

Analyse Slibdroger Beverwijk

J. Kiesewetter REA

Revisie		
A	15-3-2002	1 ^e concept ter interne commentaar
0	18-3-2002	2 ^e concept voor externe commentaar
±		
Gemaakt door:	Goedgekeurd door:	ECN Energie Efficiency in de Industrie
J. Kiesewetter	S. Spoelstra	
Gecontroleerd door:	Vrijgegeven door:	
S. Spoelstra	P.T. Alderliesten	

Verantwoording

De energetische analyse van het slibdroogproces bij de Slibdroger Beverwijk van USHN is uitgevoerd in opdracht van USHN, en bij ECN bekend onder projectnummer 8.61263

Abstract

'Slibdroger Beverwijk' is a company that removes water from sewage sludge. The process is based on evaporation of the water in a fluidised bed. The necessary heat in the drier is provided with a steam circuit. The steam is produced in a small combined heat and power plant with a gas turbine. The specific energy consumption for the present process is high if compared with other plants.

USHN has asked ECN to evaluate the present process and to indicate possible solutions to reduce the energy consumption.

After evaluating the available data ECN came to the conclusion that the process of the drier has limited possibilities for improvement. However major energy savings are possible if the waste heat from the turbine is utilised in a more effective way in the waste heat boiler. In the present situation only 60% of the available heat is used.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	4
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
2. BESCHRIJVING SLIBDROOGPROCES	8
3. BESCHRIJVING ENERGIEGEBRUIK	9
4. MOGELIJKHEDEN VOOR ENERGIEBEPSPARING	13
4.1 Energiebesparing in de droger	13
4.2 Energiebesparing bij de stoomproductie	15
4.3 Overige energiebesparingen	17
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	19
BIJLAGE A BEREKENING ENERGIEGEBRUIK VOOR VERDAMPEN VAN WATER	21
BIJLAGE B MAANDELIJKSE PRODUCTIE- EN ENERGIECIJFERS	23
BIJLAGE C OVERZICHT BEREKENINGEN DROGER EN CONDENSOR	25
BIJLAGE D VERGELIJKENDE BEREKENING TURBINE/AFGASKETEL MET STOOMKETEL	29

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 3.1	<i>Verdeling gebruik thermische energie in de droger</i>	10
Tabel 3.2	<i>Verdeling energiegebruik WKK-installatie</i>	11
Tabel 4.1	<i>Uitgangspunten berekening effectiviteit WKK</i>	15
Tabel 4.2	<i>Vergelijking tussen stoomopwekking met WKK of met losse stoomketel</i>	16
Tabel A.1	<i>Bepaling energiegebruik voor stoomproductie</i>	21
Tabel B.1	<i>Productiecijfers</i>	24
Tabel B.2	<i>Energiecijfers</i>	24

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 3.1	<i>Schema droger met belangrijkste massastromen</i>	9
Figuur 3.2	<i>Schema massastromen in condensor</i>	10
Figuur 3.3	<i>Sankey-diagram van aardgasinzet naar verdampen water NB: Energie voor het verdampen is op 100% gesteld.</i>	12

SAMENVATTING

Uitwaterende Sluizen heeft ECN gevraagd een korte energieanalyse te maken van het slibdroogproces. Achtergrond van deze vraag is het relatief hoge energieverbruik indien de slibdroger van Beverwijk wordt vergeleken met andere slibdrogers.

Er is in het verleden door een extern bureau voor de slibdroger in Beverwijk een energiegebruik berekend van 3,66 GJ per ton verdampt water. Deze waarde is destijds vergeleken met een andere onderneming die slechts 2,32 GJ per ton water verbruikte.

Op basis van verstrekte gegevens heeft ECN energiebalansen van de belangrijkste processen opgesteld. Met deze berekeningen is bepaald waar de grootste verliezen optreden. Tevens is met deze berekeningen het effect van mogelijke procesaanpassingen en technische verbeteringen beoordeeld. Met de gegevens uit deze berekeningen kunnen conclusies getrokken worden over de efficiency van de bedrijfsvoering en kan worden aangegeven waar verbeteringen mogelijk zijn.

Het droogproces zelf is, gegeven de huidige techniek en de problemen rondom verwerking van slib, efficiënt.

De grootste energieverliezen bij de slibdroger in Beverwijk treden op bij de productie van stoom in een afgasketel. Deze afgasketel is onderdeel van een WKK-installatie met een gasturbine.

Uit berekeningen is gebleken dat het interne energiegebruik voor het droogproces zelf niet extreem hoog ligt, maar dat met name het toerekenen van het energieverlies bij de WKK-installatie aan het droogproces het specifiek cijfer fors verhoogt. Met een andere berekening kan een veel lager specifiek energiegebruik worden bepaald. Omdat er verschillende berekeningsmethoden mogelijk zijn is het vergelijken van getallen, zonder daarbij de berekeningsmethode te kennen, zinloos. Ondanks dat met een andere berekening een laag specifiek energiegebruik gepresenteerd kan worden mag niet worden verhuuld dat de schoorsteenverliezen zeer aanzienlijk zijn. Het totale aardgasverbruik is circa 500 TJ per jaar. Hiervan gaat ongeveer 125 TJ via de schoorsteen van de stoomketel verloren.

Een aanzienlijke energiebesparing is mogelijk indien de warmte in de nog hete afgassen van de stoomketel kan worden benut. Een van de mogelijkheden hierdoor is het aanleggen van een tweede stoomnet op lage druk of een circuit met heet water dan wel thermische olie.

Er wordt door de TU-Delft onderzoek gedaan aan een nieuw type droger (Delta Dryer) waarbij een aanzienlijk lager energiegebruik mogelijk is. Deze techniek is echter nog niet commercieel beschikbaar.

1. INLEIDING

USHN heeft in 1999 een analyse laten uitvoeren van het totale energiegebruik van de installaties beheerd door USHN. In deze analyse kwam naar voren dat het energiegebruik van de slibdroger van USHN in Beverwijk hoger is dan dat van vergelijkbare installaties bij een andere onderneming.

Omdat ook naar mening van ECN het energiegebruik (uitgedrukt in MJ per ton verdampt water) hoog lag is aangeboden een nadere analyse te maken van het droogproces, om daarmee besparingsopties aan te geven.

Bij de analyse van het proces is gebruik gemaakt van beschikbaar gestelde documentatie, waaronder een aantal schermafdrucken van de procescomputer met hierop schema's en actuele proceswaarden. Verder is gebruik gemaakt van maandrapporten, enkele basisgegevens van de gasturbine, een eerder opgesteld rapport over het totale energiegebruik van USHN en is ter plaatse door USHN een mondelinge toelichting op het proces gegeven.

Bij het uitwerken en analyseren zijn enkele rekenmodellen opgesteld. Deze modellen zijn gebaseerd op een normale bedrijfssituatie en zijn gebruikt om vergelijkingen tussen verschillende procesomstandigheden mogelijk te maken. Indien naar details gekeken wordt zullen de gehanteerde inputgetallen en berekende waarden kunnen afwijken van de werkelijkheid. Deze verschillen zijn echter niet van belang voor de conclusies die in dit rapport worden getrokken.

Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van het slibdroogproces bij de slibdrooginstallatie in Beverwijk, in Hoofdstuk 3 gevolgd door een beschrijving van het energiegebruik van de droger en de stoomproductie. In Hoofdstuk 4 wordt een analyse gegeven van het energiegebruik en verbetermogelijkheden aangegeven. Conclusies en aanbevelingen zijn te vinden in Hoofdstuk 5.

Bijlage A betreft het toerekenen van energiegebruik van de WKK-installatie aan het droogproces. Deze bijlage geeft geen inzicht in energiebesparingsmogelijkheden, maar is wel essentieel als cijfers betreffende energiegebruik van verschillende installaties met elkaar worden vergeleken

2. BESCHRIJVING SLIBDROOGPROCES

Bij de slibdroger in Beverwijk wordt slib gedroogd dat voornamelijk afkomstig is van eigen rioolwaterzuiveringsinstallaties van USHN. Daarnaast wordt in beperkte mate ook slib gedroogd dat afkomstig is van andere ondernemingen. Het gedroogde slib kan worden gestort, maar wordt deels ook verkocht, omdat de resterende organische bestanddelen als brandstof in andere processen benut kunnen worden.

Het slib wordt per vrachtauto 'ontwaterd' aangeleverd. Het droge-stof gehalte ligt bij binnenkomst op ongeveer 23%. In een aantal bunkers wordt het binnenkomende slib van de diverse afnemers bewaard en op basis van samenstelling en restvochtgehalte toegevoerd aan twee slibdrogers.

De slibdrogers zijn wervelbeddrogers. Door circulerende lucht (met een zeer laag zuurstofpercentage om verbranding van bestanddelen te voorkomen) wordt het water als damp afgevoerd. De noodzakelijke warmte voor verdamping wordt toegevoerd middels een verwarmingssysteem in de droger, welke wordt verhit met stoom. De warme en vochtige lucht uit de droger wordt in een sproeicondensor door het inspuiten van water afgekoeld. Hierdoor condenseert het vocht. De warmte in het sproeiwater wordt geleverd aan de nabijgelegen slibzuiveringsinstallatie. Aldaar wordt deze warmte gebruikt om het aero-zuiveringsproces te versnellen.

De stoom voor de droger wordt opgewekt middels een WKK-installatie. Deze WKK-installatie bestaat uit een gasturbine met generator en een nageschakelde stoomketel waarin de warmte uit de afgassen van de gasturbine worden benut voor de productie van stoom. Eventueel kan in de stoomketel worden bijgestookt. Ook is het mogelijk om bij storing van de turbine alleen met de bijstookbrander stoom te produceren. De noodzakelijke verbrandingslucht wordt dan met een 'Koudelucht ventilator' aangevoerd. Bij de bouw van de installatie is vermoedelijk aangenomen dat deze ventilator slechts in noodsituaties gebruikt zou worden, en is daarom niet van een regeling voorzien.

Bijzondere problemen bij het drogen van rioolslib zijn de optredende geuremissies en het kleefgedrag tijdens het drogen. Om geuremissies te voorkomen is het hele droogproces een gesloten proces. Daarnaast worden de fabrieksruimten en de los- en laadpunten afgezogen. Via een biologisch filter wordt de afgezogen lucht van hinderlijke dampen ontdaan.

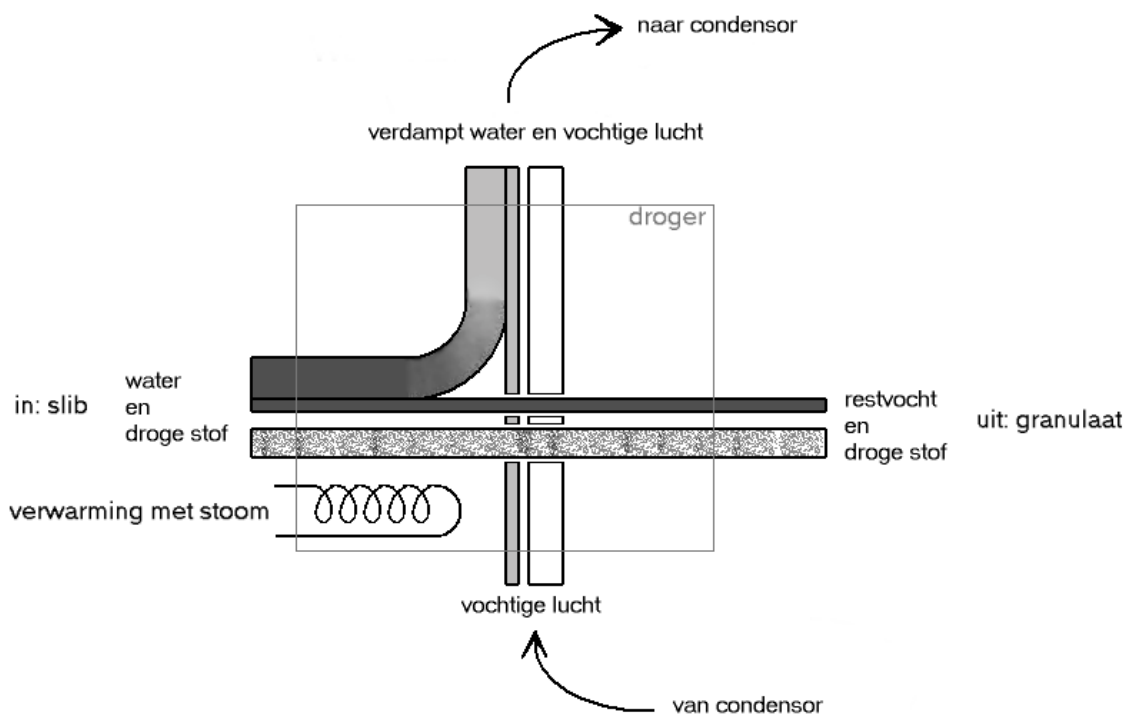
Om het kleefgedrag van half-droog slib in de droger onder controle te houden wordt het vers toegevoerd vochtig slib gemengd met een deel van het al gedroogde slib. Ondanks deze maatregel blijft het droogproces een kritisch proces, dat wordt verstoord door vervuiling van de warmtewisselaars.

Het gedroogde slib wordt gestort of verkocht aan bedrijven die het slib kunnen gebruiken als brandstof. Door de aanwezige organische componenten heeft het gedroogde slib een verbrandingswaarde van circa 14 MJ/kg.

3. BESCHRIJVING ENERGIEGEBRUIK

Belangrijkste energiegebruiker in het totale proces is het primaire droogproces. Dit droogproces is volledig gebaseerd op het verdampen van water uit het slib. Mechanische ontwatering wordt in de slibdrogerij niet toegepast.

Het slib wordt gedroogd in een wervelbed droger (schematisch weergegeven in Figuur 3.1).

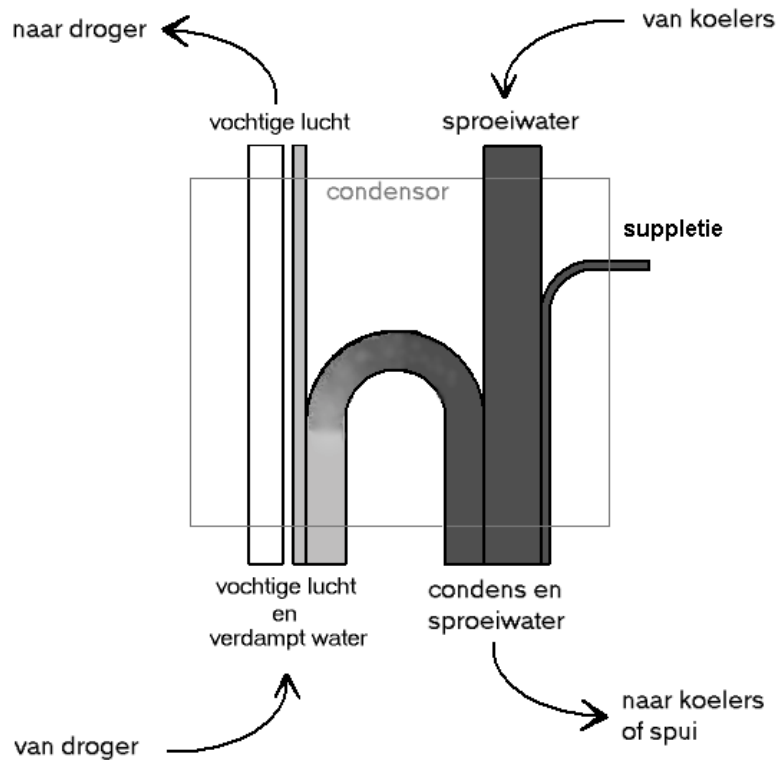


Figuur 3.1 *Schema droger met belangrijkste massastromen*

Hierbij circuleert een luchtstroom¹ door het systeem. Vóór intrede in de droger heeft deze lucht een lage temperatuur (50°C) en is verzadigd met waterdamp. In de wervelbeddroger wordt de lucht opgewarmd, en is daardoor in staat extra vocht op te nemen. Ook de noodzakelijke warmte voor het verdampen van het water uit het slib wordt in de droger toegevoerd.

De opgewarmde en vochtige lucht van circa 90°C wordt na de droger naar een condensatiesysteem geleid. (zie Figuur 3.2). Door het insproeien van koud water koelt de lucht af, en condenseert de waterdamp. De afgekoelde lucht verlaat (geheel verzadigd) het afkoelsysteem en wordt eerst naar een druppelvanger en daarna met ventilatoren weer naar de droger geleid. Het sproeiwater, met daarin opgenomen het condensaat, is door contact met de drooglucht en door het condenseren van het water opgewarmd en wordt via een warmtewisselaar ('condensaatkoeler') teruggekoeld en weer opnieuw gebruikt als sproeiwater. Er vindt een kleine suppletie met vers water plaats. Een klein deel ('droogdamcondensaat') wordt gespuid. Deze hoeveelheid is bij benadering gelijk aan de hoeveelheid uit het slib verdampte water en de suppletie.

¹ Hoewel in deze notitie wordt gesproken over lucht, is de samenstelling niet gelijk aan die van lucht. Er is slechts een zeer gering O₂-percentage in het mengsel aanwezig om verbranding van het slib te voorkomen. Daarnaast komen er in de 'luchtstroom' nog allerlei andere gasvormige verbindingen voor die niet in de normale buitenlucht voorkomen. Voor de berekeningen is echter uitgegaan van 'lucht'



Figuur 3.2 *Schema massastromen in condensor*

Het proces in de droger is op te delen in een aantal afzonderlijke thermische deelprocessen. Op basis van enkele procesparameters is berekend welk aandeel in het totale energiegebruik deze deelprocessen hebben. De resultaten staan in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 *Verdeling gebruik thermische energie in de droger*

Deelproces in de droger	Aandeel in energiegebruik
Verdampen van het water in het slib.	89%
Verwarmen van deze waterdamp van intrede temperatuur van het slib naar de uittrede temperatuur van de luchtstroom.	3%
Verwarmen van de circulerend lucht.	6%
Verwarmen van de in de circulerende lucht aanwezige waterdamp.	1%
Verwarmen van de droge stof in het slib van intrede naar uittredetemperatuur.	1%
Verwarmen van de in het slib achterblijvend restvocht.	0%

Naast de warmte die procesmatig wordt verbruikt moeten ook nog warmteverliezen naar de omgeving worden gecompenseerd. De grootte van deze verliezen is niet bekend. De installatie is echter goed geïsoleerd.

Al de warmte die in de wervelbeddroger aan het proces wordt toegevoerd wordt via het water in het condensatievat weer afgevoerd. Hierbij wordt een deel direct als warm water geloosd (droogdampcondensaat), en een deel via condensaatkoelers aan een secundaire waterstroom (koelwater) overgedragen. Zowel het koelwater als het condensaat worden afgevoerd naar de RWZI. Door de warmte van dit water verloopt het afbraak- en reinigingsproces in de RWZI beter dan zonder deze warmte. Kwantificeren van de waarde van deze warmte is echter moeilijk. Als de hoeveelheid warmte in dit water naar de RWZI verminderd zal dit niet direct worden gecompenseerd door het aanvullend verwarmen van de RWZI. Daarom wordt de totale hoeveelheid warmte in dit rapport als verlies aangemerkt.

Voor toevoer van de noodzakelijke warmte naar de droger wordt een stoomsysteem gebruikt. In de droger wordt niet alleen de condensatiewarmte van de stoom benut, maar wordt er ook nog warmte uit het condensaat gehaald.

Het stoomsysteem is een gesloten systeem waarbij condensaat weer wordt geretourneerd naar de stoomketel. Hierdoor treden er bij de distributie slechts geringe verliezen op die kunnen worden beïnvloed door leidingisolatie en door het minimaliseren van de noodzakelijke spui van de stoomketel. De aangetroffen isolatie maakt echter een goede indruk.

Voor het opwekken van de noodzakelijke warmte wordt gebruik gemaakt van een WKK-installatie met een gasturbine. De gasturbine produceert circa 5000 kW elektrisch vermogen bij een rendement van gemiddeld 31%. De elektriciteitsproductie is hoger dan de lokale vraag. Een overschot kan worden doorgeleverd aan de RWZI, via het openbare net worden geleverd aan andere locaties van USHN of verkocht.

De stoom wordt geproduceerd in een stoomketel waarbij gebruik wordt gemaakt van de afgassen van een gasturbine als belangrijkste warmtetoevoer. De stoomketel is uitgerust met een economiser. Er is niet beoordeeld of deze stoomketel naar behoren functioneert en of hier verbetermogelijkheden zijn. Wel zijn de schoorsteenverliezen van de stoomketel groot. Er kan (bij hoge stoomvraag, of bij stilstand van de gasturbine) in de ketel worden bijgestookt met aardgas.

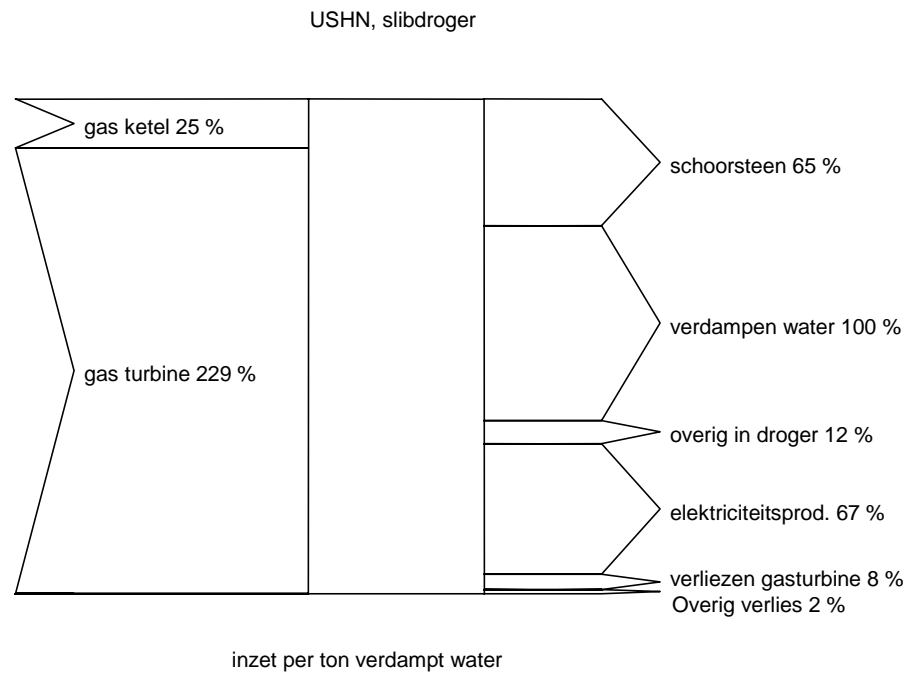
Er is een globale energiebalans gemaakt van de gasturbine met stoomketel en een gering percentage bijstoken. Een samenvatting is weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Verdeling energiegebruik WKK-installatie

Post	Aandeel	
Aardgas gasturbine	91%	
Aardgas ketel	9%	
Totaal inzet		100%
Elektriciteit gasturbine	28%	
Stoomproductie	44%	
Totaal productie		71%
Algemene verliezen gasturbine	3%	
Schoorsteenverliezen stoomketel	25%	
Totaal verlies		29%

Het overige energiegebruik van het bedrijf is bestemd voor het aandrijven van pompen, ventilatoren, persluchtcompressoren, etc. Dit zijn allen relatief geringe verbruikers.

In onderstaand Sankey-diagram (zie Figuur 3.3) zijn de energiestromen nog eens in verhouding weergegeven. Er zijn dezelfde basisgetallen als in bovenstaande Tabel 3.2 gebruikt, maar er is een ander referentieniveau gekozen. Het energiegebruik voor het verdampen van het water is in het Sankey-diagram op 100% gesteld.



Figuur 3.3 *Sankey-diagram van aardgasinzet naar verdampen water*

4. MOGELIJKHEDEN VOOR ENERGIEBESPARING

Op basis van de beschikbare informatie en enkele modellen zijn de mogelijkheden voor energiebesparing onderzocht. Dit hoofdstuk is onderverdeeld naar mogelijkheden bij de droger, mogelijkheden bij de stoomproductie, en overige energiebesparende maatregelen.

4.1 Energiebesparing in de droger

Er moet onderscheid worden gemaakt in het energiegebruik in het droogproces zelf, en het benutten van vrijkomende restwarmte.

Energiebesparing in de droger

Besparingen op het energiegebruik in de droger zelf zijn slechts op zeer beperkte schaal mogelijk. De hoeveelheid warmte voor het verdampen ligt fysisch vast, en kan niet worden beïnvloed. Hiermee ligt 89% van het energiegebruik in de droger vast (zie Tabel 3.1). Wel kan het energiegebruik voor het voortdurend opwarmen (en weer afkoelen) van de circulerende lucht worden beïnvloed door verandering van intrede en uittrede temperatuur en de temperatuur van het sproeiwater.

Door het injecteren van kouder sproeiwater in de condensor wordt er meer condensaat uit de circulerende lucht gehaald, en is de lucht in staat om tijdens passage in de droger meer vocht op te nemen. Er is echter ook een nadelig effect. Omdat de lucht verder is afgekoeld, is meer energie noodzakelijk om deze lucht weer op temperatuur te brengen. Per saldo werkt deze maatregel nadelig.

Door het injecteren van warmer sproeiwater zal het energiegebruik van het droogproces (per ton verdampt water) gering verminderen, maar ook de droogcapaciteit zal verminderen.

Bij een verhoging van de temperatuur van de drooglucht bij uittrede van de mengcondensor (en dus een hogere intrede temperatuur in de droger) met 5°C zal het energieverbruik per ton verdampt water met circa 0,5% dalen, maar zal de droogcapaciteit met circa 10% verminderen.

Er kan worden geconcludeerd dat er geen grote besparingen mogelijk zijn door aanpassing van het droogproces.

Benutting vrijkomende restwarmte

Alle warmte die in de droger wordt toegevoerd komt in de condensor weer beschikbaar als restwarmte. Echter het gebruik van restwarmte is vermoedelijk niet uitvoerbaar. In de condensor komt veel latente warmte vrij (de verdampingswarmte van water). Deze warmte wordt nu volledig als laagwaardige warmte afgevoerd naar de RWZI. De uittrede temperatuur van het water uit de tegenkoelers is circa 30°C. Er is geen warmtevraag op dit niveau, zodat directe benutting niet mogelijk is anders dan voor het vergistingsproces bij de RWZI.

Direct na de condensor heeft het sproeiwater/condensaat een temperatuur van circa 60°C. Ook op dit temperatuurniveau is er geen warmtevraag. Het is technisch mogelijk met een warmtepomp de warmte uit het vrijkomende condens naar een hoger temperatuurniveau te brengen en deze warmte weer te benutten in de droger. Wel zal de temperatuurlift aanzienlijk moeten zijn om in het huidige systeem te gebruiken. Het temperatuurniveau in de droger ligt op 80 tot 90°C rekening houdend met de noodzakelijk temperatuurverschillen over warmtewisselaars moet minimaal een temperatuurverschil van 50°C overbrugd worden. Hierdoor zal de rentabiliteit van een conventionele warmtepomp niet voldoende zijn.

Voordat de vochtige lucht in de condensor wordt afgekoeld is de temperatuur circa 85 °C. In theorie is het mogelijk deze damp te comprimeren, en daarna in een warmtewisselaar in de wervelbeddroger te laten condenseren. Hierdoor komt de condensatiewarmte vrij direct op de plaats waar deze voor het verdampen van water uit het slib gebruikt kan worden. Deze techniek ('mechanische damprecompressie') zal naar verwachting niet mogelijk zijn doordat er allerlei vervuilingen in de warmtewisselaars optreden.

In de huidige situatie is de uittrede temperatuur van het condensaat van de stoomverwarming ongeveer 125°C. Dit geeft aan dat, indien er restwarmte op een lager temperatuurniveau benut moet worden, de warmtewisselaars in de wervelbeddroger moeten worden aangepast dan wel vergroot. Welke consequenties dit heeft voor het droogproces, de capaciteit en optredende vervuiling in de droger is niet eenvoudig te beoordelen.

Er kan worden geconcludeerd dat er in theorie wel mogelijkheden zijn voor het benutten van vrijkomende restwarmte, maar dat die technisch moeilijk te realiseren zijn in de huidige installatie of economisch niet haalbaar zijn.

Alternatieve droogtechnieken

Er zijn alternatieven mogelijk voor de wervelbeddroger waarbij een aanzienlijke besparing op energiegebruik mogelijk is. De TU-Delft werkt aan de ontwikkeling van een Delta-Dryer. Dit is een veelbelovende, maar nog niet in praktijk toegepaste techniek. De verdere ontwikkeling van deze techniek tot een commercieel toepasbare installatie zal naar verwachting nog enkele jaren duren. In de Delta Dryer wordt de condensatiewarmte van de vrijkomende waterdamp goed benut. Uitgevoerde proeven op lab-schaal bieden voldoende basis voor het opschalen van deze techniek naar een industrieel toepasbare droger maar deze installatie is nog niet gerealiseerd. TU-Delft heeft onlangs een subsidie ontvangen voor het bouwen van een demo-installatie met een capaciteit van 1 à 2 ton te verdampen water per uur. Naar verwachting van TU-Delft is opschaling van deze techniek tot 10 ton water per uur in de toekomst economisch en energetisch verantwoord. Producten die in de geplande proefinstallatie zullen worden gedroogd zijn zuiveringsslib en baggerslib. Het resultaat van dit droogproces is een product met circa 90% droge stof.

Door TU-Delft is bepaald dat het extern toe te voeren energiegebruik slechts de helft is van de hoeveelheid die theoretisch nodig is voor het verdampen van water. De overige benodigde energie komt volledig uit het condenseren van de vrijkomende waterdamp. Tevens worden met de condensatiewarmte de gebruikelijke warmteverliezen gedekt. Met deze installatie zou het energiegebruik van het huidige droogproces dus tot minder dan de helft kunnen worden gereduceerd. Dit komt neer op een energiegebruik van circa 1200 kJ per kg verdampt water terwijl het huidige energiegebruik in de droger circa 2700 kJ/kg bedraagt.

Naast een laag energiegebruik heeft de Delta Dryer meer voordelen. De temperaturen in de installatie blijven beperkt (maximaal circa 140 °C), en aan de uittrede is het slib relatief koud (30 tot 50 °C) zodat de meeste vluchtige verontreinigingen in het slib achterblijven. Daarnaast voorkomt het gesloten karakter van deze installatie bijvoorbeeld geuremissies.

Mocht deze techniek succesvol blijken, dan kan een aanzienlijke energiebesparing gerealiseerd worden. De verwachting is echter dat het ontwikkelen van dit proces nog enige jaren vergt.

4.2 Energiebesparing bij de stoomproductie

De stoom wordt geproduceerd met een WKK-installatie. Over het algemeen wordt aangenomen dat een WKK-installatie een efficiënte vorm van energiegebruik is. Dit hangt echter af van de benutbaarheid van de vrijkomende warmte. In de hier gegeven situatie is deze benutbaarheid beperkt. Daarnaast speelt de waardering van de elektriciteit en de methode van toerekenen van het aardgasverbruik aan de stoomproductie een belangrijke rol.

Omdat er bij het samenstellen van deze rapportage geen exacte gegevens betreffende de procesvoering van de gasturbine en stoomketel voorhanden waren zijn een aantal veronderstellingen gedaan en zijn enkele cijfers aangenomen. De onderstaande uitgangspunten (zie Tabel 4.1) zijn gebaseerd op de specificaties van de gasturbine bij 15 °C buitenluchttemperatuur.

Tabel 4.1 *Uitgangspunten berekening effectiviteit WKK*

Item	waarde	eenheid
Vermogen gasturbine	4.975	kW elektriciteit effectief
rookgasvolume gasturbine	76.566	kg/uur
rookgastemperatuur gasturbine	483	°C
aardgasverbruik gasturbine	58,46	GJ/uur (1845 m ³ /uur)
bijstoken in de ketel	5,846	GJ/uur (10%)
aardgas samenstelling		standaard Gronings aardgas
relatieve luchtvochtigheid	60%	
stoomproductie	12	ton/uur ²
stoomdruk	20	bar(o) ³
stoomtemperatuur	240	°C ⁴
retourtemperatuur condensaat	125	°C ⁵

Op basis van bovenstaande aannames zijn de energieverliezen van de elektriciteitsproductie en stoomopwekking berekend. Daarnaast is berekend welke temperaturen optreden in de stoomketel en schoorsteen. Het kleinste temperatuurverschil tussen rookgassen en stoom is volgens deze berekeningen 59°C. Dit temperatuurverschil is een maat voor de optimalisatie van het ontwerp van de stoomketel. (De berekende waarde is hoog, maar is sterk afhankelijk van de gekozen uitgangspunten. Indien was uitgegaan van een productie van 13 ton/uur was het berekende temperatuurverschil uitgekomen op 35°C.)

Daarna is berekend wat het energiegebruik zou zijn indien de stoom was opgewekt met een conventionele stoomketel. Hierbij is een zuurstofpercentage in het rookgas van 6% aangenomen. Het kleinst optredende temperatuurverschil is verondersteld eveneens 59 °C te zijn (in praktijk worden lagere waarden gerealiseerd!)

² De stoomproductie is ingeschat op basis van de warmtebehoefte van het droogproces en een mondelinge opmerking van een procesoperator ('circa 6 ton/uur per drooglijn').

³ De stoomdruk is ingeschat op basis van een incidentele procesopname (19,8 bar)

⁴ De stoomtemperatuur is ingeschat op basis van een geringe oververhitting van de stoom (temperatuur van verzadigde stoom bij gegeven druk is 215 °C)

⁵ De retourtemperatuur van het condensaat is ingeschat op basis van een incidentele meting van de retourtemperatuur bij een droger: (128 °C)

Een overzicht van deze berekeningen is weergegeven in Bijlage C. De belangrijkste resultaten van de twee berekeningen zijn in onderstaande Tabel 4.2 samengevat. Hierbij is het totale energiegebruik in de situatie met gasturbine en bijstoken op 100% gesteld.

De relatief grote rookgasverliezen van de huidige configuratie (25%) zijn volledig te verklaren door het zeer forse volume aan rookgassen en de gering hogere schoorsteentemperatuur. Dit is tevens de belangrijkste verklaring voor het hoge energiegebruik per ton verdampt water.

Indien alle energieverliezen niet worden gerelateerd aan het gasverbruik maar aan de stoomproductie ontstaat een nog veel slechter beeld. Voor iedere MJ aan stoom gaat 0,66 MJ aan rookgassen en overige verliezen verloren. Op jaarbasis wordt circa 500 TJ aan gas verstoekt in de gasturbine en in de bijstookbrander van de ketel. Er gaat circa 125 TJ als hete lucht op een temperatuur boven 200°C de schoorsteen uit.

Tabel 4.2 *Vergelijking tussen stoomopwekking met WKK of met losse stoomketel*

Vergelijkingstabel	Turbine met afgasketel	Losse stoomketel
<i>Energiestromen</i>		
Aardgas gasturbine	91%	
Aardgas ketel	9%	48%
Totaal inzet	100%	48%
Elektriciteit gasturbine	28%	
Stoomproductie	44%	44%
Totaal productie	71%	44%
Algemene verliezen gasturbine	3%	
Schoorsteenverliezen	25%	5%
Totaal verlies	29%	5%
<i>Overige waarden</i>		
Temperatuur intrede stoomketel	548°C	1523°C
Temperatuur schoorsteen	218°C	184°C
Rookgasvolume	60.176 m ³ /uur	13.092 m ³ /uur
Zuurstofpercentage rookgassen	14%	6%

Indien bij het ontwerp was gekozen voor een stand-alone stoomketel was het totale energiegebruik voor de productie van een vergelijkbare hoeveelheid stoom 52% lager geweest. Wel was er in die situatie natuurlijk geen elektriciteit geproduceerd. Dit cijfer mag echter niet zonder meer gehanteerd worden indien met de bestaande afgasketel zonder gasturbine door alleen bijstoken stoom wordt geproduceerd. Het verdient aanbeveling om de werkelijke waarde voor de gegeven installatie in praktijk vast te stellen.

Besparen door afstemmen

Besparingen op het energiegebruik kunnen worden gezocht in een betere afstemming van gasturbine en stoomketel. Een kleinere gasturbine, met een groter aandeel bijstoken in de ketel zal het totaal rendement verhogen. Onbekend is of dit ook met de huidige installatie kan worden gerealiseerd door de gasturbine af te regelen. Aanbevolen wordt om dit te onderzoeken. Ook kan voor zover de drogers dat toelaten, worden besloten om alleen op maximale capaciteit te drogen met hoge stoomvraag en dus een groot aandeel bijstoken. De situatie waarbij slechts één droger én de gasturbine in bedrijf is moet zoveel mogelijk worden vermeden.

Besparing door tweede stoomnet

De afgassen van de gasturbine na de stoomketel zijn warm genoeg om in een tweede stoomketel stoom op lage druk te maken. Er is een indicatieve berekening uitgevoerd voor een situatie zonder bijstoken. In de bestaande stoomketel wordt dan ongeveer 9 ton stoom per uur geproduceerd met de afgassen van de gasturbine. Met de nog hete afgassen kan in een tweede ketel circa 3,5 ton stoom van 1 bar overdruk worden geproduceerd. De warmte inhoud van beide stoomhoeveelheden samen is vergelijkbaar met de huidige situatie. Er hoeft nu echter niet te worden bijgestookt. In de wervelbeddrogers zijn twee circuits voor warmtetoevoer aanwezig, waarbij in het tweede circuit nu heet condensaat van het 20-bar systeem wordt gebruikt. Dit circuit zou kunnen worden gebruikt voor lage druk stoom. In plaats van stoom kan ook gekozen worden voor een circuit met thermische olie.

De energiebesparing die met deze oplossing gerealiseerd kan worden is ongeveer 10% van het huidige aardgasverbruik. De kosten van de noodzakelijk investeringen bestaan uit een extra afgasketel of economiser en een tweede stoomcircuit. De investeringen aan de drogers alsmede de aanpassing van de procesvoering van de drogers zal beperkt zijn. Of de investering ook economisch rendabel is is niet beoordeeld.

Nieuwe toepassingen

Een geheel andere oplossing is het zoeken van een andere geschikte toepassing voor de warme rookgassen uit de gasturbine. Direct gebruik voor het drogen van rioolslib zal niet mogelijk zijn vanwege de vrijkomende geuremissies. Wel kunnen andere producten voor droging in aanmerking komen, of kan warmte aan naburige ondernemingen ter beschikking worden gesteld. Bij uitbreiding van de bestaande slibdroogcapaciteit bestaat de mogelijkheid deze speciaal te ontwerpen op de beschikbare warmte op een lager niveau. Er zou bijvoorbeeld gebruik gemaakt kunnen worden van stoom op een veel lagere temperatuur en druk dan het huidige stoomcircuit. Deze optie is vergelijkbaar met het eerder genoemde 'tweede stoomnet'.

4.3 Overige energiebesparingen

Naast het primaire droogproces zijn er een groot aantal kleine installaties die energie gebruiken. Ook bij deze installaties kan energie worden bespaard. Er is binnen het kader van deze opdracht echter niet systematisch gezocht naar mogelijkheden.

Er komen binnen het bedrijf situaties voor waarbij de druk in waterleidingen wordt bepaald doordat voor één van de afnamepunten een bepaalde druk noodzakelijk is. Een van deze situaties betreft het koelwater voor de condensaatkoelers, waarbij een kleine stroom water wordt afgetakt en naar de mengcondensor en druppelafscheider wordt gevoerd. De druk in het hoofdsysteem wordt bepaald door deze kleine aftakking. Het kan rendabel zijn indien voor dit ene afnamepunt een separate (opvoer)pomp wordt geplaatst, zodat de druk in het hoofdnet kan worden verlaagd. Hierdoor kan worden bespaard op kosten voor het hoofdnet. Met deze methode kan het energiegebruik beperkt worden verlaagd. De te behalen energiebesparing is afhankelijk van:

- Het aandeel in de totale stroom dat op hogere druk moet worden gebracht.
- De drukdaling in het hoofdnet die kan worden bereikt.

De kosten voor een dergelijke aanpassing bestaan niet alleen uit het plaatsen van een extra opvoerpomp, maar ook moet de bestaande pomp worden afgeregeld (bijvoorbeeld met een frequentieregeling) of worden vervangen. Niet bekend is of deze situatie zich op meer plaatsen in het bedrijf voordoet.

Ter illustratie van de te realiseren besparing wordt een voorbeeldsituatie gehanteerd. De hoeveelheden water in dit voorbeeld komen overeen met de situatie van een koelwatersysteem van de condensaatkoelers. De drukken in dit systeem zijn echter niet bekend en daarom (min of meer willekeurig) aangenomen.

- totale waterstroom: 175 m³/uur,
- een aftakpunt: 5 m³/uur, 5 bar noodzakelijk,
- overige aftakpunten: 170 m³/uur, 3 bar noodzakelijk.

Met één centrale pomp is het energieverbruik voor het op druk brengen van de volledige waterhoeveelheid circa 29 kW.

Met een opvoerpomp, waarbij het hoofdsysteem op 3 bar wordt gebracht en alleen de kleine verbruiker water op 5 bar krijgt aangeleverd, is het energiegebruik slechts circa 18 kW.

Binnen het bedrijf wordt veelvuldig gebruik gemaakt van frequentieregelingen voor het regelen van de aandrijvingen. Dit is een energetisch efficiënte methode. Veel technische aanpassingen voor verdere energiebesparing zullen niet voor het oprapen liggen. Wel kan mogelijk door aandacht aan de procesvoering besparingen worden gerealiseerd, bijvoorbeeld door het optimaal regelen van volumestromen en beperken van bedrijfstijden (ook van de verlichting!).

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies

- Er zijn met de huidige installatie slechts zeer geringe energiebesparingen mogelijk in het droogproces zelf.
- Er vinden grote energieverliezen plaats bij de stoomproductie.
- Indien de rookgassen van de stoomketel goed kunnen worden benut voor de productie van lagedruk stoom is een besparing op het gasverbruik van circa 10% mogelijk.

Aanbevelingen

- De mogelijkheden voor verdere benutting van de rookgassen uit de stoomketel moeten worden onderzocht. De voorkeur gaat uit naar benutting voor lagedruk stoom ter gebruik in het eigen proces. Alternatieve toepassingen zijn ook mogelijk. Concrete toepassingen zijn het verwarmen van de kantoor- en bedrijfsgebouwen en levering van additionele warmte tijdens de winter aan het naastgelegen RWZI. Een volledige benutting van de warmte zal met deze twee toepassingen echter niet mogelijk zijn
- De economische waarde van de geproduceerde elektriciteit moet worden bepaald en worden afgewogen tegen het al dan niet bedrijven van de gasturbine.
- Vastgesteld moet worden wat het energiegebruik per ton stoom is indien alleen de bijstookbrander wordt gebruikt. Dit maakt een goede beoordeling mogelijk of het (energetisch en economisch) rendabel is de gasturbine te gebruiken.
- Indien in de toekomst regelmatig zonder turbine wordt gedraaid, is het noodzakelijk om een goede regeling op de verbrandingsluchtventilator te hebben, zodat een goede lucht-gasregeling mogelijk is. Hierdoor kunnen schoorsteenverliezen worden beperkt en (in geringe mate) op elektriciteit voor de ventilator worden bespaard.
- In het maandelijks managementrapport kan een kengetal worden opgenomen dat aangeeft hoeveel ton stoom er is geproduceerd per m³ gas en hoeveel ton stoom er is verbruikt per ton verdampt water. Hierdoor kan beter worden bewaakt hoe de afzonderlijke onderdelen presteren.⁶
- Uit cijfers van de maandrapporten is geconstateerd dat slechts 90% van de aangevoerde droge stof in het slib als droge stof in granulaat wordt afgevoerd. Indien dit wordt verklaard door fouten in de vochtbepalingen heeft dit invloed op het berekende energiegebruik per ton verdampt water.⁷
- De ontwikkeling van nieuwe droogtechnieken dient te worden gevolgd. Het besparingspotentieel is zeer groot.
- Thermisch drogen is een proces met een hoge energievraag. Indien er (nieuwe) mogelijkheden bestaan om het slib mechanisch te ontwateren tot een hoger drogestofgehalte dan het huidige 23% zijn deze uit oogpunt van energiebesparing veelal zeer rendabel.

⁶ Bij de bespreking van het concept van dit verslag is door de opdrachtgever aangegeven dat er al verbeteringen zijn doorgevoerd.

⁷ Bij de bespreking van het concept van dit verslag is door de opdrachtgever opgemerkt dat dit probleem inmiddels is opgelost. Oorzaak was een geringe afwijking in de vochtbepaling en de afvoer van slibstof via het droogdamcondensaat.

BIJLAGE A BEREKENING ENERGIEGEBRUIK VOOR VERDAMPEN VAN WATER

Voor de bepaling van het energiegebruik per ton verdampt water is het allereerst nodig te bepalen welk deel van het aardgasverbruik van de gasturbine wordt toegewezen aan de stoomproductie en welk deel aan de elektriciteitsproductie.

Waardering elektriciteit en stoom

Voor het toerekenen van een aandeel van de aardgasinzet aan de stoomproductie moet de waarde van de elektriciteit worden bepaald. Uit energetisch oogpunt zijn hiervoor twee mogelijkheden:

- waardering elektriciteit tegen de energie-inhoud van deze elektriciteit,
- waardering elektriciteit tegen de vermeden energie-inzet in een conventionele elektriciteitscentrale.

In het eerste geval is elke kWh 3,6 MJ waard. In de tweede situatie is elke kWh 9 MJ waard. Bij de berekening van dit laatste getal wordt uitgegaan van een gemiddeld rendement van een centrale van 40%. Dit rendementsgetal is een algemeen aanvaarde waarde in het kader van energiebesparingsconvenanten met de overheid. (Het werkelijke gemiddelde rendement in Nederland ligt iets hoger). Deze tweede berekening sluit ook beter aan bij de werkelijke situatie. Indien immers door de gasturbine geen stroom was geproduceerd had deze elders moeten worden opgewekt.

Het is met name de keuze voor de waardering van de elektriciteit die bepaalt wat het energiegebruik voor de productie van stoom, en dus voor het drogen van slib is.

Tabel A.1 *Bepaling energiegebruik voor stoomproductie*

	1 kWh = 3,6 MJ	1 kWh = 9 MJ	
Inzet gas	64.321	64.321	MJ/uur
af: waarde elektriciteit	- 17.910	- 44.775	MJ/uur
restant voor stoom	46.411	19.546	MJ/uur
per ton stoom	3.868	1.629	MJ/ton

Voor stoom, opgewekt in een conventionele stoomketel kan ter vergelijking een waarde van 2600 MJ/ton gehanteerd worden. De hierboven berekende waarde van 1629 MJ/ton ligt lager. Ondanks de hoge verliezen is het bedrijven van de gasturbine uit energetisch oogpunt dus toch rendabel.

Doorslaggevend in de bedrijfsvoering is de economische waardering van elektriciteit. Door de open elektriciteitsmarkt is hier geen algemene waarde voor te geven. Een en ander wordt volledig bepaald door de contracten met het energieleverende bedrijf. Het is zeer wel mogelijk dat het bedrijven van de gasturbine op bepaalde momenten (daltarieven) economisch niet rendabel is.

Energiegebruik voor het droogproces

Voor iedere ton water die in de droger wordt verdampt is alleen al voor het verdampen 2430 MJ noodzakelijk. Omdat in de droger ook de damp, circulerende lucht, slib etc wordt opgewamd is er per ton verdampt water circa 1,2 ton stoom nodig. Afhankelijk van de hiervoor gemaakte keuze voor de waardering van de elektriciteit is het energiegebruik dus 4,64 GJ/ton verdampt water of 1,95 GJ/ton. Deze twee waarden zeggen echter niets over de efficiency van de droger.

Op basis van 10 maandrapporten uit 2000 (zie Bijlage B) is het hiervoor in theorie berekend energiegebruik vergeleken met de in praktijk gerealiseerde waarden. Deze komen uit op 4,52 GJ/ton respectievelijk 2,06 GJ/ton.

Bij het vergelijken van cijfers van de eigen installaties met die van vergelijkbare bedrijven moet terdege worden gelet op de configuratie. Het is verstandig om het energiegebruik voor warmteproductie en het warmtegebruik voor het eigenlijke droogproces separaat te vergelijken. Met name indien WKK's worden toegepast moet ook de berekeningsmethode bekend zijn. Het vergelijken van losse getallen is zinloos.

BIJLAGE B MAANDELIJKSE PRODUCTIE- EN ENERGIECIJFERS

Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van met actuele proceswaarden welke zijn afgelezen van de procescomputers en van 10 (maandelijkse) managementrapporten. De belangrijkste cijfers uit deze rapporten zijn samengevat in Tabel B.1 en Tabel B.2.

Tabel B.1 *Productiecijfers*

Maand	Slib				Granulaat				Verdampst [ton]
	totaal [ton]	droge stof [ton]	water [ton]	% water [%]	totaal [ton]	droge stof [ton]	water [ton]	% water [%]	
jan-00	8986	1930	7056	79%	1916	1724	192	10%	6864
feb-00	8117	1812	6305	78%	1818	1654	164	9%	6141
mrt-00	10243	2276	7967	78%	2382	2144	238	10%	7729
apr-00	7113	1605	5508	77%	1544	1390	154	10%	5354
mei-00	10214	2259	7955	78%	2347	2112	235	10%	7720
jun-00	8457	1738	6719	79%	1781	1621	160	9%	6559
jul-00	8309	1862	6447	78%	1922	1730	192	10%	6255
aug-00	8528	1884	6644	78%	1791	1612	179	10%	6465
sep-00	7741	1731	6010	78%	1723	1551	172	10%	5838
okt-00	9317	2056	7261	78%	1990	1791	199	10%	7062
totaal	87025	19153	67872	78%	19214	17329	1885	10%	65987

Tabel B.2 *Energiecijfers*

Energie	Gas			Elektriciteit		Droogenergie ⁸	
	gasturbine [m ³]	ketel [m ³]	aandeel GT %	productie kWh	rendement %	hoge waarde MJ/ton	lage waarde MJ/ton
jan-00	1.273.280	135.707	90%	3.326.123	30%	4.758	2.141
feb-00	1.043.600	105.383	91%	2.705.800	29%	4.341	1.961
mrt-00	1.224.890	175.845	87%	3.182.952	30%	4.258	2.035
apr-00	1.060.570	111.662	90%	2.813.369	30%	5.044	2.207
mei-00	1.259.090	148.536	89%	3.296.308	30%	4.239	1.933
jun-00	1.171.730	67.209	95%	3.048.320	30%	4.311	1.801
jul-00	1.207.870	114.216	91%	3.097.454	29%	4.913	2.239
aug-00	1.193.330	82.083	94%	2.956.945	28%	4.603	2.133
sep-00	960.660	158.853	86%	2.548.000	30%	4.503	2.147
okt-00	1.191.170	147.601	89%	3.084.000	29%	4.433	2.075
totaal	11.586.190	1.247.095	90%	30.059.271	29%	4.521	2.061

⁸ De hoge waarde is gebaseerd op een waardering van elektriciteit tegen 3,6 MJ/kWh. Bij de lage waarde is 9 MJ/kWh gehanteerd.

BIJLAGE C OVERZICHT BEREKENINGEN DROGER EN CONDENSOR

Droger	Gegevens per uur (van één droger)			per m3	per kg	per kg	per uur
				lucht	droge lucht	conden- saat	
kringlooplucht	Tin	54 °C	normaal 50				
	RV in	100%					
	Tuit	78 °C	normaal 80				
	RV-uit	92%	Schatting				
	Massa	26000 kg	niet bekend	0,91902	1	6	25.975
	volume	21831 m3/u	droog? Nat? Normaal?				28.264 m3/uur actueel, nat 21.872 nm3/uur droog
	Q-in					336	
	Q-uit					486	
	Delta					<u>149</u>	kJ/kg _{condensaat}
	circulatie damp	Tin	54 °C				
Tuit		78 °C					
massa				0,099	0,108	0,669	2.812
Q-in						1739	
Q-uit						<u>1767</u>	
Delta						28	kJ/kg _{condensaat}
Vocht-damp	Tin	30 °C	(water)				
	Tuit	78 °C	(damp)				
	massa	4200 kg/uur	normaal 5000	0,149	0,162	1,000	4.200
	Q-in					125	
	Q-in, verdampt					2555	
	Q-uit					<u>2640</u>	

Droger	Gegevens per uur (van één droger)		per m ³ lucht	per kg droge lucht	per kg conden- saat	per uur	
	Delta					2515 kJ/kg _{condensaat}	
Droge stof	Tin	30 °C					
	Vocht%	78%					
	Tuit	69,5 °C	na koeling 62				
	Vocht%	10%					
	sw	2 kJ/kg°C					
	massa	kg/uur				0,291 kJ/kg _{condensaat}	
	Q-in					17	
	Q-uit					40	
	Delta					23 kJ/ kg _{condensaat}	
restvocht in granulaat	Tin	30,0 °C					
	Tuit	69,5 °C					
	massa	kg/uur				0,032	
	Q-in					4	
	Q-uit					9	
	Delta					5 kJ/ kg _{condensaat}	
stoom	Tin	215 °C					
	p-in	19,8 bar_O					
	h-in	2804 kJ/kg					
	T-uit	125 °C	(condensaat)				
	h-uit	526 kJ/kg					
		5000 kg/uur	normale waarde: 6000				1,190 kJ/ kg _{condensaat}
							3338
						626	
						-2711 kJ/ kg _{condensaat}	

Droger	Gegevens per uur (van één droger)			per m3 lucht	per kg droge lucht	per kg conden- saat	per uur
	Balansfout						9 kJ/ kg _{condensaat}
Condensor	Gegevens per uur (van één droger)			per m3 lucht	per kg droge lucht	per kg conden- saat	per uur
kringlooplucht	Tin	78 °C	normaal 80				
	RV in	92%	Schatting				
	Tuit	54 °C	normaal 50				
	RV-uit	100%					
	Massa	26000 kg	niet bekend	0,919	1,000	6,185	25.975
	volume	21831 m3/u	droog? Nat? Normaal?				28.264 m3/uur act. nat 21.872 nm3/uur droog
	Q-in					486	
	Q-uit					336	
	Delta					-149	kJ/kg _{condensaat}
circulatie damp	Tin	78 °C					
	Tuit	54 °C					
	massa			0,099	0,108	0,669	2.812
	Q-in					1767	
	Q-uit					1739	
	Delta					-28	kJ/kg _{condensaat}
Condens	Tin	78 °C	(damp)				
	Tuit	59,2 °C	(water)				
	massa	4200 kg/uur	normaal 5000	0,149	0,162	1,000	4.200
						2640	

Condensor	Gegevens per uur (van één droger)		per m3 lucht	per kg droge lucht	per kg conden- saat	per uur
					247	
					-2393	$\text{kJ/kg}_{\text{condensaat}}$
vers water	Tin	16,3 °C				
	Tuit	59,2 °C				
	massa	4500 kg/uur			1,071	
					72	
					264	
					192	$\text{kJ/kg}_{\text{condensaat}}$
sproeiwater	Tin	48,3 °C				
	Tuit	59,2 °C				
	massa	211000 kg/uur			50,238	
					10108	
					12400	
					2291	$\text{kJ/kg}_{\text{condensaat}}$
			Balansfout	:	-87	$\text{kJ/kg}_{\text{condensaat}}$

BIJLAGE D VERGELIJKENDE BEREKENING TURBINE/AFGASKETEL MET STOOMKETEL

Berekeningen stoomketel.

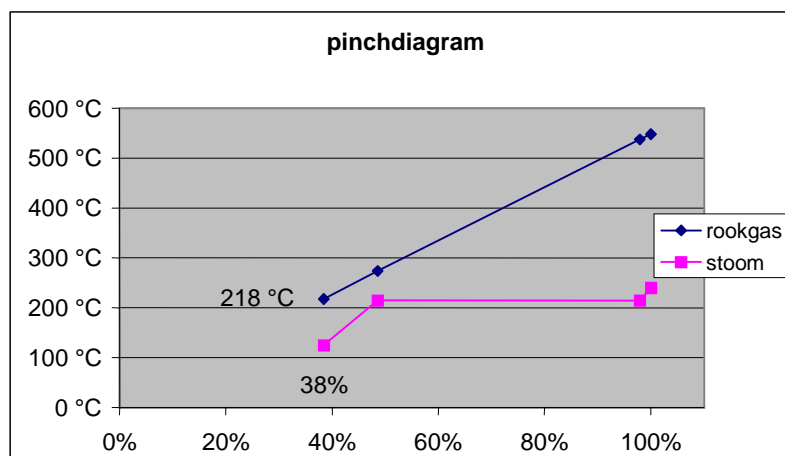
10-3-02 13:25

Situatie: USHN: gasturbine met 10% bijstook

Stoom 12,00 ton/uur
 20 bar
 240 °C
 condensaat 125 °C

rookgas 76.720 kg/uur
 intrede 548 °C
 O2% 6% 14%
 delta T minimaal 59 °C
 Volume (norm) 60.176 m3/uur

 Kookpunt 215 °C
 H_condensaat 535 kJ/kg
 H_condensaat kookpunt 920
 H_stoom v 2798
 H_stoom oververhit 2875

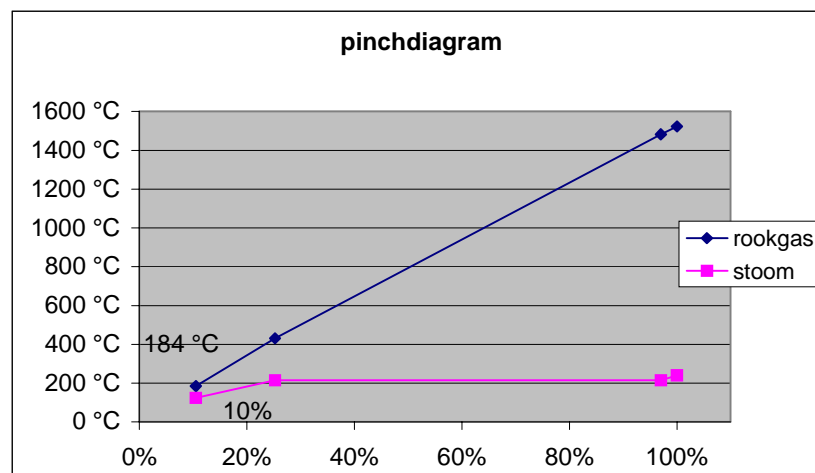


Proces	Rookgas, intrede			delta:	Stoom uittrede		delta-T
	Temp	Cpm	H	dH	H	Temp	
Oververhitten	548 °C	1,383	45.620.098	927.047	34.506.232	240 °C	308 °C
Verdampen	537 °C	1,382	44.693.051	22.537.289	33.579.185	215 °C	323 °C
Opwarmen	274 °C	1,345	22.155.762	4.618.978	11.041.896	215 °C	59 °C
	218 °C	1,339	17.536.784		6.422.918	125 °C	93 °C
	Rookgas, uittrede				Stoom intrede		
	28.083.313			< delta: >	28.083.313		58,77 °C

Situatie: Stand-alone stoomketel (ter vergelijking)

Stoom 12,00 ton/uur
20 bar
condensaat 240 °C
125 °C

rookgas 16.490 kg/uur
intrede 1523 °C
O2% 6% 14%
delta T minimaal 59 °C
Volume (norm) 13.104 m3/uur
Kookpunt 215 °C
H_condensaat 535 kJ/kg
H_condensaat kook 920
H_stoom v 2798
H_stoom oververhit 2875



Proces	Rookgas, intrede			delta: dH	Stoom uitrede		delta-T
	Temp	Cpm	H		H	Temp	
Oververhitten	1523 °C	1,572	31.372.202	927.017	34.505.111	240 °C	1283 °C
	1482 °C	1,567	30.445.185		33.578.094	215 °C	1268 °C
Verdampen	430 °C	1,403	7.908.628	22.536.556	11.041.537	215 °C	215 °C
Opwarmen	184 °C	1,366	3.289.801	4.618.828	6.422.710	125 °C	59 °C
	Rookgas, uitrede				Stoom intrede		
	28.082.401			< delta: >	28.082.401		58,77 °C