



CASCADERING VAN MAAISEL

Winning van industrieel toepasbare hernieuwbare grondstoffen gecombineerd met de opwaardering van brandstofkwaliteit voor de opwekking van energie

J. van Doorn
E.R.P. Keijsers
H.W. Elbersen

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door: J. van Doorn	Goedgekeurd/vrijgegeven door: H.J. Veringa	ECN Biomassa
Geverifieerd door: J. Beesteheerde		

Verantwoording

De werkzaamheden beschreven in dit rapport zijn uitgevoerd door ECN en ATO met ondersteuning van het EWAB programma van Novem (project nummer: 355199/050).

Abstract

Approximately 250-500 kton grass-like material from roadsides en natural habitats is available in the Netherlands on a yearly base. The average moisture content of fresh-cut grass is 50-70 weight %. At present composting and fodder are the major applications. If 100 kton mowing material could be made available for energy generation on a yearly base, 125.000.000 kWh can be produced resulting in a CO₂ emission reduction of 70 kton per year.

In this project mowing materials from different origin have been collected and pre-treated by means of extruding, pressing and leaching with water. Pre-treatment results in a much lower alkali and chlorine content of the remaining material. The order of efficiency of mineral removal is:

N, Ca < S < Na, P < Cl, K

The effect of mineral removal is also reflected in the results of the agglomeration tests. After pre-treatment, the mowing material shows a less problematic agglomeration behaviour (no agglomeration up to 900 °C) in comparison with the virgin material. Also the morphology of the remaining material is much more suited for the application as fuel for energy generation. The pre-treatment results in a pulp-like material. After pre-treatment the material contains less minerals than the virgin material, but still more nitrogen and ash in comparison with untreated wood.

One of the objectives was to show the combined production of fuel and products from mowing material. The amount of proteins in the water fraction was found to be low, but it is expected that it can be optimised by using fresh material and adapting the pre-treatment procedures.

The costs of the investigated pre-treatment route for grass-like material are comparable to the alternative route of composting.

INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	9
2. BESCHIKBAARHEID VAN MAAISEL	13
3. VERZAMELEN VAN DE MONSTERS EN BESCHRIJVING VAN DE LOCATIES	15
3.1 Gras uit woonwijk in Zwolle (AA-landen)	15
3.2 Wieden en Weerribben	16
3.3 Baarle-Nassau	16
3.4 Gras uit Zeeland van Natuurmonumenten	17
3.5 Cultuurgras uit Kesseleik in Noord-Limburg	17
4. VOORBEHANDELING VAN DE MONSTERS EN ANALYSE VAN HET PERSVOCHT	19
4.1 Gevolgde bewerkingsstappen	19
4.2 Beschrijving van de voorbehandelingsmethoden	20
4.2.1 Hakselen	20
4.2.2 Ontsluiting	20
4.3 Resultaten methodiek ontwikkeling voor persing	22
4.4 Resultaten van de bewerking van het maaisel per maaisel stroom	23
4.4.1 Gras uit woonwijk in Zwolle (AA-landen)	23
4.4.2 Gras uit natuurgebied de Wieden	24
4.4.3 Gras uit natuurgebied de Weerribben	25
4.4.4 Gras uit moerasgebied bij Baarle-Nassau	25
4.4.5 Gras uit Zeeland van Natuurmonumenten	26
4.4.6 Cultuurgras uit Kesseleik, Noord-Limburg	26
4.5 Screening van de geschiktheid van de effluenten voor fermentatie	26
4.6 Vergelijking van de pers van Agromiscanthus en de pers die ATO heeft gebruikt	28
4.7 De redenen voor het matig verwijderen van eiwit	28
5. ANALYSE VAN DE MONSTERS	31
5.1 Analyse resultaten	31
5.2 Evaluatie van de analyse resultaten	32
5.3 Vergelijking met brandstofsspecificaties Amer en Cuijk	33
5.4 Gevolgen voor emissies bij verbranding	35
5.5 Morfologie van de brandstof	36
6. AGGLOMERATIEGEDRAG	37
6.1 Inleiding	37
6.2 Experimentele condities van de agglomeratietests	37
6.3 Experimentele resultaten	37
6.4 Evaluatie agglomeratietests	38
7. ECONOMISCHE EVALUATIE VAN KETEN	41
7.1 Ketenbeschrijving	41
7.2 Investeringskosten	41
7.3 Opbrengst brandstof en producten	42
8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	45
REFERENTIES	48

COLOFON EWAB-EINDRAPPORT

Projectnummer: 355199/0050

Dit onderzoek is uitgevoerd met ondersteuning van het programma Energiewinning uit Afval en Biomassa (EWAB).

Beheer en coördinatie van het EWAB-programma berusten bij:

NOVEM B.V.

Nederlandse Onderneming Voor Energie en Milieu B.V.

Catharijnesingel 59

3511 GG UTRECHT

Postbus 8242

3503 RE UTRECHT

Telefoon: (030) 239 34 88 (Secretariaat EWAB)

Contactpersoon bij EWAB: ir. A. Swets

E-mail: a.swets@novem.nl

EWAB geeft geen garantie voor de juistheid en/of volledigheid van gegevens, ontwerpen, constructies, producten of productiemethoden voorkomende of beschreven in dit rapport, noch voor de geschiktheid daarvan voor enige bijzondere toepassing.

Aan deze publicatie kunnen geen rechten worden ontleend.

Het onderzoek is uitgevoerd door:

naam contractant:	ECN
adres:	Westerduinweg 3
postbus:	1
postcode/woonplaats:	1755 ZG Petten
telefoon:	0224-564663
contactpersoon:	J. van Doorn
met bijdragen van:	ATO
datum rapportage:	mei 2001

Het EWAB-programma werd uitgevoerd door Novem in opdracht van het ministerie van Economische Zaken.

SAMENVATTING

De beschikbaarheid van maaisel afkomstig uit wegbermen en natuurgebieden bedraagt volgens diverse inventarisatiestudies jaarlijks tussen de 250-500 kton droge stof per jaar. Het gemiddelde vochtgehalte van 'vers' maaisel bedraagt 50-70 wt% (gewichtsprocent). De huidige bestemmingen zijn met name compostering en veevoeder. Verwacht wordt dat de omvang van deze huidige bestemmingen in de toekomst zal afnemen in verband met milieu- en kwaliteitseisen in de landbouw en dat de beschikbaarheid voor energieopwekking dus zal toenemen. Het maaisel komt beschikbaar in de periode van mei tot september met als piek de maanden juni en juli.

Op basis van de beschikbaarheid van het maaisel en het conversierendement bij de toepassing van 100 kton maaisel (droge stof) kan circa 125.000.000 kWh worden geproduceerd. Deze hoeveelheid groene elektriciteit komt overeen met een CO₂ emissie reductie van 70 kton per jaar.

Het maaisel is op verschillende manieren bewerkt. De eerste stap is altijd verkleinen van het materiaal met een Pierret hakselmachine. Vervolgens is het maaisel ontsloten. Voor de ontsluiting zijn verschillende technieken (in serie) toegepast, t.w. extrusie, drenking in water en stoombehandeling. Het elektriciteitsverbruik van de ontsluitingsprocedures is lager dan 100 kWh per ton. Als derde stap is het materiaal uitgeperst met een pers. Vervolgens is het vaste residu op een droogvloer gedroogd en geanalyseerd.

In het algemeen kan worden gesteld dat het bereiken van een hoger droge stofgehalte door uitpersen leidt tot een toename van het elektriciteitsverbruik. Het elektriciteitsverbruik van de schroefpers is aanzienlijk lager in vergelijking met de Clextral extruder. Voor het verkrijgen van materiaal met een droge stofgehalte van 40 wt% is in het geval van de Clextral extruder ca. 300 kWh/ton nodig, terwijl een schroefpers voor een zelfde prestatie ca. 50 kWh verbruikt. Oorzaak hiervan is een lagere omwentelingssnelheid van de schroefpers; hierdoor wordt minder elektriciteit verbruikt voor het bereiken van een vergelijkbaar droge stofgehalte. Omdat de snijdende werking van de extruder nodig is voor het ontsluiten van het gras, levert een combinatie van de extruder en de schroefpers i.p.v. alleen een extruder het laagste elektriciteitsverbruik op.

Een maat voor de winning van eiwit is het verschil in stikstofgehalte in het uitgangsmateriaal en in het persresidu. Tevens zijn stikstofgehalten gemeten in het persvocht. De algemene conclusie is dat de verwijdering van stikstof beperkt is (maximaal 50 wt% op basis van vaste stof analyse). In een aantal gevallen is nauwelijks stikstof verwijderd. De stikstof concentratie in het persvocht varieert tussen 175 en 550 mg/liter in de drenkvloeistof en 170-890 mg in de persvloeistof. De concentratie van stikstof in de vloeistof kan aanzienlijk verhoogd worden door de drenkvloeistof te hergebruiken. Een mogelijk oorzaak voor de matig tot slechte eiwitwinning kan de verminderde versheid van het materiaal zijn. Indien dit inderdaad het geval is zal in de praktijk direct na het maaien de bewerking plaats dienen te vinden.

Het resultaat van de bepalingen van de metingen aan het persvocht geeft aan dat met het huidige proces, waarbij een grote hoeveelheid water wordt toegepast, de concentraties aan beschikbare producten te laag zijn om gewonnen te worden. Op grotere schaal in de praktijk zijn er een aantal goede mogelijkheden om de concentraties in het persvocht te verhogen. Het terugbrengen van de gebruikte hoeveelheid water tijdens het proces door het hergebruik van het proceswater en vervanging van de drenkstappen door een tegenstroom-wasinstallatie.

Het vochtgehalte van het uitgangsmateriaal is hoog en bedraagt 65-80 wt%. Verder kenmerkt maaisel zich door een relatief hoog (vergeleken met hout) stikstofgehalte (1,2-3,0 wt% op droge stof basis), een hoog chloorgehalte (0,15-0,68 wt% op droge stof basis) en een grote variatie in het gehalte aan alkali-metalen.

Door de uitgevoerde bewerking daalt het vochtgehalte tot 55-65 wt% hetgeen onvoldoende is voor directe toepassing van het residu voor thermische conversie. Terugdringen van het vochtgehalte is mogelijk door optimalisatie van de persstap; waarschijnlijk is het toevoegen van een extra droogstap noodzakelijk om het gewenste droge stof gehalte te bereiken.

Het verwijderingspercentage door de uitgevoerde voorbereiding is voor chloor en kalium zeer hoog (70-95%). De gevolgde methodiek blijkt dus voor deze componenten uitstekend te functioneren. Een lager maar nog steeds substantieel verwijderingspercentage is verkregen voor zwavel en fosfor (S: 30-50%; P: 45-85%). De mate van verwijdering van de verschillende componenten kan worden samengevat als zijnde:

$$N, Ca < S < Na, P < Cl, K$$

Onbehandeld maaisel voldoet niet aan de specificaties van de brandstof die wordt gebruikt bij de Amer centrale en in Cuijk wat betreft vochtgehalte, as, stikstof-, zwavel- en chloorgehalte. Na voorbereiding voldoet alleen nog het vochtgehalte, het asgehalte en het stikstofgehalte niet aan de specificaties.

Een opvallend fenomeen is de toename van de concentratie van een aantal metalen (Ni, Cr, Co) na voorbereiding in vergelijking met het uitgangsmateriaal. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door slijtage van de extruder.

Een belangrijk verschil tussen het uitgangsmateriaal en materiaal na bewerking is de fysische vorm. Het grasachtige materiaal verandert tijdens de voorbereiding in een pulpachtig materiaal. Hierdoor is het denkbaar dat het materiaal na bewerking te voeden is met hetzelfde voedingssysteem dat voor de voeding van houtchips wordt gebruikt. In ieder geval is de hanteerbaarheid van het materiaal veel gunstiger dan dat van het uitgangsmateriaal. Hierdoor wordt de toepassing van bewerkt maaisel als 'tweede' brandstof in een houtgestookte installatie een realistische optie.

Een alternatieve mogelijkheid is om de voorbereidingstappen af te sluiten met een pelletiserstap. Wat betreft logistiek, opslag en voeding zijn pellets zeer aantrekkelijk. Wel is pelletiseren een relatief dure en energie intensieve handeling.

Bij het maaien en/of verzamelen van het maaisel is bij twee monsters een aanzienlijke verontreiniging opgetreden met zand. Dit uit zich in een extreem hoog asgehalte. Voor zowel de voorbereiding als voor de uiteindelijke conversie is dit nadelig (extra slijtage, grotere hoeveelheid af te voeren as, grotere kans op agglomeratieverschijnselen). Bij implementatie van deze integrale verwerkingsroute zal dus aandacht moeten worden besteed voor het voorkomen van deze verontreinigingen.

Aan de hand van de uitgevoerde agglomeratietests is vastgesteld dat de voorbereiding de temperatuur waarbij agglomeratie optreedt verhoogd van 825-870 °C tot een temperatuur hoger dan 900 °C. Dit betekent dat de toepasbaarheid van het materiaal na voorbereiding in verbrandings- of vergassingsinstallatie duidelijk toeneemt. Dit gemeten positieve effect op het agglomeratiegedrag is in overeenstemming met de geconstateerde verwijdering van elementen die verantwoordelijk zijn voor agglomeratie (K, Na, P, Ca, Cl). Deze verlaging van de kans op agglomeratie vergroot de mogelijkheden voor thermische toepassing van het bewerkte maaisel aanzienlijk.

Beschrijving van de integrale keten

De resultaten van de deelactiviteiten van dit project leiden tot het volgende inzicht met betrekking tot een integrale keten voor de winning van producten en brandstof uit maaisel:

Uitgangspunt voor de integrale keten is dat de mineralen in het maaisel afgevoerd dienen te worden uit te maaien gebied vanwege het gevoerde verschravingsbeleid.

Dit betekent onder meer dat het tijdstip van maaien door de beheerder van het te maaien gebied bepaald wordt en dat het tijdstip niet wordt aangepast aan het gebruik van maaisel voor productwinning en brandstoftoepassing. Hierdoor treden er in het eerste deel van de keten geen belangrijke wijzigingen ten opzichte van de huidige situatie op. Ten aanzien van logistiek en kosten vindt het maaien plaats door dezelfde partijen en met dezelfde machines. De enige verandering die mogelijk kan plaatsvinden is dat bij het maaien en 'omgaan met' het maaisel rekening wordt gehouden met de 'nieuwe' toepassing. Er zal rekening gehouden moeten worden met het tijdstip tussen maaien en het beschikbaar zijn van het maaisel voor bewerking. Dit is met name belangrijk voor de productwinning.

Maaien vindt plaats gedurende korte periodes en veelal worden kleinere verspreid liggende oppervlakken gemaaid. Hierdoor is het aantrekkelijk dat de bewerkingsunit een mobiele installatie betreft, die op een toegankelijk plaats in de buurt van het maaien gebied wordt opgesteld. Analoog aan de huidige situatie wordt het maaisel verzameld en naar een locatie in de buurt van het te maaien gebied getransporteerd. Hiervandaan vindt momenteel het transport naar een composteringsinrichting of grasdrogerij plaats. In het geval van voorbereiding van het maaisel bevindt de bewerkingsunit zich op dit verzamelpunt. In de economische evaluatie is aangenomen dat het verschil tussen de huidige activiteiten bij het maaien en verzamelen op een verzamelpunt en bij de activiteiten in de 'nieuwe' maaisel toepassing in dit deel van de keten geen verschillen zijn.

De bewerkingsunit bestaat uit een pers/extruder en een wateropvang. Het vaste residu uit de pers wordt vervolgens getransporteerd naar een energiecentrale. Het persvocht wordt opgeslagen en afhankelijk van de samenstelling ter plekke voorbereid of in zijn geheel afgevoerd. Verwacht wordt dat de transportkosten van het residu lager zijn dan de transportkosten van het niet-bewerkte maaisel vanwege het lagere vochtgehalte en de hogere stordichtheid. Niet verdicht vers gras heeft een stordichtheid van ca. 170 kg/m^3 (30 wt% droge stof). Bij hetzelfde droge stofgehalte van 30 wt% is de bulkdichtheid van een baal ca. 200 kg/m^3 .

Economische evaluatie

De opbrengst bestaat uit de uitgespaarde kosten van het composteren, brandstofprijs en productopbrengst. De orde grootte van de opbrengst is naar verwachting vergelijkbaar met de kosten voor de bewerkingsstap. Onzekerheden in de keten zijn met name de effectiviteit (en kosten) van de productwinning en de logistieke aspecten.

Probleemstelling

De kosten voor de huidige verwerking van maaisel zijn in veel gevallen hoog en de directe toepassing als brandstof is vanwege de eigenschappen van het maaisel niet eenvoudig. Een oplossing hiervoor zou zijn het fractioneren van het maaisel in duurzame grondstoffen en een (met hout vergelijkbare) hoogwaardige brandstof. De techniek voor fractionering van maaisel in hoogwaardige agro-industriële grondstoffen en brandstof en de daaraan verbonden kosten zijn grotendeels onbekend. Het is niet mogelijk de technische en economische mogelijkheden van dit integrale proces in dit stadium vast te stellen. Tevens is het effect van de voorbehandeling op de brandstofkwaliteit niet bekend.

Doelstelling

Doelstelling is het aantonen van de technische en economische haalbaarheid van de combinatie 'producten en brandstof van betere kwaliteit' uit maaisel.

1. INLEIDING

In Nederland worden wegbermen, slootkanten, (natte) natuurgebieden en andere oppervlakken één of meerdere keren per jaar gemaaid [1]. Een belangrijke doelstelling van het beleid ten aanzien van het beheer van bermen, slootkanten en natuurgebieden is de afvoer van nutriënten (N, P, K, Ca, S, etc) en andere stoffen (zware metalen, zwerfvuil, etc). Dit wordt het verschalingsbeleid genoemd en wordt toegepast voor zowel bermen als in natuurgebieden. Afhankelijk van de kwaliteit wordt het maaisel op dit moment onder meer afgezet als veevoer of gecomposteerd. De verwerking van bermgras, maaisel uit natuurgebieden en slootmaaisel op de ‘traditionele’ manier is in toenemende mate een probleem, vanwege:

- Het achterlaten van het materiaal op het gemaaide terrein past niet in het verschalingsbeheer. Het totale tonnage dat afgevoerd moet worden neemt weliswaar in de loop van de tijd af (en wordt dus goedkoper), maar de nutriënten blijven in het gemaaide gebied.
- De afzet richting de landbouw (als hooi of via grasdrogerijen) zal eerder af dan toenemen in verband met milieu- en kwaliteitseisen (MINAS, etc). De verwerking van gras in grasdrogerijen wordt op dit moment nog gesubsidieerd.
- De kosten voor de afvoer van biomassa zijn relatief hoog zowel door de transport- en de verwerkingskosten. Een deel van het gemaaide bermgras wordt verwerkt tot compost. Gezien de grote beschikbaarheid van compost uit andere afvalstromen (o.a. GFT), is een groei van de vraag naar compost niet te verwachten.

Gezien deze bezwaren is er behoefte bij maaisel producenten en –verwerkers aan een verantwoorde en goedkopere methode voor de verwerking en afzet van maaisel.

Een alternatieve toepassing voor het maaisel, naast compostering of veevoer, kan de inzet zijn als brandstof voor energieopwekking. Hierbij worden specifieke eisen aan de kwaliteit van het materiaal gesteld ten aanzien van verontreinigingen, mineralen, vochtgehalte en fysieke structuur.

Probleemstelling

De kosten voor de huidige verwerking van maaisel zijn in veel gevallen hoog en de directe toepassing als brandstof is vanwege de eigenschappen van het maaisel niet eenvoudig. Een oplossing hiervoor zou zijn het fractioneren van het maaisel in duurzame grondstoffen en een (met hout vergelijkbare) hoogwaardige brandstof. De techniek voor fractionering van maaisel in hoogwaardige agro-industriële grondstoffen (proteïnen, suikers, etc.) en brandstof en de daaraan verbonden kosten zijn grotendeels onbekend. De marktwaarde van de geproduceerde proteïnen en koolhydraten (suikers) is sterk afhankelijk van de geproduceerde kwaliteit en toepasbaarheid. Hierdoor is het niet mogelijk de technische en economische mogelijkheden van dit proces in dit stadium vast te stellen. Tevens is het effect van de voorbehandeling op de brandstofkwaliteit niet bekend.

Doelstelling

Doelstelling is het aantonen van de technische en economische haalbaarheid van de combinatie ‘producten en brandstof van betere kwaliteit’ uit maaisel.

Werkwijze

In overleg met ‘marktpartijen’ zijn een aantal soorten maaisel verzameld, geanalyseerd en voorbereid. Het resterende vaste materiaal na voorbereiding is opnieuw geanalyseerd. Tevens zijn agglomeratietests uitgevoerd op het uitgangsmateriaal en het bewerkte materiaal. Het persvocht is geanalyseerd op aanwezigheid van producten.

Achtergrond

Een gerichte vermindering van de gehalten aan stikstof, zwavel, chloor, as, alkali-metalen en vocht in het maaisel is wenselijk bij de toepassing als brandstof. Hoewel er een verlaging van 'storende' componenten mogelijk is door de keuze van het tijdstip van maaien is dit waarschijnlijk onvoldoende om een aantrekkelijke brandstof op te leveren. Daarnaast is het moeilijk in te passen in het huidige beheer aangezien de verwijdering van deze componenten juist één van de doelstellingen van het beheer is. Dat wil zeggen dat maaien op het tijdstip dat de gehalten aan genoemde componenten minimaal zijn dus geen optie is vanwege de tegenstrijdigheid met het verschalingsbeleid. Bij het principe dat in deze studie wordt getoetst worden de verontreinigingen na het maaien in een aparte bewerking verwijderd. Hierdoor kan het huidige verschalingsbeleid uitgevoerd blijven worden (componenten worden verwijderd uit het gemaaide gebied) en het maaisel wordt tegelijkertijd (beter) geschikt gemaakt voor brandstoftoepassing.

De gehalten aan verontreinigingen kunnen sterk variëren per locatie, type bodemsoort, maaiseizoen (oogsttijdstip) en beheermethode [2]. Zo is afhankelijk van de locatie een kaliumgehalte in bermgras gevonden tussen de 3.600 en 19.800 mg K per kg droge stof; het stikstofgehalte varieerde tussen 0,9 en 2,1 wt% (gewichtsprocent) [3]. Informatie uit de ECN/Novem database Phyllis [14] laat zien dat het stikstofgehalte van bermgras tussen 1,9 en 2,7 wt% (op droge en asvrije basis) ligt (gebaseerd op 16 analyses).

Vanwege de variatie in samenstelling als functie van locatie en seizoen is uiteindelijk een snelle detectiemethode essentieel om een keuze te kunnen maken voor de optimale processingroute. De ontwikkeling en demonstratie van een dergelijke detectie methode is geen onderdeel van dit project.

In het kader van een inmiddels afgerond project zijn bij ECN vergassingstests uitgevoerd met gepelletiseerd bermgras [4]. Hierbij is gebleken dat door het hoge gehalte aan eiwitten in maaisel en dus het hoge stikstofgehalte in bermgras (2,5 wt% op droge en asvrije basis) het stookgas relatief sterk verontreinigd is met NH_3 (een factor 6 hoger in vergelijking met wilg of sloophout). Hierdoor is een uitgebreide(r) NH_3 verwijdering uit het stookgas noodzakelijk teneinde aan de NO_x -emissie normen te kunnen voldoen. Ook het hoge chloorgehalte in het bermgras veroorzaakt een relatief hoge HCl concentratie in het stookgas. Dit kan leiden tot corrosie verschijnselen in de installatie en/of luchtzijdige emissie overschrijding, waardoor additionele gasreiniging noodzakelijk kan zijn. Soortgelijke emissie problemen doen zich ook bij verbranding voor.

Andere problemen die zich voordoen bij verbranding en vergassing van biomassa (met name bij grassen en éénjarige gewassen) zijn de fysieke 'handling' van het materiaal, agglomeratie/verslakking, teervorming en corrosie. Bij de vergassingstests met bermgras [4] is het handling probleem 'opgelost' door gebruik te maken van pellets. De aanwezigheid van een hoog gehalte aan alkalimetalen (K, Na) in combinatie met andere componenten (zoals P) is verantwoordelijk voor het optreden van asagglomeratie in de installatie. Onder andere door vervuiling met grond (Si) en een hoog gehalte aan mineralen in de biomassa blijft een relatief hoog asgehalte over na verbranding. Dit brengt extra kosten voor de asafvoer met zich mee.

Verder kan in sommige gevallen het gehalte aan zware metalen een probleem zijn in verband met emissie regelgeving en voor de (toekomstige) afzet van de as als grondstof.

Wat betreft de handling van grasachtige materialen is het bekend dat problemen ontstaan bij het voeren van dit materiaal vanuit voorraadbunkers. Een oplossing is het maken van pellets. Dit vergt echter een extra stap, waardoor de bewerkingskosten en het energieverbruik toenemen.

Winning van producten

Eiwitten en koolhydraten kunnen via verschillende extractiemethoden via de waterige fase worden verwijderd uit het maaisel en gebruikt worden voor vervaardiging van verschillende

hoogwaardige producten, naast een verhoging van het droge stofgehalte van de brandstof. Het uitpersen van vers maaisel onder hoge druk zal één van de te testen extractiemethoden zijn. Hiervoor wordt samengewerkt met het project `MULTIPERS`, waarvan dhr. A.H. Drenth van Agromiscanthus coördinator is. In overleg met Agromiscanthus is maaisel getest op samenstelling voor en na de persstap.

Daarnaast zijn uitgebreide tests uitgevoerd met extruders die beschikbaar zijn bij ATO.

Voor de eiwitfractie in het extract kunnen er verschillende toepassingen zijn. Daaronder vallen veevoer en industriële toepassingen als lijmen, coatings en folies. Fermentatie tot methaan, ethanol, methanol, butanol, H₂ (of andere 'groene chemicaliën') is een mogelijkheid voor koolhydraatrijke fracties. Het residu (de brandstof), dat overblijft na extractie, zal naar verwachting een vermindering van de hoeveelheden 'storende' componenten bevatten. Hierbij is het streven om het stikstofgehalte te verminderen tot maximaal 0,25 wt% N op droge stof basis. Verder zullen afhankelijk van de toegepaste fractioneringmethode ook andere componenten, die uit oogpunt van thermische verwerking niet gewenst zijn, verwijderd worden (chloor, alkalimetalen en aanhangend zand).

Door het op elkaar afstemmen van de productwinning techniek en de gewenste morfologie van de brandstof is het denkbaar dat, als onderdeel van een integrale keten, op een economisch aantrekkelijke wijze de handlingsproblematiek kan worden opgelost.

Aan dit project werken verschillende partijen mee die uiteenlopende soorten maaisel afvoeren. Hieronder vallen Provincies, die verantwoordelijk zijn voor afvoer van maaisel langs secundaire wegen en watergangen en beheerders van natuurgebieden (Natuurmonumenten).

In dit project wordt gestreefd naar het opstellen (en vervolgens vaststellen van de technische en economische haalbaarheid) van een integraal verwerkingssysteem met de volgende innovatieve aspecten:

- winning van grondstoffen
- kwaliteitsverbetering ten behoeve van de inzet als brandstof
- vergroting aanbod bio-brandstoffen
- afstemming van de techniek van grondstofwinning met handling eigenschappen van de resterende brandstof

Naast ECN en ATO hebben de volgende bedrijven en instanties een bijdrage aan het project geleverd:

- Natuurmonumenten
- Agromiscanthus B.V.
- Wetland Management Systems B.V. (WMS)
- Staatsbosbeheer
- Veluwenkamp Groen B.V.
- Stichting Duurzame Chemische Ontwikkeling

2. BESCHIKBAARHEID VAN MAAISEL

Er is door Natuurmonumenten aangegeven dat er in Nederland momenteel jaarlijks zo'n 460.000 ton bermgras wordt geproduceerd [7], met een geschat vochtgehalte van meer dan 50 wt%. Deze hoeveelheid is afkomstig van ca. 50.000 ha aan bermen, slootkanten en andere gemaaide oppervlakten, waarvan het maaisel wordt verwijderd. Deze getallen komen overeen met een opbrengst van circa 4 ton droge stof per ha. Daarnaast worden er ook in het kader van landschapsbeheer veel graslanden in natuurgebieden onderhouden door middel van begrazing en maaien. Het is hierbij moeilijk om een schatting te maken van de hoeveelheden afgevoerd maaisel. Hoofddoel bij het beheer is verschraling. Net als voor maaisel van bermbeheer wordt het meeste materiaal nu, als hooi gebruikt, afgevoerd naar grasdrogerijen, soms op het terrein achtergelaten of verwerkt tot compost.

In een aantal eerdere en recente inventarisatiestudies [8-10, 20, 21] is het potentieel van bermgras eveneens geschat. Deze gegevens variëren van 250-500 kton droge stof per jaar; de prijs per ton (natte basis) is geschat op – 5 tot –55 €. De beschikbaarheid (te contracteren hoeveelheid) wordt in [9] geschat op 75 kton droge stof per jaar. De verwachting is dat de hoeveelheid bermgras in de komende jaren (zichtjaar 2020) min of meer gelijk zal blijven [10]. Een aparte inventarisatiestudie is gewijd aan maaisel uit natte natuurgebieden; de zgn. wetlands [11]. De conclusies uit deze inventarisatie is dat er jaarlijks in Nederland ca. 130 kton droge stof vrijkomt uit natte natuurgebieden en dat hiervan ongeveer 50 kton beschikbaar is voor energieopwekking. Met de verwachte uitbreiding van de natuurgebieden in Nederland zou deze hoeveelheid nog verder toe kunnen nemen.

Andere belangrijke factoren voor de beschikbaarheid van maaisel is de variatie in de aanvoer over het jaar. De aanvoer van maaisel is vooral afhankelijk van het groeiseizoen en het gehanteerde beheersysteem. Dit betekent dat de aanvoer van maaisel begint in mei en in juni-juli het hoogst is. In het najaar neemt de aanvoer weer iets toe. In natuurgebieden wordt meestal later begonnen met maaien in verband met het broedseizoen van de weidevogels.

Om de grote variatie in de aanvoer van maaisel voor een verwerkingsinstallatie te ondervangen kan het materiaal geconserveerd worden opgeslagen door inkuiling of in plastic verpakt tot gebruik. Indien het maaisel als tweede brandstof in een bestaande biomassaverbrandings- of vergassingsinstallatie wordt toegepast is het seizoensgebonden vrijkomen van het maaisel minder problematisch. Het voordeel van het inzetten als tweede brandstof is dat langdurige opslag wordt vermeden.

Energiepotentieel

In tabel 2.1 is het jaarlijkse energiepotentieel van de inzet van maaisel als brandstof geschat. Hierbij is uitgegaan van een calorische waarde na bewerking van 15 MJ/kg (brandstof met 10 wt% vocht). Ook is aangenomen dat het maaisel als brandstof in een WK-installatie (warmtekracht installatie) wordt toegepast. Het elektrisch rendement is op 30 % gesteld. De vermeden (fossiele) CO₂ emissie is gebaseerd op de geproduceerde elektriciteit en er is uitgegaan van de CO₂ emissie per kWh van de huidige brandstofmix in Nederland (exclusief import van elektriciteit). Deze bedraagt 562 gram per kWh [12]. Eventuele warmte benutting en de hiermee gepaard gaande (fossiele) CO₂ emissie reductie is niet meegenomen.

Tabel 2.1 *Indicatie van het energiepotentieel en vermeden CO₂ emissie bij de inzet van maaisel als brandstof in een realistisch scenario en bij maximale inzet van maaisel*

	Realistisch scenario	Maximale inzet
hoeveelheid maaisel (droge stof)	100 kton per jaar	500 kton per jaar
totale energie-inhoud maaisel	1,5 PJ	7,5 PJ
geproduceerde elektriciteit	125.000.000 kWh/jaar	625.000.000 kWh/jaar
vermeden CO ₂ uitstoot	70 kton per jaar	350 kton per jaar

3. VERZAMELEN VAN DE MONSTERS EN BESCHRIJVING VAN DE LOCATIES

In het kader van dit project zijn diverse maaisel stromen verzameld, bewerkt en geanalyseerd. Eén van de redenen voor het gebruiken van meerdere stromen is het verkrijgen van eerste indicatie van de verschillen en de overeenkomsten tussen de diverse maaisel stromen.

In tabel 3.1 worden de data gegeven waarop het gras is gemaaid, opgehaald en verder verwerkt. Het verschil tussen de datum waarop het gras werd gemaaid en de datum waarop het opgehaald is, heeft verschillende oorzaken. Het gras wordt gemaaid door loonbedrijven. Deze loonbedrijven kunnen niet altijd op de dag nauwkeurig aangeven wanneer zij een bepaald stuk land gaan maaien mede omdat ook het weer daarbij van grote invloed is. Vaak wordt het gras niet met hetzelfde apparaat gemaaid, bij elkaar geraapt en getransporteerd. Wanneer de tijd tussen maaien en het bijeenbrengen van het gras geminimaliseerd moet worden om het beschikbaar te maken voor verdere bewerking, zal de huidige praktijk aangepast moeten worden.

Voor het uitvoeren van de experimenten bij ATO bleek het door de grote hoeveelheden gras onmogelijk om de gehele bewerking binnen één dag uit te voeren, daarom is in tabel 3.1 aangegeven wanneer de voorbereiding (hakselen) is uitgevoerd en wanneer de bewerking (ontsluiting en persing) is uitgevoerd.

Tabel 3.1 *De data waarop het maaisel is gemaaid, opgehaald, voorbereid en bewerkt. Alle handelingen zijn in 2000 uitgevoerd*

	Datum maaien	Datum ophalen	Datum hakselen	Datum bewerking	Hoeveelheid materiaal (ton ar)
AA-Landen	15-6	15-6	19-6	20/22-6	10 (1,5) ¹
Wieden	30-8	30-8	31-8	1/3-9	1 (0,8)
Weerribben	9-10	10-10	11-10	12-10	2 (1,2)
Baarle- Nassau	23-10	24-10	24-10	25-10	3 (1)
Zeeland	6-12	7-12	12-12	13-12	1 (0,7)
Kesseleik	19-12	20-12	21-12	22-12	1 (0,4)

¹ De totale hoeveelheid gemaaid materiaal (in ton as received) met tussen haakjes de hoeveelheid die door ATO is meegenomen t.b.v. dit project.

3.1 Gras uit woonwijk in Zwolle (AA-landen)

De AA-landen in Zwolle is een locatie in een woonwijk. Op deze locatie worden honden uitgelaten en is er relatief veel vervuiling met zwerfvuil (blikjes, papier e.d.). Het gras is gemaaid met een grasmaaier. Het is na het maaien centraal opgeslagen in een depot; vanuit het depot is het bemonsterd. Naast gras bevat het ook relatief veel houtachtig materiaal. Het gras is gemaaid op 15 juni 2000 en na het ophalen is het direct bij ATO in de koeling is geplaatst bij 5°C. Door de hoge temperatuur op 15 juni vond er na enkele dagen in de koeling toch lichte broei plaats in delen van het monster. Deze delen zijn niet meegenomen in het experiment. Veluwenkamp Groen B.V. heeft de aanvoer van het gras verzorgd.

3.2 Wieden en Weerribben

Twee natuurgebieden liggen in de onmiddellijke omgeving van Blokzijl in Noord-West Overijssel. Noordelijk van Blokzijl ligt 'De Weerribben' (Nationaal Park, beheerd door Staatsbosbeheer) en zuidelijk ligt 'De Wieden' (grotendeels eigendom van de Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten). De Wieden in de Kop van Overijssel is met 5700 ha water, riet, gras- en hooilanden en moerasbos één van de grotere gebieden van de Vereniging Natuurmonumenten. Samen met De Weerribben van Staatsbosbeheer vormt De Wieden het grootste aaneengesloten laagveenmoeras van West-Europa. Het gebied 'De Wieden', ligt tussen twee stuwwallen: het Hoge Land van Vollenhove en het gebied rond Steenwijk.

Aan het begin van onze jaartelling was het gebied een moerasdelta. Rivieren als de IJssel, Linde en Drenthse Aa vonden in het lage land hun weg naar open water (Flevo, Almare en later Zuiderzee). Door de vele overstromingen, afgewisseld met perioden van rijke plantengroei, vormden zich veenlagen; soms wel tot twee meter dikte. Daar waar het water stagneerde, ontstonden rietvelden met veel grote zeggen en veenmos. Deze planten hebben vooral gezorgd voor de vorming van laagveen in De Wieden. Toen de Hollandse bossen opgestookt waren in de open haarden en fornuizen -of waren aangewend als timmer- en geriefhout-, begon men ook rond Blokzijl met de vervening (turfwinning).

Tijdens het afgraven van het laagveen ontstond, noordelijk, een landschap van 'Weren' (water, trekpaten) en 'Ribben' (smalle legakkers waarop men de turf te drogen legde en die later gebruikt werden voor kleinschalige veeteelt). In het Wieden-gebied, waar men al veel vroeger verveende, hield men zich niet aan afspraken over 'Ribben'. Als gevolg is bij de overstromingen van 1776 en 1825 het land tussen de trekpaten weggespoeld. Op deze manier ontstond het merengebied bestaande uit de Beulaker-, Belter-, Boven- en andere Wieden. De natuur zorgde voor 'verlanding' van het open water; riet gedijt uitstekend, zolang de verlanding niet te ver doorzet. Nu ziet men op veel oude rietlanden het moerasbos opschieten [13].

Het gras afkomstig uit de Wieden is specifiek voor dit waterrijke gebied. Het wordt gemaaid en daarna met bootjes verzameld. Door deze wijze van maaien komt er relatief weinig gras tegelijkertijd voor verwerking beschikbaar. Het gras dat is gebruikt voor dit project is gemaaid op 30 augustus 2000 en direct opgehaald. Doordat het gras in waterrijk gebied geoogst wordt is het nat, d.w.z. dat er water lekt uit de hoop gras. Wanneer dit gras niet direct opgehaald wordt is de kans op broei groot.

De Weerribben grenst in het Noorden aan het Moerasgebied de Rottige Meenthe in Friesland en in het Zuiden aan Natuurgebied De Wieden met dorpjes zoals bijvoorbeeld Giethoorn [13]. Het gras uit de Weerribben lijkt sterk op dat van de Wieden; echter het gebruikte gras is van een droger gedeelte afkomstig dan het gras uit de Wieden. Het gras is gemaaid op 9 oktober 2000. Het werd aan de kant van de weg bijeengebracht. Dit gras van de droge gedeeltes van het natuurgebied kan makkelijker in grotere hoeveelheden aangevoerd worden dan het gras uit de Wieden. Staatsbosbeheer heeft de aanvoer van het maaisel uit de Weerribben en Baarle-Nassau verzorgd.

3.3 Baarle-Nassau

De locatie bij Baarle-Nassau in Noord Brabant is een klein veld met een vennetje in het midden. Het veld is een afgesloten natuurgebied dat beheerd wordt door Staatsbosbeheer. De grond van dit zgn. wetland is zeer nat waardoor het gras gemaaid moet worden met de speciale moerasmaaier van Waste Management Systems BV (WMS). Deze maaier is uitgerust met rupsbanden, waardoor ook op zeer natte terreinen gemaaid kan worden. Het gras wordt bijeengebracht aan de rand van het gebied. Het gras is gemaaid op 23 oktober 2000 en een dag later opgehaald. Het gras is specifiek voor deze locatie, hoewel het in één keer beschikbaar komt is de totale hoeveelheid van dit veld gering.

3.4 Gras uit Zeeland van Natuurmonumenten

Het gras van Natuurmonumenten in Zeeland is afkomstig van een oude binnendijk in Walcheren. Direct naast de dijk ligt een zandpad waarover onder droge omstandigheden verkeer mogelijk is. Het gras is gemaaid op 6 december 2000 en een dag later opgehaald. Het gras bevatte relatief veel zand doordat vanwege de oneffenheden in de dijk de maaier af en toe zand meeneemt. Normaal wordt dit gras later opgehaald; voor dit experiment echter werd het gras bemonsterd zonder tussentijdse opslag. De totale hoeveelheid gras afkomstig van dijken van Natuurmonumenten is groot. Indien het gras direct na het maaien bijeengebracht wordt is het in grote hoeveelheden beschikbaar.

3.5 Cultuurgras uit Kesseleik in Noord-Limburg

Het gras uit Limburg komt van een boerenbedrijf bij Kesseleik. Het is laat in het jaar gemaaid op 19 december 2000. Ondanks het late oogsttijdstip zag het gras er nog erg vers uit. Dit cultuurgras bevat nauwelijks verontreinigingen. Normaal wordt dit gras op het weiland bijeengebracht. Voor dit experiment is het bijeengebracht bij de graspermaschine van Agromiscanthus en van daaruit bemonstert voor verdere bewerking bij ATO.

4. VOORBEHANDELING VAN DE MONSTERS EN ANALYSE VAN HET PERSVOCHT

4.1 Gevolgde bewerkingsstappen

Om een optimaal verwerkingsproces te krijgen is voor ieder experiment het bewerkingsproces aangepast. Daarbij is niet gestreefd naar het optimaliseren van de methode voor het specifieke gras, maar naar het optimaliseren van de methode zelf. Het totale bewerkingsproces is opgesplitst in drie fases:

Fase 1: Voorbewerking

Deze eerste fase bestaat uit het verkorten van het materiaal door hakselen, waardoor het geschikt wordt voor verwerking in de verdere fases. Deze fase is tijdens de optimalisatie van het proces niet veranderd. Wanneer het proces op grote schaal uitgevoerd wordt, is verkorten waarschijnlijk niet nodig, omdat de apparatuur op grotere schaal geschikt is voor de verwerking van langer materiaal.

Fase 2: Ontsluiting

De tweede fase is de ontsluiting van het materiaal. Hierbij dienen de ongewenste elementen “losgemaakt” en verwijderd worden uit het materiaal en wordt een effluent stroom afgesplitst die gebruikt kan worden voor opwerking. Tijdens de optimalisatie van de methode is er naast het extruderen gekeken naar het effect van een stoombehandeling voor extrusie en een drenking na extrusie. Hierbij is er van uitgegaan dat een deel van de ongewenste elementen zich in de cellen van het gras bevindt en een deel erbuiten. De stoombehandeling en de extrusie stap worden gebruikt om de cellen kapot te maken. Door de drenking wordt het water in de cellen gemengd met het water buiten de cellen en oplosbare componenten uitgespoeld.

Fase 3: Persing

De derde fase bestaat uit het uitpersen van het effluent dat de ongewenste elementen bevat. Het effect van deze stap is afhankelijk van de hoeveelheid water die de pers uit het monster kan verwijderen. Hoewel de bij ATO gebruikte pers goede resultaten oplevert, zijn er persen speciaal voor gras ontwikkeld zijn die naar verwachting een beter persresultaat leveren. Op grote schaal zullen de persresultaten daardoor beter zijn dan de resultaten op labschaal. Aan het begin van de optimalisatie is er gewerkt met één persstap, later is het materiaal twee maal geperst, waardoor de uitgeperste hoeveelheid vocht toenam. Het toevoegen van een drenkingstap zorgt er voor dat de concentraties van elementen die in residu achterblijven afneemt. Zonder het vochtgehalte aan het einde van de pers fase te verhogen kan er hierdoor toch een grotere hoeveelheid verontreinigingen verwijderd worden.

Fase 4: Nabewerking

Voor de vervolg experimenten bij ATO en het versturen van de monsters voor analyse bij ECN is er een nabewerking toegepast op de monsters. De monsters zijn gedroogd op een droogvloer, zodat de monsters langere tijd bewaard kunnen worden. Omdat tijdens het drogen van de monsters alleen het overtollige water verwijderd wordt, verandert de hoeveelheid verontreinigingen niet. In de praktijk zal deze vierde fase alleen toegepast worden indien het vochtgehalte te hoog is voor de toepassing van het residu als brandstof.

In tabel 4.1 is voor de verschillende grasmonsters aangegeven welke processtappen er toegepast zijn.

Tabel 4.1 *De verschillende processtappen per maaiselstroom*

	Voorbewerking	Ontsluiting	Persing	Nabewerking
AA-Landen	Hakselen	Extruderen	Persen Persen	Drogen op droogvloer
Wieden	Hakselen	Extruderen Drenken	Persen Persen	Drogen op droogvloer
Weerribben	Hakselen	Extruderen Drenken	Persen Drenken Persen	Drogen op droogvloer
Baarle-Nassau	Hakselen	Extruderen Drenken	Persen Drenken Persen	Drogen op droogvloer
Zeeland	Hakselen	Stomen Extruderen Drenken	Persen Drenken Persen	Drogen op droogvloer
Kesseleik	Hakselen	Stomen Extruderen Drenken	Persen Persen	Drogen op droogvloer

4.2 Beschrijving van de voorbehandelingsmethoden

4.2.1 Hakselen

Het materiaal is verkort met een Pierret hakselmachine. Deze hakselaar snijdt het materiaal met behulp van een vast en een bewegend mes. Het materiaal wordt aangevoerd met behulp van een lopende band. Door het instellen van de snelheid van de lopende band ten opzichte van de snelheid van het bewegende mes kan de door het materiaal afgelegde afstand tussen twee snijbewegingen ingesteld worden. Wanneer al het materiaal loodrecht op de snijbeweging ligt wordt het tot de minimale afstand verkort. Wanneer het materiaal schuin ligt t.o.v. het mes of stropt, dus niet met de snelheid van de band beweegt, kan de haksellengte afwijken van de ingestelde lengte. Gedurende alle experimenten is de haksellengte ingesteld op 25 mm. Het gras is niet georiënteerd t.o.v. het mes op de lopende band gebracht. De verkregen verkorting van het materiaal was voldoende voor een goede verdere verwerking. Tijdens de hakselstap verandert het vochtgehalte van het materiaal niet; het materiaal wordt niet opgewarmd of gekoeld. De capaciteit van de gebruikte hakselaar bedraagt ongeveer 200 kg materiaal per uur, afhankelijk van de ingestelde haksellengte. Het verbruikte vermogen van een hakselaar is erg klein (< 10 kWh/ton materiaal). Bij verwerking op ‘commerciële’ schaal is deze voorbewerking overbodig.

4.2.2 Ontsluiting

De ontsluiting van het gras is op drie manieren getest:

- alleen extrusie
- extrusie gevolgd door drenking
- stoombehandeling gevolgd door extrusie en drenking

Tevens is de mogelijkheid onderzocht om de extruder als pers te gebruiken; de resultaten van die experimenten worden later beschreven (bij fase 3: Persing). De verschillende processtappen stomen, extrusie en drenking worden hieronder beschreven.

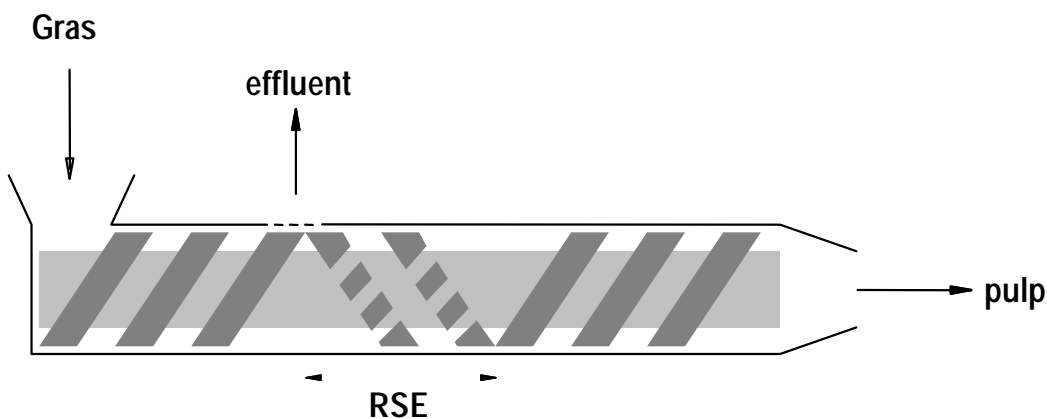
Stoombehandeling

Het doel van de stoombehandeling is het kapotmaken van de cellen van het grasmateriaal, zodat de inhoudstoffen vrijkomen en verwijderd kunnen worden. Op labschaal vindt deze behandeling

batchgewijs plaats in een groot roestvrij stalen vat. De stoom wordt verdeeld via een ijzeren geperforeerde plaat en onder in het vat ingevoerd. Vervolgens stroomt de stoom door het gras heen naar boven. Het gras is gedurende 15 minuten gestoomd. De benodigde hoeveelheid energie voor deze stap is groot en sterk afhankelijk van het vochtgehalte van het materiaal. De warmtecapaciteit van droog gras is ongeveer 1,4 kJ/kg.K. De warmtecapaciteit van water bedraagt 4,2 kJ/kg.K. Uitgaande van een opwarming van het gras van 20 °C tot net onder het kookpunt van water en een vochtgehalte van het gras van 80 % (20 % droge stofgehalte) is de benodigde hoeveelheid energie 290 kJ per kg materiaal. Op droge stof basis betekent dit een opgenomen vermogen van 400 kWh/ton.

Extrusie

Het gras is ontsloten in een meedraaiende tweeschroefs extruder, een Clextral BC-45. De schroefopbouw is aangepast aan de bewerking van gras. Er is gebruik gemaakt van één reverse screw element (RSE) met kleine openingen op beide assen. Voor dit element vindt drukopbouw plaats. Deze druk en de snijdende werking van het element zorgen voor de gewenste bewerking. Het gras is met de hand ingevoerd, waarna het met een stamper in de schroef gedrukt wordt. Om opwarming van het materiaal in de extruder te voorkomen wordt de wand van de extruder gekoeld. In figuur 4.1 wordt een schematische tekening van de extruder gegeven.



Figuur 4.1 *Schematische voorstelling van het extruderproces*

Door het veranderen van de schroefopbouw van de extruder en de hoeveelheid toegevoerd materiaal per schroefomwenteling is het mogelijk om de toegevoerde hoeveelheid energie aan het materiaal te variëren. Afhankelijk van deze toegevoerde hoeveelheid energie zal het gras meer of minder ontsloten worden. Het gehakselde grasmateriaal heeft een lage dichtheid vergeleken met bijvoorbeeld vezelgewassen zoals hennep, vlas en hout. In het geval van gras betekent dit dat voor een gegeven toerental van de extruder de maximale hoeveelheid materiaal die ingevoerd kan worden niet begrensd wordt door het vermogen van de extruder, maar door de invoer opening en de grootte van de vrije ruimte van de extruder elementen onder de invoeropening. Bij de keuze van een extruder voor pilot-schaal proeven zal hier rekening mee moeten worden gehouden. Het gebruikte vermogen voor de ontsluiting van het gras bij de experimenten is beperkt gehouden, ongeveer 100 kWh/ton. Door dit lage vermogen is het niet mogelijk om een grote effluent stroom te genereren voor de RSE. Daarom is er voor gekozen om geen effluent af te scheiden voor de RSE en al het vocht tijdens de persstappen te verwijderen. Deze keuze is gebaseerd op de eerst uitgevoerde tests met het gras van de AA-landen. Hierbij is gebleken dat voor het uitpersen van het gras met de extruder er veel meer energie nodig is in vergelijking met het uitpersen in de schroefpers.

Drenking

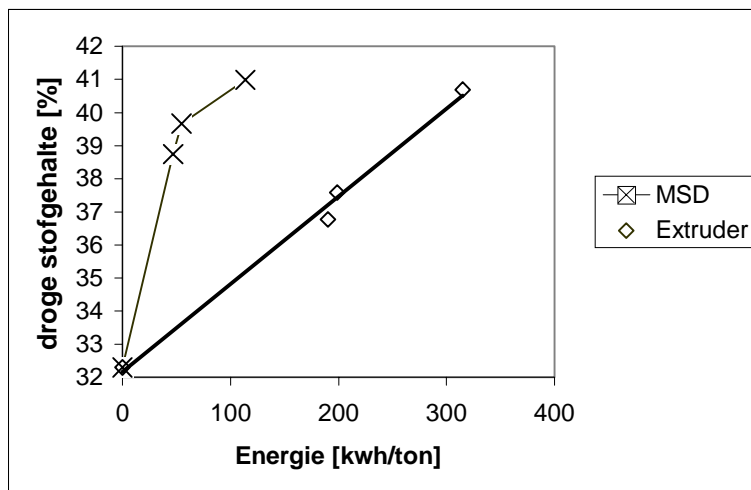
De drenking vond batchgewijs op labschaal plaats in grote roestvrij stalen vaten. Aan het einde van de drenktijd werd het drenkwater door een filterplaat onder in het vat verwijderd. Er is een

drenkverhouding van 1:20 gebruikt, d.w.z. 1 kg droge stof per 20 liter water. De drenktijd bedraagt 1,5 uur.

4.3 Resultaten methodiek ontwikkeling voor persing

Het uitpersen van het gras is zowel batchgewijs als continu uitgevoerd met drie bij ATO beschikbare persen: de clextral extruder met een schroefopbouw die zowel snijdt als perst, een schroefpers (Modular Screw Device) en een batch pers. Met de batch pers kan het gras tot een druk van 60 atmosfeer uitgeperst worden. Het gras wordt daarbij minder ver uitgeperst (minder vochtverwijdering) dan met de extruder en de schroefpers. In figuur 4.2 zijn de resultaten van de persingen van het gras uit Zwolle weergegeven. De bereikte droge stofgehalten zijn uitgezet tegen de benodigde energie tijdens de persing. Uit de resultaten blijkt dat met de schroefpers bij een lager energieverbruik hogere droge stofgehalten bereikt kunnen worden.

Het doel van het uitpersen van het gras is tweeledig. Enerzijds is het doel het verwijderen van verontreinigingen, anderzijds het verminderen van de hoeveelheid water in het persresidu. Door de persingen te combineren met een drenking wordt de hoeveelheid verontreinigingen verminderd.



Figuur 4.2 Droge stofgehalte als functie van de benodigde energie bij de persing van gras met behulp van MSD (Modular Screw Device) en Clextral extruder

Het uitpersen van het gras is op labschaal getest met een 6' Modular Screw Device (MSD) van Andritz Sprout Bauer. In deze enkelschroefs pers wordt aan het einde van de schroef een prop gevormd. Het materiaal wordt continu uitgeperst, doordat er aan de ene kant steeds nieuw materiaal aan de prop wordt toegevoegd en, aan het einde, de prop continu wordt verwijderd. Het effluent kan weglopen via gaten in de wand van de pers. De mate van persing kan ingesteld worden door het wijzigen van de schroefsnelheid en door het over een bepaalde afstand indraaien van 'vingers' aan het einde van de schroefpers. Deze vingers leveren weerstand aan de prop, zodat die niet te gemakkelijk door de schroef vooruit geduwd kan worden. De schroefpers werkt alleen optimaal bij een constante aanvoer van materiaal. Wanneer er geen materiaal meer ingevoerd wordt zal de prop niet meer uitgeperst worden. Echter omdat de schroef nog draait, wordt er in deze situatie nog wel energie verbruikt. Afhankelijk van het droge stofgehalte van het uitgangsmateriaal en het droge stofgehalte na de behandeling bedraagt de benodigde energie voor de uitpersing met de MSD ongeveer 40-60 kWh/ton. Wanneer twee opeenvolgende persstappen gebruikt worden is de totale benodigde energie ongeveer 100-120 kWh/ton. Op grote schaal is er persapparatuur beschikbaar die tot hogere droge stofgehalten kunnen persen dan de op labschaal gebruikte schroefpers. De benodigde energie op grote schaal is waarschijnlijk lager dan die in de schroefpers.

De meest optimale bewerkingsroute van maaisel bestaat uit de combinatie van een schroefpers en een extruder. Met de schroefpers kan met een relatief laag elektriciteitsverbruik een hoger droge stof gehalte bereikt worden, terwijl de snijdende werking van de extruder nodig is voor de ontsluiting van het materiaal.

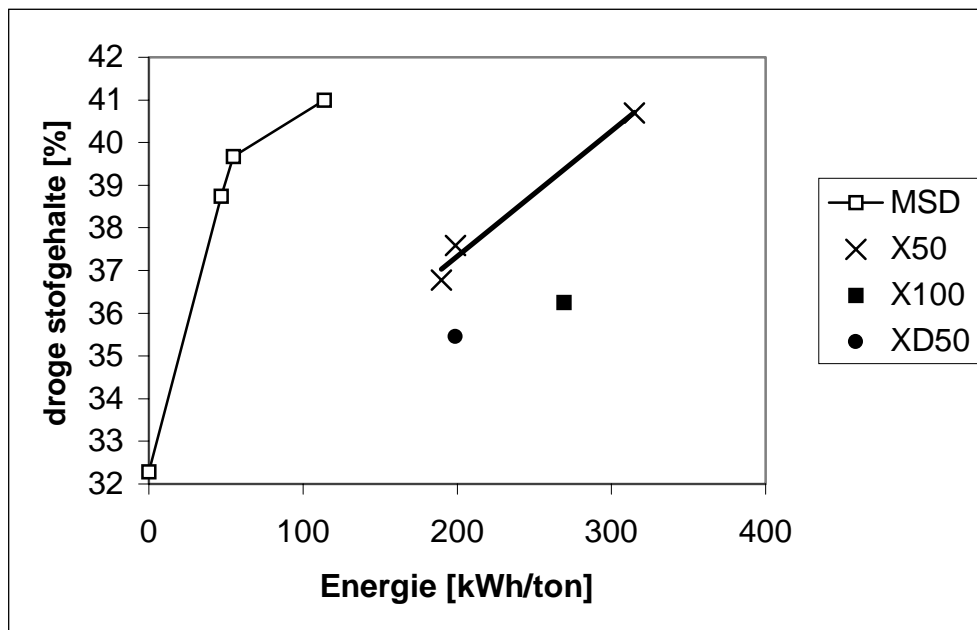
4.4 Resultaten van de bewerking van het maaisel per maaisel stroom

4.4.1 Gras uit woonwijk in Zwolle (AA-landen)

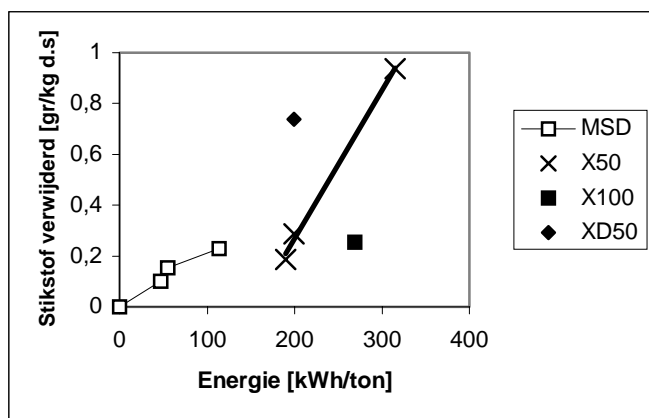
Het gras van de AA-landen is met name gebruikt voor het testen van de diverse persapparaten bij ATO en het onderzoeken van verschillende procesroutes. Het droge stofgehalte van het gras bedroeg 32,3 wt% bij aanvang van de proeven. Er is een vergelijking gemaakt tussen de hoeveelheid stikstof die verwijderd wordt uit het gras door verschillende processen:

- Het gras is gehakseld en daarna uitgerst in de Modular Screw device. Door het veranderen van de procesparameters is de mate van persing gevarieerd.
- Het gras is gehakseld en daarna in de clextral extruder versneden en uitgerst. Hierbij zijn proeven uitgevoerd met twee schroefsnelheden: 100 toeren per minuut (X100) en 50 tpm (X50). De werking van de extruder is beter bij 50 tpm, omdat door de lagere schroefsnelheid de hoeveelheid materiaal die per omwenteling ingevoerd kan worden groter is. (De invoersnelheid van het gras in de extruder is limiterend voor de totale doorvoer.)
- Het gras is gehakseld, gedrenkt en daarna geëxtrudeerd met 50 tpm (XD50).

In figuur 4.3 wordt het droge stofgehalte na bewerking gegeven als functie van de verbruikte hoeveelheid energie. In figuur 4.4 wordt de verwijderde hoeveelheid stikstof, aangetroffen in de effluenten, weergegeven als functie van de verbruikte energie.



Figuur 4.3 Droge stofgehalte van het behandelde maaisel als functie van de verbruikte energie bij verschillende processen; gehakseld en daarna uitgerst in de Modular Screw Device, gehakseld en daarna in de Clextral extruder versneden en uitgerst bij 50 toeren per minuut (X50) of 100 toeren per minuut (100X) en gehakseld, gedrenkt en daarna geëxtrudeerd met 50 tpm (XD50)



Figuur 4.4 Verwijderde hoeveelheid stikstof uit het maaisel als functie van de verbruikte energie bij verschillende bewerkingsprocessen. Gehakseld en daarna uitgeperst in de Modular Screw Device, gehakseld en daarna in de Clextral extruder versneden en uitgeperst bij 50 toeren per minuut (X50) of 100 toeren per minuut (X100) en gehakseld, gedrenkt en geëxtrudeerd met 50 tpm (XD50)

Uit de resultaten met maaisel uit de AA-landen kan het volgende geconcludeerd worden:

- Het persen met de MSD kost minder energie dan het uitpersen met de extruder. Het gebruik van de extruder is wel nodig om het gras te versnijden, waardoor er meer eiwit en dus stikstof verwijderd kan worden.
- De eiwitverwijdering bij 50 tpm (X50) is aanmerkelijk hoger dan bij 100 tpm (X100).
- De toevoeging van een drenkstep leidt, zoals verwacht, tot een grotere verwijdering van eiwit en het bereikte eind droge stofgehalte is lager. Dit komt doordat het gras i.p.v. met een droge stofgehalte van 32,3 wt% (uitgangsmateriaal) na drenking met een droge stofgehalte van 17,4 wt% in de extruder is ingevoerd.

4.4.2 Gras uit natuurgebied de Wieden

Het gras uit het natuurgebied de Wieden is gehakseld, geëxtrudeerd, gedrenkt en daarna uitgeperst in de MSD. Bij aanvang van de proeven bedroeg het droge stofgehalte 31,2 wt%, na de persstap 39,3 wt%.

De stikstofgehaltenes van de diverse stromen in het proces worden gegeven in tabel 4.2. Deze gehaltenes zijn gemeten bij ATO en wijken licht af van de door ECN aan de vaste producten bepaalde gehaltenes.

Tabel 4.2 Stikstofgehaltenes in de diverse processtromen (maaisel uit De Wieden)

Stroom	Stikstofgehalte ¹		
	(mg/gram droge stof)	(mg/liter)	
Startmateriaal	15	(0)	
Materiaal na extrusie	14	(2)	
Eindproduct	12	(2)	
Drenkvloeistof	35	(7)	245
Persvloeistof	40	(12)	888

¹ De spreiding in vier metingen is tussen haakjes gegeven.

Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat de afname van het stikstofgehalte bij dit proces gering is (15 mg/gram droge stof in het uitgangsmateriaal en 12 mg/gram droge stof in het persresidu). Het effluent dat uit het gras geperst wordt, bevat meer stikstof dan de

drenkvloeistof. Gezien de drenkverhouding van 1:20 is er tijdens de drenking 4,9 mg stikstof per gram droge stof verwijderd. Tijdens de persstap wordt er nog ongeveer 1,2 liter effluent per kg droge stof verwijderd: dus 1,1 mg stikstof per gram droge stof. De totale hoeveelheid stikstof in het effluent (6 mg/g droge stof) is aanmerkelijk groter dan het verschil in stikstofgehalte tussen begin en eindproduct (3 mg/gram droge stof). Dit verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de wijze van monsternamen; de uiteindelijke meting geschiedt aan enkele grammen, terwijl de totale hoeveelheid gras meer dan 500 kg bedraagt. Daarbij komt dat het nemen van een representatief monster uit de vloeistof lastig is, omdat de relatief geringe hoeveelheid vaste stof inhomogeen over de drenkvloeistof verdeeld is.

De meting van de stikstofgehalten in het begin en eindproduct van het proces verricht door ECN respectievelijk 1,47 wt% en 1,51 wt% laten een lichte toename van het stikstofgehalte zien.

4.4.3 Gras uit natuurgebied de Weerribben

Het gras uit het natuurgebied de Weerribben is gehakseld, geëxtrudeerd en gedrenkt, daarna uitgeperst nogmaals gedrenkt en weer uitgeperst. Het droge stofgehalte van het uitgangproduct bedroeg bij aanvang van de proeven 34,0 wt%. Na de eerste persing bedroeg het droge stofgehalte 44,5wt%; na de tweede persing 46,4 wt%.

De stikstofgehalten van de diverse stromen in het proces worden gegeven in tabel 4.3. Deze gehalten zijn gemeten bij ATO en wijken licht af van de door ECN aan de vaste producten bepaalde gehalten.

Tabel 4.3 *Stikstofgehalten in de diverse processtromen (maaisel uit De Weerribben)*

Stroom	Stikstofgehalte ¹	
	(mg/gr droge stof)	(mg/liter)
Startmateriaal	12	(1)
Na éérste persing	11	(0)
Eindproduct	9	(0)
Drenkvloeistof (1e)	30	(0) 150
Drenkvloeistof (2e)	25	(2) 25
Persvloeistof (2e)	40	(7) 170

¹De spreiding is tussen haakjes gegeven.

De stikstofconcentratie is wederom het hoogste in het effluent van de persstap. De totale verwijderde hoeveelheid stikstof in het effluent bedraagt ongeveer 3,8 mg/gram droge stof.

De bij ECN gemeten stikstofgehalten van begin en eindproduct respectievelijk 1,32 en 1,06 wt% liggen iets hoger dan de door ATO gemeten waarden.

4.4.4 Gras uit moerasgebied bij Baarle-Nassau

Het gras uit Baarle-Nassau is op dezelfde wijze behandeld als het gras uit de Weerribben. Het is gehakseld, geëxtrudeerd en gedrenkt, daarna uitgeperst nogmaals gedrenkt en weer uitgeperst. De drenktijd van de eerste drenking bedroeg 16 uur (overnacht) i.p.v. 1,5 uur. Het droge stofgehalte van het uitgangproduct bedroeg bij aanvang van de proeven 29,0 wt%. Na de eerste persing bedroeg het droge stofgehalte 37,4 wt% na de tweede persing 36,6 wt%.

De stikstofgehalten van de diverse stromen in het proces worden gegeven in tabel 4.4. Deze gehalten zijn gemeten bij ATO en wijken licht af van de door ECN aan de vaste producten bepaalde gehalten.

Tabel 4.4 *Stikstofgehalten in de diverse processtromen (maaisel uit Baarle-Nassau)*

Stroom	Stikstofgehalte ¹ (mg/gr droge stof)		Stikstofgehalte (mg/liter)
Startmateriaal	20,6	(0)	
Eindproduct	13,7	(0)	
Drenkvloeistof (1e)	45,7	(0)	548
Persvloeistof (1e)	49,5	(1)	396
Drenkvloeistof (2e)	51,8	(1)	207
Persvloeistof (2e)	41,0	(1)	451

¹De spreiding is tussen haakjes gegeven.

Het hogere stikstofgehalte in de vloeistof van de eerste drenking kan verklaard worden door de langere drenktijd. De totale verwijderde hoeveelheid stikstof in het effluent bedraagt volgens deze stikstof metingen ongeveer 22 mg/gram droge stof. Ook bij deze proef blijkt dat het opstellen van een massabalans over de gehele proef aan de hand van de metingen niet goed mogelijk is.

De bij ECN gemeten stikstofgehalten van begin- en eindproduct bedragen respectievelijk 2,51 en 1,67 wt% en liggen iets hoger dan de door ATO gemeten waarden.

4.4.5 Gras uit Zeeland van Natuurmonumenten

Het gras uit zeeland is gehakseld, gestoomd, geëxtrudeerd en gedrenkt, geperst, gedrenkt en daarna weer geperst. Het droge stofgehalte van het uitgangproduct bedroeg bij aanvang van de proeven 18,7 wt%. Tijdens extrusie bedroeg het droge stofgehalte 35,4 wt%. Na de eerste persing bedroeg het droge stofgehalte 39,4 wt%, na de tweede persing is dit 39,8 wt%. Het stikstofgehalte in de effluentstromen is niet gemeten. De stikstofmeting van ECN laat geen vermindering maar een verhoging van het stikstofgehalte in het product zien. Van 1,21 wt% naar 2,40 wt%.

Hoewel de grondstof bij het van de dijk afhalen er redelijk vers uitzag, is het tijdens transport en opslag sterk uitgedroogd. Hierdoor zijn de eiwitten blijkbaar sterker gebonden aan het materiaal.

4.4.6 Cultuurgras uit Kesseleik, Noord-Limburg

Het cultuurgras is in Kesseleik met de graspers van *Agromiscanthus* uitgeperst, daarna is een zelfde deelmonster van het gras bij ATO verwerkt. Dit monster is gehakseld, gestoomd, geëxtrudeerd en gedrenkt, daarna is het tweemaal geperst. Het droge stofgehalte van het uitgangproduct bedroeg bij aanvang van de proeven bij ATO 33,7 wt%. Tijdens extrusie bedroeg het droge stofgehalte 14,1 wt%. Na de eerste persing bedroeg het droge stofgehalte 36,0 wt%; na de tweede persing 38,7 wt%.

De afname van het stikstofgehalte in het residu is groter in het product uit de graspers van 3,0 wt% naar 1,54 wt% dan uit het proces van ATO van 3,0 wt% naar 2,37 wt%. Hiervoor zijn twee verklaringen. Ten eerste is het gras droger geworden voordat het bij ATO verwerkt is. Hierdoor is het eiwit vaster gebonden. Ten tweede lijkt de stoomstap in het proces niet de gewenste uitwerking te hebben.

4.5 Screening van de geschiktheid van de effluenten voor fermentatie

De geschiktheid van de effluenten voor fermentatie is afhankelijk van de concentraties aan fermenteerbare stoffen in de effluenten. Om de mogelijkheden voor fermentatie van de tijdens het proces geproduceerde effluenten te onderzoeken zijn de effluenten, verkregen tijdens het

verwerken van het gras uit Baarle-Nassau, getest op de aanwezigheid van suikers. De bepalingen van de hoeveelheid fermenteerbare verbindingen is uitgevoerd aan het maaisel afkomstig uit Baarle-Nassau, omdat het voorbereidingsproces toegepast bij dit materiaal het meest geschikt lijkt voor de grootschalige verwerking van gras.

Dit proces bestaat uit de volgende stappen: hakselen, extruderen, drenking 1, persstap 1, drenking 2 en persstap 2. Tijdens dit proces komen er vier effluent stromen vrij:

Effluent 1: Het drinkwater van drenkstep 1

Effluent 2: Het perswater van persstap 1

Effluent 3: Het drinkwater van drenkstep 2

Effluent 4: Het perswater van persstap 2

In een proces op industriële schaal zullen deze effluents niet als dusdanig vrijkomen. Op grote schaal is het van belang om de verschillende stappen aan elkaar te koppelen door bijvoorbeeld het drinkwater van drenkstep 2 te gebruiken in de eerste drenking.

De suikergehaltes van de effluents zijn bepaald met HPLC en een RI (Refractive Index) detector. Het glucose- en sacharosegehalte in de effluents is te laag om met de RI-detector aangetoond te kunnen worden ($\ll 0,01$ mg/100 mg droge stof). De aanwezigheid van fructose is wel aangetoond. De gemeten concentraties zijn in Tabel 4.5 weergegeven.

Tabel 4.5 *Resultaten van de fructose bepaling in de verschillende effluents (maaisel uit Baarle-Nassau)*

Effluent	Droge stof (wt%)	Fructose (mg/100 mg droge stof)	Fructose (mg/l)
Effluent 1: Drenking 1	1,23	0,159	19,6
Effluent 2: Persstap 1	0,76	0,042	3,2
Effluent 3: Drenking 2	0,38	0,117	4,4
Effluent 4: Persstap 2	1,10	0,020	2,2

Om de geschiktheid van de effluents voor o.a. fermentatie verder te onderzoeken is de hoeveelheid suikers bepaald die als polymeer voorkomen in het effluent. Omdat Effluent 1 zowel de grootste concentratie stikstof als de grootste concentratie glucose bevat is de hoeveelheid gebonden suikers van dit effluent bepaald. Met behulp van een hydrolyse stap zijn de gebonden suikers afgebroken tot vrije suikers. Dit effluent is onderzocht op de aanwezigheid van Rhamnose, Arabinose, Galactose, Glucose, Xylose en Mannose. Detectie met de RI detector levert alleen een meetbare concentratie Glucose van 1,32 mg/100 mg droge stof, overeenkomend met 207 mg/liter.

Hoewel deze hoeveelheid erg laag is, is m.b.v. een andere detector Pulse Ampèromatic Detector de concentratie aan vrije suikers na hydrolyse nogmaals gemeten. De gemeten waarden zijn in tabel 4.6 opgesomd.

Tabel 4.6 *Resultaten van de bepaling van de suikerconcentraties na hydrolyse in effluent 1 (maaisel uit Baarle-Nassau)*

Suiker	Concentratie (mg/100 mg droge stof)	Concentratie (mg/l)
Rhamnose	n.d. ¹	
Arabinose	0,088	13,8
Galactose	0,012	1,9
Glucose	0,017	2,7
Xylose	n.d.	
Mannose	n.d.	

¹ n.d.: niet detecteerbaar.

Bovenstaande resultaten geven aan dat er in de effluenten geen bruikbare hoeveelheid suiker aanwezig is voor fermentatie doeleinden. De aangetoonde hoeveelheden zijn dusdanig laag dat ze bij de gebruikte HPLC -analysemethoden problemen opleveren.

Er kan geconcludeerd worden dat voor het verkrijgen van een bruikbaar effluent het nodig is om de gebruikte waterhoeveelheden drastisch te verlagen en in het proces op industriële schaal het water te hergebruiken binnen het proces. Tijdens het proces dat gebruikt is voor het verwerken van het gras in Baarle-Nassau is de totale hoeveelheid water dat gebruikt is 40 l/kg droge stof. Aangezien het gras aangevoerd is met een droge stofgehalte van 29,0 wt% bedraagt de maximale hoeveelheid water die uitgeperst kan worden tot het evenwicht droge stofgehalte van 90 % 2,3 l/kg droge stof. Er vindt dus een verdunning van het uitgeperste water plaats met een factor $40/2,3 = 17,4$. Indien er recycling van het proceswater plaatsvindt, kan er een veel grotere concentratie aan fermenteerbare suikers in het effluent ontstaan, waardoor het mogelijk geschikt is voor fermentatieve productie van methaan of andere producten.

4.6 Vergelijking van de pers van Agromiscanthus en de pers die ATO heeft gebruikt

De pers van Agromiscanthus is een tegendraaiende dubbelschroefpers. Op beide schroeven zijn zowel snijdende als persende elementen aanwezig. De mate van persing wordt o.a. bepaald door de grootte van de uitgang van de pers. Het vocht wordt via gaten in de zijkant naar buiten geperst. Daarbij wordt ook een deel van het materiaal naar buiten geperst. Het verbruikte vermogen en de capaciteit van de pers zijn nog onbekend. De schroefpers van ATO is een enkelschroefpers die geen snijdende werking heeft. De mate van persing wordt o.a. bepaald door het indraaien van vingers, waarmee de vrije uitgang van de pers verkleind wordt. Ook het toerental van de as kan gevarieerd worden om een optimale persing te verkrijgen. De proeven met het gras uit Kesseleik laten zien dat de perskracht van de pers van Agromiscanthus groter is dan die van ATO. Indien het gras meerdere malen geperst wordt zal het uiteindelijke droge stofgehalte van het materiaal geperst met de pers van Agromiscanthus hoger zijn. Aangezien het energieverbruik tijdens de persing met de pers van Agromiscanthus niet is bepaald kan geen uitspraak gedaan worden over de verschillen in benodigde energie voor het uitpersen. Naast de voorgaande verschillen zijn de overeenkomsten tussen de twee persen groot. Er komen echter twee problemen naar voren:

- De afvoercapaciteit voor het effluent is niet groot genoeg om gras met een droge stofgehalte van ongeveer 20 wt% in één doorgang tot boven de 50 wt% droge stof te persen. Voor een optimale persing van vers gras zijn daarom meerdere persstappen nodig.
- De perscapaciteit is afhankelijk van de invoersnelheid van de grondstof, bij een optimale invoersnelheid wordt de capaciteit van de pers in kg/uur groter bij een gelijk eind droge stofgehalte.

4.7 De redenen voor het matig verwijderen van eiwit

De belangrijkste oorzaak voor het matig verwijderen van eiwit (dus de stikstof) is mogelijk gelegen in de verminderde versheid van het materiaal voor aanvang van de bewerking. De tijd tussen het maaien van het gras en het bewerken van het gras door ATO is bepaald door de huidige praktijk waarbij het gras niet direct wordt opgehaald. Hoewel er gepoogd is om de tijd tussen het maaien en het ophalen van het gras zo klein mogelijk te houden, is er bij alle proeven minstens één dag verschil tussen het maaien en het extruderen van het materiaal. Wanneer de huidige praktijk van gras maaien niet aangepast wordt, zal het materiaal ook op grote schaal minimaal één dag verouderen voordat het verwerkt wordt.

Deze veroudering leidt tot een sterkere binding tussen het eiwit en het vezel/cel-materiaal, hierdoor is het ontsluiten van het gras en daarna uitpersen van de vloeistof minder effectief. Het verschil tussen de eiwitverwijdering met de pers van *Agromiscanthus* en het proces van ATO moet ook op die manier verklaard worden.

Het effect van de stoombehandeling op de verwijdering van stikstof uit de plant is contraproductief. Waarschijnlijk is de stoombehandeling niet zwaar genoeg om het gewenste effect te bereiken.

Naar verwachting kan de mate van stikstofverwijdering ook vergroot worden door de totale hoeveelheid energie voor het proces te vergroten. Daarbij kan zowel de extrusie stap als de persstap geoptimaliseerd worden.

5. ANALYSE VAN DE MONSTERS

De analyses aan de uitgangsmonsters en het residu dat na de voorbereiding vrij komt zijn uitgevoerd conform de 'Best Practice List' [6]. Het vochtgehalte van zowel het uitgangsmateriaal als het residu is door ATO bepaald. De materialen zijn vervolgens bij ATO gedroogd alvorens ze naar ECN te versturen. Van het maaisel afkomstig uit de Wieden is een uitgebreide analyse uitgevoerd, dus inclusief de zware metalen.

5.1 Analyse resultaten

Tabel 5.1 *Analyse resultaten van het uitgangsmateriaal (onbewerkt materiaal)*

		locatie De Wieden Weerribben Baarle-Nassau Kesseleik Zeeland				
component	eenheid					
As	wt% dry ¹	6,8	9,4	9,6	39,4	18,4
Vocht	wt%	68,8	66,0	71,0	66,3	81,3
Vluchtig	wt% dry	73,3	71,3	70,6	48,1	65,3
cal.waarde ²	kJ/kg dry	18240	18345	20025	13245	16615
C	wt% dry	45,6	45,7	45,5	30,0	40,1
H	wt% dry	6,1	5,5	5,7	3,8	5,23
O	wt% dry	39,3	39,0	38,5	21,8	33,3
N	wt% dry	1,47	1,32	2,51	3,0	1,21
S	wt% dry	0,19	0,15	0,26	0,27	0,13
Cl	wt% dry	0,314	0,278	0,678	0,56	0,148
Ca	mg/kg dry	6611	4055	5901	3250	5166
K	mg/kg dry	5157	3261	20707	42275	4938
Na	mg/kg dry	1669	902	342	1322	457
P	mg/kg dry	1386	692	3072	5084	940
Si	mg/kg dry	11315	6736	2556	11267	30002

¹ dry = op basis van droge stof

² cal.waarde = calorische waarde (Higher Heating Value – HHV)

Tabel 5.2 *Analyse resultaten van het bewerkte materiaal*

component eenheid		locatie De Wieden	Weerribben	Baarle-Nassau	Kesseleik ATO	Kesseleik Agrom.	Zeeland
As	wt% dry ¹	5,8	14,8	9,3	46,7	50,3	42,7
Vocht	wt%	60,7	53,6	63,4	61,3		60,2
Vluchtig	wt% dry	76,1	68,9	72,9	43,2	39,6	46,4
cal.waarde ²	kJ/kg dry	19130	17330	18470	12175	10235	12540
C	wt% dry	46,2	42,8	45,7	26,7	24,5	29,2
H	wt% dry	6,0	4,8	5,3	3,0	3,2	3,9
O	wt% dry	39,0	36,8	39,2	16,7	20,1	21,1
N	wt% dry	1,51	1,06	1,67	2,37	1,54	2,40
S	wt% dry	0,131	0,088	0,131	0,18	0,12	0,20
Cl	wt% dry	0,077	0,015	0,021	0,061	0,154	0,066
Ca	mg/kg dry	5290	2890	4515	2180	2345	2295
K	mg/kg dry	1405	465	1255	7925	16810	8225
Na	mg/kg dry	425	195	125	450	810	435
P	mg/kg dry	730	240	480	2125	1980	2240
Si	mg/kg dry	14130	7230	3765	10835	12440	11280

¹ dry = op basis van droge stof

² cal.waarde = calorische waarde (Higher Heating Value – HHV)

5.2 Evaluatie van de analyse resultaten

In tabel 5.3 is per component het percentage weergegeven waarmee een aantal cruciale componenten zijn verwijderd door de uitgevoerde behandeling, zowel betrokken op droge stof basis als op droge en asvrije stof basis. Een negatief getal in de tabel duidt op verrijking. Er treden verschillen op in de percentuele verwijderingsgraad op basis van droge stof en op basis van droge en asvrije stof indien het asgehalte van het uitgangsmateriaal en het materiaal na bewerking sterk verschilt. Dit is het geval voor het monster 'Zeeland'. Het hoge asgehalte is veroorzaakt door de wijze van verzameling van het maaisel. Duidelijk is dat de resultaten van dit monster sterk afwijken van de overige monsters. Deze resultaten zijn niet in de verdere evaluatie meegenomen.

Tabel 5.3 *Verwijderingspercentages van een aantal componenten na behandeling van het maaisel. De percentages zijn berekend op basis van droge stof (dry) en op basis van droge en asvrije stof (daf)*

	N dry	N daf	S dry	S daf	Cl dry	Cl daf	Ca dry	K dry	Na dry	P dry	Si dry
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Wieden	- 2,7	- 1,3	30	30	76	76	20	73	75	47	- 25
Weerribben	20	15	40	33	95	94	30	86	79	65	- 7
Baarle Nassau	34	34	50	50	97	97	24	94	63	84	4
Kesseleik ATO ¹	21	10	33	24	89	88	33	81	66	58	4
Kesseleik Agro ²	49	37	56	47	73	67	28	60	39	61	- 10
Zeeland	- 98	- 183	-54	- 120	55	37	56	- 67	5	- 140	62

¹ Maaisel uit Kesseleik behandeld bij ATO

² Maaisel uit Kesseleik behandeld bij Agromiscanthus

De resultaten van het monster uit Zeeland geven aan dat enerzijds het kaliumgehalte toeneemt na bewerking en anderzijds het chloorgehalte afneemt. Dit wijkt af van de resultaten van de andere monsters en heeft ook geen duidelijk verklaring.

Uit tabel 5.3 kan worden opgemaakt dat de verwijderingsgraad van stikstof slechts in één geval groter dan 40 % is; in de andere gevallen werd geen stikstof verwijderd (Wieden) of tussen de 20-35 %. Voor de verwijdering van zwavel ligt de verwijderingsgraad significant hoger (30-55 %). De voorbehandeling heeft een groot effect op het chloorgehalte; chloor wordt in een aantal gevallen tot meer dan 95 % verwijderd. De minimale chloorverwijdering bedraagt 75 %. Ook kalium wordt in hoge mate verwijderd tijdens de voorbehandelingsstap (60-95 %). De verwijderingsgraad van Ca bedraagt 20-30 %, terwijl de verwijderingsgraad van P ligt tussen 45 en 85 %.

De afname in het gehalte kalium en chloor is eerder gerapporteerd voor stro door uitspoeling met regen [15]. Uitgebreide tests waarin het effect door uitspoeling van stro is gemeten [16] gaven als resultaat dat zowel in rijststro als tarwestro chloor tot ca. 90 % kon worden verwijderd. Zwavelverwijdering vond plaats tot een percentage van 33 % (rijststro) en 75 % (tarwestro). In Stikstof werd nauwelijks verwijderd tijdens de uitspoelingstests. Soortgelijke resultaten (N-verwijdering: 6-45 %; S-verwijdering: 40-77 %; Cl-verwijdering: 90-100 %) zijn gemeld voor stro en switchgrass [17-18].

Zowel uit de resultaten in dit project als de literatuur kan worden geconcludeerd dat een hoge verwijderingsgraad van chloor en kalium kan worden bereikt. Op basis van dit project en informatie in de literatuur kan een globale volgorde van de mate van verwijdering van de verschillende componenten opgesteld worden:

N, Ca < S < Na, P < Cl, K

De samenstelling van het maaisel zal variëren afhankelijk van het tijdstip van maaien en de locatie waar het maaisel vandaan komt. Materiaal dat in voorjaar en vroege zomer wordt aangevoerd zal een relatief hoger gehalte aan vrije suikers en stikstof (en dus eiwit) hebben. Later in het seizoen zal het eiwit en stikstofgehalte (sterk) afnemen terwijl de vezelige fractie toeneemt.

5.3 Vergelijking met brandstofsspecificaties Amer en Cuijk

De samenstelling van een tweetal maaiselstromen voor en na bewerking is in tabel 5.4 vergeleken met de brandstofsspecificaties, zoals die bij de Amer centrale (vergassing) en de Cuijk centrale (verbranding) gehanteerd worden. Ook is in deze tabel een gemiddelde samenstelling van wilg ter vergelijking opgenomen.

Tabel 5.4 *Brandstofsificaties van houtvergasser (Amer-9) en verbrandingsinstallatie (Cuijk) en de samenstelling van het uitgangsmateriaal en het materiaal na bewerking uit de Wieden en Weerribben. Bij referentie is het identificatie nummer (ID-nummer) uit de database Phyllis weergegeven [14]*

component	eenheid	Amer-9	Cuijk	wilg	Wieden	Wieden	Weerr.	Weerr.
		sloophout	'schoon'	gemiddelde	voor	na	voor	na
			hout	waarde				
referentie		ID-1287			ID-1855	ID-1856	ID-1924	ID-1925
HHV ¹	kJ/kg daf ³			19800	19571	20308	20246	20317
LHV ²	kJ/kg daf			18500	18143	18918	18919	19081
water content	wt%	15-20	20-50		68,8	60,7	66,0	53,6
ash content	wt% dry ⁴	2,4-6	1-6	1,9	6,8	5,8	9,4	14,7
N content	wt% dry	1 avr	0,2-0,9	0,63	1,47	1,51	1,31	1,06
S content	wt% dry	0,05-2	0,02-0,13	0,06	0,19	0,13	0,14	0,09
Cl content	wt% dry	0,009-0,2	< 0,2	0,014	0,31	0,077	0,28	0,015
F content	wt% dry	0,00003-0,0012	< 0,02	0,003				
BLA ⁵ -metalen								
As (arseen)	mg/kg dry	1-20	0,02-1	1,3	1,2	1,1		
Cd (cadmium)	mg/kg dry	0,5-3,0	< 2	2,4	0,11	0,09		
Cr (chrom)	mg/kg dry	5-120	< 25	2,9	0,3	20		
Cu (koper)	mg/kg dry		3-25	13,2	5,1	7,6		
Co (kobalt)	mg/kg dry		< 1	0,6	0,09	32		
Hg (kwik)	mg/kg dry	0,1-1,5	< 0,05	0,1				
Mn (mangaan)	mg/kg dry		8-150	10	290	240		
Ni (nikkel)	mg/kg dry		< 20	26	0,5	34		
Pb (lood)	mg/kg dry	50-1000	< 25	235				
Sb (antimoon)	mg/kg dry	2-20	< 2	2,5	0,94	0,37		
Se (selenium)	mg/kg dry		< 2	< 1				
Sn (tin)	mg/kg dry	1-5	< 5	2		0,5		
Te (tellurium)	mg/kg dry		< 2	< 1				
V (vanadium)	mg/kg dry		< 10	0,3	0,5	1		
BAGA ⁶ -metalen								
Ba	mg/kg dry		5-50	4	39	42		
Be	mg/kg dry							
Mo	mg/kg dry		< det.lim. [#]	0,5		2,3		
P	mg/kg dry		35-1910	710	1400	730	690	240
Tl	mg/kg dry							
W	mg/kg dry							
Zn	mg/kg dry	100-1500	97	130				

det.lim. [#]

= detectie limiet

¹ HHV = Higher Heating Value

² LHV = Lower Heating Value

³ kJ/kg daf = kJ per kg droog en asvrij materiaal

⁴ wt% dry = gewichtspercentage droge stof

⁵ BLA = Besluit Luchtmissies Afvalverbranding

⁶ BAGA = Besluit Aanwijzing Gevaarlijk Afval

Uit deze tabel blijkt dat op basis van de samenstelling onbehandeld maaisel niet voldoet aan de volgende brandstof specificaties:

vocht, as, stikstof, zwavel en chloor

Na de voorbereiding vallen de gehalten aan zwavel en chloor binnen de brandstof specificaties van zowel Amer als Cuijk. Het vochtgehalte, asgehalte en stikstofgehalte is na voorbereiding nog niet voldoende afgenomen. Deze constatering is ook van toepassing op het maaisel afkomstig uit Baarle-Nassau en Kesseleik.

Het zwavelgehalte na voorbehandeling is nog steeds hoger dan het zwavelgehalte van wilg, terwijl het chloorgehalte in het geval van maaisel uit de Weerribben dat van wilg benadert. Duidelijk is wel dat het asgehalte van de maaisel stromen hoger is in vergelijking met dat van wilg.

Opvallend is dat de gehalten aan chroom, kobalt en nikkel in het bewerkte maaisel sterk zijn toegenomen ten opzichte van het uitgangsmateriaal. Dit duidt op verontreiniging door de voorbewerking, waarschijnlijk veroorzaakt door metaalslijpsel afkomstig van de extruder. Dit is eerder door ATO geconstateerd bij andere extrudertests. De extruderdelen worden blootgesteld aan zeer verschillende omstandigheden, waardoor er relatief veel metalen uit de elementen verwijderd worden. Voor het metaal nikkel resulteert de voorbehandelingsstap in een overschrijding van de brandstofsamenstelling zoals opgesteld voor de verbrandingsinstallatie in Cuijk. Dit verschijnsel zal in een vervolgstap nader bekeken moeten worden, maar de verwachting is dat toepassing van een industriële extruder die voor één doel gebruikt wordt het probleem niet zal veroorzaken.

5.4 Gevolgen voor emissies bij verbranding

Op basis van de samenstelling van het uitgangsmateriaal en het materiaal na bewerking kan berekend worden wat de emissies van NO_x, HCl en SO₂ worden met als uitgangspunt dat stikstof, chloor en zwavel volledig in het rookgas terecht komen en dat geen extra thermische NO_x gevormd wordt.

De berekening is uitgevoerd bij een luchtvermaat van 1,3 en de emissie cijfers zijn teruggerekend naar 11 volume% O₂ in het rookgas. De resultaten van de berekening is opgesomd in tabel 5.5.

Tabel 5.5 *Theoretische concentraties in het rookgas (teruggerekend naar 11 vol% O₂ in het rookgas) van een verbrandingsinstallatie die met maaisel wordt bedreven. Aanname: 100% van het chloor, zwavel en stikstof uit de brandstof komt in het rookgas terecht*

	HCl mg/m ³ _n	SO ₂ mg/m ³ _n	NO ₂ mg/m ³ _n
Wieden uitgangsmateriaal	340	410	5250
Wieden na bewerking	85	280	5350
Baarle-Nassau uitgangsmateriaal	740	565	8950
Baarle-Nassau na bewerking	25	295	6150
emissie norm 'schone' biomassa ¹	geen eis	150	100-200
emissie norm 'vuile biomassa' ²	10	50	70-133

¹ Ontwerp emissie eisen VROM voor een stand-alone installatie bedreven op 'schone' biomassa

² Ontwerp emissie eisen VROM voor een stand-alone installatie bedreven op 'vuile' biomassa

Uit deze tabel blijkt dat de ontwerp emissie eisen en de berekende concentraties in het rookgas voor met name NO_x ver uiteen liggen. In de praktijk zal echter niet alle brandstof-stikstof, -chloor en- zwavel tijdens verbranding worden omgezet in NO_x, HCl of SO₂. Op basis van de genoemde aannames is voor het bereiken van de emissie eis voor NO_x van 200 mg/m³_n de maximale stikstof concentratie in de brandstof ca. 0,05 wt%. Door de voorbewerking van het maaisel wordt wel de (ontwerp) emissie eis voor HCl benaderd.

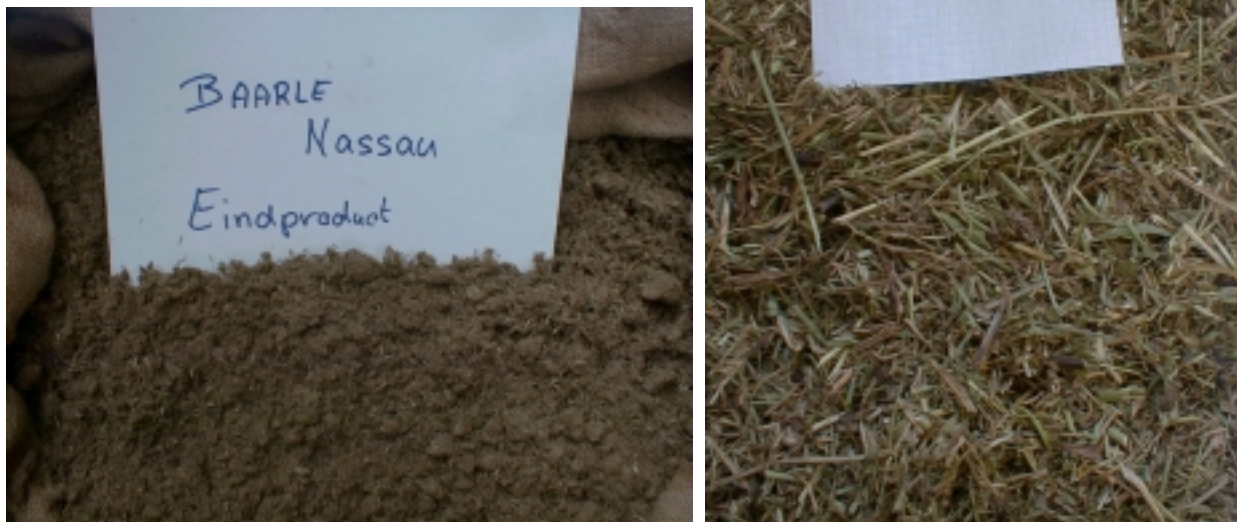
5.5 Morfologie van de brandstof

Grasachtige biomassa is een moeilijke brandstof wat betreft de handling. Het transport vanuit de opslag naar een tussenbunker en het transport vanuit de tussenbunker naar de verbrandings- of vergassingsreactor is één van de lastige operaties bij het bedienen van een installatie [23]. Het materiaal brukt in bunkers en veroorzaakt problemen in schroeftransporteurs. Hierdoor zal, indien maaisel in een bestaande installatie als tweede brandstof wordt toegepast, een apart voedingssysteem moeten worden ontworpen en geïnstalleerd.

Een belangrijk voordeel van de bewerking van het maaisel, naast de verwijdering van een aantal componenten en de winning van grondstoffen, is een verandering in de morfologie.

In figuur 5.1 zijn foto's te zien van maaisel afkomstig uit Baarle-Nassau. Op de rechterfoto is het uitgangsmateriaal zichtbaar, terwijl de linkerfoto het materiaal na bewerking laat zien. Duidelijk is zichtbaar dat de grasachtige structuur door de bewerking is verdwenen. Na bewerking is nog wel een vezelstructuur aanwezig, maar het materiaal heeft het voorkomen van gedroogde pulp. De genoemde voedingsproblemen zullen met dit materiaal veel minder zijn en het is zelfs denkbaar dat een bestaand voedingssysteem voor houtchips geschikt is.

Het is denkbaar dat de extrusie-pers-droog processen dusdanig worden geoptimaliseerd dat als eindproduct van de integrale voorbewerking pellets geproduceerd worden.



Figuur 5.1 Foto's van maaisel afkomstig uit Baarle-Nassau. De rechterfoto toont het uitgangsmateriaal. De linkerfoto toont het materiaal na voorbewerking

6. AGGLOMERATIEGEDRAG

6.1 Inleiding

Voor het vaststellen van het agglomeratiegedrag van brandstoffen is bij ECN een testprocedure ontwikkeld. Onder vergassings- of verbrandingscondities wordt in een bubbling wervelbed opstelling (WOB) de temperatuur waarbij bed agglomeratie optreedt gemeten. Het principe van de procedure is dat bij een gelijkblijvend brandstofvoedings- en lucht debiet de temperatuur in de reactor stapsgewijs verhoogd wordt door middel van externe (elektrische) verwarming. Er wordt gestart met een isotherme periode van vier uur bij de starttemperatuur van 750 °C. Vervolgens wordt de temperatuur met behulp van de elektrische heaters verhoogd met 25 °C en vervolgens gedurende 30 minuten op de nieuwe temperatuur gehouden. Deze stapsgewijze temperatuursverhoging wordt herhaald totdat een temperatuur van 900 °C is bereikt of tot agglomeratie optreedt. Agglomeratieverschijnselen uiten zich in temperatuurverschillen in het bed (voor een gedetailleerde beschrijving van de WOB-opstelling en de gevolgde procedure zie: <http://www.ecn.nl/biomass/wob/index.html>).

6.2 Experimentele condities van de agglomeratietests

De tests met het uitgangsmateriaal en het residu na persing zijn uitgevoerd onder vergassingscondities. Het materiaal is gedroogd en gemalen voorafgaand aan de tests. De zeeffractie van het maaisel dat is gebruikt voor de agglomeratietests is 0,71 mm - 2,0 mm. Vooraf aan iedere tests is het voedingssysteem met het toe te passen materiaal geijkt. Tijdens de tests wordt bij aanvang een leeg asvat onder de cycloon aangebracht, dat na afloop wordt gewogen. Op deze wijze wordt het cycloonas debiet bepaald.

In tabel 6.1 zijn de experimentele condities van de tests opgesomd.

Tabel 6.1 *Experimentele condities agglomeratietests*

parameter	eenheid	waarde
brandstof debiet	gram per uur	ca. 1000
lucht debiet	liter per minuut	ca. 16
bedmateriaal	-	zand
deeltjesgrootte bedmateriaal	mm	0,27 (gemiddeld)
hoeveelheid bedmateriaal	gram	1000
start temperatuur	°C	750
eind temperatuur	°C	890 (indien geen agglomeratie optreedt)

6.3 Experimentele resultaten

In tabel 6.2 zijn de experimentele resultaten van de agglomeratietests samengevat.

De agglomeratietests met materiaal uit de Wieden, Weerribben en Baarle-Nassau laten hetzelfde beeld zien. Het uitgangsmateriaal vertoont agglomeratie bij een temperatuur tussen 825-870 °C, terwijl het materiaal na voorbewerking geen agglomeratie vertoont (maximale vergassingstemperatuur tijdens de agglomeratietest is 890-900 °C gedurende 30 minuten).

Het materiaal uit Kesseleik bevat een zeer hoog asgehalte. Om per tijdseenheid voldoende 'brandbaar' materiaal toe te voeren is een hoog voedingsdebiet noodzakelijk. Hierdoor is de

hoeveelheid mineralen die per tijdseenheid met de brandstof wordt toegevoerd erg hoog. De as uit de brandstof hoopt zich op in het zandbed en veroorzaakt reeds bij lage temperatuur agglomeratieachtige verschijnselen. De agglomeratie met dit materiaal is meerdere keren uitgevoerd met steeds hetzelfde resultaat. Vanwege het exceptionele hoge asgehalte van deze maaisel stromen is het resultaat van deze agglomeratietests niet goed te vergelijken met de overige tests. De agglomeratietest met het uitgangsmateriaal is daarom niet uitgevoerd.

Tabel 6.2 *Experimentele resultaten van de agglomeratietests met een aantal maaisel stromen voor en na bewerking*

		Wieden		Weerribben		Baarle Nassau		Kesseleik		
		voor ¹	na	voor	na	voor	na	voor	na	
aggl. temp.	°C	870	geen ²	> 825	geen	825	geen	n.g. ³	ATO ⁴ 750	AM ⁵ 750
brandstofdebiet	g/uur	985	1100	990	670	1055	820		ca. 1400	ca. 1400
cycloonasdebiet	g/uur	53,0	58,0	20,3	33,6	51,4	38,9			
bedmateriaal	gram	1070	1040	1025	1670	1050	1400		2925	1725/ 1600
na afloop										
stookgas										
	CO vol%	14,5	16,0	15,2	15,4	14,1	15,3			
	H ₂ vol%	5,3	4,7	5,2	3,7	7,6	4,5			
	CO ₂ vol%	15,6	14,6	15,1	13,8	16,6	15,0			
	CH ₄ vol%	3,9	4,0	4,2	3,0	3,9	3,8			

¹ Experiment tweemaal uitgevoerd. Resultaten duplo meting zijn identiek.

² geen = er is geen agglomeratie opgetreden; de eindtemperatuur van 890-900°C is zonder problemen bereikt.

³ n.g. = niet gemeten

⁴ maaisel uit Kesseleik bewerkt door ATO

⁵ maaisel uit Kesseleik bewerkt door Agromiscanthus; agglomeratietest meerdere malen uitgevoerd.

In analogie met de analyse resultaten zijn de agglomeratie resultaten van het monster Kesseleik sterk afwijkend.

6.4 Evaluatie agglomeratietests

De algemene trend uit de agglomeratietests is dat onbehandeld materiaal agglomeratie vertoont bij een temperatuur tussen 825-870 °C, terwijl bewerkt materiaal geen agglomeratie vertoont tot 900 °C. Dit is geconstateerd voor maaisel uit de Wieden, Weerribben en Baarle-Nassau. Dit komt overeen met de resultaten van de analyses. Componenten die agglomeratie kunnen veroorzaken tijdens verbranding en vergassing (K, Na, Cl, P) worden deels verwijderd door de voorbehandeling.

Bedrijfstemperaturen van commerciële installatie voor vergassing en verbranding (m.u.v. wervelbedtechnologie) zijn veelal gelijk of hoger dan de temperatuur waarbij agglomeratie optreedt met het onbehandelde maaisel. In het geval van verbranding is de bedrijfstemperatuur van roosterovens en schroefstuwstokers hoger dan 900 °C, zodat de kans op operationele problemen (agglomeratie/verslakking) met onbehandeld maaisel verwacht kunnen.

Voor vergassing geldt dat vastbed vergassers over het algemeen een hoge temperatuur zone hebben (T > 1000 °C), zodat ook hier operationele problemen te verwachten zijn. In analogie met wervelbedverbranding is wervelbed vergassing voor dit type materiaal vanwege de lagere en controleerbare bedrijfstemperatuur eerder geschikt als conversie techniek.

Door de bewerking van het maaisel (en de verwijdering van een deel van de componenten die verantwoordelijk zijn voor agglomeratie) is de verwachting dat het aantal typen verwerkingstechnieken dat dit materiaal als brandstof kan benutten aanzienlijk wordt uitgebreid. Hierdoor neemt de kans toe dat bewerkt maaisel in bestaande houtgestookte installatie als tweede brandstof kan worden toegepast.

Het stortgewicht van bewerkt maaisel (op droge stof basis) bedraagt ca.120 kg per m³.

7. ECONOMISCHE EVALUATIE VAN KETEN

7.1 Ketenbeschrijving

Voor de totale handeling van maaien, inzameling, bewerking, transport, opslag en brandstoftoepassing zijn een groot aantal ketens mogelijk. De keuze voor de meest optimale keten wordt bepaald door verschillende factoren, zoals beheersstructuur van het te maaien gebied, tijdstip van maaien, hoeveelheid maaisel dat vrijkomt uit een specifiek gebied, afstand tot de openbare weg, bereikbaarheid van het specifieke gebied, afstand tot energiecentrale, etc. Uitgangspunt blijft dat de mineralen aanwezig in het maaisel uit het gemaaid gebied afgevoerd dienen te worden.

In eerste instantie wordt uitgegaan van de situatie dat het tijdstip van maaien door de beheerder van het te maaien gebied bepaald wordt en dat het tijdstip niet wordt aangepast aan het gebruik van maaisel voor productwinning en brandstoftoepassing. Dit betekent dat in het eerste deel van de keten er geen belangrijke wijzigingen ten opzichte van de huidige situatie optreden. Het maaien vindt plaats door dezelfde partijen en met dezelfde machines. De enige verandering die mogelijk kan plaatsvinden is dat bij het maaien en het 'omgaan met' het maaisel rekening wordt gehouden met de 'nieuwe' toepassing. Dit betekent dat er meer aandacht moet worden besteed aan het voorkomen van verontreiniging van het maaisel met zand en grond. Ook zal rekening gehouden moeten worden met het tijdstip tussen maaien en het beschikbaar zijn van het maaisel voor bewerking. Dit is met name belangrijk voor de productwinning.

Maaien vindt plaats gedurende korte periodes en veelal worden kleinere verspreid liggende oppervlakken gemaaid. Hierdoor kan het aantrekkelijk zijn dat de bewerkingsunit een mobiele installatie betreft, die op een toegankelijk plaats in de buurt van het maaien gebied wordt opgesteld. Analoot aan de huidige situatie wordt het maaisel verzameld en naar een locatie in de buurt van het te maaien gebied getransporteerd. Hiervandaan vindt momenteel het transport naar een composteringsinrichting of grasdrogerij plaats. In het geval van voorbereiding van het maaisel bevindt de bewerkingsunit zich op dit verzamelpunt. In de economische evaluatie is aangenomen dat het verschil tussen de huidige activiteiten bij het maaien en verzamelen op een verzamelpunt en bij de activiteiten in de 'nieuwe' maaisel toepassing in dit deel van de keten geen verschillen zijn.

De bewerkingsunit bestaat uit een pers/extruder en een wateropvang. Het vaste residu uit de pers wordt vervolgens getransporteerd naar een energiecentrale. Het persvocht wordt opgeslagen en afhankelijk van de samenstelling ter plekke voorbereid of in zijn geheel afgevoerd. Een mogelijke verwerking voor het persvocht is het bevochtigen van een composteringsproces. Verwacht wordt dat de transportkosten van het residu lager zijn dan de transportkosten van het niet-bewerkte maaisel vanwege het lagere vochtgehalte en de hogere stortdichtheid. Niet verdicht vers gras heeft een stortdichtheid van ca. 170 kg/m³ (30 wt% droge stof). Bij hetzelfde droge stofgehalte van 30 wt% is de bulkdichtheid van een baal ca. 200 kg/m³. In het algemeen heeft gras in de vorm van oprolbalen een dichtheid van 110-350 kg/m³ afhankelijk van het vochtgehalte [20, 21].

7.2 Investeringskosten

De belangrijkste investeringskosten zijn de kosten voor pers en extruder.

Een Clextral extruder met een capaciteit van 20 kg/uur kost 0,2-0,3 M€ Bij een verwerkingscapaciteit van 200 kg/uur bedragen de investeringskosten 0,4 M€ en een extruder

met een capaciteit van 2000 kg/uur kost 0,8 M€(gegevens afkomstig van Cleextral 2001). In de berekening is uitgegaan van een installatie met een capaciteit van 2000 kg/uur met als investeringskosten 0,8 M€

De geschatte kosten voor een pers met een capaciteit van 2000 kg/uur bedraagt 0,1 M€ Waarschijnlijk zijn er voor het proces twee persen nodig. De echte kosten van zo'n pers kunnen nog niet bepaald worden, omdat er dan eerst een keuze gemaakt moet worden welke soort pers het meest geschikt is. Voorlopig is uitgegaan van de investeringskosten van 1 M€ voor de extruder en persen. Als bedrijfstijd is gesteld dat de installatie 2000 uur per jaar gebruikt gaat worden voor de bewerking van maaisel. Bij een capaciteit van 2000 kg per jaar en een bedrijfstijd van 2000 uur per jaar wordt jaarlijks 4000 ton maaisel verwerkt. De afschrijvingskosten uitgedrukt per ton maaisel (uitgangsmateriaal) bedragen in dit geval zo'n 23 € per ton maaisel. In tabel 7.1 zijn indicatieve kosten en energieverbruiken voor voorbehandelingstechnieken opgesomd.

Tabel 7.1 *Indicatieve getallen (afkomstig uit de 'Marsroute-rapportage') voor kosten en energieverbruik voor voorbewerking van biomassa*

Handeling	kosten (incl. energie) per ton	energieverbruik per ton
Hakselen, chippen, shredderen	9,1 €	15 kWh
Pelleteren, briketteren	36,3 €	15 kWh
Fysisch ontwateren (tot 25% ds)	4,5 €	5 MJe
thermisch drogen (25% naar 85% ds)	45,4 €per ton	3 GJth per ton
	waterverdamping	waterverdamping

7.3 Opbrengst brandstof en producten

De brandstof wordt afgeleverd bij de poort van de energiecentrale met een vochtgehalte van 20 wt%. Materiaal met een dergelijk laag vochtgehalte kan probleemloos worden opgeslagen zonder kans op broei en is voldoende droog om als brandstof te worden gebruikt.

De opbrengst van producten is moeilijk aan te geven, omdat de eiwitwinning in het project niet optimaal is geweest. Een eiwit concentratie van minimaal 1% (N-gehalte van ca. 3 tot 5 gram pe liter) in het persvocht is nodig voor rendabele winning. De verwachting is dat bij het gebruik van vers materiaal en optimalisatie van de procedure de eiwitwinning aanzienlijk hoger zal zijn. Aangenomen is dat per ton maaisel (uitgangsmateriaal met een vochtgehalte van 70 wt%) 14,4 kg eiwit en 337,5 kg brandstof geproduceerd wordt Bij de productie van eiwit is aangenomen dat 50 wt% van het aanwezige eiwit kan worden gewonnen; 90 wt% van het organische deel komt beschikbaar als brandstof.

De mogelijke prijs voor de uit het persvocht te winnen eiwitten zijn afhankelijk van de samenstelling van deze eiwitten. Op dit moment lijkt een toepassing als veevoer het meest waarschijnlijk. De prijzen van eiwit voor veevoer zijn geschat op 0,5 €per kg (op basis van 90 % eiwit). Andere bronnen in deze prijsklasse zijn o.a. tarwe gluten, maïs gluten en aardappel eiwit. De brandstof levert 11,3 €per ton op. Per ton (vers) uitgangsmateriaal zijn de vermeden afvoerkosten 45,4 €per ton.

Dit betekent dat per ton uitgangsmateriaal de opbrengst 7 €(eiwit) en 15 €(brandstof) bedraagt en de vermeden afvoerkosten 45 €bedragen.

De kosten voor de gehele bewerking bestaan uit logistieke kosten, persen/extrusie, productwinning en drogen. De logistieke kosten zijn op nul gesteld, omdat deze niet wezenlijk verschillen t.o.v. de huidige verwerkingsroute (maaien, afvoeren, storten). Het kosten voor persen/extrusie zijn gesteld op 45,4 € per ton, in analogie met pelletiseren. Voor het drogen

(deels fysisch, deels thermisch) zijn de kosten geraamd op 18,2 € per ton. De kosten voor de productwinning zijn geschat op

Baten	€per ton uitgangsmateriaal
eiwit	7
brandstof	11
uitgespaarde verwerkingskosten	45
totale baten	63
Kosten	€per ton uitgangsmateriaal
afschrijving apparatuur	23
bewerkingskosten en productwinning	45
totale kosten	68

Uit deze globale balans kan worden opgemaakt dat de baten en kosten in dezelfde orde grootte liggen.

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Beschikbaarheid, energiepotentieel en CO₂ emissie reductie

De beschikbaarheid van maaisel afkomstig uit wegbermen en natuurgebieden bedraagt volgens diverse inventarisatiestudies jaarlijks tussen de 250-500 kton droge stof per jaar. Op basis van de beschikbaarheid en het conversierendement bij de toepassing van 100 kton maaisel (droge stof) 125.000.000 kWh worden geproduceerd. Deze hoeveelheid groene elektriciteit komt overeen met een CO₂ emissie reductie van 70 kton per jaar. Bij compostering van deze 100 kton maaisel zou de CO₂ emissie ca. 2 kton per jaar bedragen (gebaseerd op 20 kWh elektriciteitsverbruik per ton te composteren materiaal).

Voorbehandelingsmethoden van het maaisel

Het maaisel is op verschillende manieren bewerkt. De eerste stap is altijd verkleinen van het materiaal met een Pierret hakselmachine. Op ‘commerciële’ schaal kan deze bewerking waarschijnlijk worden overgeslagen. Het elektriciteitsverbruik van het hakselen bedraagt minder dan 10 kWh/ton.

Voor de ontsluiting zijn verschillende technieken (in serie) toegepast, t.w. extrusie, drenking in water en stoombehandeling. Het elektriciteitsverbruik van de ontsluitingsprocedures is lager dan 100 kWh per ton.

Het bereiken van een hoger droge stofgehalte door uitpersen leidt tot een toename van het elektriciteitsverbruik. Het elektriciteitsverbruik van de schroefpers is aanzienlijk lager in vergelijking met de Clextral extruder. Voor het verkrijgen van materiaal met een droge stofgehalte van 40 wt% is in het geval van de Clextral extruder ca. 300 kWh/ton nodig, terwijl een schroefpers ca. 50 kWh verbruikt. Omdat de snijdende werking van de extruder nodig is voor het ontsluiten van het gras, levert een combinatie van de extruder en de schroefpers i.p.v. alleen een extruder het laagste elektriciteitsverbruik op. De meest optimale route bevat dus een extruder, een schroefpers, hergebruik van drinkwater en mogelijk een nageschakelde droogstap.

Winning van eiwit en andere producten

De algemene conclusie is dat de verwijdering van stikstof beperkt is (maximaal 50 wt% op basis van vaste stof analyse). In een aantal gevallen is nauwelijks stikstof verwijderd. De concentratie kan aanzienlijk verhoogd worden door de drenkvloeistof te hergebruiken.

Een mogelijk oorzaak voor de matig tot slechte eiwitwinning kan de verminderde versheid van het materiaal zijn. Indien dit inderdaad het geval is zal in de praktijk direct na het maaien de bewerking plaats dienen te vinden.

De geschiktheid van het effluent voor fermentatie wordt bepaald door de concentratie aan vrije suikers. Het fructosegehalte in de verschillende vloeistofstromen is maximaal 20 mg/liter, hetgeen te laag is voor fermentatie doeleinden.

Het resultaat van de bepalingen van de metingen aan het persvocht geeft aan dat met het huidige proces, waarbij een grote hoeveelheid water wordt toegepast, de concentraties aan beschikbare producten te laag zijn om gewonnen te worden. Het terugbrengen van de gebruikte hoeveelheid water tijdens het proces is mogelijk door het hergebruik van het proceswater en vervanging van de drenkstappen door een tegenstroom-wasinstallatie.

Analyse van de monsters

Door de uitgevoerde voorbewerking daalt het vochtgehalte tot 55-65 wt% hetgeen onvoldoende is voor directe toepassing van het residu voor thermische conversie. Terugdringen van het vochtgehalte door optimalisatie van de persstap en waarschijnlijk het toevoegen van een extra droogstap is noodzakelijk.

Het verwijderingspercentage door de uitgevoerde voorbereiding is voor chloor en kalium zeer hoog (70-95 %). De gevolgde methodiek blijkt dus voor deze componenten uitstekend te functioneren. Een lager maar nog steeds substantieel verwijderingspercentage is verkregen voor zwavel en fosfor (S: 30-50 %; P: 45-85 %). De mate van verwijdering van de verschillende componenten kan worden samengevat als zijnde:



Onbehandeld maaisel voldoet niet aan de specificaties van de brandstof die wordt gebruikt bij de Amer centrale en in Cuijk wat betreft vochtgehalte, as, stikstof-, zwavel- en chloorgehalte. Na voorbereiding voldoet alleen nog het vochtgehalte, het asgehalte en het stikstofgehalte niet aan de specificaties. Optimalisatie van de gehele procedure en een droogstap zijn nodig.

Een opvallend fenomeen is de toename van de concentratie van een aantal metalen (Ni, Cr, Co) na voorbereiding t.o.v. het uitgangsmateriaal. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door slijtage van de extruder tijdens de bewerking.

Morfologie van de brandstof

Een belangrijk verschil tussen het uitgangsmateriaal en materiaal na bewerking is de fysische vorm. Het grasachtige materiaal verandert tijdens de voorbereiding in een pulpachtig materiaal. In ieder geval is de hanteerbaarheid van het materiaal veel gunstiger dan die van het uitgangsmateriaal. Hierdoor wordt de toepassing van bewerkt maaisel als 'tweede' brandstof in een houtgestookte installatie een realistische optie.

Bij het maaien en/of verzamelen van het maaisel is bij twee monsters een aanzienlijke verontreiniging opgetreden met zand. Dit is zowel voor de voorbereiding als de uiteindelijke conversie nadelig (extra slijtage, grotere hoeveelheid af te voeren as, grotere kans op agglomeratieverschijnselen). Bij implementatie van deze integrale verwerkingsroute zal dus aandacht moeten worden besteed voor het voorkomen van deze verontreinigingen.

Agglomeratiegedrag

Aan de hand van de uitgevoerde agglomeratietests is vastgesteld dat de voorbereiding de temperatuur waarbij agglomeratie optreedt, verhoogt van 825-870 °C tot een temperatuur hoger dan 900 °C. Dit betekent dat de toepasbaarheid van het materiaal na voorbereiding in verbrandings- of vergassingsinstallatie duidelijk toeneemt. Dit gemeten positieve effect op het agglomeratiegedrag is in overeenstemming met de geconstateerde verwijdering van elementen die verantwoordelijk zijn voor agglomeratie (K, Na, P, Ca, Cl). Deze verlaging van de kans op agglomeratie vergroot de mogelijkheden voor brandstof toepassing van het bewerkte maaisel aanzienlijk.

Economische evaluatie

De opbrengst bestaat uit de uitgespaarde verwerkingskosten, brandstofprijs en productopbrengst. De orde grootte van de opbrengst is naar verwachting vergelijkbaar met de kosten voor de bewerkingsstap. Onzekerheden in de keten zijn met name de effectiviteit van de productwinning en de logistieke aspecten.

Aanbevelingen

- Aanpassing van de huidige praktijk met betrekking tot de snelheid van het verzamelen en beschikbaar maken voor verdere verwerking van gras na het maaien. Uit verser gras kunnen de eiwitten beter en eenvoudiger verwijderd worden.
- Optimaliseren van de ontsluiting van het materiaal door middel van stoom om de productwinning te verbeteren kan leiden tot een meer efficiënte verwijdering van ongewenste elementen.
- Uitvoeren van een demonstratie van de gehele keten op semi-commerciële schaal, waarbij zowel maaisel bezitters als een afnemer van de bewerkte brandstof betrokken is. In eerste

instantie wordt aanbevolen de nadruk bij de optimalisatie van de voorbehandelingsstappen te leggen op brandstoftoepassing.

REFERENTIES

1. K.V. Sykora, L.J. de Nijs en T.A.H.M. Pelsma; Plantengemeenschappen van Nederlandse wegbermen, Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, Utrecht, 1993
2. A.P. Schaffers, M.C. Vesseur and K.V. Sykora; Effects of delayed hay removal on the nutrient balance of roadside grass plant communities. *J.of Appl.Ecology*, 35, 349-364, 1998
3. S. Landstrom, L. Lomakka and S. Andersson; Harvest in spring improves yield and quality of reed canary grass as a bioenergy crop, *Biomass and Bioenergy*, 11 (4), 333-341, 1996
4. J.W. Vermeulen en A. van der Drift; Brandstoffen uit reststromen voor circulerend wervelbedvergassing; rapportage fase 2, september 1998, Novem: 355197/4040
5. J. van Doorn, Brandstofanalyse en conversiemogelijkheden van maaisel en riet, ECN-CX--98-117, november 1998
6. G.C.A.M. Heemskerck; Best Practice list for biomass fuel and ash analysis, Novem 9820, 1998
7. Persoonlijke informatie van dhr. W.H. Vons (Natuurmonumenten).
8. R.A.P.M. Weterings, G.C. Bergsma, J. Koppejan, M.J.G. Meeusen-van Onna; Beschikbaarheid van Afval en Biomassa voor Energieopwekking in Nederland, Novem-Gave 9911, december 1999
9. P.A.M. Arts, A. van Beek en J.H.B. Benner; BIO-MASSTERCLASS: Een overzicht van de stromen en een aanzet tot prijsindexering, Bureau voor Communicatie en Advies over Energie & Milieu B.V., Novem-EWAB 9916, september 1999
10. J. Koppejan; EWAB Marsroutes, Taak 1: Formats voor biomassa en afval, Novem-EWAB januari 2000
11. A. Geerdes en A.J. Rossenaar; Oppervlakte en biomassa productie van Nederlandse wetlands, De Vlinderstichting, Wageningen, rapport nr.: VS 98.18, 1998
12. www.ecn.nl/unit_bs/ency/index.html
13. www.kaatje.nl/text/weerribben.html; www.deweerribben.nl
14. www.ecn.nl/phyllis; ECN/Novem database met samenstelling van biomassa en afval
15. B. Sander, Properties of Danish biofuels and the requirements for power production, *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, no. 3, 177-183, 1997
16. B.M. Jenkins, R.R. Bakker and J.B. Wei, On the properties of washed straw, *Biomass and Bioenergy*, vol. 10, no. 4, 177-200, 1996
17. D.C. Dayton, B.M. Jenkins, S.Q. Turn, R.R. Bakker, R.B. Williams, D. Belle-Oudry and L.M. Hill, *Energy & Fuels*, 13, 860-870, 1999
18. S.Q. Turn, C.M. Kinoshita and D.M. Ishimura, *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, no. 4, 241-252, 1997
19. Eindrapportage Multipersontwikkeling, *Agromiscanthus*, Novem-EWAB, april 2001
20. Energie uit groene residuen, Verslag van de workshop 19 november 1995, Novem 9524, december 1995
21. Thermische verwerkingsopties van stro en bermgras, R.V. Siemons, Novem 9101, augustus 1991
22. A. van der Knijff, Ethanol productie uit afval, Novem 9001, 1990
23. A. van der Drift en C.M. van der Meijden, Brandstofvoedingsproblemen bij ECN-vergassers, ECN-CX--99-097, september 1999