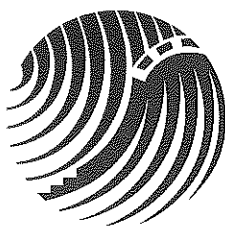


Simulatiemodel voor de reductie van de ammoniakemissie bij het toedienen en onderwerken van mest op bouwland

**Simulation model for the reduction of the
ammonia volatilization from surface
applied manure followed by incorporation
on arable land**

Ir. R.M. de Mol
Ir. J.F.M. Huijsmans

imag-dlo



CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Mol, R.M. de

Simulatiemodel voor de reductie van de ammoniakemissie bij het toedienen en onderwerken van mest op bouwland = Simulation model for the reduction of the ammonia volatilization from surface applied manure followed by incorporation on arable land / R.M. de Mol, J.F.M. Huijsmans. – Wageningen : IMAG-DLO. – Ill. – (Rapport / Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Milieu- en Agritechniek ; 95-28)

Met lit. opg. – Met samenvatting in het Engels.

ISBN 90-5406-134-0

NUGI 849

Trefw.: ammoniakemissie ; simulatiemodellen,

© 1995

IMAG-DLO

Postbus 43 – 6700 AA Wageningen

Telefoon 0317-476300

Telefax 0317-425670

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enig andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Simulatiemodel voor de reductie van de ammoniakemissie bij het toedienen en onderwerken van mest op bouwland

**Simulation model for the reduction of the
ammonia volatilization from surface
applied manure followed by incorporation
on arable land**

Ir. R.M. de Mol
Ir. J.F.M. Huijsmans

imag-dlo



Abstract

de Mol, R.M. and J.F.M. Huijsmans, 1995. Simulation model for the reduction of the ammonia volatilization from surface applied manure followed by incorporation on arable land. IMAG-DLO 95-28, Wageningen, 52 pp (nl)

When applying manure to arable land by surface spreading, volatilization of ammonia takes place. Reduction of ammonia volatilization can be achieved by incorporation of the manure into the soil. This reduction is dependent on the time lag between application and incorporation. This time lag depends on the working method and parameters like the dimensions of the plot and working speeds.

A simulation model to calculate the reduction of ammonia volatilization is described. The model is called CAESAR (Computer simulation of the Ammonia Emission of Slurry application and incorporation on ARable land). It is based on calculation of the time lag between application and incorporation and on a volatilization function of surface applied manure. Two examples (incorporation with a plough and a cultivator) show the possibilities. These show that both the incorporation method as well as the working method (one-man or two-man system) have great influence.

Keywords: simulation, ammonia, volatilization, arable land

Voorwoord

De ammoniakemissie na mesttoediening op bouwland kan worden beperkt door de mest onder te werken. De effectiviteit hiervan is onder andere afhankelijk van de werktuigkeuze en het tijdsverschil tussen de mesttoediening en het onderwerken. De werktuigkeuze is afhankelijk van de bedrijfsspecifieke omstandigheden, zoals o.a. de grondsoort. Het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken is afhankelijk van de werktuigkeuze en de werkorganisatie.

In het voorliggende rapport wordt een simulatiemodel beschreven dat de reductie van de ammoniakemissie aangeeft bij mest toedienen en onderwerken op bouwland, afhankelijk van werktuigkeuze en werkorganisatie.

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt door medefinanciering van het Financieringsoverleg Mest- en Ammoniakonderzoek (FOMA).

Aan dit onderzoek hebben meegewerkt mw. J.M.G. Hol en E.J.J. Lamaker, alsmede de medewerkers T. Koudenburg, M.J. Lawerman, G.J. Ramaker, C. Sonneveld en C.G.J. Vendrig van proefbedrijf "De Oostwaardhoeve" in Slootdorp.

Ir. A.A. Jongebreur
directeur

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	7
2 Achtergrond	9
3 Procesbeschrijving	11
3.1 Definities	11
3.2 Tweemanssysteem	13
3.3 Eenmanssysteem	15
4 Het emissiemodel	17
4.1 De emissie tot het onderwerken	17
4.2 De emissie na het onderwerken	19
4.3 De gemiddelde emissie	19
5 Het simulatiemodel	22
5.1 Input en output	22
5.2 Het simulatieprogramma	23
6 Resultaten	26
6.1 Uitgangspunten	26
6.2 Voorbeeld 1: Onderwerken met wentelploeg	27
6.3 Voorbeeld 2: Onderwerken met cultivator	30
7 Discussie	35
8 Conclusies	37
Summary	38
Literatuur	39
Begrippenlijst	40
Bijlage A Grafische presentatie van de resultaten (voorbeeld 1)	43
Bijlage B Grafische presentatie van de resultaten (voorbeeld 2)	48

Samenvatting

Beperking van de ammoniakemissie bij mesttoediening op bouwland is mogelijk door toedienen en onderwerken in twee opeenvolgende bewerkingen. De emissiereductie, t.o.v. niet onderwerken, is bekend uit metingen waarbij het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken zo klein mogelijk is gehouden. In werkelijkheid zal dit tijdsverschil variëren afhankelijk van de omstandigheden. In dit rapport wordt het simulatiemodel CAESAR (Computer simulation of the Ammonia Emission of Slurry application and incorporation on ARable land) beschreven waarmee de feitelijke emissiereductie bij mest toedienen en onderwerken op een bouwland-perceel wordt berekend.

Afhankelijk van de omstandigheden (afmetingen perceel, werksnelheden, werkbreedten e.d.) wordt in het model het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken berekend per plaats binnen een perceel. Voor de werkorganisatie zijn er de volgende keuzemogelijkheden:

- tweemanssysteem (gelijktijdig toedienen en onderwerken) of eenmanssysteem (afwisselend toedienen en onderwerken);
- bij de mesttoediening alleen hele omgangen maken (heen en terug over het perceel), alleen hele werkgangen maken (heen of terug) of de tank leeg rijden;
- bij het onderwerken dezelfde volgorde aanhouden als bij de mesttoediening (fifo-systeem) of zoveel mogelijk in omgekeerde volgorde werken (lifo-systeem).

Op basis van het emissieverloop van bovengronds toegediende mest en de emissiereductie van het onderwerkwerktuig wordt de emissie bepaald afhankelijk van het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken. Het emissieverloop is gebaseerd op metingen bij experimenten. De emissiereductie van het onderwerkwerktuig is gebaseerd op metingen bij direct onderwerken. Aangenomen wordt dat deze reductie na onderwerken steeds hetzelfde is, onafhankelijk van reeds uit de mest geëmitteerde ammoniak vóór het onderwerken. Door combinatie van het berekende tijdsverschil, het emissieverloop en de emissiereductie door het onderwerken per plaats binnen het perceel wordt de gemiddelde emissie voor het hele perceel berekend. Daarnaast geeft CAESAR ook het gemiddelde tijdsverschil en een verdeling van de tijd over mogelijke activiteiten voor de mestverspreider en voor het onderwerkwerktuig.

CAESAR is toegepast op twee voorbeelden. In het eerste voorbeeld wordt de mest ondergewerkt met een wentelploeg; bij de gekozen uitgangspunten blijkt vooral dat een tweemanssysteem resulteert in een hogere emissie dan een eenmanssysteem. In het tweede voorbeeld wordt de mest ondergewerkt met een cultivator; hierbij blijft het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken klein en is de emissie nauwelijks afhankelijk van de werkorganisatie. De emissie bij onderwerken met een cultivator is in sommige gevallen vergelijkbaar met de emissie bij onderwerken met een wentelploeg.

CAESAR moet worden toegepast op meer situaties om een goed inzicht te krijgen in de effecten van de uitgangspunten op de gemiddelde emissie voor een bouwlandperceel. Dit maakt het mogelijk om te optimaliseren, d.w.z. de minimale emissie bij toedienen en onderwerken onder bepaalde randvoorwaarden te bepalen.

CAESAR is een bruikbaar instrument om de effecten te bekijken van de omstandigheden en de werkorganisatie op de gemiddelde emissiereductie in praktijksituaties.

1 Inleiding

Het milieubeleid van de rijksoverheid is er onder andere op gericht de ammoniakemissie uit de landbouw vergaand te reduceren. In het jaar 2000 moet de ammoniakemissie uit de landbouw met 50% zijn gereduceerd, met een inspanningsverplichting van 70%, ten opzichte van de emissie in 1980 (Notitie Mest- en Ammoniakbeleid, 1993).

Beperking van de ammoniakemissie bij mesttoediening op niet-beteeld bouwland kan worden bereikt door de mest in of onder te werken. De volgende systemen kunnen worden toegepast:

- in één bewerking de mest rechtstreeks in de grond brengen (injecteur) of de mest toedienen en direct onderwerken (werktuig voor het onderwerken gekoppeld aan de mesttoedieningsmachine);
- in twee opeenvolgende bewerkingen eerst de mest toedienen en vervolgens onderwerken met bijvoorbeeld een ploeg of cultivator.

In verschillende onderzoeken is het emissiereducerend effect van onderwerktechnieken bepaald. Injectie reduceert de ammoniakemissie bijna geheel. Bij het toedienen en onderwerken in één bewerking geven de werktuigen die de mest en grond intensief mengen of de mest volledig met grond bedekken de hoogste emissiereducties (Bruins en Huijsmans, 1989; Mulder en Huijsmans, 1994; Huijsmans en Hol, 1995).

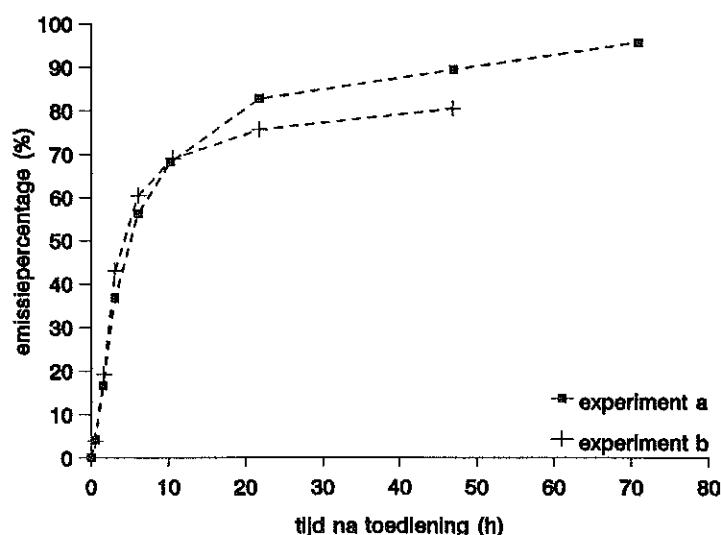
Bij het toedienen en onderwerken in twee opeenvolgende bewerkingen is, naast de werktuigkeuze, het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken van belang. De emissie van ammoniak uit de mest begint direct na de bovengrondse toediening op het land en is het hoogst de eerste uren na het toedienen. Gedurende de periode tussen toedienen en onderwerken kan een belangrijk deel van de ammoniak uit de nog niet ondergewerkte mest emitteren. Het onderwerken in een tweede bewerking is des te effectiever, naarmate dit zo snel mogelijk na de mesttoediening wordt uitgevoerd (Bruins en Huijsmans, 1989; Huijsmans en Hol, 1995). Bij de emissiemetingen is altijd een vaste periode genomen tussen het tijdstip van toedienen en het tijdstip van onderwerken. In werkelijkheid zal er een variabel tijdsverschil zijn tussen het moment van toedienen en het moment van onderwerken. Dit verschil is behalve van de capaciteit van de werktuigen (werkbreedte en snelheid) ook afhankelijk van de perceelsgrootte, mestgift en werkorganisatie.

Om de totale ammoniakemissie van een bemest en ondergewerkt perceel te bepalen is het nodig het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken voor verschillende capaciteiten van werktuigen, perceelsgrootten, werkorganisaties en mestgiften te weten. In het voorliggende rapport wordt het simulatiemodel CAESAR (Computer simulation of the Ammonia Emission of Slurry application and incorporation on ARable land) beschreven. CAESAR is bruikbaar voor de berekening van het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken van mest op bouwland in twee bewerkingen en de gevolgen voor de uiteindelijke ammoniakemissie.

In hoofdstuk 2 wordt achtergrondinformatie over de ammoniakemissie gegeven. In de hoofdstukken 3 tot en met 5 wordt de rekenmethode beschreven: een procesbeschrijving van het toedienen en onderwerken van mest (hoofdstuk 3), de modellering van de ammoniakemissie afhankelijk van het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken (hoofdstuk 4) en de koppeling in het simulatiemodel tussen de procesbeschrijving en de emissie (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 worden de resultaten van berekeningen voor twee voorbeelden gegeven. In hoofdstuk 7 volgt een discussie en tot slot worden in hoofdstuk 8 de conclusies gegeven. De gebruikte begrippen worden toegelicht in de opgenomen begrippenlijst.

2 Achtergrond

Ammoniumstikstof in mest kan emitteren in de vorm van ammoniak. De ammoniakemissie na mesttoediening op het veld wordt uitgedrukt als percentage van de met de mest toegediende hoeveelheid ammoniumstikstof. Uit bovengronds toegediende mest emitteert 20% tot 100% van de toegediende hoeveelheid ammoniumstikstof. Mulder en Huijsmans (1994) vonden bij 21 experimenten, waarin dunne varkensmest op bouwland werd toegediend, een gemiddelde emissie van 71% (37-100%). Huijsmans en Hol (1995) vonden in soortgelijk onderzoek een emissie van 67-90%. De hoogte van de emissie is afhankelijk van omgevingsfactoren (weersinvloeden, bodemconditie en stoppelhoogte) en bedrijfstechnische factoren, zoals soort toedieningswerktuig en mestgift. Hierbij kunnen een sterke wind, hoge temperatuur en globale straling emissieverhogend werken, terwijl regen emissieverlagend kan werken. De hoogte van de emissie wordt dus bepaald door een combinatie van elkaar mee- en tegenwerkende emissiefactoren. De ammoniakemissie van bovengronds breedwerpig verspreide mest verloopt de eerste uren na toediening snel. De hoge emissie kort na de mesttoediening is goed te zien aan het cumulatieve emissieverloop (figuur 1).



Figuur 1 De cumulatieve ammoniakemissie na bovengrondse mesttoediening als percentage van de toegediende ammoniumstikstof bij twee experimenten (naar Huijsmans en Hol, 1995).

Figure 1 The cumulative ammonia volatilization after surface application as a percentage of the applied ammonium nitrogen in two experiments (after Huijsmans en Hol, 1995).

In verschillende onderzoeken is het emissiereducerend effect van verschillende werktuigen voor het onderwerken gemeten (Bruins en Huijsmans, 1989; Mulder en Huijsmans, 1994; Huijsmans en Hol, 1995). De emissiereductie is het procentuele verschil in emissie bij niet of wel onderwerken. In het algemeen is de emissiereductie hoger bij een intensievere menging van mest en grond of bij een volledige bedekking van de mest met grond. Met de ploeg wordt de mest volledig afgedekt en kan een vergelijkbaar hoge emissiereductie (meer dan 90%) bereikt worden als met mestinjectie. Afhankelijk van de intensiteit van mengen bereiken andere werktuigen emissiereducties variërend van 37 tot 96%. Deze resultaten werden gevonden bij het direct

onderwerken van de mest, d.w.z. het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken was geminimaliseerd.

Bij na 3 uur onderwerken van de mest vonden Bruins en Huijsmans (1989) op kleigrond emissie-reducties van 68-78% voor een ploeg, 55-58% voor een rotorkoepel en 33-37% voor een cultivator. Huijsmans en Hol (1995) vonden in hun experimenten dat 40 tot 60% van de totale emissie van de niet ondergewerkte mest (referenties) optrad gedurende de eerste 3 uren na de mesttoediening. Onderwerken na de periode van 3 uur reduceerde de emissie op klei- en zandgrond met 48-63% voor een ploeg, 35-41% voor een rotorkoepel en 21% voor een cultivator.

De onderzoeken naar de ammoniakemissie bij bovengronds mest verspreiden en onderwerken hebben aangetoond dat een verkorting van de tijd tussen toedienen en onderwerken effectief is om de emissie te reduceren. In deze onderzoeken werd de ammoniakemissie gemeten in experimenten op percelen van ca. 0,15 ha. Op deze schaal is het direct, of het 3 uur na de mesttoediening, onderwerken goed te realiseren. In de praktijk zal het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken op een groter perceel variabel zijn en zal de werkelijke ammoniakemissie na onderwerken anders zijn dan in de kleinschalige veldexperimenten is gemeten. Bijvoorbeeld: direct onderwerken met een ploeg geeft een veel hogere emissiereductie dan met een cultivator. De feitelijke emissiereductie van een ploeg kan echter lager uitkomen dan van een cultivator, omdat de onderwerkcapaciteit (werkbreedte en snelheid) lager is; de toegevoegde mest zal langer bovengronds liggen alvorens te worden ondergewerkt.

Om de feitelijke ammoniakemissie te bepalen moeten dus bekend zijn:

- 1) het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken dat volgt uit de procesbeschrijving (hoofdstuk 3) en
- 2) de emissie afhankelijk van het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken (hoofdstuk 4).

Beide gegevens worden gebruikt in het simulatiemodel CAESAR om het emissiepercentage te berekenen (hoofdstuk 5).

3 Procesbeschrijving

3.1 Definities

Het verloop van het proces van toedienen en onderwerken van mest wordt bepaald door de werktuigkeuze, de werkorganisatie en de situatie ter plaatse. Op een perceel wordt eerst mest toegediend met bijv. een mengmestverspreider, daarna wordt de mest ondergewerkt. Het procesverloop bij het toedienen van mest op een perceel wordt bepaald door de perceelsafmetingen, de werksnelheid en de werkbreedte van het toedieningswerktuig. Daarnaast is ook de afstand tot de mestopslag, de mestgift, de tankgrootte e.d. van belang. Het verloop bij het onderwerken wordt bepaald door de perceelsafmetingen, de werksnelheid en werkbreedte van het onderwerkwerktuig.

Naast deze technische uitgangspunten heeft ook de werkorganisatie invloed op de processen bij het mest toedienen en onderwerken. De volgende keuzemogelijkheden zijn te onderscheiden:

1) Gelijktijdig of volgtijdig toedienen en onderwerken

Bij een **tweemanssysteem** wordt er gelijktijdig mest toegediend en ondergewerkt: één man is beschikbaar voor het toedieningswerktuig en één voor het onderwerkwerktuig. Bij een **eenmanssysteem** is één man afwisselend bezig met mest toedienen en onderwerken.

2) Werkmethode bij de mesttoediening

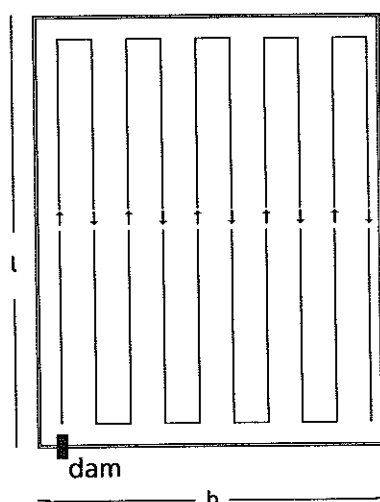
Bij het toedienen van mest rijdt het toedieningswerktuig (mengmest- of stalmestverspreider) heen en terug over het perceel. Eén oversteek van het perceel is een werkgang, twee opeenvolgende werkgangen vormen een omgang. Voor de mesttoediening worden drie werkmethoden onderscheiden:

- **Hele omgangen:** de verspreider begint alleen dan aan een nieuwe omgang (heen en terug) als er nog voldoende mest in de tank zit; zo niet dan wordt de tank eerst bijgevuld.
- **Hele werkgangen:** de verspreider begint alleen dan aan een nieuwe werkgang (heen of terug) als er nog voldoende mest in de tank zit; zo niet dan wordt er eerst bijgevuld.
- **Onderbroken werkgangen:** de verspreider gaat door tot de tank is leeggereden; de werkgang wordt dan onderbroken om bij te vullen en vervolgens, op dezelfde plek en in dezelfde richting, voortgezet.

3) Werkmethode bij het onderwerken

Ook het onderwerkwerktuig rijdt heen en terug in werkgangen over het perceel. Bij het begin van een nieuwe werkgang kan er gekozen worden welk gedeelte van het perceel in de volgende werkgang wordt ondergewerkt:

- Het perceelsgedeelte waarop het eerst mest is toegediend, wordt ook het eerst ondergewerkt: *first in, first out (fifo)*. Dit betekent dat bij het onderwerken dezelfde volgorde wordt aangehouden als bij de mesttoediening.
- Het perceelsgedeelte waarop het laatst mest is toegediend, wordt het eerst ondergewerkt: *last in, first out (lifo)*. Bij het onderwerken wordt zoveel mogelijk in omgekeerde volgorde (vergeleken met de mesttoediening) gewerkt. Dit kan gunstig zijn omdat de emissie direct na het toedienen het hoogst is en daarna langzaam afneemt.



Figuur 2 Schema van een perceel (met lengte l en breedte b) met werkgangen.
Figure 2 Scheme of a plot (with length l and width b) with passes.

De emissie bij het toedienen en onderwerken van mest is afhankelijk van de technische uitgangspunten en van de gekozen werkorganisatie. In de volgende twee paragrafen wordt beschreven hoe het proces van toedienen en onderwerken verloopt bij het tweemanssysteem en bij het eenmanssysteem. De basis is altijd een rechthoekig akkerbouwperceel met een bepaalde **lengte** en **breedte** (zie figuur 2). De bewerkingen (mest toedienen en onderwerken) worden uitgevoerd in de lengterichting met werkgangen afwisselend in de heen- en terugrichting. De snelheid waarmee de bewerkingen worden uitgevoerd is de **werksnelheid**. De mest wordt uitgereden met een toedieningswerktuig (mengmest- of stalmestverspreider), hier verder **verspreider** genoemd, en ondergewerkt met een onderwerkwerktuig (stoppelploeg, cultivator o.i.d.) dat hier **onderwerker** genoemd wordt. De verspreider en de onderwerker rijden heen en weer over het perceel, ieder met een constante werksnelheid.

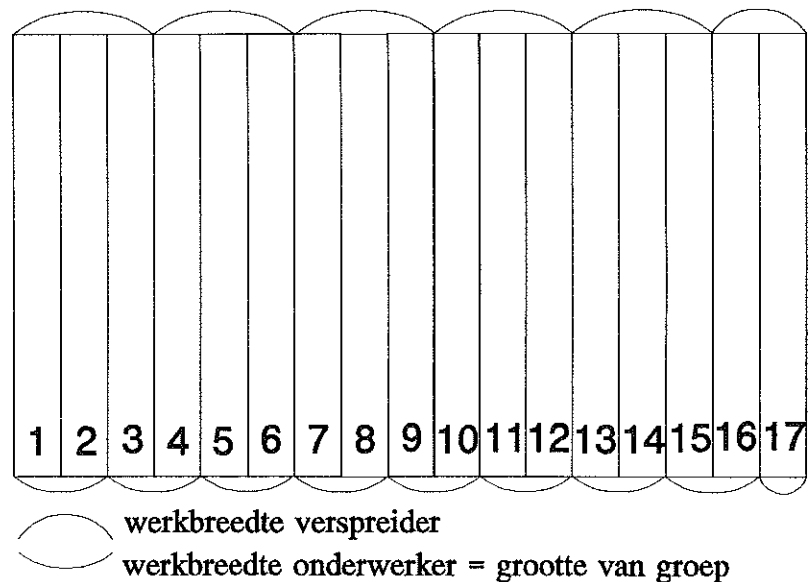
Het aantal werkgangen van de verspreider en van de onderwerker dat nodig is om het hele perceel te bewerken is afhankelijk van de perceelsbreedte en de (effectieve) **werkbreedte**. Meestal zal de verspreider een veel grotere werkbreedte hebben dan de onderwerker, daarom zal de onderwerker meer werkgangen maken dan de verspreider.

Er wordt verondersteld dat bij het begin van de simulatie de verspreider (met gevulde tank) en de onderwerker klaar staan op de oprit van het perceel, de **dam** (zie figuur 2).

Om het tijdsverschil (tussen mest toedienen en onderwerken) en de emissie in het simulatiemodel te kunnen berekenen wordt het perceel verdeeld in gelijke **stroken**. De gemiddelde emissie zal in eerste instantie per strook worden berekend. De gemiddelde emissie voor het perceel is het gemiddelde over alle stroken.

De lengte van elke strook is gelijk aan de lengte van het perceel. De breedte van elke strook is afhankelijk van de perceelsbreedte en de werkbreedte van de verspreider en onderwerker. Voor de strookbreedte kan de grootste gemene deler van de perceelsbreedte, de werkbreedte van de verspreider en de werkbreedte van de onderwerker, gebruikt worden. Bijvoorbeeld als

de perceelsbreedte 17 m is, de werkbreedte van de verspreider 3 m en de werkbreedte van de onderwerker 2 m, dan kunnen de stroken 1 m breed worden genomen (zie figuur 3). De breedte van het perceel moet een veelvoud van de breedte van de stroken zijn. Tijdens een bewerking met de verspreider of de onderwerker wordt een geheel aantal stroken meegenomen. Daarom moet de werkbreedte van de verspreider en van de onderwerker een veelvoud van de strookbreedte zijn. De verdeling van het perceel in stroken is op deze manier altijd mogelijk.



Figuur 3 Voorbeeld van de verdeling van een perceel in 17 stroken en 9 groepen.

Figure 3 Example of the division of a plot in 17 strips and 9 groups.

De verspreider bewerkt in elke werkgang een geheel aantal stroken. Als de verspreider klaar is met een werkgang, dan zijn de stroken geschikt om onder te werken. De stroken waarop mest is toegediend worden verdeeld in **groepen**, zodanig dat er in elke groep aaneengelegene stroken zitten met een totale breedte gelijk aan de werkbreedte van de onderwerker (zie figuur 3). De onderwerker zal in één werkgang telkens één groep bewerken.

Het verloop van het proces is afhankelijk van de gekozen werkorganisatie. Bij de simulatie worden de uitgangspunten en werkorganisatie als parameters meegegeven. In de volgende paragrafen wordt het verloop van het simulatieproces beschreven voor het tweemanssysteem en het eenmanssysteem.

3.2 Tweemanssysteem

Bij een tweemanssysteem zijn de verspreider en de onderwerker in principe onafhankelijk van elkaar. Hier wordt eerst het proces van de verspreider beschreven, daarna dat van de onderwerker. De verspreider start op tijdstip 0 en maakt werkgangen over het perceel afwisselend in de heen- en terugrichting. Na elke werkgang moet de verspreider **keren**.

Als de verspreider alleen **hele omgangen** maakt, dan wordt dit proces onderbroken (na een werkgang in de terugrichting) als er onvoldoende mest in de tank zit voor een volgende omgang. Voor het bijvullen van de verspreider zijn de volgende stappen nodig:

- rijden in de breedterichting over het perceel naar de dam, met een snelheid die groter zal zijn dan de werksnelheid (**veldsnelheid**);
- rijden over de weg naar de mestopslag, met een snelheid die op de weg geldt (**wegsnelheid**);
- de verspreider koppelen aan de mestopslag;
- mest in de verspreider pompen;
- de verspreider afkoppelen;
- terugrijden over de weg naar het perceel;
- rijden in de breedterichting over het perceel naar het punt waar de mesttoediening was onderbroken.

Er wordt verondersteld dat de tank van de verspreider volledig wordt gevuld, met uitzondering van de laatste keer. De laatste tank wordt gevuld met de hoeveelheid die nodig is om het resterende deel van het perceel te bemesten.

De verspreider maakt hele omgangen, afgewisseld met bijvullen, totdat het hele perceel is bemest. De laatste werkgang kan zo nodig smaller zijn dan de werkbreedte van de verspreider. Het is mogelijk dat voor het laatste gedeelte een werkgang in de heenrichting voldoende is (en dus geen hele omgang). In dat geval keert de verspreider na de laatste werkgang en rijdt in de lengterichting terug over het perceel (met de veldsnelheid). Als de verspreider klaar is, rijdt hij in de breedterichting terug naar de dam.

Als de verspreider alleen **hele werkgangen** maakt, dan wordt het toedienen onderbroken, na een werkgang (in de heen- of terugrichting), als er onvoldoende mest in de tank zit voor een volgende werkgang. Voor het bijvullen van de verspreider zijn de volgende stappen nodig:

- eventueel terugrijden in de lengterichting naar de rand van het perceel als de laatste werkgang in de heenrichting was;
- vervolgens de zeven stappen die ook nodig zijn voor het bijvullen in het geval van hele omgangen (zie hierboven).

De eerste werkgang na het bijvullen is altijd in de heenrichting. Voor het laatste stuk gelden dezelfde kanttekeningen als bij hele omgangen.

Als de verspreider geen hele werkgangen maakt, maar **onderbroken werkgangen**, dan wordt het toedienen onderbroken op het moment dat de tank leeg raakt tijdens een werkgang. Om de verspreider bij te vullen zijn de volgende stappen nodig:

- eventueel keren als de verspreider bezig was met mest uitrijden in de heenrichting;
- terugrijden in de lengterichting naar de rand van het perceel;
- vervolgens de zeven stappen die ook nodig zijn voor het bijvullen in het geval van hele omgangen (zie hierboven);
- rijden in de lengterichting naar het punt waar de verspreider was gestopt;
- eventueel keren als de verspreider bezig was met mest uitrijden in de terugrichting.

Voor het laatste stuk gelden opnieuw dezelfde kanttekeningen als bij hele omgangen.

In het geval van een tweemanssysteem start de onderwerker later dan de verspreider; hij heeft een bepaalde **wachttijd**. De onderwerker is continu bezig met werkgangen heen en terug over het perceel. Na elke werkgang moet de onderwerker **keren**. Bij de aanvang van een nieuwe werkgang zullen er meestal meer groepen beschikbaar zijn. In het geval van het **fifo**-systeem pakt de onderwerker voor een nieuwe werkgang de 'oudste' beschikbare bemeste groep. Bij het **lifo**-systeem wordt telkens de 'jongste' bemeste groep gekozen. Bij het fifo-systeem sluiten de groepen op elkaar aan. Bij het lifo-systeem kan het gebeuren dat de gekozen groep niet aansluit op de laatst-bewerkte groep, in dat geval moet de onderwerker eerst in de breedterichting over het perceel naar de nieuwe groep toerijden. Het onderwerken gaat door zolang er voldoende groepen beschikbaar zijn. Als er onvoldoende groepen beschikbaar zijn moet de onderwerker wachten. Dit kan voorkomen als de onderwerker een relatief grote werksnelheid heeft (bijv. een cultivator) en als het bijvullen van de verspreider veel tijd kost.

De onderwerker maakt in principe alleen hele omgangen, dit om te voorkomen dat hij aan de achterzijde van het perceel moet wachten. Hij start met een nieuwe omgang als er minstens twee groepen stroken beschikbaar zijn. De laatste groep kan een breedte hebben die smaller is dan de werkbreedte. Bij een oneven aantal groepen wordt de laatste groep niet in een volledige omgang ondergewerkt. In dat geval wordt nog één werkgang in de heenrichting gemaakt, daarna keert de onderwerker en rijdt in de lengterichting terug over het perceel. Als alle stroken zijn ondergewerkt rijdt de onderwerker in de breedterichting terug naar de dam.

3.3 Eenmanssysteem

Bij een eenmanssysteem zijn de processen van de verspreider en onderwerker meer met elkaar verweven. Er wordt afwisselend mest toegediend en ondergewerkt.

De verspreider start op tijdstip 0 en maakt werkgangen over het perceel, afwisselend in de heen- en terugrichting. Na elke werkgang moet hij keren.

In het geval van **hele omgangen** stopt de verspreider als bij het beëindigen van een omgang de inhoud van de tank onvoldoende is voor een volgende omgang. De verspreider rijdt dan terug in de breedterichting over het perceel naar de dam.

Bij **hele werkgangen** stopt de verspreider na het voltooien van een werkgang als de tankinhoud onvoldoende is voor een volgende werkgang. De verspreider rijdt terug naar de dam, zo nodig eerst in de lengterichting naar de rand van het perceel en vervolgens in de breedterichting.

In het geval van **onderbroken werkgangen** gaat de verspreider door tot de tank leeg is, dat zal tijdens een werkgang zijn. De verspreider keert zo nodig om en rijdt dan terug naar de dam; eerst in de lengterichting, daarna in de breedterichting.

Als de verspreider terug is bij de dam, wordt normaliter overgestapt op onderwerken en wordt de verspreider na het onderwerken bijgevuld. (In het model is echter ook de optie mogelijk om eerst bij te vullen alvorens te gaan onderwerken.) Voor het overstappen is een bepaalde **overstaptijd** nodig, gedurende deze tijd zijn zowel de verspreider als de onderwerker niet actief. De wisselingen vinden altijd plaats bij de dam, zodat de loopafstanden bij de overstap van de verspreider naar de onderwerker (of omgekeerd) minimaal zijn.

Na het onderwerken (zie hieronder) zal de verspreider worden bijgevuld. Hiervoor zijn de volgende stappen nodig:

- rijden over de weg naar de mestopslag;
- de verspreider koppelen aan de mestopslag;
- mest in de verspreider pompen;
- de verspreider afkoppelen;
- terugrijden over de weg naar het perceel.

De onderwerker maakt werkgangen over het perceel (heen en terug), afgewisseld met keren. Hierbij wordt telkens een groep stroken ondergewerkt waarop eerder mest is toegediend. Als het onderwerken (opnieuw) begint rijdt de onderwerker zonodig in de breedterichting over het perceel van de dam naar de groep stroken die is geselecteerd voor de volgende werkgang. Bij het **fifo**-systeem wordt telkens de oudste bemeste groep geselecteerd, bij het **lifo**-systeem de jongste.

Het onderwerken stopt als er onvoldoende groepen beschikbaar zijn voor een volgende omgang. De onderwerker rijdt dan in de breedterichting terug naar de dam. De overstap van de onderwerker naar de verspreider kost opnieuw een bepaalde overstaptijd. De verspreider wordt bijgevuld (als dat nog niet is gebeurd) en rijdt terug naar het afbreekpunt, in de breedterichting en bij onderbroken werkgangen ook in de lengterichting (evt. gevolgd door keren bij uitrijden in de terugrichting). Vervolgens gaat de verspreider door met mest toedienen.

Op deze manier wordt er afwisselend mest toegediend en ondergewerkt. Het mest toedienen en het onderwerken stopt als het hele perceel is bewerkt. Voor het laatste stuk gelden dezelfde kanttekeningen als bij het tweemanssysteem.

4 Het emissiemodel

4.1 De emissie tot het onderwerken

De emissie bij mest toedienen en onderwerken in twee opeenvolgende bewerkingen is opgesplitst in de emissie in de periode tussen toedienen en onderwerken en de emissie na het onderwerken. De modellering van de emissie tot het onderwerken (afhankelijk van het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken) is gebaseerd op metingen bij experimenten. In tabel 1 staan de resultaten van de emissie van bovengronds toegediende mest bij twee experimenten (Huijsmans & Hol, 1995; zie ook figuur 1). Deze resultaten zijn afhankelijk van de experimentele omstandigheden (zie hoofdstuk 2).

Tabel 1 Gemeten cumulatieve emissie bij twee experimenten als percentage van de toegediende ammoniumstikstof bij bepaalde tijdsverschillen tussen mesttoediening en meting (naar Huijsmans & Hol, 1995).

Table 1 Measured cumulative volatilization in two experiments as a percentage of the applied ammonium nitrogen for certain time lags between manure application and measurement (after Huijsmans & Hol, 1995).

experiment a (kleigrond)		experiment b (zandgrond)	
tijdsverschil (h)	emissie (%)	tijdsverschil (h)	emissie (%)
0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	4,2	0,5	3,8
1,5	16,6	1,6	19,3
3,0	36,8	3,0	43,0
6,0	56,2	6,0	60,4
10,2	68,1	10,5	68,9
21,7	82,8	21,7	75,7
46,9	89,3	46,8	80,4
70,9	95,4		

Voor het simulatiemodel moet de emissie bij willekeurige tijdsverschillen bekend zijn (bijv. bij een tijdsverschil van 1,0 h). Hiervoor wordt een emissiefunctie gebruikt die de (cumulatieve) emissie afhankelijk van het tijdsverschil geeft. Deze emissiefunctie kan op twee manieren bepaald worden:

- 1) door lineaire interpolatie tussen de tijdsverschillen waarbij gemeten is; dit geeft een functie opgebouwd uit lijnstukken tussen de meetpunten: een stuksgewijs **lineaire emissiefunctie**;
- 2) door een emissiefunctie te bepalen m.b.v. niet-lineaire regressie; dit geeft een **niet-lineaire emissiefunctie**.

Voor de niet-lineaire emissiefunctie wordt de volgende vorm verondersteld:

$$Em(t) = \frac{t}{\beta_0 + \beta_1 \cdot t} \quad (1)$$

met:

t tijdsverschil
 $Em(t)$ ammoniakemissie bij tijdsverschil t
 β_0 en β_1 parameters van de emissiefunctie

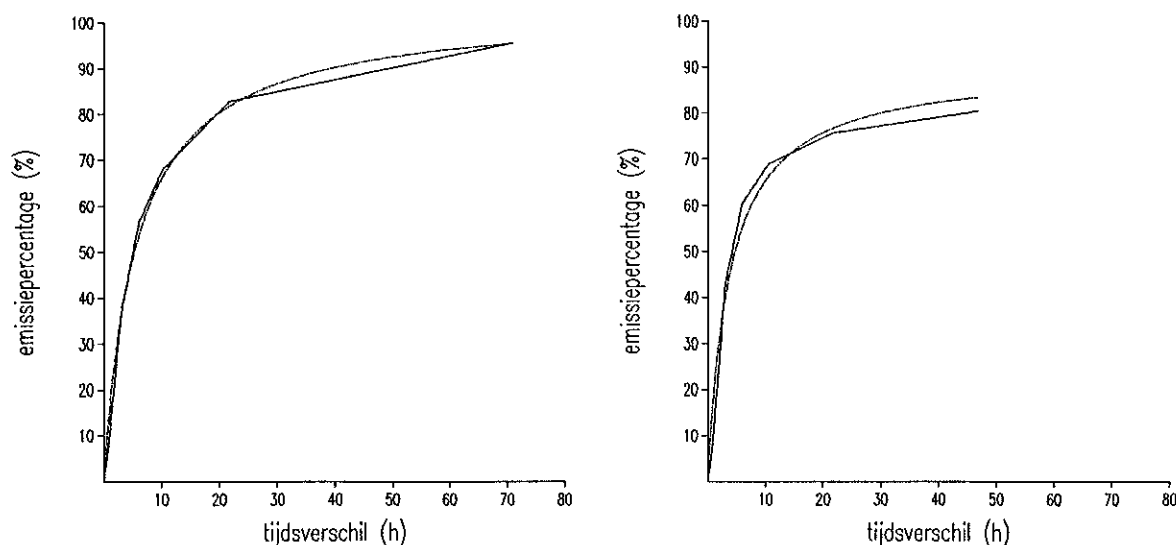
De regressie is mogelijk met behulp van een statistisch pakket. De resultaten bij de emissiegegevens uit tabel 1 staan in tabel 2.

Tabel 2 Parameters van de niet-lineaire emissiefunctie volgens formule 1 bij de metingen van twee experimenten (volgens tabel 1).

Table 2 Parameters of the non-linear volatilization function following formula 1 for the measurements of two experiments (according Table 1).

	experiment a	experiment b
β_0	0,05412	0,04219
β_1	0,00973	0,01109

De lineaire en niet-lineaire emissiefunctie voor de meetresultaten van experiment a en b, uit figuur 1, alsmede tabel 1 en 2 zijn afgebeeld in figuur 4.



Figuur 4 Lineaire en niet-lineaire emissiefunctie (resp. doorgetrokken en stippellijn) voor de meetresultaten van experiment a (links) en b (rechts), volgens tabel 1 en 2.

Figure 4 Linear and non-linear volatilization function (solid and dotted line) for the measurements in experiment a (left) and b (right), according to Table 1 and 2.

Het verschil tussen de lineaire en niet-lineaire emissiefunctie is gering voor kleine tijdsverschillen (minder dan 5 uur), daarna kunnen de verschillen iets groter worden. De niet-lineaire emissiefunctie lijkt beter omdat deze een vloeiend verloop heeft; bij de lineaire functie zijn er knikpunten die niet logisch verklaard kunnen worden. In het simulatiemodel kan naar keuze met lineaire of niet-lineaire functies worden gewerkt. In dit rapport worden alleen resultaten bij niet-lineaire emissiefuncties gegeven.

De uiteindelijke emissie zonder onderwerken, $Em(t=\infty)$, is bij de lineaire functie de emissie bij de laatste meting (bijv. na 70,9 uur). Bij de niet-lineaire emissiefunctie wordt de gefitte waarde bij hetzelfde tijdstip genomen.

In het simulatiemodel wordt telkens gewerkt met de emissieresultaten bij één experiment. Meer algemene resultaten zijn te krijgen door achtereenvolgens verschillende emissiecurves te gebruiken of een gemiddelde curve als input te nemen. In dit rapport worden resultaten gegeven bij de niet-lineaire emissiefuncties behorende bij de meetresultaten volgens tabel 1 en 2 (en figuur 4).

4.2 De emissie na het onderwerken

De totale emissie na het onderwerken bij een bepaald tijdsverschil na de mesttoediening, is in het algemeen niet bekend uit experimenten. In de experimenten is het tijdsverschil meestal zo klein mogelijk gehouden (Bruins & Huijsman, 1989 en Mulder & Huijsmans, 1994). In andere experimenten is de emissie bij een tijdsverschil van 3 uur gemeten (Huijsmans & Hol, 1995). Voor de modelberekeningen moet de emissie na het onderwerken bij een willekeurig tijdsverschil bekend zijn. Er wordt daarom verondersteld dat een onderwerkmethode een vaste reductie in de emissie geeft. Dit betekent dat de emissie na onderwerken een vast percentage is van de resterende ammoniumstikstof die zonder onderwerken zou emitteren. Dit percentage is in experimenten bepaald bij direct onderwerken. Hetzelfde percentage wordt gebruikt in het model als het tijdsverschil groter is. Deze veronderstelling lijkt redelijk op basis van de experimenten waarbij na 3 uur werd ondergewerkt (Huijsmans & Hol, 1995).

4.3 De gemiddelde emissie

Door de simulatie van de activiteiten van de verspreider en van de onderwerker is het mogelijk om het tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken te berekenen voor elk punt binnen het perceel. Zowel de verspreider als de onderwerker maken werkgangen over het perceel en bewerken daarbij telkens een geheel aantal stroken.

De emissie wordt per strook berekend, op basis van:

- 1) het tijdsverschil ΔT tussen de verspreider en de onderwerker op een punt x van de strook dat bepaald wordt bij de simulatie volgens de beschrijving in paragraaf 3.2 en 3.3;
- 2) de emissiefunctie die de emissie tot onderwerken geeft, afhankelijk van het tijdsverschil (paragraaf 4.1);
- 3) het emissiereductiepercentage dat de emissie na onderwerken bepaald (paragraaf 4.2).

Het tijdsverschil is afhankelijk van de werkrichting:

Als de verspreider en de onderwerker op een strook in dezelfde richting werken geldt:

$$\Delta T(x) = (T_{ow} + \frac{x}{V_w}) - (T_{ov} + \frac{x}{V_v}) \quad (2a)$$

Als de verspreider en de onderwerker op een strook in tegengestelde richting werken geldt:

$$\Delta T(x) = (T_{ow} + \frac{x}{V_w}) - (T_{ov} + \frac{l-x}{V_v}) \quad (2b)$$

Met:

- T_{ow} het tijdstip dat de onderwerker aan de strook begon [min]
- T_{ov} het tijdstip dat de verspreider aan de strook begon (is gelijk aan 0 bij de start van de simulatie) [min]
- V_w de werksnelheid van de onderwerker [m/min]
- V_v de werksnelheid van de verspreider [m/min]
- x plaats op de strook, $0 \leq x \leq l$ [m]
- l lengte van een strook (is gelijk aan de lengte van het perceel) [m]

De emissie is verdeeld over twee componenten: de emissie in de periode tussen toedienen en onderwerken en de emissie na het onderwerken. Voor het gemiddelde emissiepercentage E_1 van een strook in de periode tussen toedienen en onderwerken geldt:

$$E_1 = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} Em(\Delta T(x)) dx \quad (3)$$

Hierbij wordt geïntegreerd over de plaats x . In het simulatiemodel is alleen integreren over de tijd mogelijk, daarom wordt een transformatie toegepast:

$$x \equiv V_w \cdot t$$

Hiermee wordt de integraal tijdsafhankelijk:

$$E_1 = \frac{V_w}{l} \int_{t=0}^{t=T_l} Em(\Delta T(V_w \cdot t)) dt \quad (4)$$

Deze integraal loopt over de tijd dat de onderwerker met de strook bezig is (T_l is de tijd die de onderwerker nodig heeft om een hele strook onder te werken).

Na het onderwerken is er een resterende emissie E_2 . Dit is een percentage $RestEm_{meth}$ (afhankelijk van de onderwerkmethode) van de resterende ammoniak die zonder onderwerken zou emitteren:

$$E_2 = \frac{RestEm_{meth}}{100} (Em(t=\infty) - E_1) \quad (5)$$

Voor het totale emissiepercentage van een strook geldt:

$$E_{tot} = E_1 + E_2 \quad (6)$$

Het emissiepercentage van het totale perceel is het gemiddelde percentage van alle stroken.

Het gemiddelde tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken op een strook kan op dezelfde manier berekend worden:

$$\Delta T_{gem} = \frac{1}{l} \int_0^l \Delta T(x) dx = \frac{V_w}{l} \int_0^{\tau_l} \Delta T(V_w \cdot t) dt \quad (7)$$

De emissiereductie is bepaald door de uiteindelijke emissie zonder onderwerken en de totale emissie:

$$Emissiereductie = \frac{Em(t=\infty) - E_{tot}}{Em(t=\infty)} \cdot 100\% \quad (8)$$

5 Het simulatiemodel

5.1 Input en output

Voor de simulatie moet bekend zijn voor welke werkmethode er wordt gekozen:

- eenmanssysteem of tweemanssysteem;
- hele omgangen, hele werkgangen of onderbroken werkgangen;
- fifo-systeem of lifo-systeem.

Verder zijn de volgende input-gegevens voor CAESAR nodig:

Algemene gegevens:

- lengte van perceel [m]
- breedte van perceel [m]
- breedte van een strook [m]
- mestgift [m^3/ha]
- veldsnelheid: de snelheid van zowel de verspreider als de onderwerker bij een verplaatsing in breedte- of lengterichting [km/h]
- wacht-/overstaptijd: bij een tweemanssysteem de wachttijd voordat de onderwerker start, bij een eenmanssysteem de tijd die nodig is voor een overstap [min]

Emissiegegevens:

Als er in het model gewerkt wordt met een lineaire emissiefunctie dan zijn de gemeten percentages bij bepaalde tijdsverschillen nodig (zoals in tabel 1). Als er gewerkt wordt met een niet-lineaire emissiefunctie dan zijn de parameters van deze functie nodig (zoals in tabel 2).

Gegevens betreffende de verspreider:

- werksnelheid [km/h]
- werkbreedte [m]
- tankgrootte [m^3]
- keertijd op het perceel [sec]
- wegsnelheid (gelijk verondersteld voor het heen- en terugrijden) [km/h]
- afstand van het perceel tot de mestopslag (evt. gelijk aan 0 bij tussenopslag bij het perceel) [km]
- aankoppeltijd bij de mestopslag (incl. keertijd bij de opslag) [min]
- pompcapaciteit [m^3/min]

Gegevens betreffende de onderwerker:

- werksnelheid [km/h]
- werkbreedte [m]
- keertijd op het perceel [sec]
- emissiereductie van de onderwerkmethode, gekarakteriseerd door het emissiepercentage van de resterende ammoniak die na onderwerken alsnog emitteert [%]

De breedte van de stroken moet zo zijn dat de werkbreedte van de verspreider en van de onderwerker een geheel aantal stroken is. De perceelsbreedte moet bij voorkeur een geheel aantal werkbreedten van de verspreider en van de onderwerker zijn. De verschillende snelheden worden opgegeven in kilometers per uur en in het model omgerekend naar meters per minuut (zoals gebruikt in formule 2).

De output bestaat uit:

- het gemiddelde tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken (bepaald volgens formule 7);
- het gemiddelde emissiepercentage tot het moment van onderwerken (formule 4);
- het gemiddelde totale emissiepercentage (formule 6);
- de gemiddelde emissiereductie t.o.v. niet onderwerken (formule 8);
- de totale tijd die nodig is voor mest toedienen en onderwerken van het perceel;
- een verdeling van de totale tijd over de verschillende activiteiten, zowel voor de verspreider als voor de onderwerker.
- overige gegevens, zoals de emissie per strook, de route van verspreider en onderwerker etc.

5.2 Het simulatieprogramma

Het model CAESAR is ontwikkeld met het simulatiepakket PROSIM (PROSIM, 1994). Dit is binnen het landbouwkundig onderzoek het standaardgereedschap voor dergelijke toepassingen; het is ook gebruikt in verwant onderzoek (de Mol en Koning, 1992; Monteny et al., 1996). Hiermee is het mogelijk om simultaan continue en discrete processen te simuleren. De emissie is een continu proces, de bewerkingen zijn ook continue processen, maar zij worden op discrete tijdstippen onderbroken (bijv. om de verspreider opnieuw te vullen).

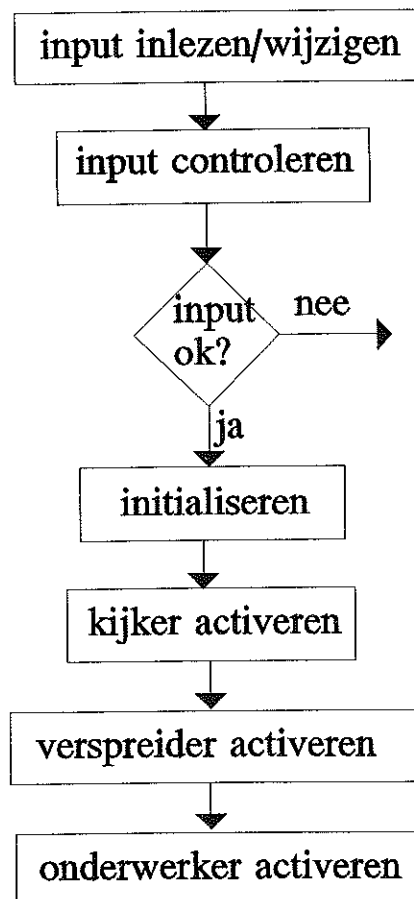
De simulatie volgt de procesbeschrijving zoals die in paragraaf 3.2 en 3.3 is gegeven. Dit maakt het mogelijk om de tijdsverschillen tussen mest toedienen en onderwerken te berekenen. Deze tijdsverschillen worden gebruikt om de emissie te berekenen (zie paragraaf 4.3). Het simulatiemodel bestaat uit verschillende modules. De opbouw van de basismodule is weergegeven in figuur 5.

Allereerst wordt de input ingelezen en wordt de mogelijkheid geboden om deze uitgangspunten te wijzigen. Als de input in orde is (werkbreedten moeten een geheel aantal stroken zijn e.d.) worden enkele vergelijkingen geïnitieerd (o.a. volgens formule 4 en 7) en worden de componenten (elementen van het model) geactiveerd:

De **kijker** is een kunstmatige component, hij observeert elke 10 seconden de toestand van het systeem en heeft geen actieve rol bij de simulatie.

De **verspreider** begint op tijdstip 0 met mest toedienen. Afhankelijk van de werkmethode kan de verspreider de volgende activiteiten hebben (zie procesbeschrijving):

- werken: bezig met mest toedienen;
- wachten: bij een eenmanssysteem wachten voor het overstappen naar de verspreider of tot de onderwerker klaar is;



Figuur 5 Structuur van de basismodule van het simulatieprogramma.
Figure 5 Structure of the base module of the simulation programme.

- rijden op het perceel: in de breedte- of lengterichting van het perceel;
- bijvullen: onder te verdelen in:
 - + rijden over de weg (heen en terug),
 - + aan- en afkoppelen (en keren) bij de mestopslag,
 - + pompen;
- keren: tussen twee werkgangen of voor/na een onderbroken werkgang;
- overstappen: bij een eenmanssysteem.

De verspreider is klaar als er op het gehele perceel mest is uitgereden en hij is teruggedren naar de dam.

De **onderwerker** begint na een zekere wachttijd met het onderwerken van bemeste stroken. Afhankelijk van de werkmethode kan de onderwerker de volgende activiteiten hebben (zie procesbeschrijving):

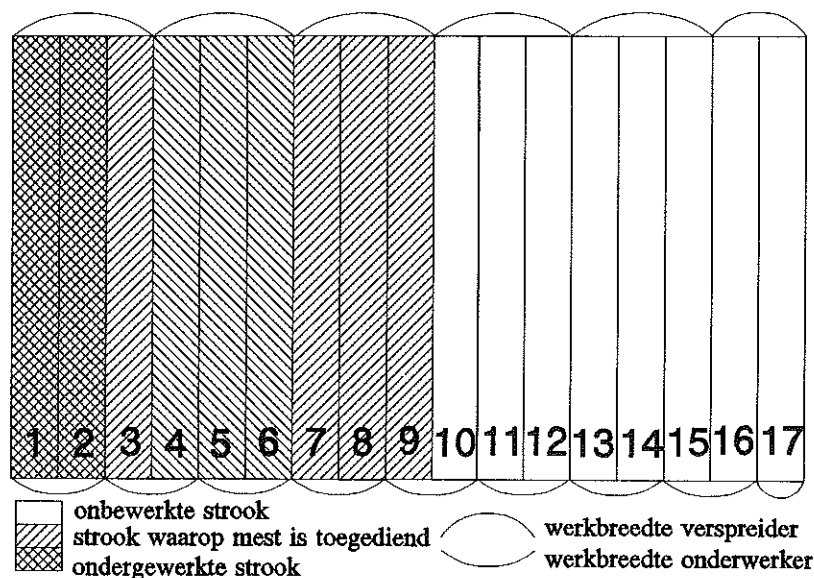
- werken: bezig met onderwerken;
- wachten: in een tweemanssysteem in het begin wachten of wachten totdat de verspreider weer voldoende stroken heeft bemest; in een eenmanssysteem wachten op de overstap naar de onderwerker of tot de verspreider klaar is;
- rijden op het perceel: in de breedte- of lengterichting van het perceel;

- keren: tussen twee werkgangen;
- overstappen: bij een eenmanssysteem;

De onderwerker is klaar als het hele perceel is ondergewerkt en hij terug is bij de dam.

Het simulatieprogramma stopt als de verspreider en de onderwerker klaar zijn.

In figuur 6 is een mogelijke situatie geschetst tijdens een simulatie. In dit fictieve voorbeeld heeft de verspreider een werkbreedte van drie stroken en de onderwerker heeft een werkbreedte van twee stroken (zie ook figuur 3). De mest is toegediend op de stroken 1 t/m 9, de verspreider kan nu bezig zijn met de stroken 10 t/m 12, met bijvullen of wachten tot de onderwerker klaar is. De onderwerker heeft zojuist de stroken 1 en 2 ondergewerkt. Bij het fifo-systeem zal de onderwerker in de volgende werkgang de stroken 3 en 4 onderwerken, bij het lifo-systeem zijn de stroken 7 en 8 aan de beurt (strook 9 kan pas worden ondergewerkt als er mest is toegediend op strook 10!).



Figuur 6 Voorbeeld van een situatie tijdens de simulatie op een perceel verdeeld in 17 stroken, waarbij de verspreider op negen stroken mest heeft toegediend en de onderwerker twee stroken heeft ondergewerkt.

Figure 6 Example of a situation during simulation on a plot divided into 17 strips, where manure has been applied on nine strips by the spreader and where two strips have been incorporated by the incorporator.

6 Resultaten

6.1 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het simulatiemodel CAESAR bij enkele voorbeelden besproken. De volgende acht werkmethoden worden onderscheiden (zie paragraaf 3.1 voor uitleg van de begrippen):

1	tweemanssysteem	hele omgangen	fifo
2	"	"	lifo
3	"	onderbroken werkgangen	fifo
4	"	"	lifo
5	eenmanssysteem	hele omgangen	fifo
6	"	"	lifo
7	"	onderbroken werkgangen	fifo
8	"	"	lifo

In **voorbeeld 1** (paragraaf 6.2) wordt de mest ondergewerkt met een wentelploeg en in **voorbeeld 2** (paragraaf 6.3) met een cultivator. In beide voorbeelden worden de resultaten bekeken bij de acht werkmethoden en de twee emissiefuncties uit paragraaf 4.1. De resultaten bij de werkmethoden met hele werkgangen zijn niet opgenomen. In de voorbeelden is de tankgrootte voldoende voor twee werkgangen, in dat geval geeft een werkmethode met hele werkgangen dezelfde resultaten als bij hele omgangen.

Verder wordt uitgegaan van de volgende input-gegevens (zie paragraaf 5.1 voor uitleg). Deze gegevens zijn voor een groot deel gebaseerd op waarnemingen bij het uitrijden en onderwerken van mest op het proefbedrijf "De Oostwaardhoeve" in Slootdorp.

Algemeen:

lengte van perceel	250 m
breedte van perceel	150 m
mestgift	20 m ³ /ha
veldsnelheid	10 km/h
wacht-/overstaptijd	3 min

Verspreider:

werksnelheid	9 km/h
werkbreedte	10 m
tankgrootte	12 m ³
keertijd	20 sec
wegsnelheid	25 km/h
afstand van het perceel tot de mestopslag	1 km
aankoppeltijd	2 min
pompcapaciteit	3 m ³ /min

Onderwerker:

	wentelploeg	cultivator
werksnelheid	5 km/h	8 km/h
werkbreedte	1,5 m	3,0 m
keertijd	30 sec	20 sec
emissiepercentage na onderwerken	10 %	40 %
emissiereductie bij onderwerken	90 %	60 %

De breedte van de stroken is vooral afhankelijk van de werkbreedten. De verspreider heeft een werkbreedte van 10 m. Als de onderwerker een werkbreedte van 1,5 m heeft (wentelploeg) dan worden de stroken 0,5 m breed; bij een werkbreedte van 3 m (cultivator) worden ze 1 m breed.

6.2 Voorbeeld 1: Onderwerken met wentelploeg

In dit voorbeeld wordt de invloed van de werkmethode en de emissiefunctie op de resultaten bekeken als de mest wordt ondergewerkt met een wentelploeg. Het gemiddelde tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken staat in tabel 3.

Tabel 3 Gemiddelde tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken bij onderwerken met een wentelploeg voor acht werkmethoden.

Table 3 Average difference in time between manure application and incorporation with a half-turn plough for eight working methods.

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	tijdsverschil (min)
2-mans	hele omgangen	fifo	129,0
"	"	lifo	129,9
"	onderbroken werkgangen	fifo	130,0
"	"	lifo	130,9
1-mans	hele omgangen	fifo	31,4
"	"	lifo	31,5
"	onderbroken werkgangen	fifo	66,0
"	"	lifo	66,2

De resulterende emissie bij de niet-lineaire emissiefunctie van experiment a en b, staat in resp. tabel 4 en 5. In deze tabellen staan voor iedere werkmethode de volgende resultaten:

- emissiepercentage tot onderwerken: dit is de gemiddelde emissie die vrijkomt vanaf het moment van mest toedienen tot het moment van onderwerken (komt overeen met E_i in formule 4);
- totale emissiepercentage: dit is de gemiddelde emissie voor het onderwerken plus de emissie na het onderwerken (komt overeen met E_{tot} uit formule 6);
- emissiereductie: dit is het procentuele relatieve verschil in emissie bij niet onderwerken en onderwerken volgens deze werkmethode (zie formule 8).

Tabel 4 Resultaten bij onderwerken met een wentelploeg en de niet-lineaire emissiefunctie van experiment a, voor acht werkmethoden (emissie bij niet onderwerken: 95,4%, bij direct onderwerken 9,5% = 90% reductie).

Table 4 Results in case of incorporation with a half-turn plough and the non-linear volatilization function of experiment a, for eight working methods (volatilization in case of no incorporation 95.4%, with direct incorporation 9.5% = 90% reduction).

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	emissie tot onderwerken (%)	totale emissie (%)	emissie-reductie (%)
2-mans	hele omgangen	fifo	26,9	33,7	64,6
"	"	lifo	24,1	31,2	67,2
"	onderbroken werkgangen	fifo	27,1	33,9	64,4
"	"	lifo	24,3	31,4	67,0
1-mans	hele omgangen	fifo	8,7	17,3	81,8
"	"	lifo	8,5	17,2	82,0
"	onderbroken werkgangen	fifo	16,6	24,4	74,4
"	"	lifo	15,7	23,6	75,2

Tabel 5 Resultaten bij onderwerken met een wentelploeg en de niet-lineaire emissiefunctie van experiment b, voor acht werkmethoden (emissie bij niet onderwerken: 83,4%, bij direct onderwerken 8,3% = 90% reductie).

Table 5 Results in case of incorporation with a half-turn plough and the non-linear volatilization function of experiment b, for eight working methods (volatilization in case of no incorporation 83.4%, in case of direct incorporation 8.3% = 90% reduction).

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	emissie tot onderwerken (%)	totale emissie (%)	emissie-reductie (%)
2-mans	hele omgangen	fifo	30,2	35,5	57,4
"	"	lifo	26,4	32,1	61,5
"	onderbroken werkgangen	fifo	30,4	35,7	57,2
"	"	lifo	26,7	32,3	61,2
1-mans	hele omgangen	fifo	10,6	17,9	78,5
"	"	lifo	10,4	17,7	78,8
"	onderbroken werkgangen	fifo	19,6	26,0	68,8
"	"	lifo	18,3	24,8	70,3

Uit de resultaten in tabel 3, 4 en 5 komen de volgende verschillen naar voren:

- Een tweemanssysteem geeft een hogere emissie dan een eenmanssysteem (8 tot 18% hoger emissiepercentage). In het tweemanssysteem raakt de onderwerker steeds verder achterop bij de verspreider en wordt het tijdsverschil groter.
- De verspreider helemaal leeg rijden (onderbroken werkgangen) heeft bij een tweemanssysteem nauwelijks invloed op de resultaten (een verschil van 0,1 à 0,2%); bij een eenmanssysteem is het emissiepercentage meer dan 6% hoger bij onderbroken werkgangen.

- Lifo is gunstiger dan fifo, ondanks het iets grotere tijdsverschil. Dit geldt vooral bij de tweemanssystemen (1½ à 3% minder emissie) en bij een eenmansstelsel met onderbroken werkgangen (1% minder).
- Bij de emissiefunctie van experiment a is de emissie iets lager en de emissiereductie iets hoger dan bij experiment b. Het effect van de werkmethode is bij beide emissiefuncties vergelijkbaar.

De verdeling van de tijd van de verspreider en de onderwerker, over de verschillende activiteiten (zie paragraaf 5.2) staat in resp. tabel 6 en 7. Deze verdeling is onafhankelijk van de gebruikte emissiefunctie.

Tabel 6 Verdeling van de tijd van de verspreider (min) over de activiteiten bij onderwerken met een wentelploeg voor acht werkmethoden.

Table 6 *Distribution of the time of the spreader (min) over the activities in case of incorporation with a half-turn plough for eight working methods.*

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	werk-en	wach-ten	rij-den	bijvul-len	keren	over-stappen	totaal
2-mans	hele omgangen	fifo	25,0	-	8,7	68,6	2,7	-	104,9
"	"	lifo	25,0	-	8,7	68,6	2,7	-	104,9
"	onderbroken werkg.	fifo	25,0	-	16,2	61,8	7,0	-	110,0
"	"	lifo	25,0	-	16,2	61,8	7,0	-	110,0
1-mans	hele omgangen	fifo	25,0	327,7	8,7	68,6	2,7	45,0	477,7
"	"	lifo	25,0	327,8	8,7	68,6	2,7	45,0	477,7
"	onderbroken werkg.	fifo	25,0	326,8	16,2	61,8	7,0	39,0	475,8
"	"	lifo	25,0	326,8	16,2	61,8	7,0	39,0	475,8

Tabel 7 Verdeling van de tijd van de onderwerker (min) over de activiteiten bij onderwerken met een wentelploeg voor acht werkmethoden.

Table 7 *Distribution of the time of the incorporator (min) over the activities in case of incorporation with a half-turn plough for eight working methods.*

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	werk-en	wach-ten	rij-den	keren	over-stappen	totaal
2-mans	hele omgangen	fifo	300,0	3,0	0,9	49,5	-	353,4
"	"	lifo	300,0	3,0	1,2	49,5	-	353,7
"	onderbroken werkgangen	fifo	300,0	3,0	0,9	49,5	-	353,4
"	"	lifo	300,0	3,0	1,3	49,5	-	353,8
1-mans	hele omgangen	fifo	300,0	104,9	8,3	49,5	45,0	507,8
"	"	lifo	300,0	104,9	8,2	49,5	45,0	507,6
"	onderbroken werkgangen	fifo	300,0	110,0	7,4	49,5	39,0	505,9
"	"	lifo	300,0	110,0	7,3	49,5	39,0	505,7

In bijlage A is bij elke werkmethode een grafische presentatie gegeven van de activiteiten van de verspreider en ploeg tijdens de eerste 120 minuten van de simulatie. Ook hieruit zijn de consequenties van de gekozen werkmethode af te lezen.

Enkele zaken die uit tabel 6 en 7 en bijlage A naar voren komen, zijn:

- De tijden voor de activiteit werken zijn onafhankelijk van de werkmethode.
- Bij een tweemanssysteem heeft de verspreider nooit een wachttijd. De ploeg begint bij een tweemanssysteem met wachten. De ploeg moet in uitzonderlijke omstandigheden eventueel op de verspreider wachten, maar deze situatie komt hier niet voor.
- Bij onderbroken werkgangen heeft de verspreider minder tijd nodig voor bijvullen, daar staat tegenover dat er meer tijd nodig is voor rijden en keren. In het tweemanssysteem is de verspreider per saldo langer bezig bij onderbroken werkgangen dan bij hele omgangen.
- Fifo of lifo heeft vrijwel geen invloed op de tijden van de verspreider. Voor de onderwerker is alleen de rijtijd bij lifo verschillend van fifo, deze verschillen zijn klein.
- De verspreider rijdt zowel in de lengterichting als in de breedterichting. Hij rijdt bij hele omgangen alleen na de laatste werkgang in de lengterichting (terugrijden naar voren), bij onderbroken werkgangen ook vanwege het bijvullen.
- De ploeg zal alleen in de lengterichting rijden bij een oneven aantal werkgangen; dat is hier niet het geval.
- De verspreider moet vaker keren bij onderbroken werkgangen.
- Bij een tweemanssysteem is de verspreider veel eerder klaar dan de ploeg. Dit verschil in totale tijd tussen de verspreider en de ploeg moet niet verward worden met het tijdsverschil uit tabel 3.

6.3 Voorbeeld 2: Onderwerken met cultivator

In voorbeeld 2 wordt de invloed van de werkmethode en de emissiefunctie op de resultaten bekeken als de mest wordt ondergewerkt met een cultivator. Hierbij is vooral de vergelijking met de resultaten uit de vorige paragraaf interessant, waar werd ondergewerkt met een wentelploeg. De werksnelheid is hoger (8 i.p.v. 5 km/h), evenals de werkbreedte (3 i.p.v. 1½ m). De emissie na onderwerken is hoger (40 i.p.v. 10%), de emissiereductie is dus lager (60 i.p.v. 90%). Verder is de input gelijk aan die in de vorige paragraaf. In tabel 8 staan de tijdsverschillen bij de verschillende werkmethoden.

Tabel 8 Gemiddelde tijdsverschil tussen mest toedienen en onderwerken bij onderwerken met een cultivator voor acht werkmethoden.

Table 8 Average time lag between manure application and incorporation with a cultivator for eight working methods.

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	tijdsverschil (min)
2-mans	hele omgangen	fifo	10,8
"	"	lifo	11,6
"	onderbroken werkgangen	fifo	16,2
"	"	lifo	16,8
1-mans	hele omgangen	fifo	15,9
"	"	lifo	16,1
"	onderbroken werkgangen	fifo	33,6
"	"	lifo	33,7

In tabel 9 en 10 staan de emissieresultaten bij de niet-lineaire emissiefunctie voor resp. experiment a en b.

Tabel 9 Resultaten bij onderwerken met een cultivator en de niet-lineaire emissiefunctie bij experiment a, voor acht werkmethoden (emissie bij niet onderwerken: 95,4%, bij direct onderwerken 38,2% = 60% reductie).

Table 9 Results in case of incorporation with a cultivator and the non-linear volatilization function of experiment a, for eight working methods (volatilization in case of no incorporation 95.4%, in case of direct incorporation 38.2% = 60% reduction).

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	emissie tot onderwerken (%)	totale emissie (%)	emissie-reductie (%)
2-mans	hele omgangen	fifo	3,2	40,0	58,0
"	"	lifo	3,2	40,0	58,0
"	onderbroken werkgangen	fifo	4,7	41,0	57,0
"	"	lifo	4,7	40,9	57,1
1-mans	hele omgangen	fifo	4,6	40,9	57,1
"	"	lifo	4,5	40,8	57,1
"	onderbroken werkgangen	fifo	9,2	43,6	54,2
"	"	lifo	9,0	43,5	54,4

Tabel 10 Resultaten bij onderwerken met een cultivator en de niet-lineaire emissiefunctie bij experiment b, voor acht werkmethoden (emissie bij niet onderwerken: 83,4%, bij direct onderwerken 33,4% = 60% reductie).

Table 10 Results in case of incorporation with a cultivator and the non-linear volatilization function of experiment b, for eight working methods (volatilization in case of no incorporation 83.4%, in case of direct incorporation 33.4% = 60% reduction)

2- of 1-mans-systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	emissie tot onderwerken (%)	totale emissie (%)	emissie-reductie (%)
2-mans	hele omgangen	fifo	4,0	35,8	57,1
"	"	lifo	4,0	35,7	57,1
"	onderbroken werkgangen	fifo	5,9	36,9	55,7
"	"	lifo	5,8	36,8	55,9
1-mans	hele omgangen	fifo	5,8	36,8	55,8
"	"	lifo	5,6	36,7	55,9
"	onderbroken werkgangen	fifo	11,3	40,1	51,9
"	"	lifo	10,8	39,9	52,2

Over de resultaten in tabel 8, 9 en 10 kan het volgende worden opgemerkt:

- De verschillen tussen de werkmethoden zijn klein, alleen een eenmanssysteem met onderbroken werkgangen is enigzins ongunstiger.
- De mest wordt na vrij korte tijd ondergewerkt (binnen 10 tot 34 minuten). Hierdoor is de emissie tot onderwerken klein en bestaat de totale emissie vooral uit de emissie na onderwerken. Er is een klein verschil met de emissiereductie bij direct onderwerken (60%).
- De verschillen tussen fifo en lifo zijn te verwaarlozen bij deze kleine tijdsverschillen.
- De emissiefuncties van experiment a en experiment b geven een vergelijkbare emissiereductie omdat vooral de emissie na onderwerken bepalend is.
- Onderwerken met een cultivator geeft in deze situatie altijd een hogere totale emissie dan onderwerken met een wentelploeg (zie paragraaf 6.2). Echter bij de emissiefunctie van experiment b en in het geval van een tweemanssysteem met hele omgangen en fifo zijn de totale emissie en de emissiereductie bij de wentelploeg en cultivator vrijwel gelijk (vgl. tabel 5 en 10). Er zijn situaties denkbaar waarbij de emissie bij onderwerken met de cultivator gunstiger uitvalt dan bij onderwerken met de wentelploeg.

De verdeling van de tijd van de verspreider en de onderwerker, over de verschillende activiteiten staat in resp. tabel 11 en 12. Deze verdeling is onafhankelijk van de gebruikte emissiefunctie.

Tabel 11 Verdeling van de tijd van de verspreider (min) over de activiteiten bij onderwerken met een cultivator voor acht werkmethoden.

Table 11 Distribution of the time of the spreader (min) over the activities in case of incorporation with a cultivator for eight working methods.

2- of 1-mans- systeem	hele omgangen of onder- broken werkgangen	fifo of lifo	werk- en	wach- ten	rij- den	bijvul- len	keren	over- stappen	totaal
2-mans	hele omgangen	fifo	25,0	-	8,7	68,6	2,7	-	104,9
"	"	lifo	25,0	-	8,7	68,6	2,7	-	104,9
"	onderbroken werkg.	fifo	25,0	-	16,2	61,8	7,0	-	110,0
"	"	lifo	25,0	-	16,2	61,8	7,0	-	110,0
1-mans	hele omgangen	fifo	25,0	107,2	8,7	68,6	2,7	45,0	257,1
"	"	lifo	25,0	107,2	8,7	68,6	2,7	45,0	257,1
"	onderbroken werkg.	fifo	25,0	106,2	16,2	61,8	7,0	39,0	255,2
"	"	lifo	25,0	106,3	16,2	61,8	7,0	39,0	255,3

Tabel 12 Verdeling van de tijd van de onderwerker (min) over de activiteiten bij onderwerken met een cultivator voor acht werkmethoden.

Table 12 Distribution of the time of the incorporator (min) over the activities in case of incorporation with a cultivator for eight working methods.

2- of 1-mans- systeem	hele omgangen of onderbroken werkgangen	fifo of lifo	werk- en	wach- ten	rij- den	keren	over- stappen	totaal
2-mans	hele omgangen	fifo	93,8	4,6	0,9	16,3	-	115,6
"	"	lifo	93,8	4,5	2,4	16,3	-	117,0
"	onderbroken werkgangen	fifo	93,8	9,8	0,9	16,3	-	120,7
"	"	lifo	93,8	9,4	2,2	16,3	-	121,7
1-mans	hele omgangen	fifo	93,8	104,9	8,2	16,3	45,0	268,2
"	"	lifo	93,8	104,9	8,2	16,3	45,0	268,2
"	onderbroken werkgangen	fifo	93,8	110,0	7,2	16,3	39,0	266,3
"	"	lifo	93,8	110,0	7,2	16,3	39,0	266,3

In bijlage B is bij elke werkmethode een grafische presentatie gegeven van de activiteiten van de verspreider en de cultivator tijdens de eerste 120 minuten van de simulatie.

Over de resultaten in tabel 11 en 12 en bijlage B valt het volgende op te merken:

- De cultivator moet ook bij het tweemanssysteem soms wachten (niet alleen 3 minuten bij de start); de cultivator kan de verspreider zonder problemen bijhouden.
- Bij alle werkmethoden is de verspreider uiteraard eerder klaar, maar de verschillen zijn veel kleiner dan bij een wentelploeg (zie tabel 6 en 7).
- Bij een tweemanssysteem zijn de tijden in tabel 11 gelijk aan de tijden in tabel 6 omdat deze onafhankelijk van de onderwerker worden bepaald; bij een eenmanssysteem zijn de wachttijden verschillend.
- Bij een eenmanssysteem zijn de wachttijden van de verspreider veel kleiner dan wanneer er met een wentelploeg wordt ondergewerkt (vgl. tabel 11 en 6).

- Bij de onderwerker zijn er verschillen tussen lifo en fifo, de tijden voor wachten en rijden zijn in een tweemanssysteem verschillend.

7 Discussie

Het model CAESAR is in de huidige vorm geschikt voor rechthoekige percelen die in de lengterichting worden bewerkt. In het model is geen rekening gehouden met kopeinden aan de voorzijde en achterzijde van het perceel. Op de kopeinden vindt het draaien en keren plaats alsmede het transport naar de dam. In de praktijk worden de kopeinden bewerkt nadat de werkzaamheden op het perceel zijn afgewerkt (op de laatste werkgang na). Bij de modelontwikkeling is verondersteld dat de kopeinden een beperkt effect hebben op de gemiddelde emissie. Berekeningen voor een perceel met kopeinden zijn met het model wel mogelijk door een opsplitsing van het perceel in de kopeinden en de rest van het perceel en het model voor ieder gedeelte te gebruiken.

De bewerkingen in het model worden uitgevoerd in werkgangen heen en terug over het perceel. Opeenvolgende werkgangen zijn meestal aaneengelegd, alleen bij onderwerken met het lifo-systeem is dit niet altijd het geval. Dit betekent dat het model niet geschikt is voor andere systemen, bijv. voor een rondgaand systeem waarbij de bewerkingen in de heenrichting aan de linkerzijde van het perceel en bewerkingen in de terugrichting aan de rechterzijde liggen, met een steeds kortere afstand.

In het model is de emissiereductie van de onderwerker bepaald op basis van onderzoeksresultaten van direct onderwerken van mest. De resterende emissie na onderwerken wordt berekend door de op het tijdstip van onderwerken potentieel resterende emissie van de bovengronds verspreide mest te verrekenen met de emissiereductie van de onderwerker. Hierbij wordt dus aangenomen dat de emissiereductie van de onderwerker onafhankelijk is van het tijdsverschil waarbij de mest wordt ondergewerkt. Uit de enkele metingen waarbij de emissiereductie is bepaald bij niet direct onderwerken (Huijsmans en Hol, 1995) valt op te maken dat bij na 3 uur onderwerken de emissiereductie van de onderwerker lager of gelijk is aan die bij direct onderwerken. Deze afwijking is afhankelijk van het emissieverloop maar zal naar verwachting beperkt zijn, wanneer de periode tussen mest toedienen en onderwerken niet te groot wordt.

Voor de beide bewerkingen toedienen en onderwerken wordt uitgegaan van een vaste effectieve werkbreedte. Er wordt verondersteld dat er bij het mest verspreiden geen overlapping van spreidpatronen optreedt; de spreidbreedte is gelijk aan de werkbreedte. Indien wel overlapping van spreidpatronen zou plaatsvinden kan dit de consequentie hebben dat de "onderwerker" besmeurd zou worden met mest of dat een reeds ondergewerkt deel nog deels bemest wordt. Dit zou kunnen optreden als de afstand tussen de bewerkte stroken van de verspreider en onderwerker dicht bij elkaar liggen (in een eenmanssysteem of in een tweemanssysteem met lifo).

Bij de modellering zijn enkele veronderstellingen gemaakt die niet altijd zullen overeenstemmen met de praktijk:

- De verspreider en de onderwerker mogen nooit met dezelfde strook bezig zijn. In de praktijk kan dit wel gebeuren, met name op lange percelen.

- In het model wordt aangenomen dat het lifo-systeem altijd uitvoerbaar is. Praktisch kan dit moeilijk zijn, vooral bij onderwerken met een ploeg waarbij een nieuwe voor moet aansluiten op de laatste voor.
- Het tijdsverschil tussen toedienen en onderwerken kan sterk oplopen in het model, vooral bij een tweemanssysteem. In de praktijk zijn andere varianten denkbaar waardoor het tijdsverschil niet zo groot wordt, bijv. na elke omgang onderwerken in het eenmanssysteem of mest toedienen in twee delen ('s morgens en 's middags) bij het tweemanssysteem.

De voorbeelden in hoofdstuk 3 schetsen een aantal mogelijkheden van het model. De uiteindelijke emissie bij het bemesten en onderwerken van een perceel is afhankelijk van de gekozen uitgangssituatie en inputgegevens. Zo is het verloop en de hoogte van de ammoniakemissie van een bemest en een bewerkt veld afhankelijk van vele factoren. In verschillende onderzoeken (Bruins en Huijsmans, 1989; Mulder en Huijsmans; 1994; Huijsmans en Hol, 1995) zijn een groot aantal emissieverlopen bepaald. Het effect van het verloop van de emissie op de uiteindelijke emissiereductie in verschillende situaties kan nu met het model worden gesimuleerd. Het model biedt de mogelijkheid om door middel van scenario-analyses te komen tot bepaling van de belangrijkste factoren die een rol spelen bij het beperken van de ammoniakemissie. Het model kan ook worden gebruikt voor een optimalisatie van de werktuigkeuze en werkorganisatie met betrekking tot de emissiereductie en/of de kosten. Het model is ook geschikt om het toedienen en onderwerken van vaste mest te analyseren, dit is niet opgenomen in de voorbeelden.

8 Conclusies

Berekeningen met het simulatiemodel CAESAR geven een goed inzicht in de gemiddelde emissiereductie bij het, in twee werkgangen, toedienen en onderwerken van mest op bouwland. Door achtereenvolgens verschillende varianten door te rekenen worden de effecten van de uitgangspunten op de emissie duidelijk. Dit maakt het mogelijk om de feitelijke emissie onder praktijkomstandigheden goed in te schatten, bovendien kan bekeken welke opzet moet worden gekozen om de emissie te minimaliseren.

Uit de twee voorbeelden, waarbij een perceel werd ondergewerkt met een wentelploeg en een cultivator bij verschillende werkmethoden, blijkt onder meer het volgende:

- Bij onderwerken met een wentelploeg is de emissiereductie lager dan de resultaten bij veldmetingen aangeven. In dit geval is een eenmanssysteem gunstiger dan een tweemanssysteem. Bij een eenmanssysteem geeft het systeem met onderbroken werkgangen een duidelijk lagere emissiereductie. Bij een tweemanssysteem is het systeem met onderbroken werkgangen ongunstig omdat de emissie hoger is en de verspreider in totaal meer tijd kwijt is. Het lifo-systeem is iets gunstiger dan het fifo-systeem, maar de praktische bezwaren maken deze optie waarschijnlijk moeilijk uitvoerbaar.
- Bij onderwerken met een cultivator zijn er weinig verschillen tussen de werkmethoden omdat het tijdsverschil tussen mest uitrijden en onderwerken beperkt blijft. Alleen het systeem met onderbroken werkgangen bij een eenmanssysteem geeft een hogere emissie, in de andere gevallen zit de emissiereductie in de buurt van de reductie die bij veldexperimenten is gemeten.

Summary

When applying manure to arable land by surface spreading, volatilization of ammonia takes place. Reduction of ammonia volatilization can be achieved by incorporation of the manure into the soil. It has been proved that the degree of reduction depends on the method of incorporation. These reductions were determined when incorporation took place directly following the spreading on a small scale plot. However in reality there will always be some time lag between application and incorporation. The ammonia volatilization rate from surface applied manure is not linear but is higher the first hours after application. This means that, on a plot scale, the time lag between application and incorporation effects the overall ammonia volatilization. To assess the ammonia volatilization from, in two operations, applied and incorporated manure the time lag between application and incorporation needs to be known.

A simulation model has been developed to calculate the time lag, between application and incorporation, and ammonia volatilization for each point of an arable plot. The model is called CAESAR (Computer simulation of the Ammonia Emission of Slurry application and incorporation on ARable land). The time lag depends on the circumstances (dimensions of plot, working speed and width) and the work organization:

- two-man system (application and incorporation simultaneously) or one-man system (alternately application and incorporation);
- application in discrete passes or till the tank is empty;
- incorporation in the same order as application (first in, first out) or in reverse order as much as possible (last in, first out).

The time lag is calculated by simulation of the activities on the plot. Given the time lag, the volatilization is determined by the volatilization function and the volatilization reduction of the incorporation implement. The volatilization function is based on measurements in field experiments. A combination of the time lag and the volatilization of all points gives the average volatilization and volatilization reduction for the whole plot. Furthermore the model gives the average time lag and a division of the spent time over the activities for the application and incorporation implement.

With the model it can be shown that incorporation by a plough not always results in lower ammonia volatilization than incorporation by a fixed tine cultivator. A one-man system results in lower overall volatilization than a two-man system, when using a plough (low capacity tillage system). The input parameters, like plot size, work capacity of the spreader and the incorporation method and volatilization rate of surface applied manure, effect the overall ammonia volatilization.

The model shows to be a good instrument to evaluate the effects of different manure application and incorporation management strategies on the ammonia volatilization on plot scale.

Literatuur

Bruins, M.A. en J.F.M. Huijsmans, 1989. De reductie van de ammoniakemissie uit varkensmest na toediening op bouwland. IMAG rapport 225, IMAG-DLO, Wageningen, 27 pp

Huijsmans, J.F.M. en J.M.G. Hol, 1995. Ammoniakemissie bij het in een tweede werkgang onderwerken van dunne varkensmest op bouwland. IMAG-DLO rapport 95-13, Wageningen, 32 pp

Mol, R.M. de en J.E.T. Koning, 1992. Een simulatiemodel voor de mestlogistiek op bedrijfsniveau. Agro-Informatica, jg 5, nr 5, p 32-37

Monteny, G.J., D.D. Schulte en A. Elzing, 1996. A conceptual mechanistic model for the ammonia emission from cubicle dairy cow houses. Submitted to the Transactions of the ASAE

Mulder, E.M. en J.F.M. Huijsmans, 1994. Beperking ammoniakemissie bij mesttoediening. Overzicht metingen DLO-veldmeetploeg 1990-1993. DLO, Wageningen 71 pp (samenvatting van 63 meetrapporten)

Notitie Mest- en Ammoniakbeleid, 1993. Notitie Mest- en Ammoniakbeleid derde fase. Tweede kamer, vergaderjaar 1992-1993, 19882, nr 34, SDU-Uitgeverij, 's-Gravenhage, 55 pp

PROSIM, 1994. PROSIM USER GUIDE. Sierenberg & de Gans bv, Waddinxveen, 134 pp

Begrippenlijst

Uitleg van de begrippen een verwijzing naar de paragraaf waar ze worden geïntroduceerd. Bij de uitleg verwijzen cursief gedrukte woorden naar een ander begrip uit de lijst.

begrip	uitleg	para- graaf
aankoppeltijd	tijd die nodig is voor het aankoppelen, loskoppelen, <i>keren</i> etc. bij de mestopslag van de <i>verspreider</i> voor het <i>bijvullen</i> van de tank	5.1
activiteit	bezigheid van de <i>verspreider</i> of de <i>onderwerker</i> tijdens de simulatie	5.2
ammoniakemissie	hoeveelheid ammoniak die emitteert, uitgedrukt als percentage van de met de mest toegediende hoeveelheid ammoniumstikstof	2
bijvullen	rijden over de weg naar en van de mestopslag, aankoppelen bij de mestopslag, pompen en loskoppelen en terugrijden naar het perceel: <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> ; de benodigde tijd is verdeeld over wegrijtijd, <i>aankoppeltijd</i> en pomptijd	5.2
breedte	breedte van het perceel; meestal is de breedte kleiner dan de <i>lengte</i>	3.1
CAESAR	de naam van het simulatiemodel, dit is een acroniem van: Computer simulation of the Ammonia Emission of Slurry application and incorporation on ARable land	1
dam	oprit van het perceel; in een <i>tweemanssysteem</i> het start- en eindpunt van de bewerkingen van de <i>verspreider</i> en de <i>onderwerker</i> ; in een <i>eenmanssysteem</i> niet alleen het start- en eindpunt, maar ook het <i>overstappunt</i>	3.1
eenmanssysteem	systeem waarbij één man afwisselend bezig is met mest toedienen en met onderwerken	3.1
emissiefunctie	het verband tussen de cumulatieve <i>ammoniakemissie</i> en de tijd na toediening	4.1
emissiereductie	het procentuele verschil in emissie bij niet of wel onderwerken	2 4.3
fifo	"first in first out": werkmethode bij het onderwerken, zodanig dat bij het onderwerken dezelfde volgorde wordt aangehouden als bij de mesttoediening	3.1
niet-lineaire emissiefunctie	<i>emissiefunctie</i> waarbij de <i>ammoniakemissie</i> beschreven wordt met een wiskundige vergelijking (met parameters) volgens formule 1	4.1
groep	aantal aaneengelegene <i>stroken</i> die in één <i>werkgang</i> met de <i>onderwerker</i> worden bewerkt	3.1

hele omgangen	werkmethode bij de mesttoediening waarbij de <i>verspreider</i> alleen aan een nieuwe <i>omgang</i> begint als hiervoor voldoende mest in de tank zit	3.1
hele werkgangen	werkmethode bij de mesttoediening waarbij de <i>verspreider</i> alleen aan een nieuwe <i>werkgang</i> begint als hiervoor voldoende mest in de tank zit	3.1
keertijd	tijd die nodig is om de <i>verspreider</i> of de <i>onderwerker</i> eenmaal te <i>keren</i>	5.1
keren	omdraaien van een <i>werktuig</i> na een (onderbroken) <i>werkgang</i> en/of voor het begin van een nieuwe/onderbroken <i>werkgang</i> : <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i>	3.2 5.2
lengte	lengte van het perceel	3.1
lifo	"last in first out": werkmethode bij het onderwerken, zodanig dat bij het onderwerken zoveel mogelijk in omgekeerde volgorde wordt gewerkt, vergeleken met de mesttoediening	3.1
lineaire emissiefunctie	<i>emissiefunctie</i> verkregen door lineaire interpolatie van metingen	4.1
mestgift	toegediende hoeveelheid mest per hectare	5.1
omgang	twee opeenvolgende <i>werkgangen</i> (heen en terug) over het perceel	3.1
onderbroken werkgangen	werkmethode bij de mesttoediening waarbij de <i>verspreider</i> doorgaat tot de tank is leeggereden	3.1
onderwerker	onderwerkwerktuig, bijv. een ploeg, cultivator of eg	3.1
overstap(pen)	in een <i>eenmanssysteem</i> de omschakeling van de <i>verspreider</i> naar de <i>onderwerker</i> (of omgekeerd): <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i>	3.3 5.2
overstaptijd	de tijd die nodig is voor een <i>overstap</i> (gelijk aan de <i>wachttijd</i>)	3.3
pompcapaciteit	snelheid bij het vullen van de tank van de <i>verspreider</i>	5.1
rijden	verplaatsing over het perceel zonder een bewerking uit te voeren (in de lengte- of breedterichting): <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i>	5.2
strook	rechthoekig gedeelte van het perceel, even lang als het perceel en een breedte zodanig dat zowel de perceelsbreedte als de <i>werkbreedte</i> van de <i>verspreider</i> en de <i>onderwerker</i> een geheel aantal stroken is	3.1
tankgrootte	maximale inhoud van de tank van de <i>verspreider</i>	5.1
tweemanssysteem	systeem waarbij gelijktijdig de <i>verspreider</i> en de <i>onderwerker</i> bezig zijn	3.1
veldsnelheid	snelheid waarmee een <i>werktuig</i> over het perceel rijdt als er geen bewerking wordt uitgevoerd (i.t.t. <i>werksnelheid</i>); in het model is verondersteld dat de veldsnelheid van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i> gelijk zijn	3.2

verspreider	werktuig voor mesttoediening, bijv. een mengmestverspreider of stalmestverspreider	3.1
wachten	stilstand van een <i>werktuig</i> : een <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i> ; in een <i>tweemanssysteem</i> moet de <i>onderwerker</i> in het begin wachten en later evt. totdat er nieuwe <i>groepen</i> beschikbaar zijn; in een <i>eenmanssysteem</i> moet een werktuig steeds opnieuw wachten totdat het andere <i>werktuig</i> stopt	5.2
wachttijd	in een <i>tweemanssysteem</i> het verschil in starttijd van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i> ; in een <i>eenmanssysteem</i> de tijd die nodig is voor een <i>overstap</i>	3.2
wegsnelheid	snelheid van de <i>verspreider</i> over de weg, naar en van de mestopslag	3.2
werkbreedte	het aantal meters dat, gemeten dwars op de <i>werkgang</i> , in één <i>werkgang</i> wordt bewerkt; de <i>verspreider</i> en de <i>onderwerker</i> hebben in principe een verschillende werkbreedte	3.1
werken	het uitvoeren van een bewerking: een <i>activiteit</i> van de <i>verspreider</i> en van de <i>onderwerker</i>	5.2
werkgang	een gang over het perceel waarbij een bewerking wordt uitgevoerd	3.1
werksnelheid	snelheid waarmee bewerkingen worden uitgevoerd; de <i>verspreider</i> en de <i>onderwerker</i> hebben in principe een verschillende werksnelheid	3.1
werktuig	de <i>verspreider</i> of de <i>onderwerker</i>	1

Bijlage A Grafische presentatie van de simulatie (voorbeeld 1)

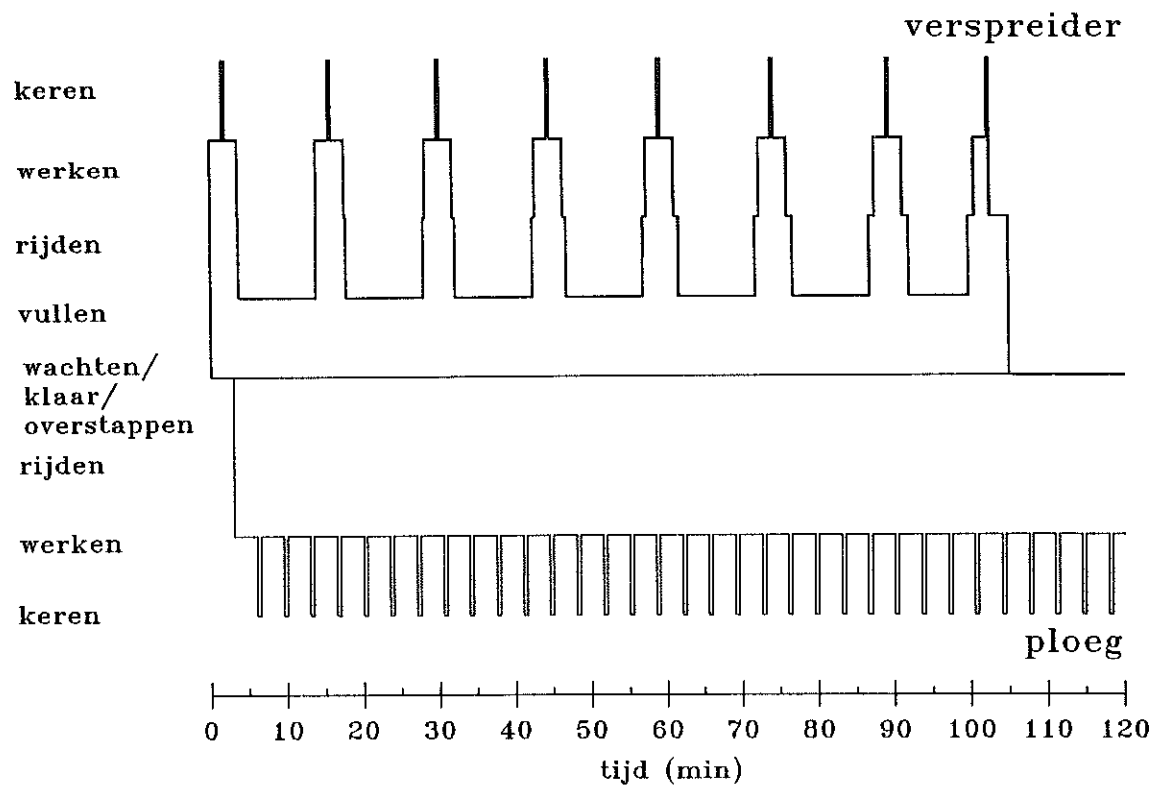
Bij voorbeeld 1: "Onderwerken met een wentelploeg" (paragraaf 6.2) zijn acht werkmethoden bekeken. In deze bijlage is een grafische presentatie van de simulatieresultaten bij elke werkmethode gedurende de eerste 120 minuten opgenomen. De kop bij elke figuur verwijst naar de werkmethode (zie paragraaf 3.1 voor uitleg van de begrippen).

In elke figuur worden in de bovenste helft de activiteitsveranderingen van de verspreider weergegeven en in de onderste helft van de ploeg. Een verandering van activiteit tijdens de simulatie correspondeert met een niveauverandering in de figuur. In beide gevallen geeft het basisniveau (de lijn in het midden) de activiteit wachten/klaar of overstappen aan. Voor de verspreider geeft het niveau aan wanneer hij bezig is met vullen (rijden, aankoppelen en pompen), rijden (op het perceel), werken (mest uitrijden) of keren. Voor de ploeg geeft het niveau aan wanneer zij bezig is met rijden (op het perceel), werken (ploegen) of keren.

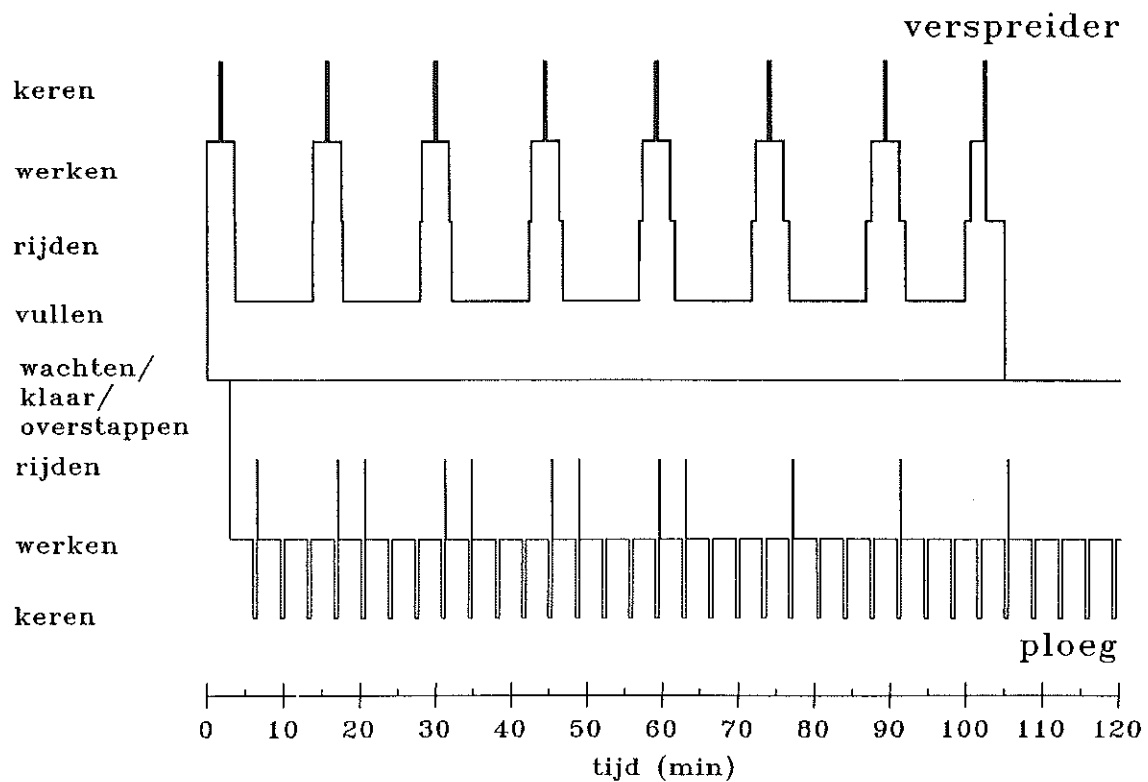
Uit deze figuren valt onder meer af te lezen:

- Bij een tweemanssysteem is de verspreider binnen 120 minuten klaar.
- Bij onderbroken werkgangen is zes keer bijvullen voldoende, bij hele omgangen zeven keer (zie de activiteiten bij het tweemanssysteem). Uit de figuren blijkt dat bij onderbroken werkgangen meer rijden en keren nodig is.
- Bij een tweemanssysteem en lifo moet de ploeg soms rijden over het perceel voor een nieuwe werkgang.
- De rijtijden op het perceel nemen toe naarmate het werk verder is gevorderd, dit is te zien aan de rijtijden van de verspreider in het tweemanssysteem.
- Bij een eenmanssysteem is afwisselend de verspreider en ploeg actief; bij elke wisseling is er een overstap die tijd kost.
- Het verschil tussen fifo en lifo bij een eenmanssysteem blijkt uit de rijtijd van de ploeg: na afloop van het ploegen of bij het begin.

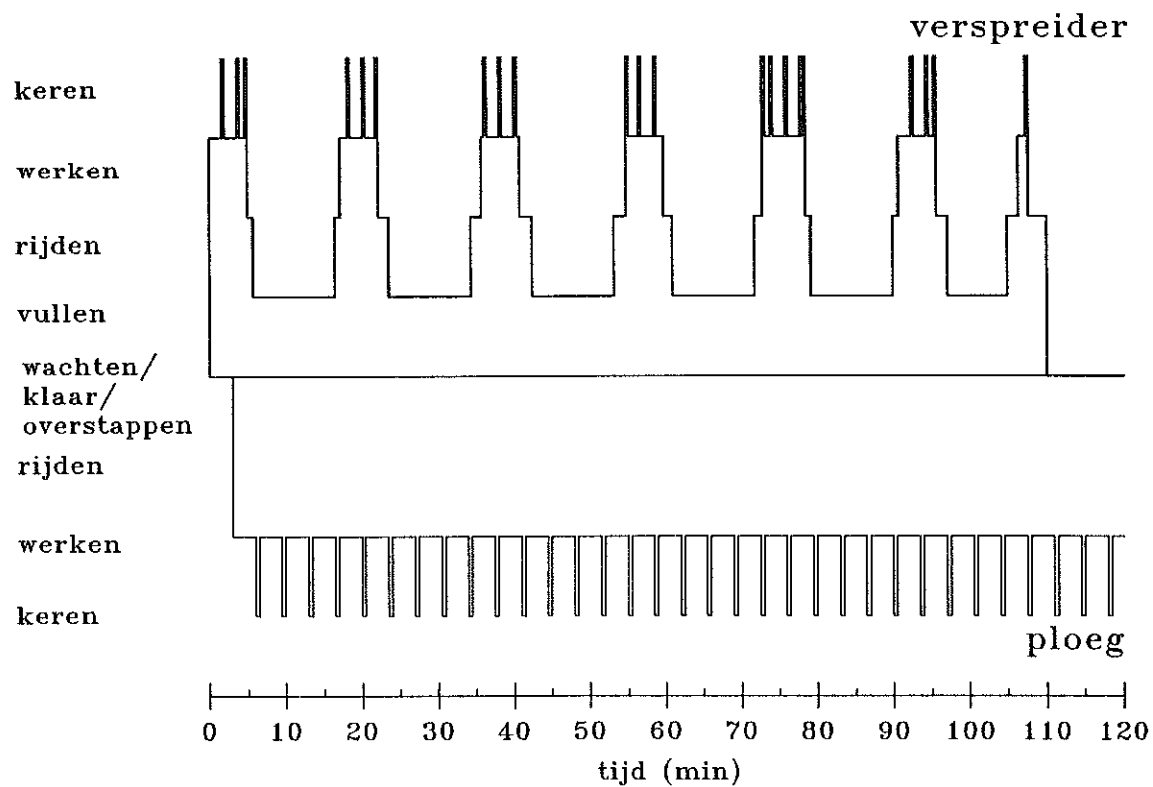
tweemanssysteem / hele omgangen / fifo



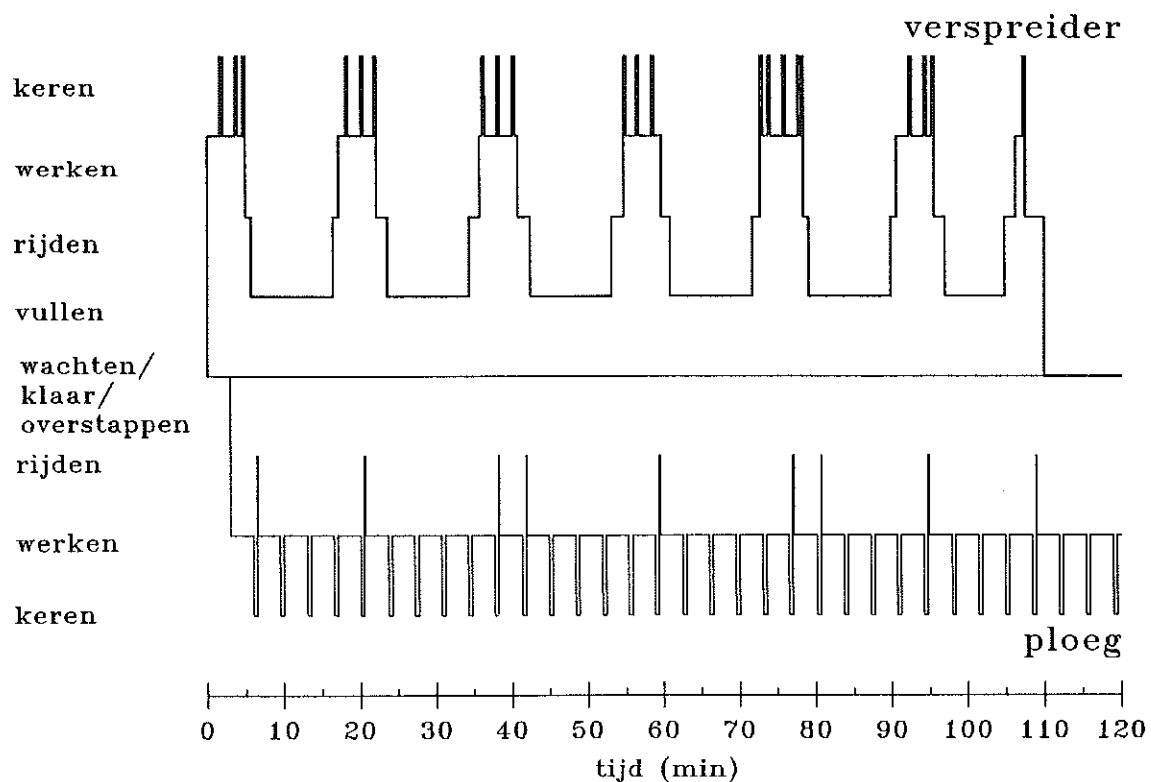
tweemanssysteem / hele omgangen / lifo



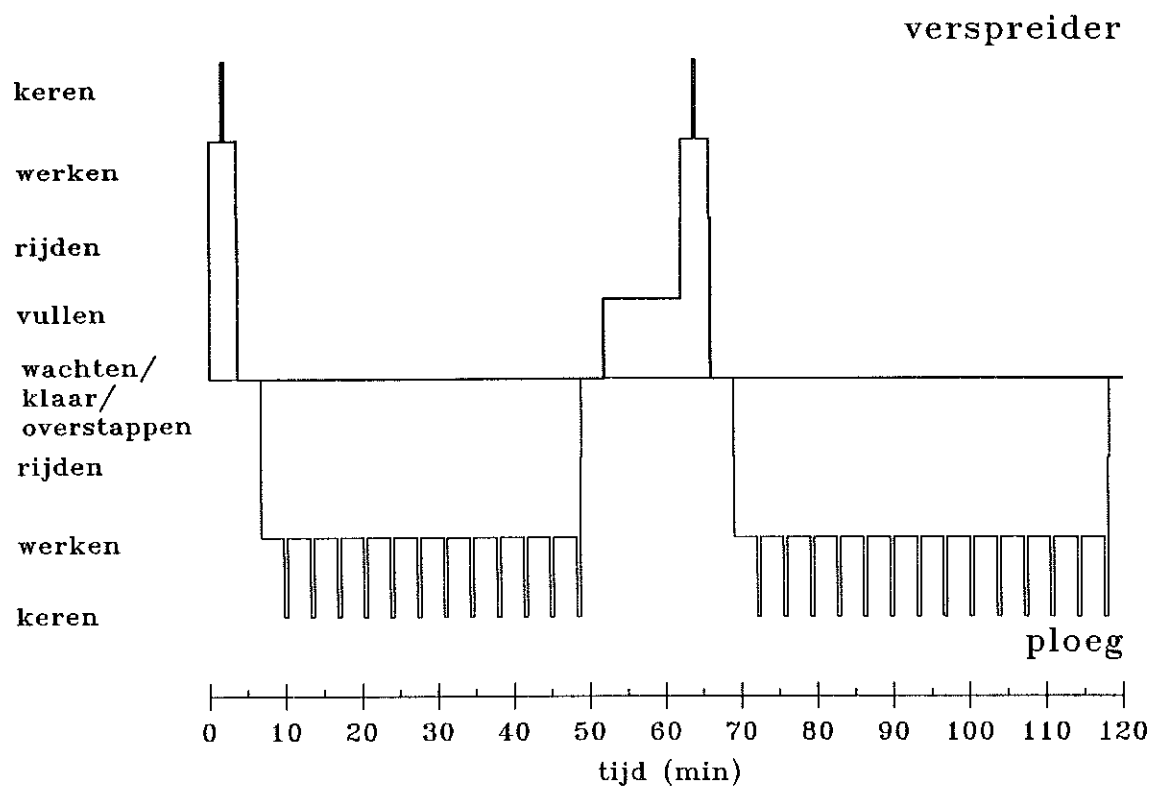
tweemanssysteem / onderbroken werkgangen / fifo



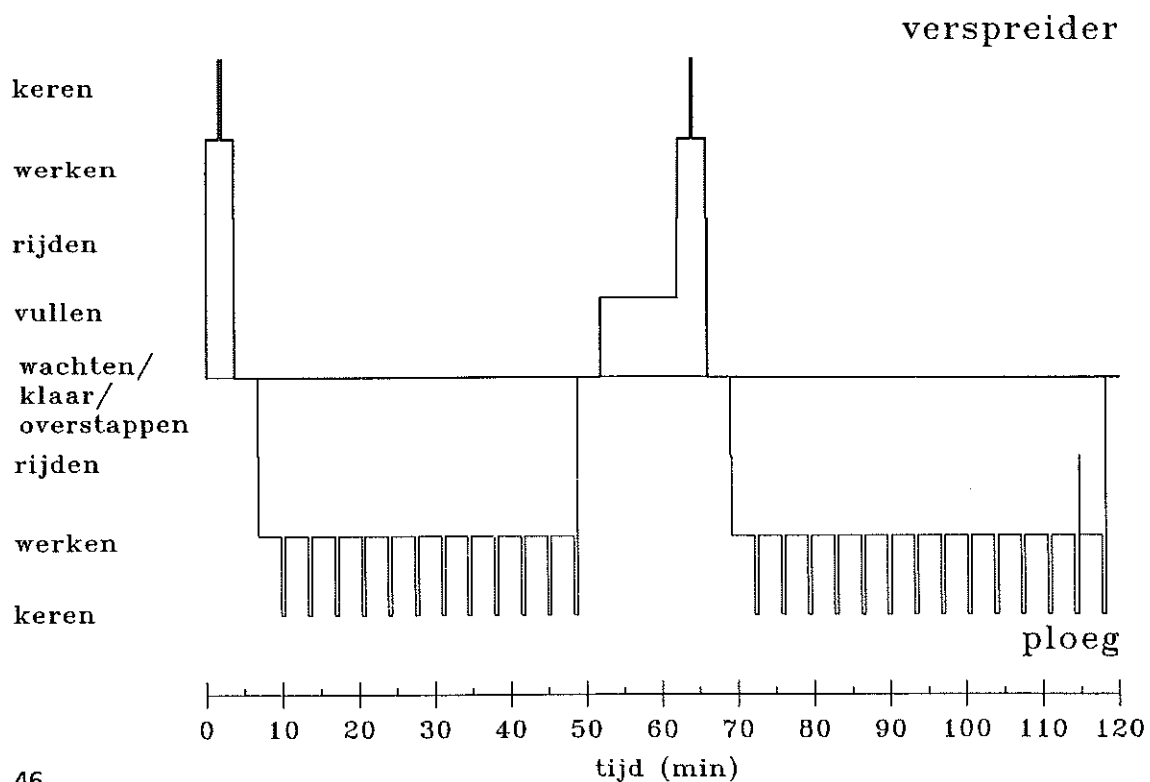
tweemanssysteem / onderbroken werkgangen / lifo



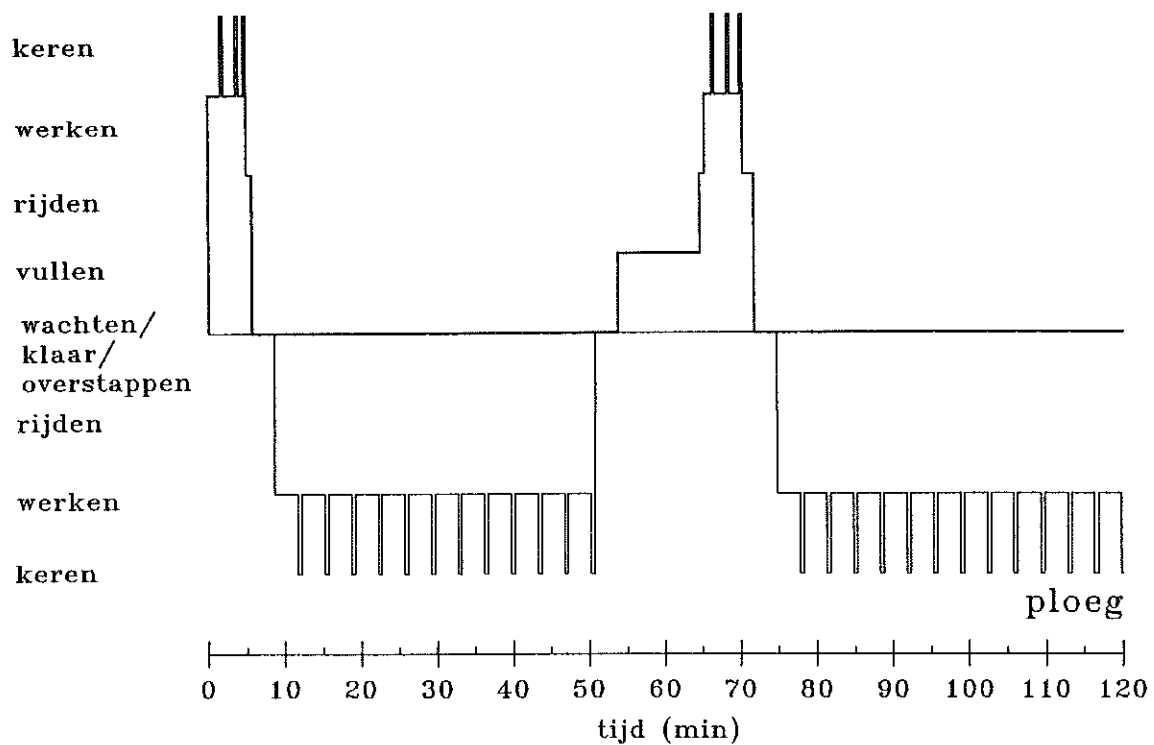
eenmanssysteem / hele omgangen / fifo



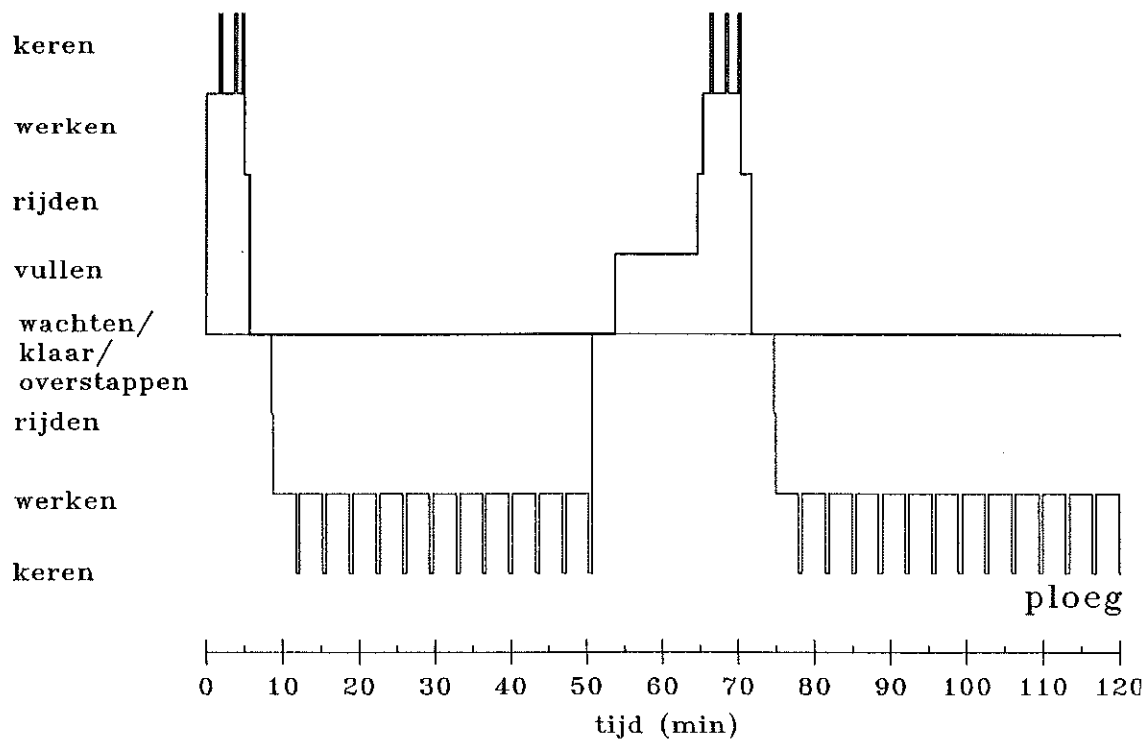
eenmanssysteem / hele omgangen / lifo



eenmanssysteem / onderbroken werkgangen / fifo
verspreider



eenmanssysteem / onderbroken werkgangen / lifo
verspreider



Bijlage B Grafische presentatie van de simulatie (voorbeeld 2)

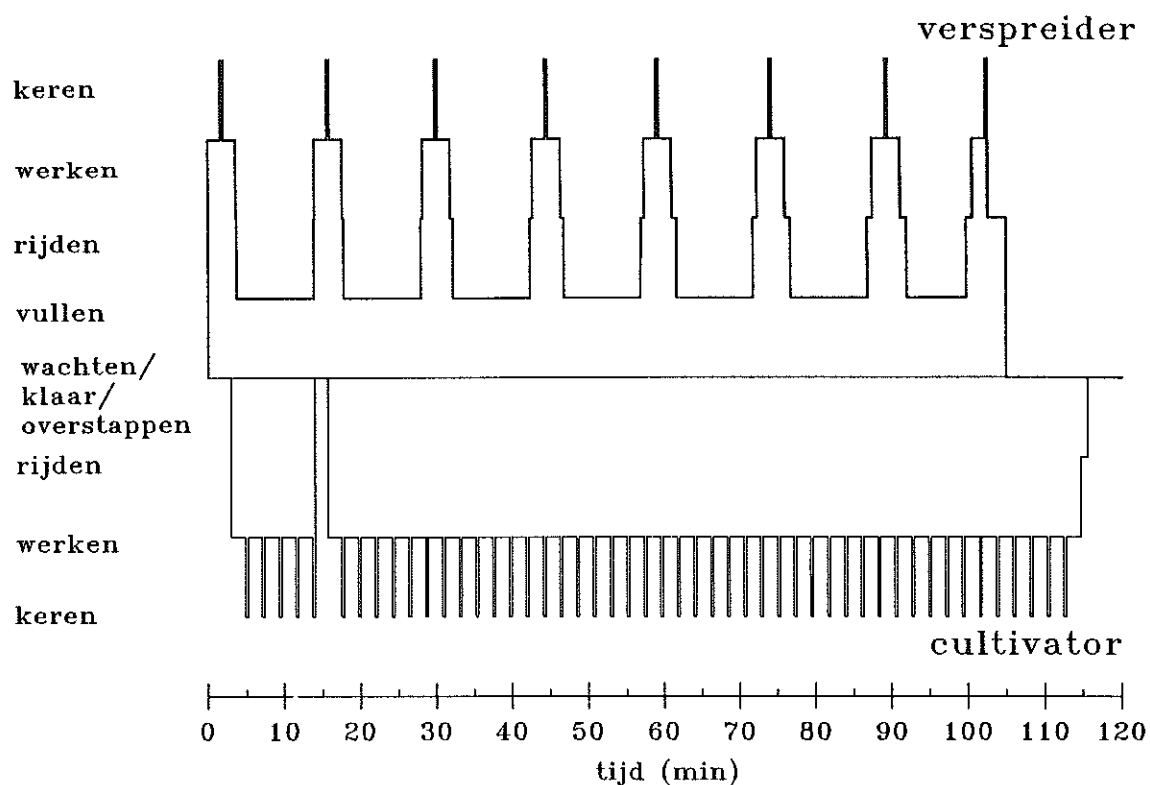
Bij voorbeeld 2: "Onderwerken met een cultivator" (paragraaf 6.3) zijn acht werkmethoden bekeken. In deze bijlage is een grafische presentatie van de simulatieresultaten bij elke werkmethode gedurende de eerste 120 minuten opgenomen. De kop bij elke figuur verwijst naar de werkmethode (zie bijlage A voor een algemene toelichting op de figuren).

Uit deze figuren kan het volgende worden afgelezen:

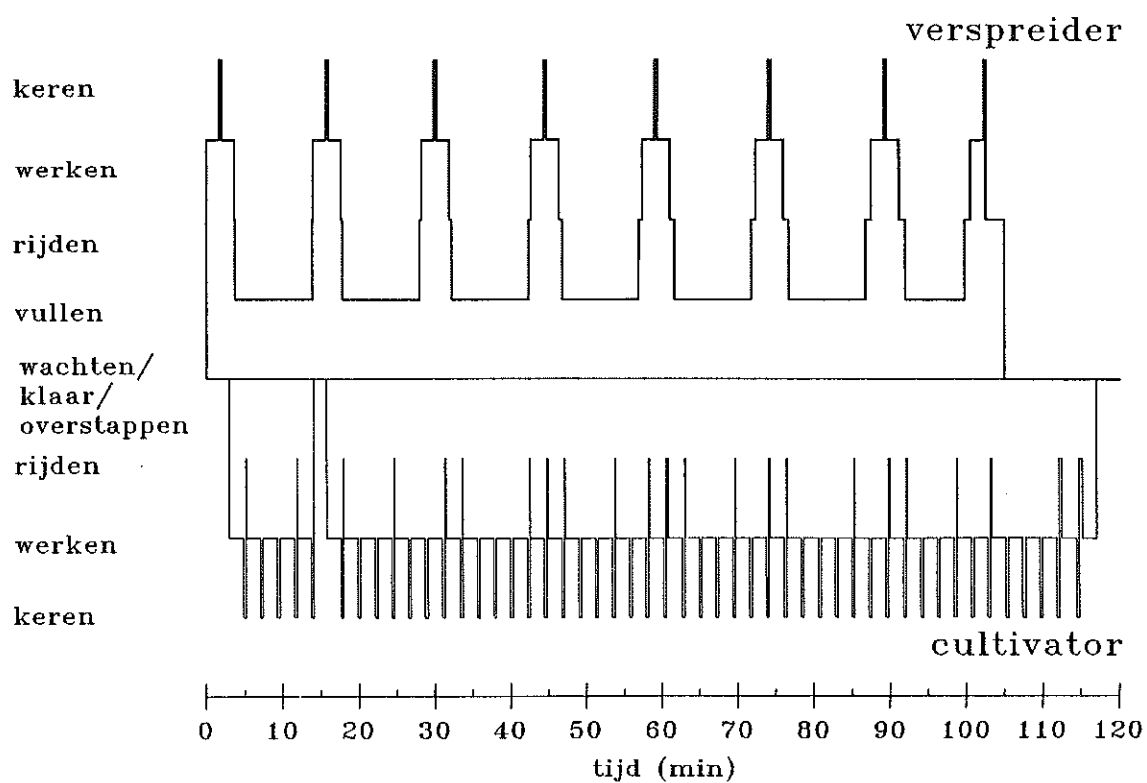
- Bij een tweemanssysteem met hele omgangen zijn zowel de verspreider als de cultivator binnen 120 minuten klaar. Bij onderbroken werkgangen is de onderwerker vrijwel klaar binnen 120 minuten (zie tabel 12).
- Bij een tweemanssysteem moet de cultivator af en toe wachten op de verspreider totdat er weer voldoende stroken zijn bemest.

Verder zijn de opmerkingen die bij de figuren in bijlage A zijn gemaakt ook hier van toepassing.

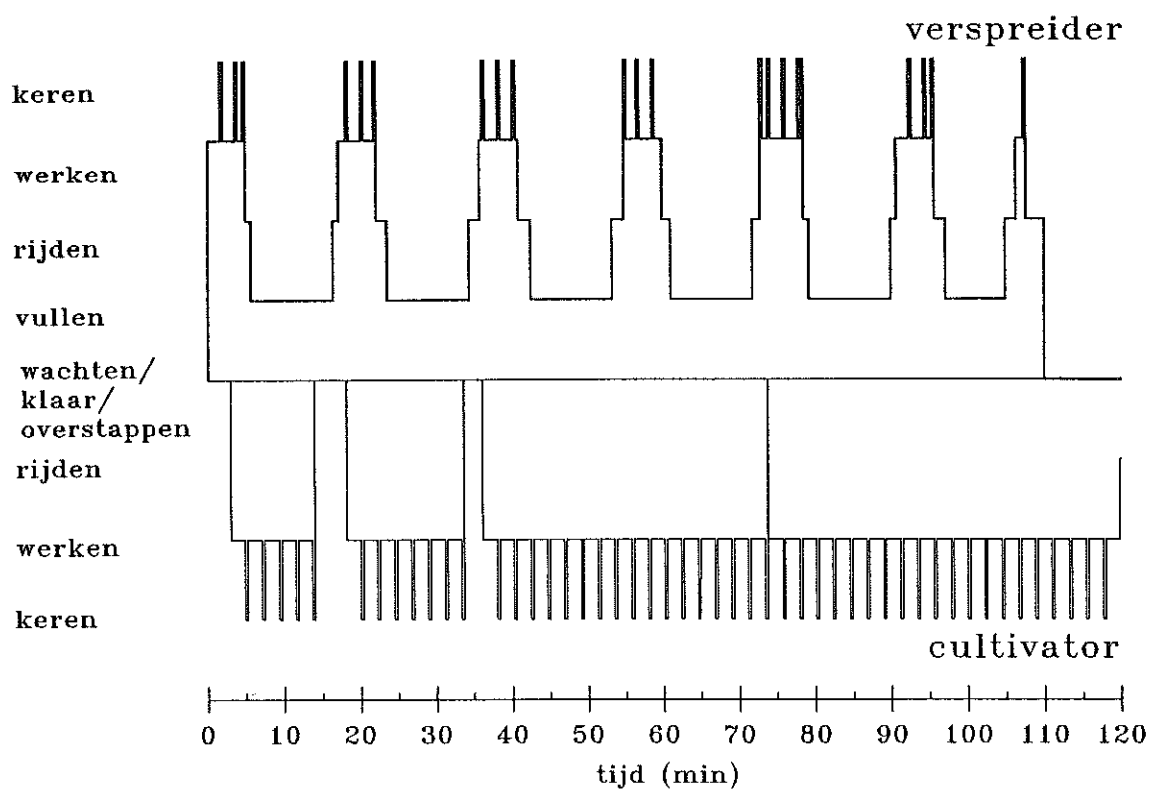
tweemanssysteem / hele omgangen / fifo



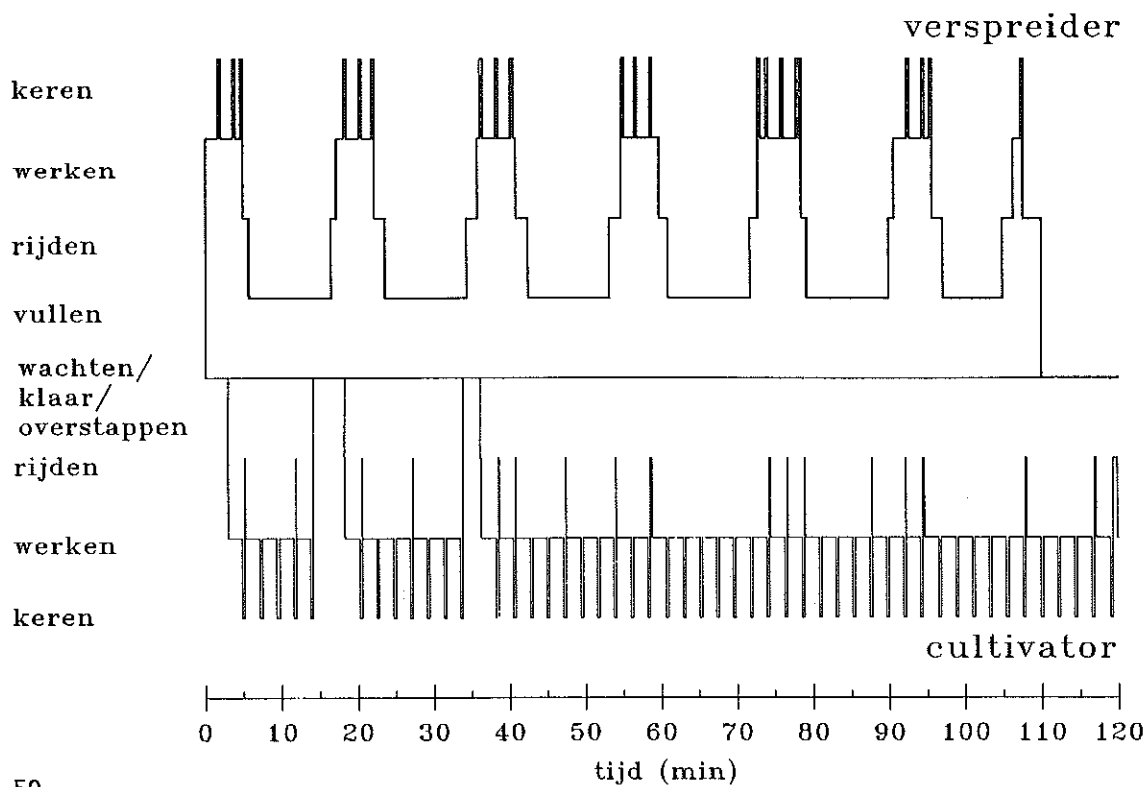
tweemanssysteem / hele omgangen / lifo



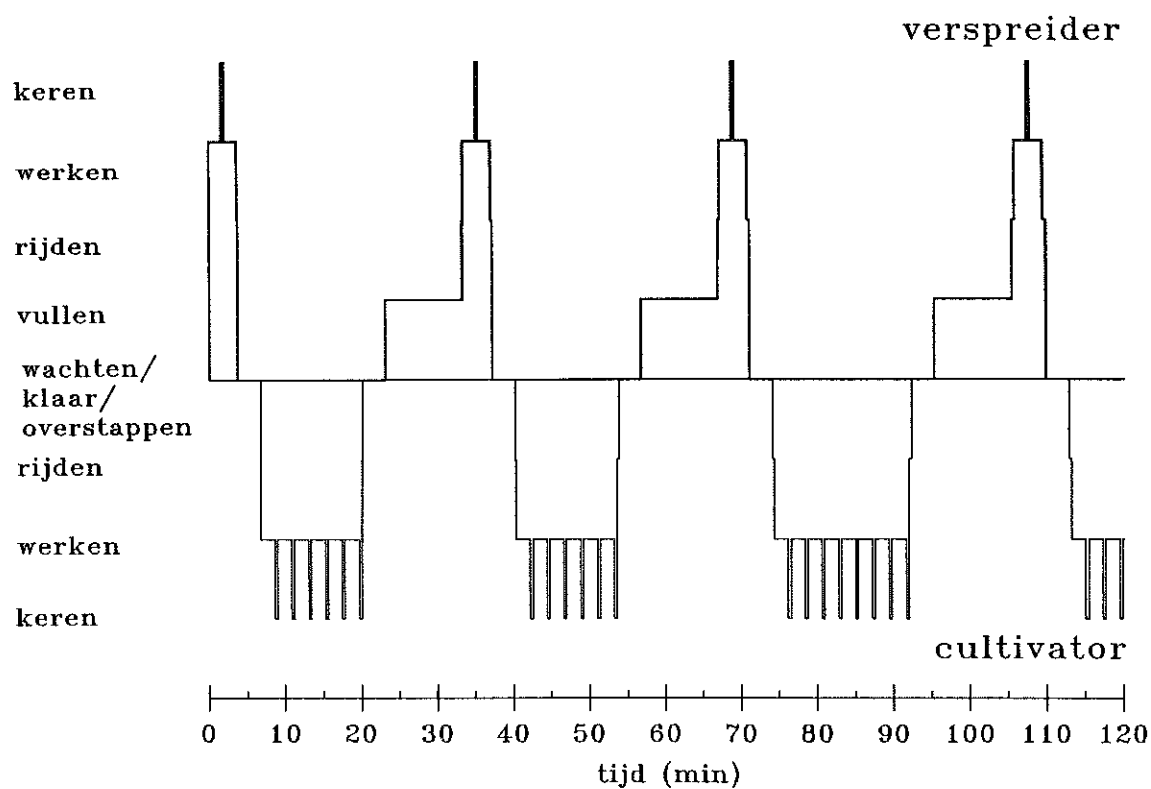
tweemanssysteem / onderbroken werkgangen / fifo



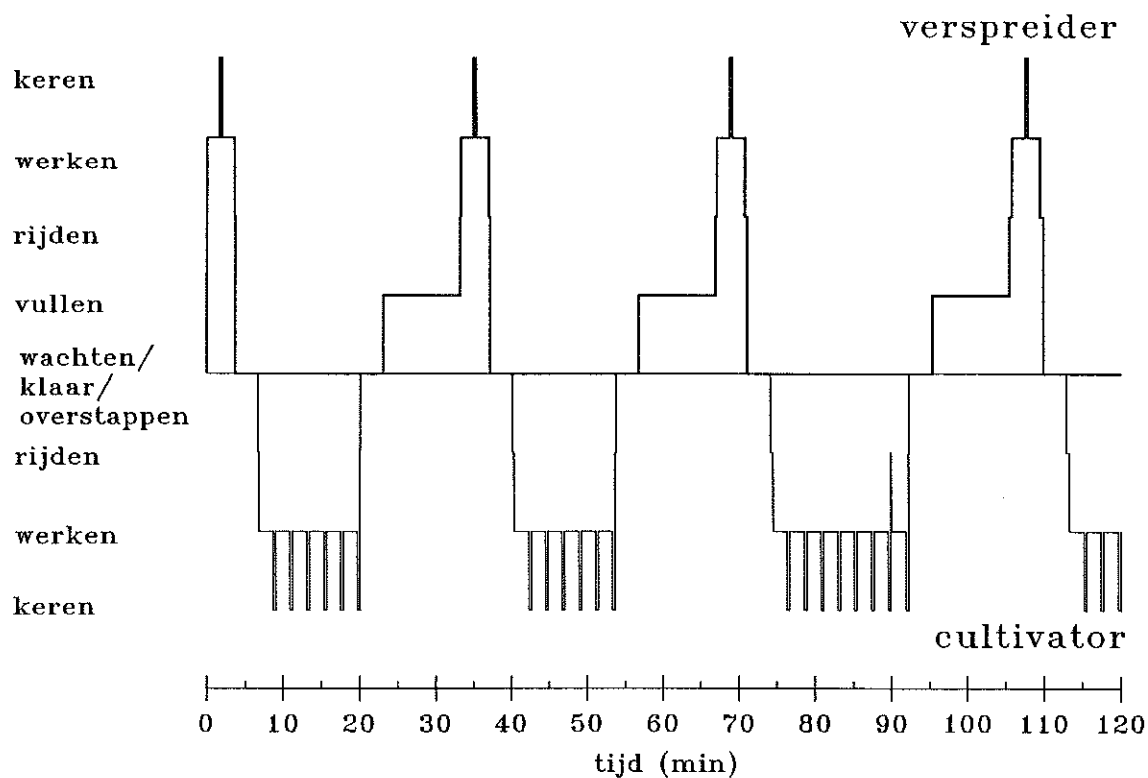
tweemanssysteem / onderbroken werkgangen / lifo



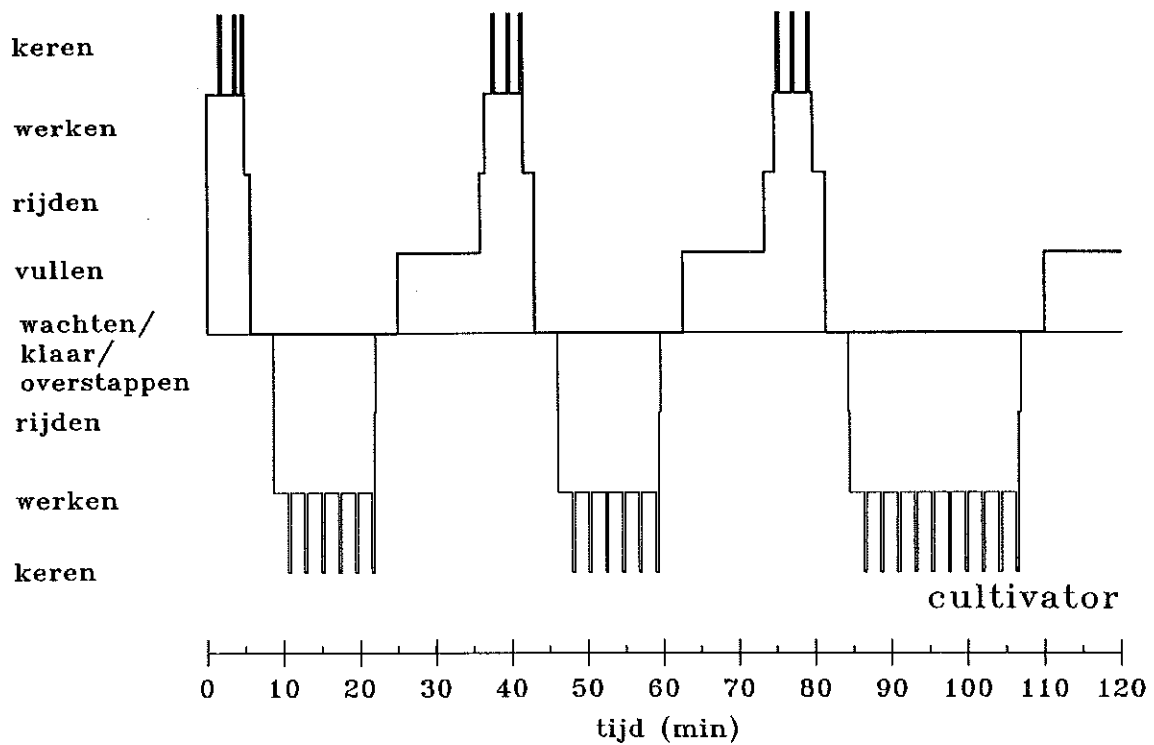
eenmanssysteem / hele omgangen / fifo



eenmanssysteem / hele omgangen / lifo



eenmanssysteem / onderbroken werkgangen / fifo
verspreider



eenmanssysteem / onderbroken werkgangen / lifo
verspreider

