van 20% gebruikt voor de zogenaamde 50/50 estimate van de investeringskosten. Dit betekent dat de kans dat een investering duurder uitvalt dan berekend ongeveer 50% is. Een overzicht van de investeringskosten is opgenomen in tabel 13 voor case A en B.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

Tabel 13 Investeringskosten

	Case A	Case B
Apparatuur	1.847.200	2.991.400
'Commodity' mat.	688.000	1.080.700
'sub-contracts'	1.540.000	2.500.000
afronding bedragen	800	7.900
Totaal directe kosten	4.076.000	6.580.000
Projectmanagement	1.171.620	1.889.479
Engineering	611.280	985.815
afronding bedragen	1.000	706
Basis schatting	5.860.000	9.456.000
Contingenten	1.160.000	1.895.000
50/50 Estimate totale investering	7.020.000	11.351.000

Uit de tabel kan afgeleid worden dat er, wat de investering betreft, een flink schaafeffect optreedt. De capaciteit voor case B is 3,3 keer groter dan die van case A, terwijl de investering slechts 1,6 keer zo groot is.

Gelet op de schaafactor is af te leiden dat het realiseren van twee vacuümunits in serie niet aantrekkelijk is. Een alternatieve opzet zou kunnen zijn om de twee units te vervangen door een enkele unit, die charge-gewijs droogt en kwik verwijdert. Voorlopig is niet duidelijk of een dergelijke werkwijze ook apparaattechnisch uitvoerbaar is.

De investeringsschatting voor case C is niet door de NAM uitgevoerd maar door Recycling Nederland B.V. en TNO, in overleg met enkele apparaatfabrikanten. Er is uitgegaan van een tweetal scenario's, een van Recycling Nederland B.V. en een van TNO. TNO is hierbij uitgegaan van een wat conservatievere investeringsschatting. De totale investering wordt door Recycling Nederland B.V. geschat op f 3.750.000,= en door TNO op f 5.000.000,=.

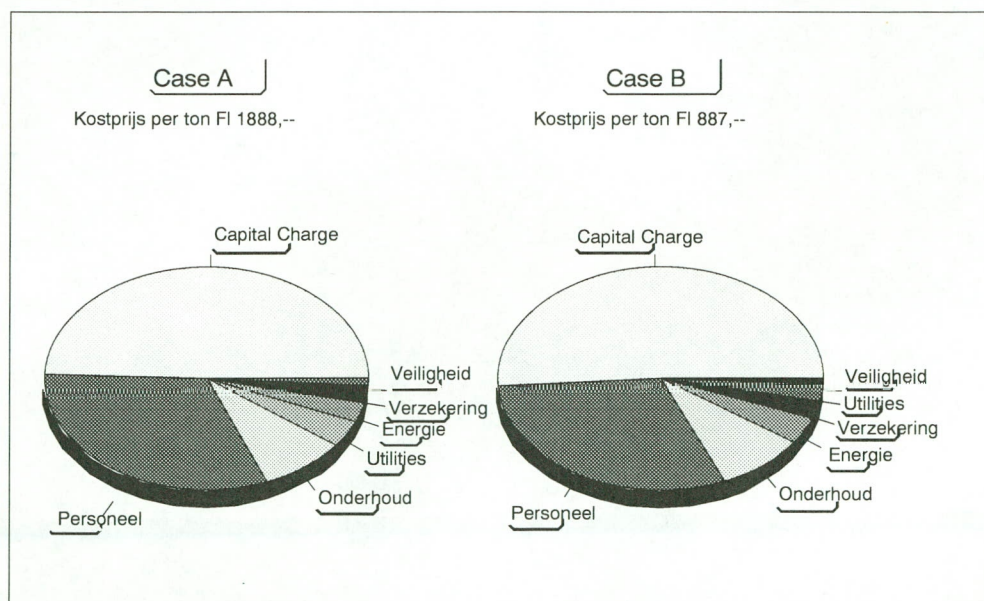
Bij de berekening van de kostprijs per ton produkt is uitgegaan van kapitaalskosten (een zogenaamde 'capital charge') van 20% van de investering. Hierbij is uitgegaan van een afschrijving in 15 jaar, een rentepercentage van 10% en een fiscale afschrijving van 10 jaar bij een belastingpercentage van 50%. In tabel 14 zijn de totale jaarlijkse kosten en de kostprijs per ton gegeven in een jaar van volledige produktie voor case A, B en C.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

Tabel 14 Totale jaarlijkse kosten

	Case A f/jaar	Case B f/jaar	Case C f/jaar	
			TNO	RN B.V.
Kapitaalskosten	1.404.000	2.270.200	1.000.000	750.000
Variabele produktiekosten	213.107	304.420	1.965.354	1.965.354
Vaste produktiekosten	1.214.200	1.858.510	1.500.000	777.500
Totaal	2.831.307	4.433.130	4.465.354	3.492.854
Kosten per ton	1.888	887	78,4	61,3

De kostenopbouw van de verschillende cases worden geïllustreerd aan de hand van de figuren 10 en 11.

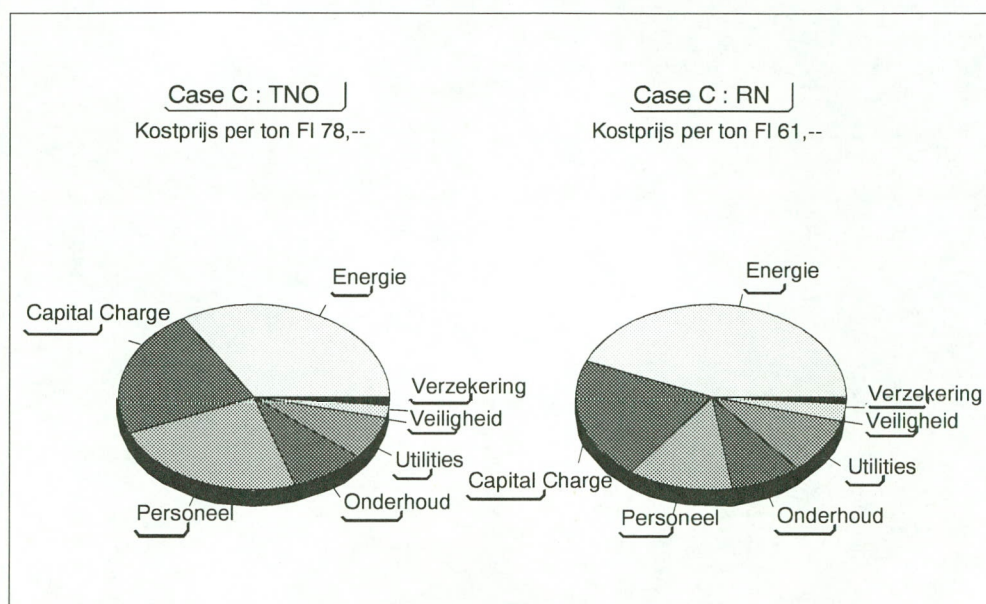


Figuur 10 Opbouw verwerkingskosten voor aardgasproductieslib, 1500 ton/jaar (case A) en 5000 ton/jaar (case B)

Uit figuur 10 blijkt dat de verwerkingskosten van aardgasproductieslib voor ongeveer de helft uit kapitaalskosten en voor ongeveer een derde deel uit personele kosten bestaan. De kostenopbouw van een lage capaciteit (case A) verschilt in percentages slechts weinig van die van een hoge capaciteit (case B). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat voor dit geval de verwachte stijging van personele kosten relatief gezien praktisch gelijk is aan de toename van de investering met de capaciteit.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
 – Samenvattend rapport –

Het proces is in deze vorm sterk kapitaals- en arbeidsintensief, terwijl de kosten van energie en utilities relatief laag zijn. De kapitaalsintensiteit wordt veroorzaakt door de uitvoering als tweetrapsproces (grote hoeveelheid apparatuur) en de complexiteit daarvan en is inherent aan de keuze voor een continu vacuümproces in combinatie met een kleine doorzet. De arbeidsintensiteit wordt veroorzaakt door de lage capaciteit van de installatie en de hoeveelheid personeel die minimaal benodigd is voor een continu proces. Vergroting van de capaciteit leidt in dit geval tot een groot schaafeffect met als gevolg een sterke verlaging van de verwerkingsprijs per ton.



Figuur 11 Opbouw verwerkingskosten verontreinigde grond, 10 ton/uur (case C)

Uit figuur 11 blijkt dat voor de verwerking van verontreinigde grond de energiekosten de grootste post zijn, en ten opzichte van de verwerking van aardgasproductieslib zeer sterk zijn toegenomen. Dit wordt veroorzaakt door de uitvoering als eentrapsproces (alleen de schroefdroger) en de grotere capaciteit van de installatie. Hierdoor drukken de kapitaalskosten en de personele kosten minder zwaar op de verwerkingsprijs per ton materiaal. Verschillen tussen de schattingen van TNO en Recycling Nederland B.V. worden veroorzaakt door de verschillen in geschatte investering en personele kosten.

8 Aanbevelingen

Uit de experimenten op laboratoriumschaal en pilot-plant schaal is duidelijk naar voren gekomen dat een behandeling met een vacuümverdampingsproces perspectieven biedt met betrekking tot de verwijdering van organische componenten uit grond. Een globale engineering is reeds in het kader van het project uitgevoerd. In een volgende stap zou in samenwerking met een apparatenbouwer een gedetailleerd ontwerp gemaakt moeten worden.

Voor de verwijdering van kwik uit droge materialen, zoals gedroogd aardgasproductieslib en fluorescentiepoeder zijn de perspectieven geringer doordat er andere technologieën ontwikkeld zijn, specifiek voor verwerking van kwikhoudende afvalstoffen. Verder onderzoek op dit terrein lijkt op dit moment minder zinvol.

Naast de reeds genoemde gedetailleerde engineering wordt als een volgende stap specifiek voor verontreinigde grond een demonstratieproject geadviseerd. Hierbij moet er aandacht geschonken worden aan specifieke apparaattechnische aspecten, die bij het reeds uitgevoerde onderzoek naar voren zijn gekomen.

Aandachtspunten bij vervolgonderzoek

In zijn algemeenheid geldt dat uitgaande van de huidige installatie verbeteringen nodig zijn ten aanzien van een aantal apparaattechnische aspecten. De volgende onderdelen van de installatie zijn hierbij kritisch:

- a. het vacuümsluisensysteem,
- b. het stoffilter- en condensorsysteem en
- c. de vergruizers.

ad a) Vacuümsluisensysteem:

De minimale druk die in de installatie gerealiseerd kon worden was circa 40 - 90 mbara, bij een semi-continue bedrijfsvoering. Voor een continue bedrijfsvoering zijn efficiënte en storingsvrije vacuümsluizen vereist om een werkdruk van 10 - 20 mbara te bereiken en in stand te houden.

ad b) Stoffilter- en condensorsysteem:

Gedurende het onderzoek zijn diverse keren problemen tengevolge van vervuilde condensors geconstateerd. Een alternatieve uitvoeringsvorm van de condensor ten opzichte van de nu gebruikte 'shell and tube' condensors zou de storingsgevoeligheid mogelijk aanzienlijk verkleinen. Nadere studie naar condensatie (naar alternatieve uitvoeringsvorm van de condensor) wordt sterk aanbevolen. De mogelijkheden van een elektro-statische stoffilter in combinatie met een stofcycloon moet worden overwogen.

ad c) Vergruizers:

De vergruizers zijn een storingsgevoelig onderdeel van de installatie gebleken. Het vergruizen van klonten en kluiten is essentieel omdat de diffusielimitering zo verkleind wordt en een vergaande verwijdering van verontreinigingen gerealiseerd wordt. De uitvoeringsvorm van de vergruizer is een punt van aandacht.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdampers
– Samenvattend rapport –

Nieuw te behandelen afvalstoffen

Wanneer overwogen wordt om een partij grond of afvalstoffen te behandelen op industriële schaal, is het zinvol eerst op semi-technische schaal een proefrun te kunnen doorlopen om een relatie te leggen tussen condities (temperatuur, verblijftijd en behandeltijd) en het verwijderingsrendement. Daarnaast wordt een indruk verkregen welke operationele problemen verwacht kunnen worden. Er zou daarvoor een kleine, modulair opgebouwde unit moeten komen. Voor de verwijdering van organische componenten lijkt een installatie, die verwarmd wordt met thermische olie voorlopig te voldoen. Voor deze nieuwe typen verontreinigde grond/afvalstof (met specifieke verontreinigingen) kan dan aandacht worden geschonken aan de emissies en de reiniging van het gecondenseerde water. Bij de behandeling van zeer natte stromen dient nagegaan te worden wat het maximale vochtgehalte mag zijn om aanbakgedrag (en dus problemen met materiaaltransport en warmte-overdracht) te voorkomen.

9 Conclusies

Het pilot-plant onderzoek heeft uitgewezen dat door middel van een continu werkend vacuümverdampingsproces verontreinigde grond en afvalstoffen gereinigd kunnen worden. Het onderzoek heeft uitgewezen dat al onder relatief milde condities dat wil zeggen tot 300 °C goede resultaten behaald kunnen worden. Door de uitvoering van het pilot-plant onderzoek is inzicht verkregen in de procestechnische en apparaattechnische ontwerpeisen. Verder is aangetoond dat het principe van 'afdichting op produkt', dat wil zeggen dat de afvalstof/verontreinigde grond zorgt voor de (vacuümdichte) afsluiting van de installatie, onvoldoende werkt en dat er op industriële schaal gebruik gemaakt zal moeten worden van vacuümdichte sluisen.

Met betrekking tot de behandeling van met ftalaten verontreinigde grond

Door middel van behandeling in een schroefdroger kunnen ftalaten volledig verwijderd worden uit vervuilde grond. Bij verwarming van de vervuilde grond (met een totaalconcentratie aan ftalaten tussen 20 en 200 mg/kg) tot een temperatuur van 250 °C en een druk van 150 mbara bij een verblijftijd van 40 minuten is de verwijdering van ftalaten zodanig dat deze niet meer kunnen worden aangetoond (concentraties beneden 0,1 mg/kg, behalve voor DEHP beneden 0,5 mg/kg). Dit betekent dat de met ftalaten verontreinigde grond voor wat betreft ftalaten door middel van vacuümverdamping gereinigd kan worden tot beneden de A-waarde volgens de leidraad Bodembescherming.

Als gevolg van de behandeling stijgen de concentraties benzeen en de 'fenolindex'. Voor deze componenten wordt door behandeling onder vacuüm de A-waarde niet gehaald. De stijging van de fenolconcentratie is een gevolg van de afbraak van ftalaten.

Bij een temperatuur lager dan 250 °C of een druk hoger dan 150 mbara is de verwijdering van ftalaten weliswaar vergaand, maar niet volledig.

De resultaten van de eerder uitgevoerde laboratoriumexperimenten worden door de pilot-plant experimenten bevestigd.

Emissiemetingen hebben aangetoond dat de verwijderde ftalaten en andere organische componenten in de koelsectie, bestaande uit een tweetal condensers, maar gedeeltelijk worden gecondenseerd; afgassen zullen dus in een naverbrander nabehandeld moeten worden. Mogelijk kan de verwarmingsketel van de thermische olie hiervoor gebruikt worden.

Er blijkt een discrepantie te bestaan tussen de ASPEN simulatieberekeningen en de experimentele resultaten, waarbij een lager verwijderingsrendement vastgesteld wordt. Adsorptie, chemische binding of condensatie zijn verschijnselen die in de ASPEN simulaties niet meegenomen worden en kunnen verantwoordelijk zijn voor deze discrepantie.

Voor de behandeling van verontreinigde grond in een schroefdroger, waarbij de capaciteit van een installatie zeer groot is (case C), zijn de energiekosten relatief hoog ten opzichte van de kapitaalskosten en de personele kosten. De verwerkingskosten bedragen dan circa f 80,- per ton. Hierbij is ervan uitgegaan dat een installatie met een

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

capaciteit van 10 ton/uur technisch realiseerbaar en gedurende 65% van de tijd operationeel inzetbaar is.

Met betrekking tot het drogen van aardgasproductieslibben

De operationele problemen tijdens het drogen van natte slibben kunnen voor een groot deel teruggevoerd worden op aanbakgedrag tijdens het drogen en op het onvolgende tegenhouden van stofdeeltjes door het filter tijdens de behandeling van gedroogd materiaal. Een zeer efficiënt stoffilter is essentieel voor storingsvrij opereren van de installatie.

Bij het drogen van aardgasproductieslib wordt circa de helft van het kwik al verwijderd, ondanks de kleine onderdruk (900 mbara) en de lage temperatuur (200 °C) ver beneden het kookpunt van kwik. Een stoomstripeffect moet hiervoor verantwoordelijk gehouden worden. Na het drogen van aardgasproductieslib onder genoemde condities resteert nog een fractie (van circa 17%) organisch materiaal.

Het opgevangen condensaat vormt geen emulsie; Een nabehandeling van het gecondenseerde water is vereist om het kwikgehalte terug te brengen tot beneden de normen voor lozing op het oppervlaktewater en ook de gecondenseerde organische componenten kunnen niet zonder meer afgezet worden (kwikconcentratie bedraagt circa 60 mg/kg).

Met betrekking tot de verwijdering van kwik uit gedroogd aardgasproductieslib en fluorescentiepoeder

Door de behandeling van het gedroogd aardgasproductieslib (tweede keer behandelen) bij een temperatuur van 280 °C en een druk van circa 90 mbara gedurende 120 minuten blijkt het kwikgehalte aanzienlijk te kunnen worden teruggebracht tot een concentratie van 250 mg/kg, echter niet tot beneden de grenswaarde van 50 mg/kg (volgens het Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen).

Door behandeling van fluorescentiepoeder bij een temperatuur van 280 °C en een druk van 40 mbara gedurende 120 minuten kan het kwik verwijderd worden tot beneden de grenswaarde van 50 mg/kg (namelijk tot 43 mg/kg voor ontstoffingspoeder en tot 6 mg/kg voor zeefdoorvalpoeder).

Voor een vergaande verwijdering van kwik uit afvalstoffen is een installatie vereist, die onder stringenter condities (qua temperatuur en/of onderdruk) bedreven kan worden dan de installatie die in het kader van het project is getest. Volledigheidshalve dient vermeld te worden dat de geteste unit in principe alleen voor het verwijderen van water en organische componenten bedoeld was en niet voor het verwijderen van kwik. Experimenten op laboratoriumschaal geven duidelijk aan dat ook voor gedroogd aardgasproductieslib een reductie tot beneden 50 mg/kg haalbaar is, indien de druk verder verlaagd en/of de temperatuur verder verhoogd wordt.

De geschatte investering voor een installatie voor de behandeling van kwikhoudende afvalstoffen bedraagt voor case A (1500 ton/jaar) Mf 7,0,= en voor case B (5000 ton/jaar) Mf 11,4,= (inclusief projectmanagement, engineering en contingencies). Voor de behandeling van kwikhoudende afvalstoffen bestaat de kostprijs voor circa de helft uit kapitaalskosten en voor een derde deel uit personele kosten. De kostprijs voor case B bedraagt f 900,=/ton en voor case A f 1900,=/ton.

10 Referenties

- [1] Haalbaarheidsonderzoek kwikverwijdering fluorescentiepoeder via vacuümtechnologie, Micon, febr. 1992.
- [2] Oriënterende experimenten met vacuümdestillatie op kwikhoudende aardgasproduktieslibben van NAM B.V., (ref. nr. 91-414), vertrouwelijk.
- [3] Onderzoek naar de procescondities van de voorbehandeling van het aardgasproduktieslib van NAM B.V., (ref. nr. 92-077), vertrouwelijk.
- [4] Verwijdering van ftalaten uit grond afkomstig van DSM Resins door middel van vacuümverdamping, oriënterende experimenten, juli 1993 (ref. nr. 93-251), vertrouwelijk.
- [5] Droger van verontreinigde grond, april 1993, ref. nr. 93-143.
- [6] Deelrapport 1, Veiligheids- en Milieuaspecten t.b.v. de ontwikkeling vacuümtechnologie voor verwijdering van vluchtige componenten uit afvalstoffen en verontreinigde grond, juli 1993 (ref. nr. 93-254).
- [7] Deelrapport 2, Verdamping van water en minerale olie uit aardgasproduktieslib, simulaties met 'ASPEN', aug. 1993 (ref. nr. 93-283).
- [8] Deelrapport 3, Technische evaluatie van de schroefdroger (unit I), okt. 1993 (ref. nr. 93-373).
- [9] Deelrapport 4, Behandeling van met ftalaten verontreinigde grond, maart 1994 (ref. nr. 94-078).
- [10] Deelrapport 5, Behandeling van kwikhoudende afvalstoffen, maart 1994 (ref. nr. 94-096).
- [11] Deelrapport 6, Ontwerp en kosten van een continu werkend vacuümverdampingssysteem, maart 1994 (ref. nr. 94-079).
- [12] Besluit Aanwijzing Gevaarlijke Afvalstoffen (Staatscourant 617, 93).
- [13] Nederlandse Emissie Richtlijnen- Lucht, ISBN 90-6960-023-4, mei 1992.
- [14] Vluchtige verontreiniging vacuüm verdampen, Land + Water, december 1993, nr. 12, pg. 57.
- [15] Vacuümtechnologie verwijdert vluchtige componenten, Toegepaste Wetenschap, december 1993, nr. 6, pg. 19.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamer
– Samenvattend rapport –

- [16] Vacuümverdamping pakt problematische afvalstoffen aan, Land + Water, april 1994, nr. 4, pg. 38-40.

Reiniging van afvalstoffen en grond door middel van een continu werkende vacuümverdamp(er)
– Samenvattend rapport –

11 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

PNEM N.V.

NAM B.V.

DSM

Novem

Namen en functies van de medewerkers

Ing. H.J.B. Averink

Ir. G.H.W. van Benthem

J.C. Pisa

Dr.Ir. J.A. Zeevalkink

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

Recycling Nederland B.V.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

december 1992 - april 1994

Ondertekening



Ir. J.I.A. Koene
onderzoekleider

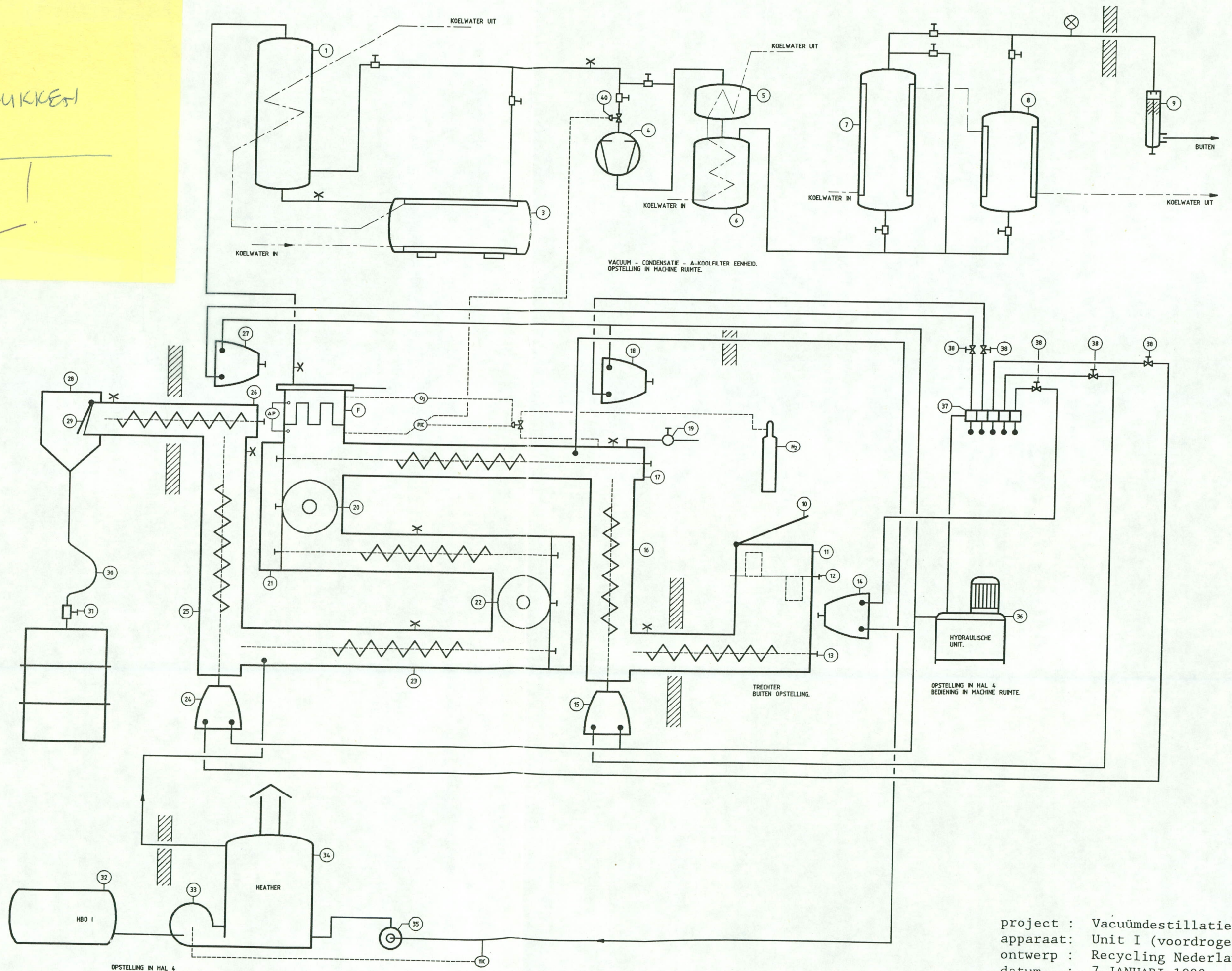
Goedgekeurd door



Dr.-Ir. J.A. Zeevalkink
werkgroep leider

OP PAG. 12 AFDRIJKE!

Reeds!



project : Vacuümdestillatie
 apparaat: Unit I (voordroger)
 ontwerp : Recycling Nederland b.v.
 datum : 7 JANUARI 1992
 versie : 3