



**Effecten van grondsoort en ontwatering op
de opbrengst van akkerbouwgewassen**

**A.L.M. van Wijk, R.A. Feddes,
J.G. Wesseling en J. Buitendijk**

**Effecten van grondsoort en ontwatering op de opbrengst van
akkerbouwgewassen**

ICW en het Staring Centrum

Vanaf 1989 zal het Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied, Staring Centrum het onderzoek voortzetten van:

ICW	Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
IOB	Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen
LB	Afd. Landschapsbouw. Rijksinstituut voor Onderzoek van de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp'
STIBOKA	Stichting voor Bodemkartering

Dit rapport is te bestellen door storting van f 25,- op giro 817672 ten name van ICW, Wageningen, onder vermelding van Rapport 31 en het aantal exemplaren. Toezending geschiedt na ontvangst van het bedrag.

**EFFECTEN VAN GRONDSOORT EN ONTWATERING OP DE OPBRENGST VAN
AKKERBOUWGEWASSEN**

Een evaluatie over 30 jaren van de opbrengst van
aardappelen en zomergraan op acht bodemprofielen
bij vijftien combinaties van ontwateringsdiepte
en -intensiteit

A.L.M. van Wijk, R.A. Feddes, J.G. Wesseling en J. Buitendijk

RAPPORT 31

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING (ICW)

POSTBUS 35, 6700 AA WAGENINGEN

1988

Copyright® 1988
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Postbus 35, 6700 AA Wageningen
Tel. 08370-19100

ISSN 0921-89X

VOORWOORD

Bij de evaluatie van landinrichtingsplannen was het waterhuishoudkundige aspect tot in het midden van de zeventiger jaren gebaseerd op het werk van de Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland (COLN). In dit COLN-onderzoek werd voor zeven profielgroepen het verband gelegd tussen de opbrengst van landbouwgewassen en de gemiddelde grondwaterstandsdiepte gedurende het groeiseizoen. Hieruit zijn de iso-carpen diagrammen (lijnen van gelijke opbrengst) van grasland en bouwland ontstaan (VISSER, 1958). Uit deze diagrammen kan voor elk profieltype bij elke combinatie van winter- en zomergrondwaterstand de gewasopbrengst worden afgelezen.

Ten behoeve van een meer gefundeerde berekening van de landbouwkundige baten ontstond rond 1975 de behoefte om door middel van recent wetenschappelijk onderzoek de relatie tussen waterhuishouding en opbrengst verder te onderbouwen. Door VAN WIJK en FEDDES (1975) en door FEDDES and VAN WIJK (1977) werd een eerste methodiek uitgewerkt ter berekening van de invloed van de ontwatering op de opbrengst van landbouwgewassen en grasland. De ontwikkelde methodiek leende zich toendertijd niet voor directe toepassing. De belangrijkste oorzaken hiervoor waren: het ontbreken van goede bepalingsmethodieken voor de benodigde bodemfysische invoerparameters en de te hoge kosten vanwege de toen nog beperkte computercapaciteit. Wel vormde de tijdens dit onderzoek verkregen inzichten een basis waarop de eerste zogenaamde HELP-tabellen mede werden gebaseerd (WERK GROEP HELP, 1978).

Door ontwikkelingen in bodemfysische meettechnieken (BOELS et al, 1978; BOUMA, 1977), het beschikbaar komen van simulatiemodellen voor bodem-water-plant-atmosfeer (WIND and VAN DOORNE (1975), FEDDES et al (1978), WIND (1979), VAN WIJK (1980), BELMANS et al (1983), BUITENDIJK (1984)) en van eigen computers, werd in 1979 de draad weer opgevat. Naast de methodiekwikkeling werd in dat jaar begonnen met een uitgebreid veldonderzoek dat tot doel had de nodige gegevens voor invoer en validatie van de te ontwikkelen modellen te verzamelen.

Aan dit HELP-onderzoek werd door de volgende ICW-medewerkers in belangrijke mate bijgedragen:

dr. A.L.M. van Wijk

dr. R.A. Feddes

ir. J.G. Wesseling

J. Buitendijk

J. Beuving

R. Wiebing

dr. G.P. Wind

J.J. Evers-Vermeer

ir. P. Kabat.

Resultaten van dit onderzoek werden onder andere gepubliceerd door VAN WIJK en FEDDES (1982; 1986), BEUVING (1982; 1984), BUITENDIJK (1985), FEDDES, WESSELING and WIEBING (1984).

In 1982 werd voor herziening van de eerste HELP-tabellen de WERKGROEP 'HELP-tabel, bestaande uit medewerkers van de Landinrichtingsdienst ingesteld. Bij de samenstelling van de nieuwe ontwatering-opbrengst-depressie tabellen voor bouwland is door de Werkgroep 'HELP-tabel' (1987) uitvoerig gebruik gemaakt van de in het onderhavige ICW-rapport gepresenteerde resultaten

INHOUD

	Blz.
IN KORT BESTEK	1
1. INLEIDING	2
2. BODEMPROFIELEN, GEWASSEN, VELD- EN LABORATORIUMMETINGEN	5
2.1. Keuze bodemprofielen	5
2.2. Keuze gewassen	7
2.3. Veldonderzoek	7
2.3.1. Bodem	7
2.3.2. Gewassen	9
2.4. Laboratoriumonderzoek	10
2.4.1. Meting doorlatendheids- en vocht karakteristieken	10
3. MODELLERING VUCHTHUISHOUDING, BODEMGEBRUIKSOMSTANDIGHEDEN, GEWASGROEI EN PRODUCTIE	17
3.1. Geïntegreerde modelbenadering	17
3.2. Modellerings vocht huishouding onbegroeide bodem (FLOWEX)	19
3.3. Modellerings bewerkbaarheid in het voorjaar	22
3.4. Modellerings zaai-/poottijdstip	25
3.5. Modellerings kieming en opkomst	28
3.6. Modellerings vocht huishouding en gewasverdamping (SWATRE)	33
3.7. Modellerings gewasgroei en opbrengst (CROPR)	36
3.7.1. Fotosynthese en droge stofproductie	36
3.7.2. Produktiemodel zomergranen	39
3.7.3. Produktiemodel aardappelen	43
3.8. Modellerings oogsttijdstip van granen, aardappelen en bieten	45
4. UITGANGSPUNTEN EN INVOERGEGEVENS VOOR MODELBEREKENINGEN	48
4.1. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken van bodemprofielen	48
4.2. Karakterisering ontwatering	48
4.3. Weersgesteldheid	58
4.4. Aanvangsvochtverdeling	60
4.5. Drempelwaarden bodemvocht voorjaarswerkzaamheden	61
4.6. Aantal dagen benodigd voor zaaien en poten	62
4.7. Wortelgroei en wateropname	62
4.8. Gewasontwikkeling en droge stofverdeling	65
4.9. Watergebruik en gewasproductie	66
4.10. Tijd-basis modellen	67
5. VERIFICATIE MODELRESULTATEN AAN MEETGEGEVENS	69
5.1. Drukhoogte bodemvocht en grondwaterstand	69
5.2. Verdamping en produktie	70
6. KARAKTERISERING EFFECTEN VAN ONTWATERING OP GEWASOPBRENGST	72
6.1. Karakterisering effecten ontwatering in voorjaar en groeiseizoen	72
6.2. Ontwateringseffect in relatie tot bodemtype	74
6.3. Ontwateringseffect in relatie tot stikstofvoorziening	75

Blz.

7. EFFECTEN VAN ONTWATERING OP GEWASOPBRENGST TOEGELICHT AAN AARDAPPELEN OP EEN MATIG LICHT ZAVEL	79
7.1. Invoergegevens	79
7.2. Voorbeeld uitvoergegevens	79
7.3. Verkregen ontwateringssituaties	82
7.4. Ontwatering, bewerkbaarheid, tijdstip poten	86
7.5. Ontwatering, kieming, opkomst en tijdigheidsverliezen	87
7.6. Ontwatering, verdamping en produktie	91
7.7. Effect van infiltratie en wegzijging op de opbrengst	95
8. EFFECTEN VAN ONTWATERING OP DE OPBRENGST VAN AARDAPPELEN EN ZOMERGRANEN OP 8 BODEMPROFIELEN	97
8.1. Inleiding	97
8.2. Aardappelen	97
8.2.1. Effecten van ontwatering in het voorjaar op de opbrengst	97
8.2.2. Effecten van ontwatering in het groeiseizoen op de opbrengst	104
8.2.3. Effecten van verschil in bodemtype op de opbrengst	106
8.2.4. Effecten van ontwatering ten gevolge van extra stikstofleverantie door de bodem op de opbrengst	107
8.2.5. Totaal effect van ontwatering op de gewasopbrengst	107
8.3. ZOMERGRANEN	116
8.3.1. Effecten van ontwatering in het voorjaar op de opbrengst	116
8.3.2. Effecten van ontwatering in het groeiseizoen op de opbrengst	116
8.3.3. Effecten van verschil in bodemtype op de opbrengst	118
8.3.4. Effecten van ontwatering ten gevolge van extra stikstofleverantie door de bodem op de opbrengst	118
8.3.5. Totaal effect van de ontwatering op de gewasopbrengst	118
LITERATUUR	127

IN KORT BESTEK

Een methodiek is ontwikkeld om effecten van waterhuishoudkundige maatregelen op de gewasopbrengst op elke willekeurige grond te kunnen berekenen onder wisselende meteorologische omstandigheden. De methodiek bestaat uit een geïntegreerde modelbenadering, die per bodemtype en gewas rekening houdt met effecten van ontwatering op:

- aantal/tijdstip van bewerkbare dagen i.v.m. zaaien/poten in het voorjaar;
- kiemingsduur en opkomst in afhankelijkheid van bodemvocht en temperatuur;
- vochtvoorziening, ontwikkeling en groei van het gewas;
- aantal/tijdstip van bewerkbare dagen i.v.m. oogsten in het najaar.

Het gebruik van dynamische modellen voor simulatie van processen in het bodem-water-plant-atmosfeer systeem staat centraal. Voorts is een aantal in het veld en laboratorium experimenteel afgeleide verbanden onderscheiden, die processen en verschijnselen onderling koppelen. Calibratie en verificatie heeft plaatsgevonden met gegevens die zijn gemeten in het veld onder uiteenlopende omstandigheden van weer, bodem, waterhuishouding en gewas.

Effecten van ontwatering op de opbrengst van aardappelen en zomergranen zijn berekend op acht verschillende bodemprofielen gedurende 30 jaren (1952-1981). De ontwateringssituaties bestonden uit vijftien combinaties van ontwateringsdiepte en -intensiteit. De resultaten zijn per bodemprofiel uitgesplitst naar:

- effecten van ontwatering in het voorjaar;
- effecten van ontwatering in het groeiseizoen;
- effecten van verschil in bodemtype;
- effecten van stikstofleverantie door de bodem als reactie op ontwatering;
- geïntegreerd effect van ontwatering op de opbrengst.

Het blijkt dat naarmate gronden lichter zijn een sterkere reactie wordt gevonden op ontwateringsmaatregelen. Dit hangt samen met de onverzadigde doorlatendheid die over het traject van drukhoogten van het bodemvocht in het voorjaar bij zwaardere gronden duidelijk lager is dan bij lichtere gronden. Hierdoor reageren de vochtomstandigheden in de bovengrond van zwaardere gronden veel minder direct op verschillen in diepte van de grondwaterstand. Verder blijkt dat de optimale ontwateringsdiepte afhankelijk van het type bodemprofiel varieert tussen ca. 80-90 cm-mv bij een niet-verbeterde veenkoloniale grond tot ca. 130-140 cm-mv bij een opdrachtige matig lichte zavel. Gaande van de gehanteerde 'hoogste drainage-intensiteit naar de aangehouden 'middelste' drainage-intensiteit varieert de verlaging in gewasopbrengst van 0-4%. Om te beoordelen of een minder zwaar criterium eventueel kan worden toegestaan, dient een nadere economische analyse te worden uitgevoerd, waarin ook het verschil in kosten van drainage tot uiting komt.

De ontwikkelde methodiek is toegepast voor de evaluatie van effecten van de waterhuishouding. De modelbenadering leent zich ook voor veel bredere toepassingen zoals voor de berekening van effecten van irrigatie, bodemverbetering, -verdichting en voor toepassing in de landevaluatie.

1. INLEIDING

De betekenis van ontwatering van landbouwgronden is het voorkomen van wateroverlast. Deze wateroverlast kan bestaan uit plassen op het maaiveld maar ook uit een te natte bouwvoor of wortelzone.

In de vijftiger jaren is vooral onderzoek gedaan naar het verband tussen de diepte van de grondwaterstand en de gewasopbrengst. Een voorbeeld van de gemiddelde grondwaterstandsdiepte gedurende het groeiseizoen en de opbrengst is gegeven in Figuur 1 (naar VISSER, 1958). Met toenemende diepte van de grondwaterstand neemt de opbrengst als gevolg van verbeterde aëratie toe. Voorbij de optimale grondwaterstandsdiepte, waarbij de maximale gewasopbrengst wordt gevonden, neemt de opbrengst af als gevolg van tekort aan water. De opbrengst-grondwaterstandsdiepte curven zijn verschillend voor verschillende gewassen en bodemtypen, maar de vorm is in het algemeen dezelfde. Afhankelijk van de weersomstandigheden zullen de optima van de curven in droge jaren naar ondiepere en in natte jaren naar diepere grondwaterstanden verschuiven.

Uit de figuur volgt dat de schade door 'te nat' ernstiger is dan de schade door 'te droog'. Dit verschijnsel is te wijten aan een aantal oorzaken. Slechte aëratie reduceert niet alleen de water/voedingsstoffenopname van het gewas, maar remt eveneens de stikstofmineralisatie in de bodem. Een ander indirect effect op plantengroei is dat onder te natte omstandigheden het tijdig uitvoeren van de benodigde werkzaamheden in het veld niet mogelijk is. Onvoldoende drainage leidt tot natte grond die slecht berijd- en

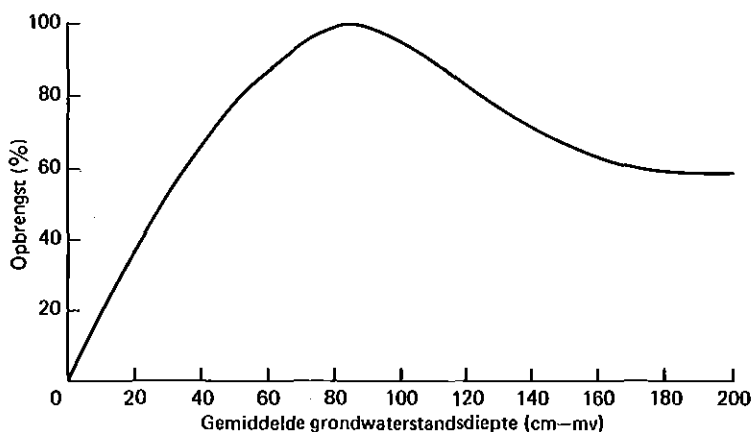


Fig. 1.

Voorbeeld van de relatie tussen gewasopbrengst en gemiddelde grondwaterstandsdiepte gedurende het groeiseizoen (naar VISSER, 1958)

bewerkbaar is. Uitgestelde voorjaarsbewerking geeft een verkorting van het groeiseizoen en daardoor een afname van de potentiële gewasopbrengst. Bovendien gaat berijden en bewerken van natte grond gepaard met structuurbederf en bodemverdichting. Daarbij komt nog dat slechte ontwatering van invloed is op de benodigde machinecapaciteit en in het najaar nadelig is voor de oogst door extra opbrengstverliezen zowel naar kwantiteit als kwaliteit. Ook wordt het aantal voor oogsten beschikbare dagen erdoor beperkt.

Uit Figuur 1 komt naar voren dat er 2 limiterende grondwaterstandsdiepten kunnen worden onderscheiden: een bovengrens zodanig dat de bodem droog genoeg is voor het tijdig kunnen uitvoeren van de benodigde grondverwerkingen en voor een gunstige aëratie van de wortelzone. Daarnaast is er een ondergrens gesteld vanuit de waterbehoeften van het gewas. Tussen deze twee grenswaarden moet een optimum liggen.

De gewasopbrengst-grondwaterstandsdiepte curve verschilt van jaar tot jaar. Bovendien is de relatie tussen grondwaterstand en opbrengst slechts zeer indirect. Bewerkbaarheid en gewasgroei worden veel directer beïnvloed door de vochtomstandigheden in de onverzadigde zone dan door de diepte van de grondwaterstand.

Voor bestudering van effecten van ontwatering op produktie van gewassen is het nodig de effecten die optreden in voorjaar, groeiseizoen en najaar in detail na te gaan. Per grondsoort en gewas dient voor ieder afzonderlijk jaar rekening te worden gehouden met het effect van ontwatering op:

- aantal en tijdstip van bewerkbare dagen in verband met zaaien/poten in het voorjaar;
- kiemingsduur en opkomst in afhankelijkheid van bodemvocht en -temperatuur;
- vochtvoorziening, ontwikkeling en groei van het gewas;
- aantal en tijdstip van bewerkbare dagen in verband met oogsten in het najaar.

Nu we in staat zijn om met behulp van computersimulatiemodellen de vochtomstandigheden naar tijd en diepte dynamisch te beschrijven, en er meer bekend is over de relatie tussen bodemvocht en bewerkbaarheid enerzijds en bodemvocht en gewasgroei anderzijds, kan de relatie tussen ontwatering en groei/produktie veel gedetailleerder dan voorheen mogelijk was, worden onderzocht.

In dit rapport wordt de methodiek beschreven die ten behoeve van een dergelijk onderzoek is ontwikkeld. Deze methodiek is getoetst aan experimenten in het veld met verschillende gewassen en bodemtypen. Vervolgens geeft dit rapport resultaten van computersimulaties aan aardappelen en zomergranen groeiend gedurende 30 jaren (1952-1981) op acht representatieve bodemprofielen bij 15 combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit.

2. BODEMPROFIELEN, GEWASSEN, VELD- EN LABORATORIUMMETINGEN

Om met behulp van een model de invloed van ontwatering gedurende een reeks van jaren te kunnen vaststellen, zijn per grondsoort en gewas een aantal karakteristieke gegevens nodig. Hiertoe is onderzoek verricht, zowel in het veld als in het laboratorium.

2.1. KEUZE BODEMPROFIELEN

In het huidige evaluatiesysteem voor landinrichtingsplannen werden voor bouwland in eerste instantie 25 profieltypen onderscheiden (WERKGROEP HELP, 1978). Inmiddels is dit aantal in de vernieuwde HELP-tabellen uitgebreid tot 70 (WERKGROEP HELP-TABEL, 1987).

Overname van dit aantal in het modelonderzoek zou tot een te omvangrijk meetprogramma in het veld en laboratorium leiden. Daarom is het aantal grondsoorten beperkt. Bij de keuze van de grondsoorten en gebieden waar de benodigde gegevens verzameld zouden kunnen worden, hebben de volgende overwegingen een rol gespeeld:

- die bodemtypen moeten worden gekozen die voorkomen in de belangrijkste akkerbouwgebieden;
- voor afleiden van criteria voor de bewerkbaarheid moeten de gekozen gebieden bodem- en waterhuishoudkundig tamelijk homogeen zijn. Bovendien moet het bouwplan in het gebied vrij uniform zijn en karakteristiek voor de grondsoort;
- de te kiezen grondsoorten moeten van licht tot zwaar een doorsnee vormen van de in de HELP-opbrengstdepressie tabellen voorkomende bodemtypen.

Aan de hand van bodemkaarten zijn we tot de in Tabel 1 en Figuur 2 gegeven grondsoort- en gebiedskeuze gekomen.

In deze opsomming ontbreken zandgronden met een toemaakdek en löss. De essen in de zandgebieden zijn veelal opgenomen in dorpsuitbreidingen of zijn nagenoeg uitsluitend voor snijmaisteelt in gebruik. Lössgronden hebben een zodanige hoogteligging dat ze nauwelijks ontwateringsbehoeftig zijn.

Tabel 1. Overzicht van de gekozen bodemprofielen en de regio's waar ze voorkomen

Profiel-
nummer

1	veldpodzol: 40 cm humeus zwak lemig (14% < 50 μ m) zeer fijn zand op leemarm zand: zuidoost Groningen (Sellingen)
2	veldpodzol: 50 cm humeus sterk lemig (28% < 50 μ m) zeer fijn zand op leemarm zand: Drenthe (Rolde)
3	dampodzol: 20 cm veenkoloniaal dek op 20 cm spalterveen op zand: Veenkoloniën (Borgercompagnie)
4	poldervaaggrond: kalkrijke zeer lichte zavel (bouwvoor: 10% < 2 μ m): noordwest Groningen (Kloosterburen)
5	poldervaaggrond: 60 cm kalkrijke matig lichte zavel (14% < 2 μ m) op kalkrijke zeer lichte zavel: Zuid-Beveland (Kortgene)
6	poldervaaggrond: 40 cm kalkrijke zware zavel (bouwvoor: 22% < 2 μ m) op kleiig zeer fijn zand: Zuid-Beveland (Colijnsplaat)
7	poldervaaggrond: 70 < cm kalkrijke lichte klei (31% < 2 μ m) op kalkrijke zavel: Zuid-Beveland (Kats)
8	poldervaaggrond: kalkrijke matig zware klei (bouwvoor: 45% < 2 μ m): noordoost Groningen (Nieuw Beerta)



Fig. 2. Overzicht van de ligging van de proefplekken

2.2. KEUZE GEWASSEN

De keuze van de gewassen is gedaan op grond van overwegingen die samenhangen met het areaal van voorkomen in Nederland, de eisen ten aanzien van de bewerkbaarheid van de grond, de beschikbaarheid van voldoende kennis en het verschil in periode en wijze van groei van de verschillende akkerbouwgewassen. Wat areaal betreft zijn aardappelen en bieten de belangrijkste akkerbouwgewassen. Gekozen is voor het gewas aardappelen als representant van de hakvruchten. Van aardappelen is vooral in het kader van beregenings- en grondverbeteringsonderzoek relatief veel kennis beschikbaar gekomen omtrent het verband tussen watergebruik en droge stofproductie evenals van gewasontwikkeling en groeiverloop in afhankelijkheid van omgevingsfactoren. Daarnaast zijn voor aardappelen in ruime mate veldgegevens beschikbaar om modelresultaten te kunnen toetsen.

Teneinde ook een gewas te hebben dat een andere groeiperiode en -habitus heeft, en mogelijk anders op de waterhuishouding reageert, is gekozen voor een graan. Allereerst is gedacht aan wintertarwe. Echter van dit gewas bleek te weinig bekend te zijn over de effecten van wateroverlast die gedurende de winter en het vroege voorjaar kunnen optreden. Bewust van het beperkte areaal dat zomertarwe in het bouwplan inneemt, is toch voor dit gewas gekozen als representant van de granen. Bovendien zijn in het verleden met zomertarwe een reeks beregeningsproeven uitgevoerd waarin de voor modelsimulaties benodigde transpiratie - produktie relaties werden vastgesteld.

2.3. VELDONDERZOEK

2.3.1. Bodem

Het veldonderzoek (voor een beschrijving zie BEUVING, 1982) is uitgevoerd in de jaren 1979 en 1980. Deze twee jaren verschilden sterk voor wat betreft de vochtomstandigheden in het voorjaar: 1979 was nat en daardoor laat, 1980 was 'normaal'. Het doel van het veldonderzoek was het verzamelen van bodemfysische invoergegevens, het afleiden van bewerkbaarheidscriteria en het registreren van de vochthuishouding ter controle van de modeluitkom-

sten. In elk gebied werden hiertoe enkele percelen uitgezocht die representatief zijn voor de grondsoort. Dit is gedaan in nauw overleg met bodemkundige specialisten, goed bekend met de streek. Aan deze percelen zijn de volgende eisen gesteld:

- het perceel moet bodemkundig homogeen zijn;
- voor zover de grondsoort het toelaat, moet het profiel duidelijke kenmerken en horizonten hebben;
- het perceel moet goed ontwaterd zijn;
- in verband met hogere eisen aan de grondbewerking moet het bouwplan waar het akkerbouw betreft een groot percentage hakvruchten bevatten;
- het bedrijf moet zodanig gemechaniseerd zijn dat bewerkingen nodig voor zaaien/poten of oogsten verricht kunnen worden zo gauw de grond dit toelaat. Bij een te grote afhankelijkheid van loonwerkers is dit vaak niet het geval;
- geen beregening, omdat aanvullende watervoorziening tijdens het groeiseizoen niet in het modelonderzoek wordt meegenomen.

Waar mogelijk zijn in de verschillende gebieden de proefplekken ingericht op proefboerderijen. Door het meer vertrouwd zijn met onderzoek, het gewend zijn aan hinderlijke vaste meetopstellingen in het veld en het accepteren van enige gewasschade bij de metingen lenen proefboerderijen zich bij uitstek voor dit type onderzoek. Daarnaast is echter ook gebruik gemaakt van de welwillende medewerking van een aantal boeren.

Om voor de in het onderzoek betrokken grondsoorten in korte tijd vast te kunnen stellen wanneer deze grondsoorten bewerkbaar worden voor zaaien/-poten, is gebruik gemaakt van de medewerking van een aantal boeren. In de geselecteerde gebieden is aan deze boeren gevraagd op een aan hen uitgereikt formulier dagelijks een waardering - in de vorm van goed, matig, slecht - te geven voor de bewerkbaarheid van de grond op hun bedrijf en in de directe omgeving. Het betreft in het voorjaar de gewassen zomergranen, bieten en aardappelen en in het najaar alleen bieten en aardappelen. In een kolom 'opmerkingen' werd een toelichting gevraagd welke werkzaamheden werden uitgevoerd en waarom eventueel niet werd gewerkt indien de grond het wel toeliet.

In dezelfde perioden werd met behulp van gemakkelijk te verplaatsen tensiometeropstellingen de drukhoogte van het bodemvocht in de bouwvoor gemeten op dezelfde percelen waarop de beoordeling van de meewerkende boeren betrekking had. De metingen zijn verricht op 5, 10, 15 en 20 cm diepte. De

meetfrequentie varieerde. In het voorjaar van 1979 werd vooral gemeten, wanneer bewerkt werd. Dit leidde tot te weinig gegevens aan de natte kant in het traject van matig naar goed bewerkbaar. Vandaar is in 1980 ook regelmatig onder natte omstandigheden gemeten.

Van elke proefplek zijn de coördinaten vastgelegd en is het profiel beschreven door de Stichting voor Bodemkartering. Ter bepaling van humusgehalte, kalkgehalte, pH-KCl, granulaire samenstelling, dichtheid van de vaste fase, dichtheid van de grond, poriënvolume, vocht karakteristiek ($h(\theta)$ -relatie of pF-curve), verzadigde en onverzadigde doorlatendheid ($K(h)$ -relatie) werden uit elke horizont gestoorde en ongestoorde monsters genomen. Voor een uitvoerige weergave van proefplekgegevens en meetresultaten wordt verwezen naar BEUVING (1982, 1984).

Voor controle van de modeluitkomsten zijn gegevens nodig over de vocht-huishouding en de grondwaterstand op een aantal tijdstippen in het voorjaar en het groeiseizoen. Voor registratie van de drukhoogte van het bodemvocht met de diepte werden op iedere proefplek in een vaste meetopstelling tensiometers in het profiel aangebracht op diepten van 5, 10, 15 en 20 cm en verder per 10 cm tot 1 m diepte. Voor meting van de grondwaterstand werd per proefplek een grondwaterstandsbuis geplaatst.

Om de met een model gesimuleerde bodemvocht-drukhoogte profielen met die in het veld gemeten te kunnen vergelijken, zijn ter plaatse gemeten neerslagen nodig. Gebruik van neerslaggegevens van het dichtstbij gelegen KNMI-neerslagstation kan tot grote afwijkingen leiden. Daarom is op elke proefplek een zelfregistrerende regenmeter geplaatst, waarvan de stroken wekelijks werden verwisseld.

2.3.2. Gewassen

Op de percelen waar per grondsoort bodem- en waterhuishoudkundige metingen werden verricht zijn periodiek waarnemingen aan het gewas gedaan. Dit betrof aardappelen en zomergraan. Voor invoer en controle van de uitkomsten van de gewasproductiemodellen werden gegevens verzameld over zaai/pootdatum, datum van opkomst, verloop van de bedekkingsgraad, gewashoogte en bewortelingsdiepte tijdens het groeiseizoen en de eindopbrengst.

2.4. LABORATORIUMONDERZOEK

Voor bepaling van de voor het modelonderzoek benodigde bodemfysische karakteristieken, $K(h)$ en $h(\theta)$ -relaties, zijn op elke proefplek en wel uit elke te onderscheiden bodemlaag ongestoorde monsters genomen. Dit betroffen:

- voor meting van verzadigde en onverzadigde doorlatendheid in het zeer natte traject, grote monsters (20 x 20 cm) in cylinders of in gipsblokken;
- voor meting van onverzadigde doorlatendheid tot een drukhoogte van het bodemvocht van circa -800 cm en de vochtkarakteristiek, monsters in cylinders van 10 of 6 cm hoog en een diameter van 10 cm;
- voor meting van de onverzadigde doorlatendheid tot een drukhoogte van circa -10^5 cm, monsters in kopeckyringen (5 x 5 cm) bij lutumrijke grond en voor zand- en veengrond in ringen met een hoogte van 10 cm.

2.4.1. Meting doorlatendheids- en vochtkarakteristieken

Voor de bepaling van de doorlatendheid bestaat een groot aantal meetmethoden. Om de doorlatendheid over het gehele traject van verzadigde tot droge grond te kunnen meten, zijn in dit onderzoek drie bepalingsmethoden toegepast, die alle op toepassing van de continuïteitsvergelijking en de stromingsvergelijking volgens Darcy berusten. De continuïteitsvergelijking toegepast op één-dimensionale verticale stroming luidt:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (1)$$

waarin: θ = vochtgehalte ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

v = flux ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

t = tijd (d)

z = verticale coördinaat, positief naar boven gericht (cm)

Integratie van vergelijking (1) levert:

$$v(z_2, t) = v(z_1, t) - \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \partial z \quad (2)$$

waarin: $v(z_2, t)$ en $v(z_1, t)$ = fluxen op diepten z_2 en z_1 op tijd t

Indien $\theta(z, t)$ bekend is, kan de integraal in vergelijking (2) worden

opgelost. Is ook $v(z_1, t)$ bekend dan kan $v(z_2, t)$ worden verkregen. De flux kan volgens Darcy worden geschreven als:

$$v(z, t) = -k(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \quad (3)$$

waarin: $k(h)$ = doorlatendheid (cm.d^{-1})

dh/dz = gradiënt van de drukhoogte van het bodemvocht (cm.cm^{-1})

Door meting van $h(z, t)$ kan bij bekende $v(z, t)$ de $K(h)$ op een gegeven diepte en tijdstip worden berekend uit de verhouding tussen flux en hydraulische gradiënt. Voorwaarde voor toepassing van op deze methodiek gebaseerde bepalingmethoden is dat de monsters homogeen zijn wat betreft samenstelling en dichtheid.

Om de doorlatendheidskarakteristiek over het gehele traject van verzadigde naar zeer droge grond te kunnen bepalen, zijn de kolommen-, de verdampings- en de hete luchtmethode toegepast. Figuur 3 laat als voorbeeld de trajecten zien waarover de verschillende methoden in geval van een zware kleigrond geldig zijn. Voor zandgronden is de hete luchtmethode niet toepasbaar. De drukhoogte vanaf welke de verdampingsmethode kan worden toegepast hangt af van de mate van betrouwbaarheid waarmee de hydraulische gra-

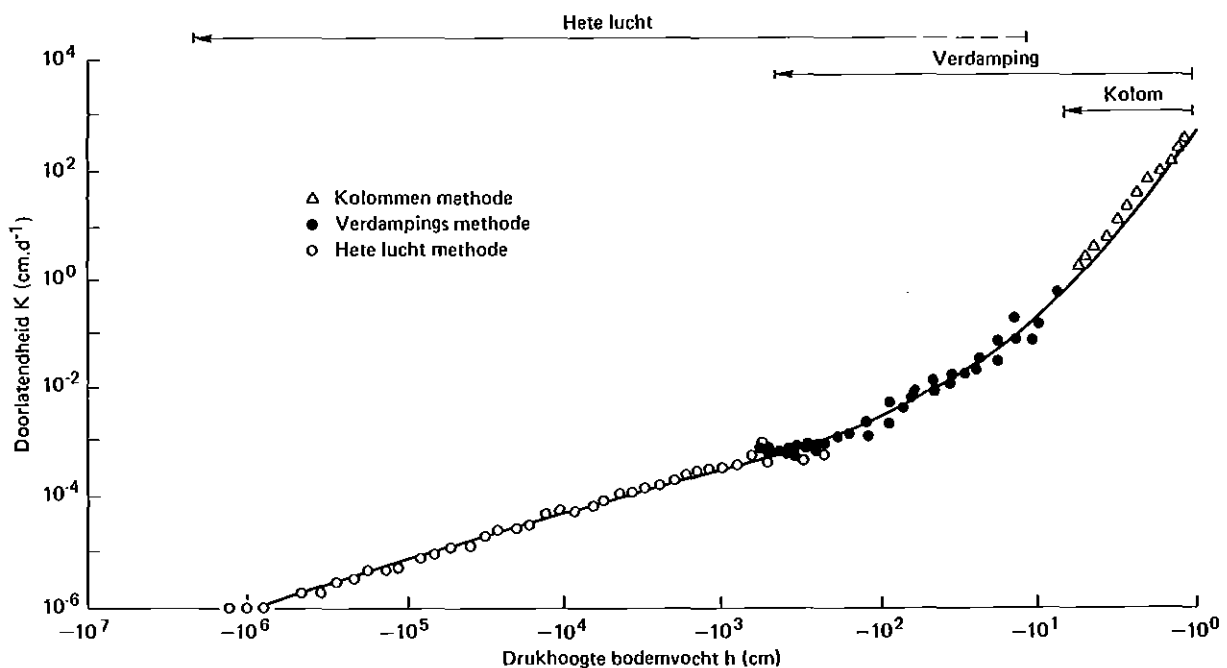


Fig. 3. Voorbeeld van een doorlatendheidskarakteristiek voor een zware kleigrond en de trajecten waarover de verschillende bepalingmethoden geldig zijn (naar BEUVING, 1984)

diënt gemeten kan worden. Voor zware kleigronden ligt deze kritieke drukhoogte bij circa -10 cm, voor leemarme zandgronden bij circa -70 cm.

Kolommenmethode

Deze methode meet de verzadigde doorlatendheid en de onverzadigde doorlatendheid in het zeer natte traject. Omdat de voor de bepaling van de verzadigde doorlatendheid gebruikelijk toegepaste geringe monstergrootte tot een grote variabiliteit in meetgegevens leidt, zijn voor dit onderzoek ongestoorde kolommen grond in plastic cylinders met een diameter en een hoogte van 20 cm of in gips gevatte ongestoorde grondkolommen van 20 x 20 cm toegepast (BOUMA, 1977). Om dh/dz te kunnen bepalen wordt op 15 cm boven de onderzijde van het monster één tensiometer ingebracht om h te meten, terwijl tijdens de meting het water aan de onderzijde vrij kan uitstromen, zodat daar geldt $h = 0$. De meting zelf is geautomatiseerd en wel zodanig dat zowel h als v met behulp van drukopnemers continu worden geregistreerd op een datalogger of recorder. De flux v wordt gemeten door de aan de onderzijde van het monster vrij uitstromende hoeveelheid water op te vangen in een vooraf geijkte buis. De verandering van de stijghoogte van het water in de buis wordt met een op de bodem van de buis aangebrachte drukopnemer continu geregistreerd.

Voor de start van de meting worden alle monsters op een zandbak op een drukhoogte van circa -80 cm gebracht. Vervolgens wordt op het monster een

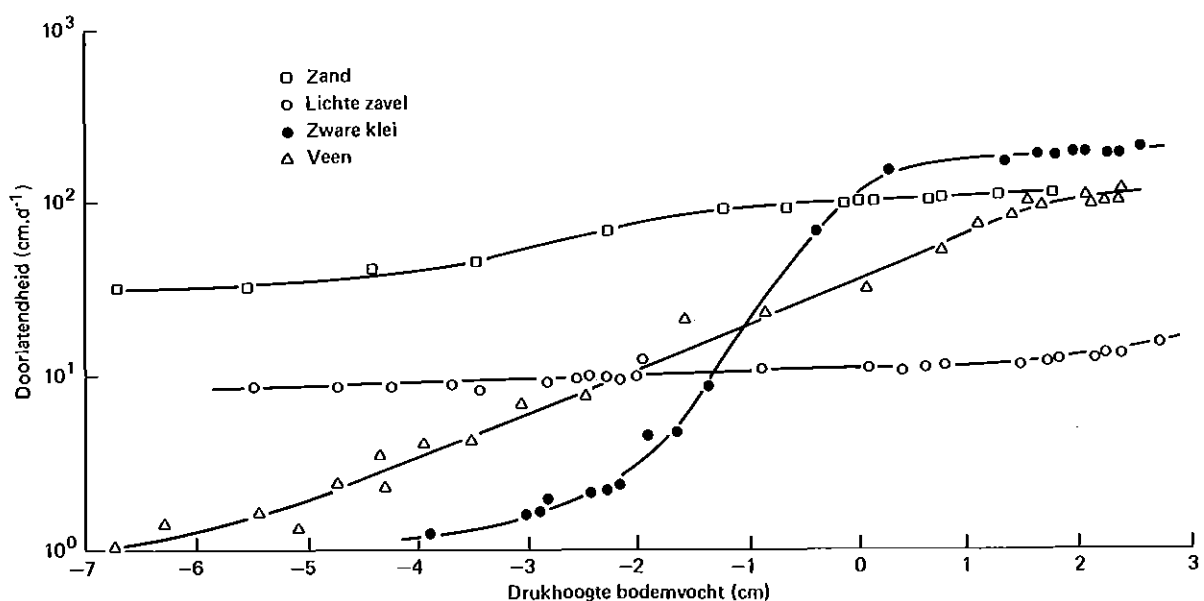


Fig. 4. Doorlatendheidskarakteristieken in het zeer natte traject voor een zand-, zavel-, veen- en zware kleigrond verkregen met de kolommenmethode (BEUVING, 1984)

laagje water van 2 cm gebracht en net zolang op dit niveau gehandhaafd tot v constant is. Afhankelijk van de doorlatendheid van het monster is de drukhoogte van het bodemvocht op 15 cm: $0 < h < -7$ cm. Door het water op het monster niet meer aan te vullen daalt het niveau en wordt tevens h negatief, zodat ook waarden van $k(h)$ in het zeer natte, doch onverzadigde traject verkregen worden.

Voorbeelden van meetresultaten van de doorlatendheid in de buurt van verzadiging van een veen-, zand-, lichte zavel- en kleigrond geeft Figuur 4.

Verdampingsmethode

Deze methode meet de onverzadigde doorlatendheid over het traject van circa $h = -10$ cm (kleigronden) en $h = -70$ cm (zandgronden) tot $h =$ circa -800 cm. De methode bestaat uit het langzaam laten verdampen van bodemvocht aan de bovenkant van een nat cilindrisch monster.

Bij monsters van 10 respectievelijk 6 cm hoogte wordt de drukhoogte als functie van de tijd op 4 respectievelijk 3 diepten in het monster gemeten, waardoor het aantal lagen in het monster dat meedoet bij de berekening van de doorlatendheid 3 respectievelijk 2 bedraagt (Figuur 5). Het vochtverlies van het totale monster met de tijd wordt verkregen door regelmatige weging van het monster. Om dit totale vochtverlies op een bepaald tijdstip te kunnen verdelen over de diepten waarop de tensiometers zijn aangebracht is het verband tussen de gemeten h 's en de bijbehorende vochtgehalten θ nodig. Dit verband wordt op voorhand benaderd met behulp van een lijnstukkencurve, waarvoor de algemene vergelijking geldt:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + c_i(h_i - h_{i-1}) \quad (4)$$

waarin c is de helling van de vocht karakteristiek, ook wel bekend als de differentiële vochtcapaciteit (cm^{-1}).

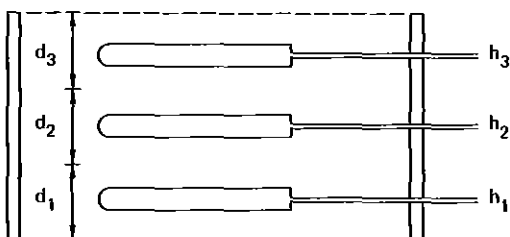


Fig. 5. Monster met tensiometers op de diepte van meten voor de bepaling van $h(\theta)$ en $k(h)$ relaties met de verdampingsmethode

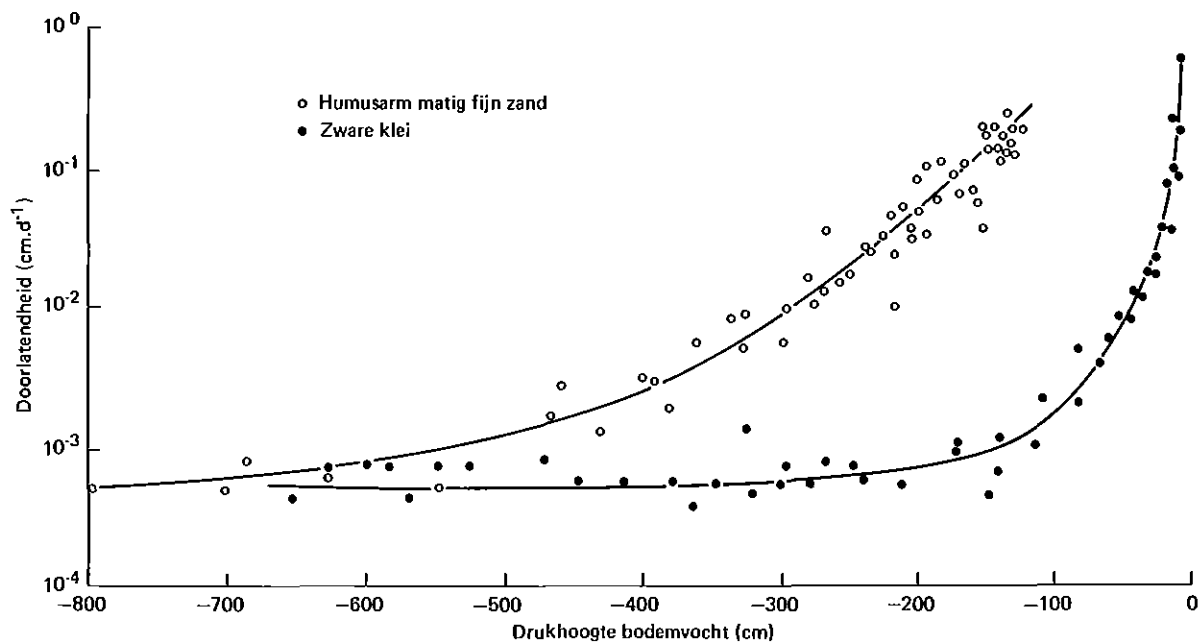


Fig. 6. Doorlatendheidskarakteristieken in het drukhoogtetraject natter dan -800 cm voor humusarm matig fijn zand en zware klei verkregen met de verdampingsmethode (BEUVING, 1984)

De vochtinhoud van het monster op een bepaald tijdstip is:

$$m = d_1\theta_1 + d_2\theta_2 + d_3\theta_3 \quad (5)$$

waarin: d = dikte van de lagen

θ = volumegehalte corresponderend met de gemeten drukhoogte h

Door substitutie van vergelijking (4) in vergelijking (5) wordt de volgende uitdrukking verkregen (zie BOELS et al., 1978):

$$m = (d_1 + d_2 + d_3)\theta_0 + \{d_1(h_1 - h_0) + d_2(h_1 - h_0) + d_3(h_1 - h_0)\}c_1 + \\ + \{d_2(h_2 - h_1) + d_3(h_2 - h_1)\}c_2 + d_3(h_3 - h_2)c_3 \quad (6a)$$

welke te vereenvoudigen is tot:

$$m = a_0\theta_0 + a_1c_1 + a_2c_2 + a_3c_3 \quad (6b)$$

waarin m , θ_0 en de coëfficiënten a_0 , a_1 en a_3 bekend zijn.

Door het verrichten van een aantal opvolgende metingen van m en h wordt een serie vergelijkingen van het type 6b verkregen. Door middel van vereffening worden waarden voor c gevonden, zodat de uiteindelijke vocht karakteristiek $h(\theta)$ bekend wordt. Vervolgens wordt via de eerder geschetste procedure met de vergelijkingen (2) en (3) de doorlatendheidskarakteristiek $k(h)$ bepaald. In figuur 6 wordt een voorbeeld gegeven van doorlatendheidsmetingen met de verdampingsmethode van een humusarm matig fijn zand en een zware klei.

Hete luchtmethode

Gaat de verdampingsmethode slechts tot circa $h = -800$ cm, deze methode beoogt de doorlatendheid te bepalen over het gehele traject tot drukhoogten van circa $10^{-5,5}$. Deze methode bestaat uit het laten stromen van verhitte lucht langs de bovenkant van een cylinder grond (ARYA e.a., 1975).

Aan het grensvlak grond - lucht droogt de grond in waardoor een stroming ontstaat in de richting van het grensvlak. Voorwaarde is echter dat het vochtgehalte aan de onderkant van het monster niet verandert. Daarom wordt na 10 minuten de hete luchttoevoer gestopt en de grondkolom van bovenaf snel in dunne plakjes opgedeeld. Van ieder plakje grond (circa 15 per monster) wordt het vochtgehalte bepaald waaruit een curve wordt verkregen welke de relatie geeft tussen het vochtgehalte en de afstand tot het grensvlak. Hieruit kan de diffusiviteit D ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) worden berekend volgens:

$$D(\theta) = \frac{1}{2t} \frac{dz}{d\theta} \int_{\theta_2}^{\theta_1} z \cdot d\theta \quad (7)$$

waarin: t = tijd (min)

z = afstand tot bovenvlak (cm)

θ_1 resp. θ_z = vochtgehalte bij de start respectievelijk op afstand z van bovenvlak ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

Vervolgens wordt met behulp van een bekende vocht karakteristiek de doorlatendheid bepaald volgens:

$$k(h) = d(\theta) \frac{d\theta}{dh} \quad (8)$$

waarin $\frac{d\theta}{dh}$ staat voor de helling van de pF-curve.

Er is nagegaan wat de monsterhoogte moet zijn om te voldoen aan de voorwaarde van het homogeen zijn wat betreft samenstelling en beginvochtgehalte van het monster. In het geval van beter doorlatende gronden wordt gewerkt met een monsterhoogte van 10 cm, bij slechter doorlatende gronden van 5 cm. In beide gevallen bedraagt de diameter van het monster 5 cm.

Figuur 7 geeft voorbeelden van enkele met de hete luchtmethode bepaalde doorlatendheidskarakteristieken.

Een volledig overzicht van de op bovenbeschreven wijze bepaalde vocht- en doorlatendheidskarakteristieken van de in tabel 1 gepresenteerde bodemprofielen, wordt door BEUVING (1984) gegeven tezamen met een aantal andere gemeten relevante bodemkundige grootheden.

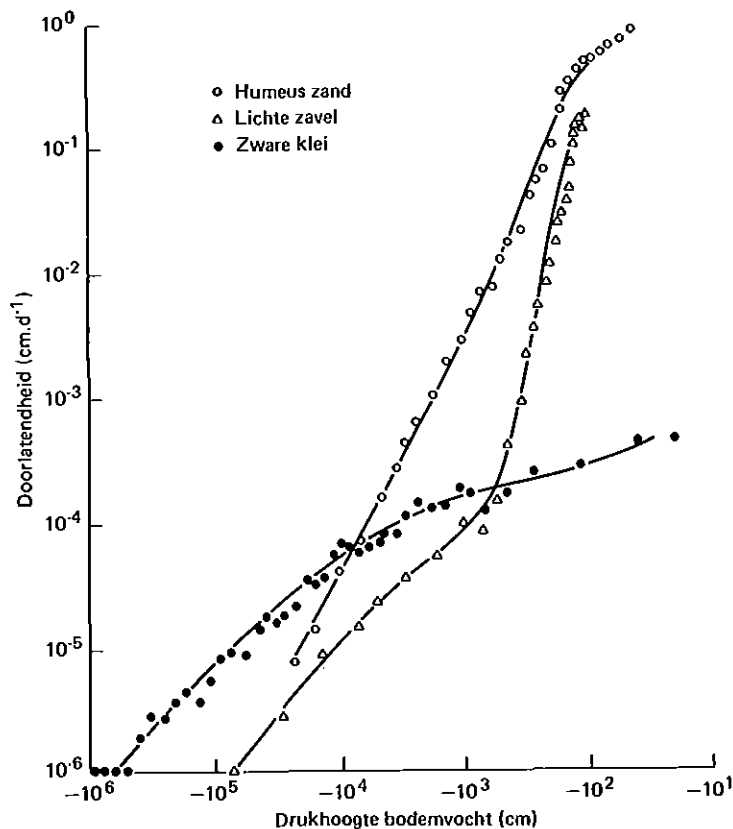


Fig. 7.
Doorlatendheidskarakteristieken voor een humeuze zand-, lichte zavel- en zware kleigrond verkregen met de hete luchtmethode (naar BEUVING, 1984)

3. MODELLERING VOCHTHUISHOUDING, BODEMGEBRUIKSOMSTANDIGHEDEN, GEWASGROEI EN PRODUCTIE

3.1. GEÏNTEGREERDE MODELLENADERING

Een model dat de effecten van ontwatering op gewasproductie simuleert dient aandacht te schenken aan effecten van zowel te nat als te droog. Zo'n model moet in staat zijn aan te geven hoe de vochtomstandigheden van de grond in de winter, het tijdstip van bewerking, kieming en opkomst in het voorjaar, gewasontwikkeling en -productie in de zomer en bewerkbaarheid in het najaar samenhangen met de ontwatering. In Figuur 8 is een stroomschema weergegeven van een geïntegreerde modelbenadering, welke rekening houdt met alle bovengenoemde effecten. Met het model FLOWEX worden de termen van de waterbalans van onbegroeide grond berekend. Als invoergegevens worden hierbij gebruikt de neerslag, potentiële verdamping, de fysische bodemeigenschappen, de drainagekarakteristieken (diepte en intensiteit) en een aanvangsvochtprofiel. Als voornaamste uitvoer wordt verkregen de drukhoogte van het bodemvocht in de bouwvoor op een diepte van 5 cm en de grondwaterstandsdiepte. Met behulp van uit veldmetingen verkregen criteria voor de bewerkbaarheid van de grond kan uit het van dag tot dag gesimuleerde verloop van de drukhoogte van het bodemvocht, het aantal en tijdstip van werkbare dagen worden vastgesteld. Op basis hiervan en het aantal dagen dat nodig is voor zaaien/poten wordt vervolgens de zaai-/pootdatum berekend. Vanaf deze datum wordt met behulp van een kiemingsmodel, dat rekening houdt met de dagelijkse temperatuur en de gesimuleerde vochttoestand in het zaai- of pootbed, de opkomstdatum vastgesteld. Vanaf deze dag neemt het model SWATRE de berekening over. SWATRE is een simulatiemodel dat de termen van de waterbalans van begroeide grond berekent door als extra term de wateropname door de wortels mee te nemen. Deze laatste term geïntegreerd over de diepte levert het werkelijke watergebruik ofwel de transpiratie van het gewas. SWATRE gebruikt als beginconditie het vochtverloop met de diepte en de grondwaterstand zoals door FLOWEX op de opkomstdatum is berekend. Daarnaast gaat SWATRE uit van dezelfde bodemfysische eigenschappen en drainagekarakteristieken als FLOWEX en van weersgegevens en een beginontwikkeling van

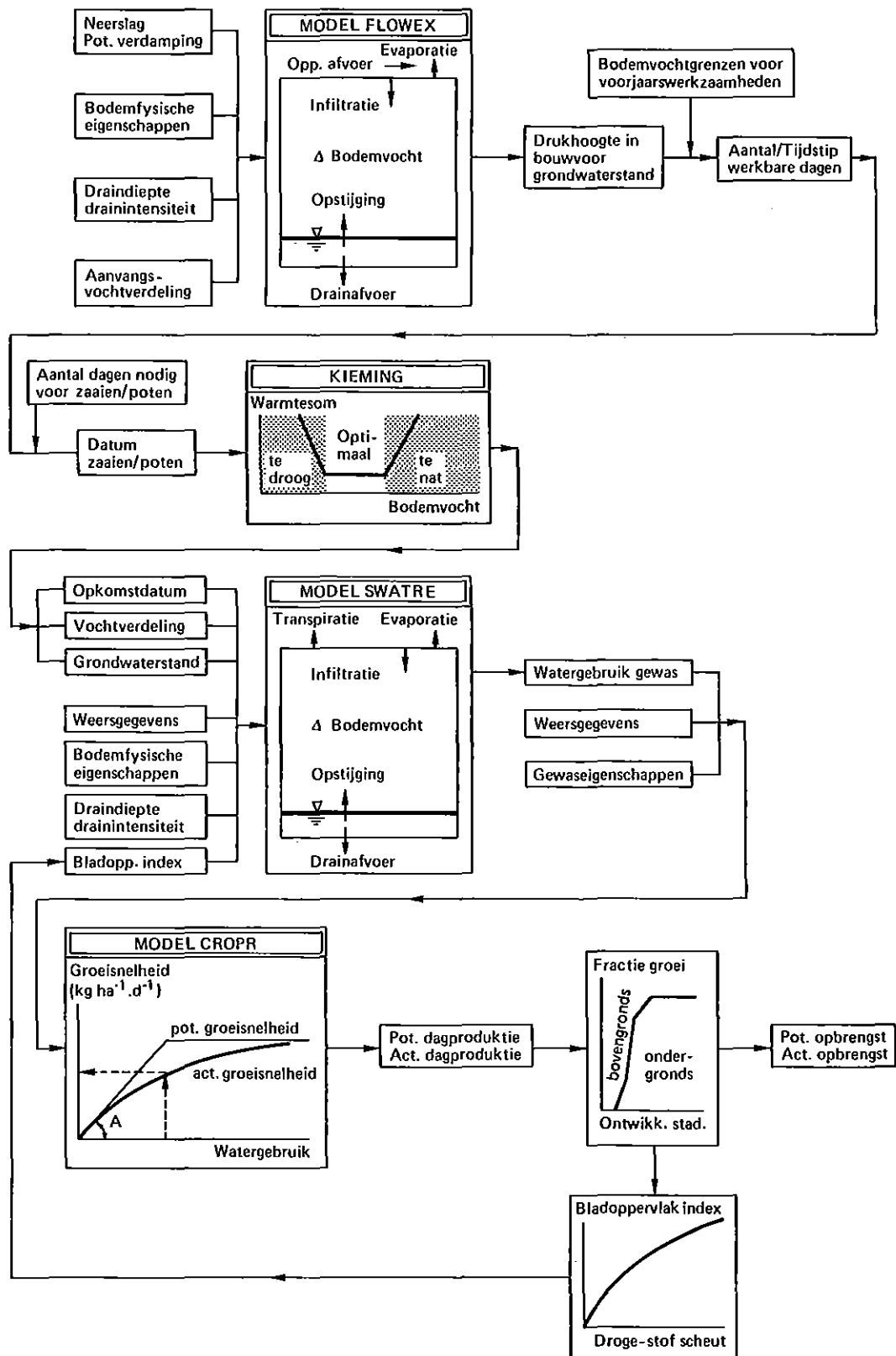


Fig. 8. Stroomschema van het geïntegreerde model waarmee de invloed van de waterhuishouding op de opbrengst van landbouwgewassen kan worden berekend

het gewas. Het door SWATRE berekende waterverbruik vormt tezamen met weersgegevens en gewaseigenschappen de invoer van het gewasproductiemodel CROPR. Dit model berekent bij een optimale nutriëntenvoorziening dag voor dag zowel de potentiële als de werkelijke droge stofproductie van het gewas. De dagelijkse toename van de droge stofproductie wordt vervolgens in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium van het gewas verdeeld over boven- en ondergrondse plantendelen. Vanuit de totale bovengrondse droge stof hoeveelheid van bladeren plus stengels wordt een nieuwe bladoppervlakte-index gegenereerd. Deze is weer uitgangspunt voor de transpiratie/productieberekeningen voor de volgende dag. Deze procedure wordt gevolgd tot de datum van de oogst.

3.2. MODELLERING VOCHTHUISHOUDING ONBEGROEIDE BODEM (FLOWEX)

FLOWEX is een één-dimensionaal numeriek model dat de stroming van water in de onverzadigde zone van gelaagde niet begroeide grond simuleert (zie BUITENDIJK, 1984). Het model is ontwikkeld om effecten van veranderingen van vochtomstandigheden in de bodem op de gebruikscondities na te gaan. Bodemeigenschappen zoals bewerkbaarheid en draagkracht voor berijden, beweiden en bespelen zijn direct aan de vochtomstandigheden gekoppeld. Bij verbeteringsmaatregelen zoals drainage of losmaken van gronden kan met FLOWEX worden nagegaan hoe het vocht- en/of luchtgehalte hierdoor worden beïnvloed. FLOWEX is uitvoerig toegepast voor berekening van het aantal en voorkomen van bewerkbare dagen in voor- en najaar, berekening van oppervlakte-afvoeren en drainafvoeren ten behoeve van waterkwaliteitsonderzoek, berekening van het aantal dagen en de verdeling hiervan over de tijd waarop de grond voldoende draagkracht heeft.

FLOWEX is gebaseerd op de stromingsvergelijking van Darcy en de continuïteitsvergelijking:

Darcy's stromingsvergelijking:

$$v = -k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (3)$$

waarin: v = flux, positief in opwaartse richting ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

θ = volume vochtgehalte ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

h = drukhoogte van het bodemvocht (cm)

k = doorlatendheid afhankelijk van h (cm.d^{-1})

z = verticale coördinaat (cm)

t = tijd (d)

Uitgaande van een exponentieel verband tussen k en h wordt vergelijking (3) geïntegreerd (WIND en VAN DOORNE, 1975) tot:

$$v = - \frac{k_i - k_{i-1}}{e^{\alpha \Delta z} - 1} - k_{i-1} \quad (9)$$

waarin: Δz = afstand (cm) tussen de middens van 2 lagen

k_{i-1} resp. k_i = doorlatendheid van boven- respectievelijk onderliggende laag (cm.d^{-1})

Voor de afleiding van vergelijking (9) is gesteld dat h een continue functie is van z en dat v constant is gedurende de tijdstap en over het diepte-interval Δz .

Beginnend met een $\theta(z)$ -profiel van de grond wordt met behulp van de $h(\theta)$ -relatie (= pF-curve) een $h(z)$ -profiel verkregen. Met behulp van het exponentiële verband tussen k en h wordt uit het $h(z)$ -profiel de bijbehorende $k(z)$ -verdeling bepaald. Vervolgens worden met vergelijking (9) de stroomsnelheden tussen de middens van de lagen over de diepte berekend.

Overeenkomstig de continuïteitsvergelijking (1) wordt na iedere tijdstap de vochtinhoudsverandering van elke laag gedurende die tijdstap berekend met:

$$\Delta \theta_i = (v_i - v_{i-1}) \frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (10)$$

waarin: $\Delta \theta$ = vochtinhoudsverandering ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

v_i resp. v_{i-1} = flux uit de onder- respectievelijk bovenliggende laag

Het nieuwe $\theta(z)$ -profiel aan het begin van de volgende tijdstap wordt verkregen uit:

$$\theta(i,t) = \theta(i,t-1) + \Delta \theta_i \quad (11)$$

De gang van deze procedure is in figuur 9 samengevat.

De randvoorwaarde aan de bovenzijde wordt bepaald door de waterbalans van de berging op het maaiveld te schrijven als:

$$S_{t+\Delta t} = S_t + \{(P-E_r)-R+v_0\} \Delta t \quad (12)$$

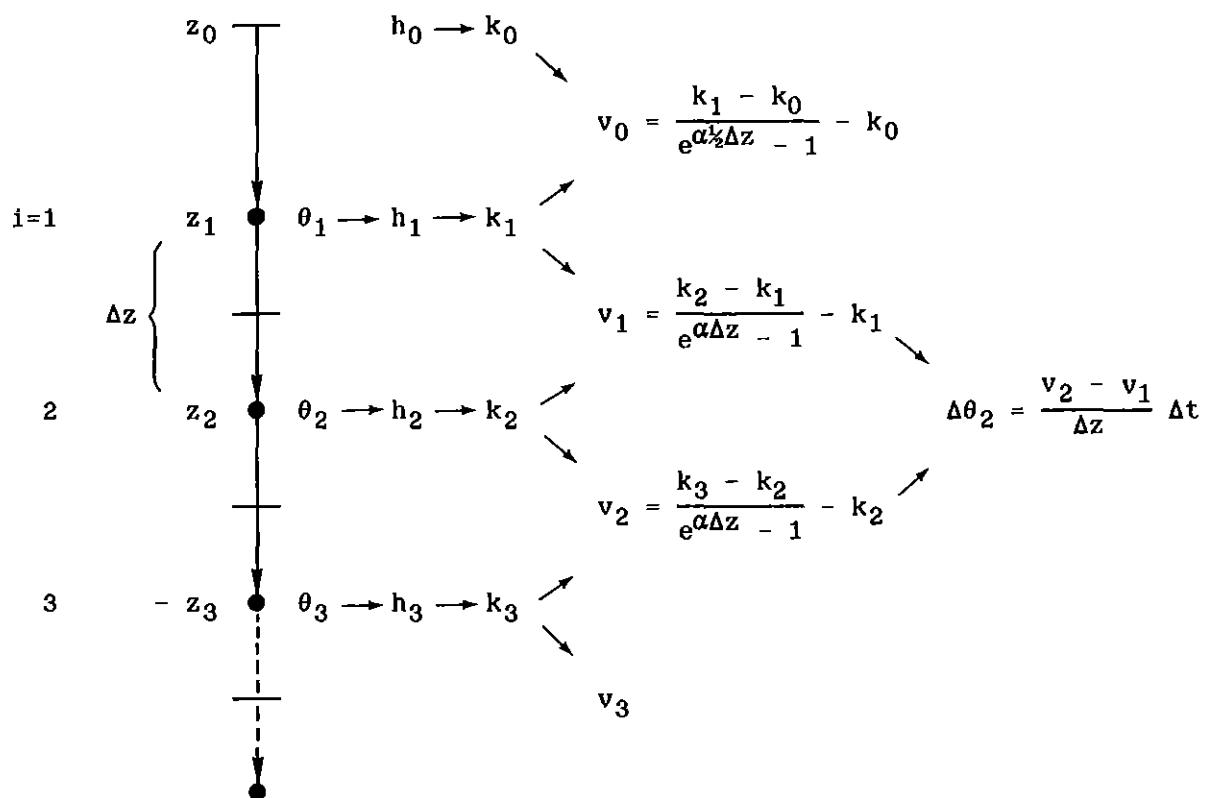


Fig. 9. Schema van de rekengang binnen één tijdstap toegepast in FLOWEX

waarin: S = oppervlaktebergings (cm)

P = neerslagintensiteit (cm.d^{-1})

E_r = werkelijke bodemverdampingsintensiteit (cm.d^{-1})

R = oppervlakteafvoerintensiteit (cm.d^{-1})

v_0 = flux door het bodemoppervlak (cm.d^{-1})

In vergelijking (12) wordt E_r berekend met:

$$E_r = E_p(1-bh) \quad (13)$$

waarin: E_p = potentiële bodemverdampingsintensiteit

b = door ijking bepaalde bodemparameter

h = drukhoogte van het bodemvocht in de bovenste cm's

Vergelijking (13) beschrijft de reductie van de verdamping als gevolg van het uitdrogen van de bovenlaag. De randvoorwaarde aan de onderzijde wordt gegeven door een flux-grondwaterstand relatie:

$$v_d = - \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{Am_0}} \quad (14)$$

waarin: v_D = afvoersnelheid naar de drain (cm.d^{-1})
 k_S = verzadigde doorlatendheid (cm.d^{-1})
 m_0 = grondwaterstand midden tussen de drains (cm)
 A = drainageintensiteit (d^{-1})

De drainageintensiteit A wordt gedefinieerd volgens HOOGHOUTD (1940) als:

$$A = \frac{8Kd}{L^2} \quad (15)$$

waarin: K = horizontale doorlatendheid (cm.d^{-1})
 d = dikte van de zogenaamde equivalentlaag (m)
 L = afstand tussen de drains (m)

Om met vergelijking (14) v_D te kunnen berekenen moet m_0 bekend zijn. Deze wordt berekend door de flux in de onderste onverzadigde laag volgens Darcy gelijk te stellen aan de flux in de verzadigde zone volgens Hooghoudt. Deze gelijkstelling levert een vierkantsvergelijking waaruit m_0 als wortel wordt opgelost.

Het model FLOWEX werkt op dagbasis waarbij de dag in tijdstappen Δt wordt ingedeeld. De keuze van de stapgrootte wordt beperkt door de stabiliteitsvoorwaarde, die door WIND en VAN DOORNE (1975) als volgt is geformuleerd:

$$\Delta t < \frac{d\theta}{dk} \cdot \frac{e^{\alpha\Delta z} - 1}{e^{\alpha\Delta z} + 1} \cdot \Delta z \quad (16)$$

Invoer in FLOWEX betreft: neerslag en potentiële bodemverdamping op dagbasis, bodemvocht- en doorlatendheidskarakteristieken van de verschillende bodemlagen, draindiepte en -intensiteit en de uitgangsvochtverdeling in het profiel. De uitvoer van het model omvat alle termen van de waterbalans, de verdeling van vochtgehalte, drukhoogte en stroomsnelheid met de diepte.

3.3. MODELLERING BEWERKBAARHEID IN HET VOORJAAR

In het voorjaar bepaalt de bewerkbaarheid van de grond wanneer gezaaid of gepoot kan worden. Is de grond nat dan kan deze zonder ernstig structuurbederf niet worden bewerkt. Slecht ontwaterde gronden zijn in het voorjaar later bewerkbaar, waardoor ook het tijdstip van zaaien of poten later valt

dan op goed bewerkbare grond. Het tijdstip van zaaien bepaalt de lengte van het groeiseizoen. De lengte van het groeiseizoen neemt weliswaar niet evenredig af met het aantal dagen later zaaien of poten, maar verkorting ervan leidt wel tot opbrengstverlaging.

Op basis van het bovenstaande kan bewerkbaarheid het best worden gedefinieerd als die toestand van de grond waarbij met de bij zaaien/poten van gewassen toe te passen mechanisatie een goed zaai/pootbed wordt verkregen op een tijdstip in het voorjaar zo dicht mogelijk bij de optimale zaai-/pootdatum. Bewerkbaarheid omvat naast het bodemkundig aspect van een goede verkruijmelbaarheid ook een aspect van tijdigheid ten opzichte van een optimaal tijdstip. In par. 3.4. wordt voor verschillende gewassen aangegeven, welke tijdstippen als optimaal voor zaaien/poten kunnen worden aangehouden.

Het verschijnsel bewerkbaarheid is erg complex. De vruchtwisseling die in de akkerbouw wordt toegepast eist dat dezelfde grond tijdig bewerkbaar moet zijn voor verschillende gewassen. Daarbij komt dat de inhoud van het begrip bewerkbaarheid verschilt per gewas en in te zetten mechanisatie. Granen worden dieper gezaaid dan bieten. Voor het zaaien van bieten is een laagje losse grond van slechts enkele cm's nodig, terwijl de grond daaronder zoveel draagkracht moet hebben dat te sterke insporing wordt voorkomen. Voor het maken van ruggen moet bij het poten van aardappelen een aanzienlijk dikkere laag losse kluitvrije grond beschikbaar zijn. Combinatie van een groot aantal meetgegevens verkregen per grondsoort op een aantal percelen met verplaatsbare tensiometeropstellingen met de dagelijkse bewerkbaarheidsbeoordeling van de meewerkende boeren (zie par. 2.3.1.) levert het in Figuur 10 weergegeven beeld. De beste aansluiting tussen de waardering van de boer en de meetgegevens werd gevonden indien de drukhoogte van het bodemvocht gemeten op 5 cm diepte werd gebruikt.

Met behulp van de uit figuur 10 af te leiden bewerkbaarheidscriteria of drempelwaarden kan nu uit een van dag tot dag gesimuleerd verloop van de drukhoogte van het bodemvocht op 5 cm diepte de tijdstip en het aantal dagen waarop de grond bewerkbaar is voor het poten van aardappelen worden vastgesteld (zie Fig. 8).

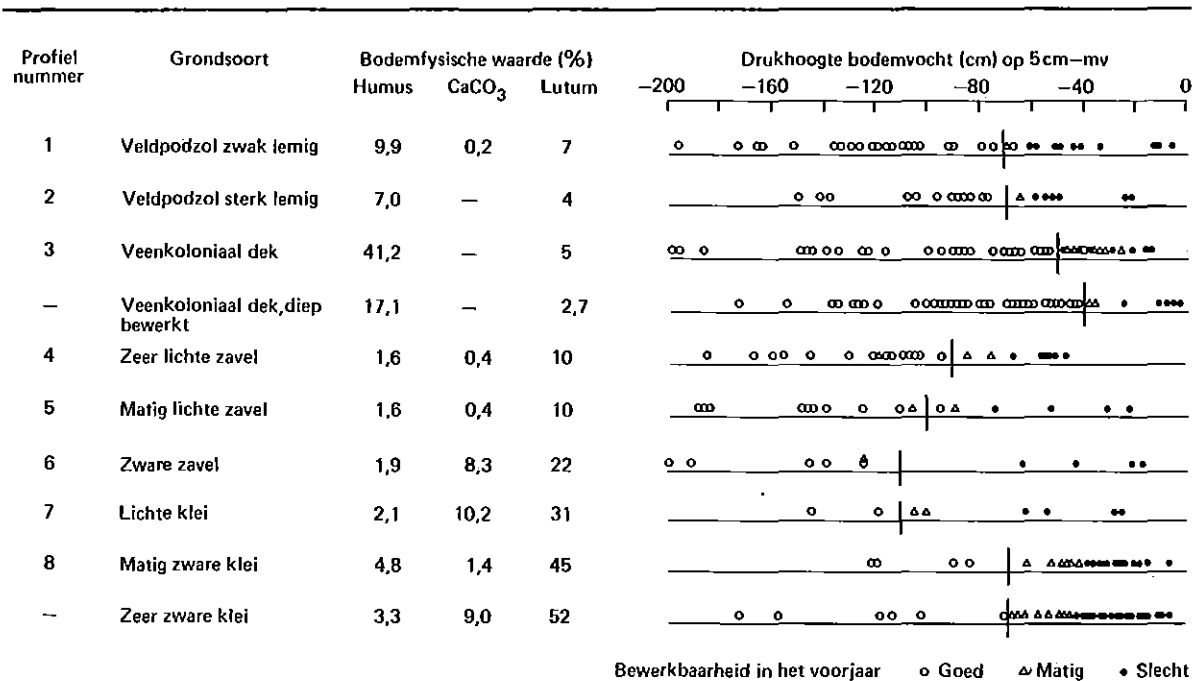


Fig. 10. Beoordeling door de boer van de geschiktheid van de grond in het voorjaar voor het poten van aardappelen op verschillende grondsoorten uitgezet tegen de gelijktijdig gemeten drukhoogte in de bouwvoor op 5 cm diepte

3.4. MODELLERING ZAAI/POOTTIJDSTIP

Om uit een reeks van bewerkbare dagen in het voorjaar het juiste tijdstip van zaaien of poten vast te kunnen stellen moet bekend zijn wat per gewas de optimale zaai- of pootdatum is en hoeveel dagen op een gemiddeld bedrijf nodig zijn voor zaaien en poten en de hierbij behorende grondbewerking.

De optimale zaaidatum voor zomergranen werd afgeleid uit resultaten van proeven in de IJsselmeerpolders over de jaren 1960-1969 (SLOOTS, 1971) waarin voor zomertarwe, -gerst en haver de relatie tussen zaaidatum en opbrengst werd vastgesteld (Fig. 11). De figuur geeft voor zomergerst de relatieve opbrengst in procenten in samenhang met de zaaidatum, waarbij de opbrengst bij inzaai op 15 maart voor elk jaar op 100% is gesteld.

Vergelijkbare resultaten werden voor zomertarwe en haver gevonden. Worden deze verbanden getransformeerd naar relaties tussen reductie in opbrengst versus zaaidatum dan wordt Figuur 12 verkregen. Uit deze figuur blijkt dat voor zomergranen als groep van gewassen over een reeks van jaren genomen 1 maart als vroegste zaaidatum kan worden aangehouden. Wordt later gezaaid dan treedt reductie in opbrengst op.

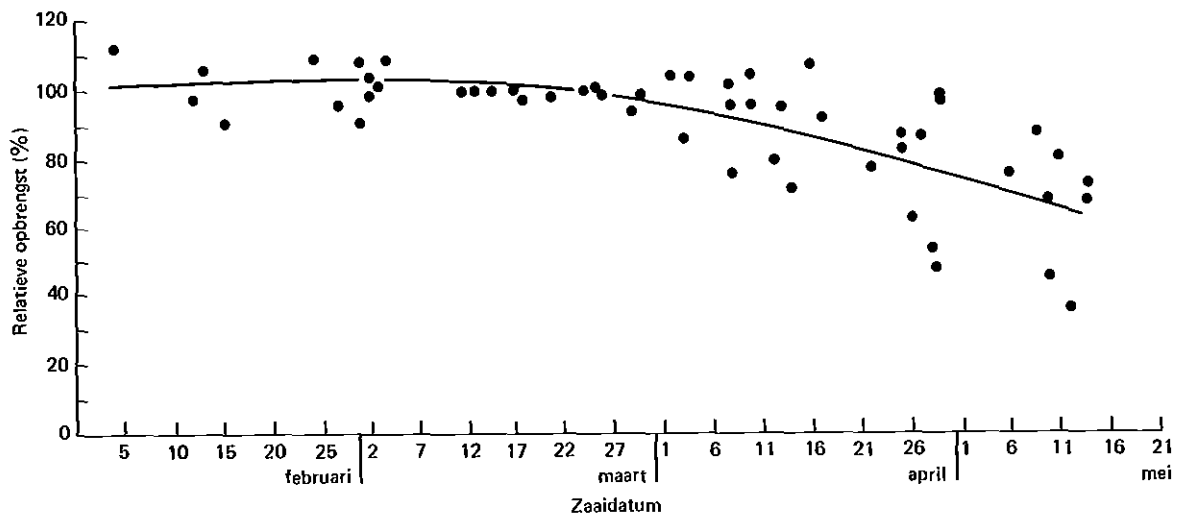


Fig. 11. De relatie tussen zaaidatum en opbrengst voor zomergerst over de periode 1960-1969 (SLOOTS, 1971). De opbrengst behorend bij uitzaai op 15 maart is op 100% gesteld

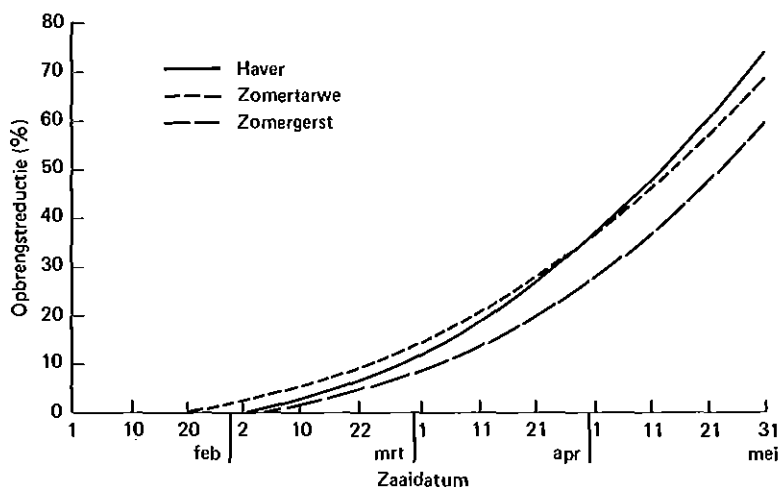


Fig. 12.

Reductie in opbrengst als gevolg van te laat zaaien voor haver, zomertarwe en zomergerst gebaseerd op data over de jaren 1960-1969 (naar SLOOTS, 1971)

Voor aardappelen is helaas geen vergelijkbaar onderzoeksmateriaal beschikbaar. In overleg met gewasdeskundigen wordt voor aardappelen als vroegste pootdatum 20 maart aangehouden.

Voor suikerbieten kan, gebaseerd op gegevens van een groot aantal zaaitijdenproeven zoals bewerkt door JORRITSMA (1975), eveneens 20 maart als vroegste zaaidatum worden toegepast. Vroeger zaaien van bieten of poten van aardappelen komt in de praktijk weinig voor vanwege lage temperaturen waardoor bieten eerder gaan schieten en aardappelen te snel starten met knolvorming waarbij te weinig loof wordt gevormd en de afsterving te vroeg inzet. Vanwege gevoeligheid voor nachtvorst van aardappelen is het eerder

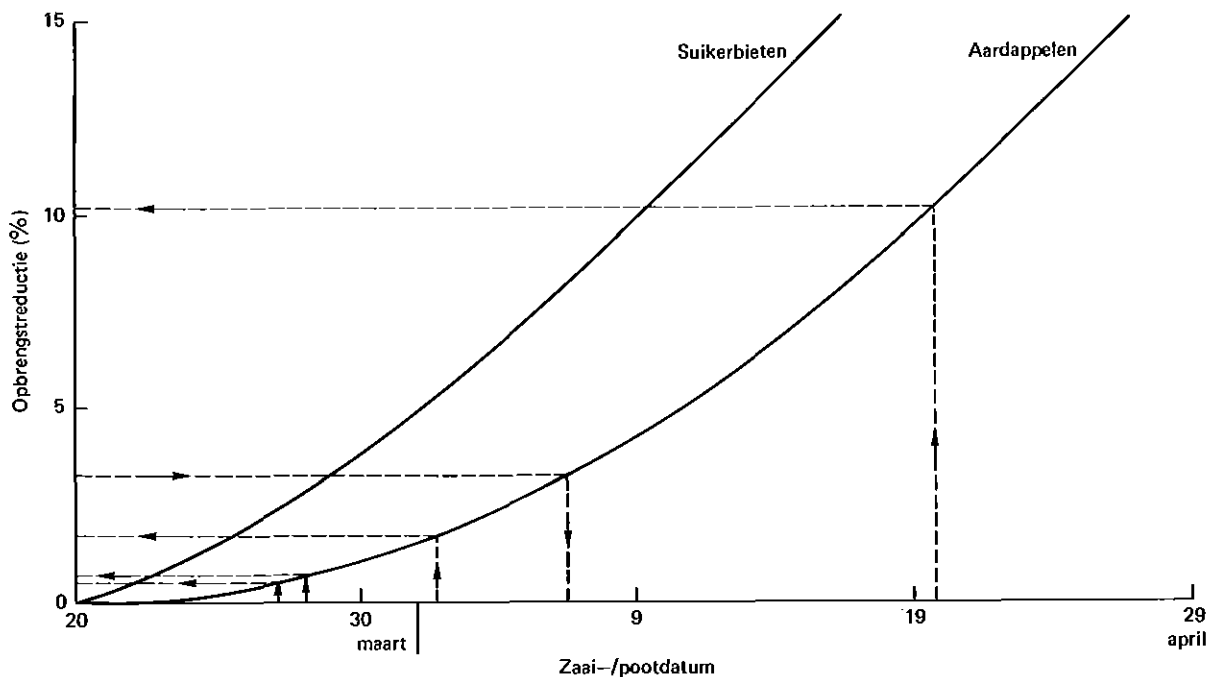


Fig. 13. Opbrengstreductie van suikerbieten en aardappelen als gevolg van te laat zaaien/poten. Als vroegste zaai/pootdatum is 20 maart aangehouden. Verder is de procedure geschetst voor het berekenen van de gemiddelde pootdatum van aardappelen voor het geval dat de vier voor poten benodigde dagen niet in een aaneengesloten periode vallen. Zie verder voorbeeld in de tekst

poten dan 20 maart in de praktijk niet gebruikelijk.

Op het aantal dagen dat benodigd is voor zaaien/poten van de verschillende gewassen wordt in detail ingegaan in Paragraaf 4.6. Bij meer dan één benodigde dag kan het voorkomen dat deze dagen niet in een aaneensluitende periode liggen. Ten behoeve van de modellering moet een gemiddelde poot-/zaaidatum worden vastgesteld. De procedure hiervoor is weergegeven in Figuur 13, welke is gebaseerd op gegevens van WIND (1960).

In het gegeven voorbeeld kunnen aardappelen worden gepoot op 27 en 28 maart en vervolgens vanwege te natte omstandigheden pas weer op 2 en 20 april. Naarmate later gezaaid wordt is de opbrengstreductie groter. Om dit in rekening te brengen wordt voor de vier pootdata de bijbehorende opbrengstreductiepercentages gezocht, opgeteld en gedeeld door het vereiste aantal pootdagen. De dag corresponderend met het aldus gevonden opbrengstreductiepercentage is de gemiddelde pootdatum.

Voorbeeld:

De functie in Figuur 13 wordt beschreven met:

$$y = 0,0105 x^2 \quad (17)$$

waarin: x = het aantal dagen na 20 maart. Voor bovenstaande data geldt:

$$\bar{y} = \frac{0,51 + 0,67 + 1,77 + 10,09}{4} = 3,26 \% \quad (17a)$$

Dus de gemiddelde pootdatum is $x = \sqrt{3,26/0,0105} = 17,6$ dagen na 20 maart, dat wil zeggen valt op 7 april (bij zonder meer middelen van de genoemde pootdata zou als gemiddelde pootdatum 3 april verkregen zijn).

Om voor suikerbieten, waarbij gemiddeld 2 dagen voor zaaien nodig zijn dezelfde procedure toe te kunnen passen, kan van de relatie (afgeleid van JORRITSMA, 1975):

$$y = 0,17 x^{1,35} \quad (18)$$

worden uitgegaan.

3.5. MODELLERING KIEMING EN OPOKOMST

Is eenmaal met het model de zaai-/pootdatum vastgesteld, dan rijst de vraag: wanneer valt de opkomstdatum (zie Fig. 8)? De kiemingsduur van gewassen varieert van jaar tot jaar en van grondsoort tot grondsoort, voornamelijk afhankelijk van de temperatuur en de vochtomstandigheden in het zaai- of pootbed.

Voor de kieming kunnen in het algemeen drie karakteristieke temperaturen worden onderscheiden: de minimum en maximum-temperatuur waar beneden respectievelijk waar boven geen kieming plaatsvindt, en de optimum temperatuur waarbij de hoogste kiemsnelheid optreedt. In het traject tussen minimum en optimum temperatuur is de kiemsnelheid rechtevenredig met de temperatuur. Voor het bereiken van een zeker kiemingspercentage is een bepaalde warmtesom F nodig. Deze kan worden berekend volgens:

$$F = (\bar{T} - T_{\min})t \quad (\text{graad-dagen}) \quad (19)$$

waarin: $\bar{T}$ = gemiddelde bodemtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) op zaaidiepte

$T_{\min}$ = minimum bodemtemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) vereist voor kieming

t = tijd benodigd voor kieming (dagen)

In de praktijk is $T_{\min}$ vaak niet bekend. Deze verschilt per gewas. Zowel $T_{\min}$ als F kunnen worden afgeleid uit kiemingsproeven in het veld bij optimale vochtomstandigheden in het zaaibed. Vergelijking (19) wordt daarvoor herschreven als:

$$\bar{T}_{\text{bodem}} = T_{\min} + F\left(\frac{1}{t}\right) \quad (20)$$

waarin: $T_{\min}$ is het intercept en F de helling van de lineaire functie

$$\bar{T} = f\left(\frac{1}{t}\right).$$

In Figuur 14A is een voorbeeld van deze relatie voor krotten weergegeven zoals afgeleid door FEDDES (1971). Deze relatie is gebaseerd op gemeten bodemtemperaturen op zaaidiepte. In Figuur 14B is dezelfde relatie weergegeven maar dan gebaseerd op gemeten luchttemperaturen. Deze laatste zijn in feite in de praktijk als enige beschikbaar. Uit Figuur 14B blijkt dat het gebruik van luchttemperaturen ook goede resultaten oplevert. In overleg met het Instituut voor Rationele Suikerproductie (IRS) blijken de waarden van $T_{\min}$ en F afgeleid voor krotten ook voor suikerbieten te mogen worden gebruikt.

Voor de afleiding van $T_{\min}$ en F voor aardappelen kon worden beschikt

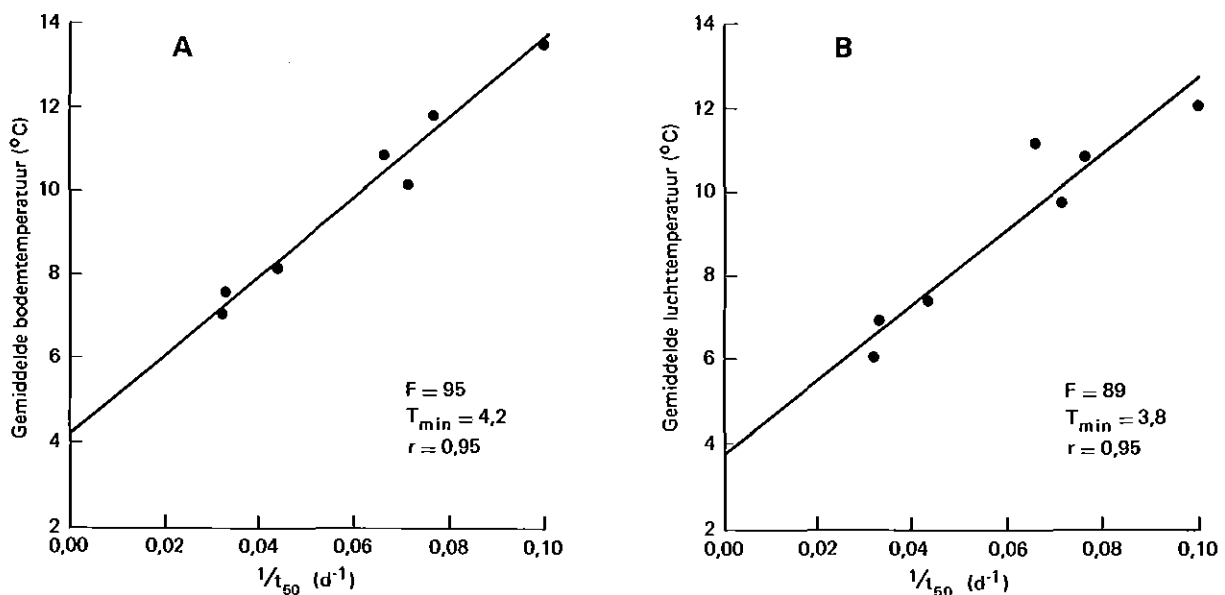


Fig. 14. Afleiding van de minimum temperatuur ($T_{\min}$) van suikerbieten en warmtesom (F) voor 50% kieming van krotten. A: de gemiddelde bodemtemperatuur gemeten op 3 cm diepte (FEDDES, 1971) en B: de gemiddelde luchttemperatuur gemeten op 1,50 m boven maaiveld

over proefveldgegevens van poot- en opkomstdatum van diverse rassen verbouwd over de periode 1971 t/m 1980 op de proefboerderij 'Geert Veenhuizen' te Borgercompagnie.

Voor zomergranen werd uitgegaan van resultaten van zaaitijdenproeven over de periode 1970 tot en met 1980 op de proefboerderij 'De Schreef' in Oostelijk Flevoland.*)

De resultaten zijn verwerkt in Figuur 15 waarbij de gegevens uit zowel de zeer natte als de zeer droge voorjaren buiten beschouwing zijn gelaten. Figuur 15 geldt dus voor vochtomstandigheden optimaal voor kieming. Analooog aan FEDDES (1971) wordt hiervoor een traject aangehouden van $-500 \leq h \leq -100$.

Bij vochtomstandigheden buiten dit optimale traject, dus zowel natter (zuurstoftekort) als droger (vochtttekort), neemt de tijdsduur voor kieming aanzienlijk toe. Dit wil zeggen dat, bij gelijkblijvende temperatuur de 'effectieve' warmtesom, die nodig is om een kieming vergelijkbaar met die in het optimale traject te bereiken, toeneemt (zie FEDDES, 1971, Fig. 48C).

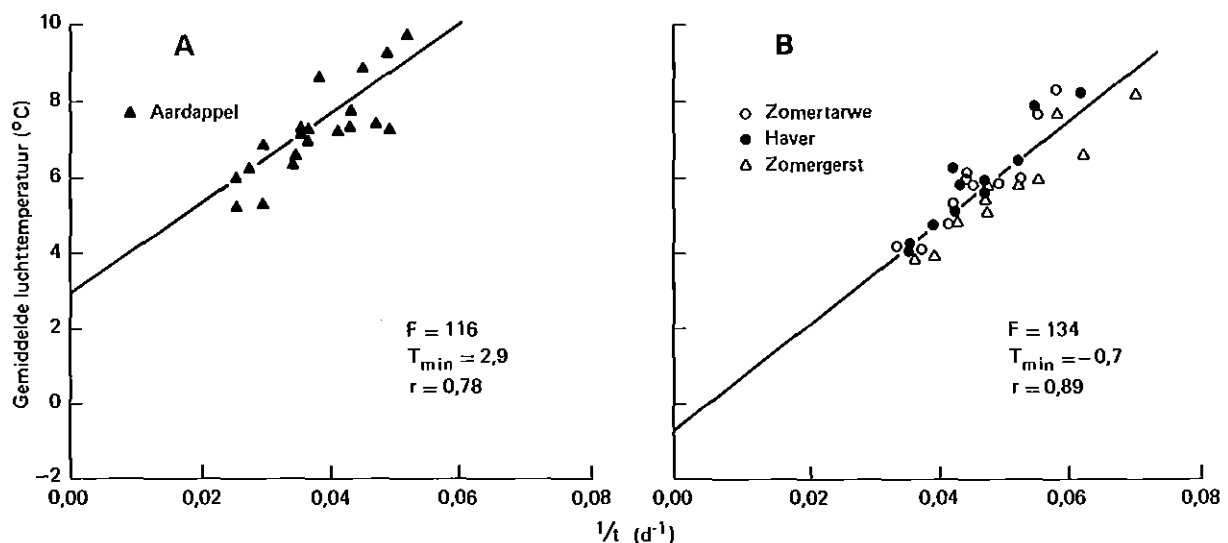


Fig. 15. Afleiding van de minimum luchttemperatuur (T_{min}) en warmtesom (F).
A: voor kieming van aardappelen afgeleid uit veldproeven over de jaren 1971 tot en met 1980 in Borgercompagnie en B: voor zomergranen afgeleid uit zaaitijdenproeven over de jaren 1970 tot en met 1980 op de proefboerderij 'De Schreef' in Oostelijk-Flevoland

*) De auteurs danken ir. G.J. de Jong van de Rijksdienst IJsselmeerpolders voor het bereidwillig beschikbaar stellen van de gegevens.

Voor omstandigheden droger dan $h = -500$ cm werd door FEDDES (1971) voor het gewas krotten uit veldproeven een verband afgeleid tussen de effectieve warmtesom F en de vochtomstandigheden in het kiembed. Aangezien de orde van grootte van de warmtesom voor kieming van aardappelen ongeveer dezelfde is als die van krotten, respectievelijk 116 (Fig. 15) en 89 (Fig. 14) werd voor kieming van aardappelen onder droge omstandigheden dezelfde relatie als voor krotten gebruikt. Voor natte omstandigheden werd, gebaseerd op de eerdergenoemde literatuur, een aan de droge omstandigheden gespiegelde relatie aangehouden. De algemene functies zoals die voor optimale, te droge respectievelijk te natte omstandigheden zijn gebruikt, zijn weergegeven in Figuur 16. De relaties die voor de verschillende gewassen kunnen worden aangehouden, zijn weergegeven in Tabel 2.

De wijze waarop in het model het aantal dagen benodigd voor kieming en opkomst wordt berekend, is als volgt:

$$F_{\text{opt}} = \sum_{t=1}^{t=n} \bar{T}_{\text{eff}} \cdot t \quad (21)$$

waarin: n = het aantal dagen waarin de warmtesom nodig voor kieming en opkomst onder optimale vochtomstandigheden, F_{opt} , wordt bereikt. Deze bedraagt voor aardappelen 116, voor granen 134 en voor suikerbieten 89 graad.dagen (zie Tabel 2).

In vergelijking (21) is T_{eff} de gemiddelde effectieve dagelijkse luchttemperatuur die bijdraagt aan de totstandkoming van F_{opt} . T_{eff} wordt als volgt berekend. Voor het gehele vochttraject van nat naar droog geldt de algemene uitdrukking:

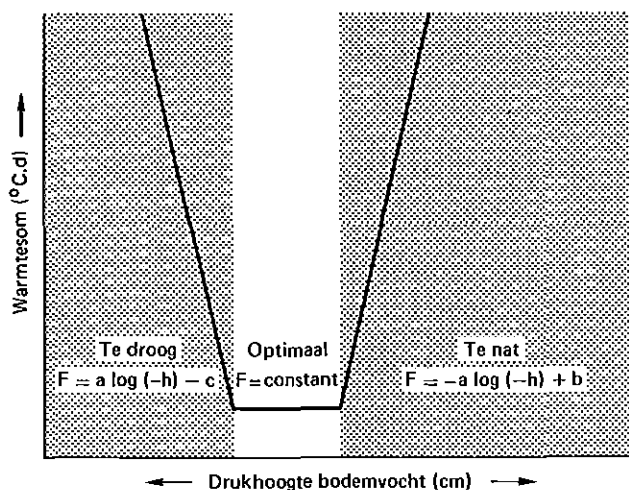


Fig. 16. Algemeen verband tussen warmtesom (F) vereist voor kieming en opkomst gebaseerd op de dagelijks gemiddelde luchttemperatuur en de drukhoogte h in het kiembed

Tabel 2. Relaties tussen warmtesom F ($^{\circ}\text{C.d}$) en drukhoogte van het bodemvocht h (cm), in het kiembed voor berekening van de kiemingsduur t (dagen) voor aardappelen, granen en suikerbieten in afhankelijkheid van de gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur T ($^{\circ}\text{C}$)

Vochttraject	Aardappelen	Granen	Suikerbieten
Optimaal:			
$-500 \leq h \leq -100$	$(\bar{T}-2,9) \quad t = 116$		$(\bar{T}-3,8) \quad t = 89$
$-500 \leq h \leq -50$		$(\bar{T}+0,7) \quad t = 134$	
Te droog:			
$h < -500$	$203 \log(-h)-432 = F_{\text{werk}}$	$203 \log(-h)-432 = F_{\text{werk}}$	$203 \log(-h)-432 = F_{\text{werk}}$
Te nat:			
$h > -100$	$-203 \log(-h)+522 = F_{\text{werk}}$		$-203 \log(-h)+522 = F_{\text{werk}}$
$h > -50$		$-203 \log(-h)+522 = F_{\text{werk}}$	

$$T_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{opt}}}{F_{\text{werk}}} (T - T_{\text{min}}) \quad (22)$$

waarin T is de gemiddelde dagelijkse luchttemperatuur en T_{min} de minimum luchttemperatuur waar beneden geen kieming/opkomst optreedt. Voor aardappelen is; $T_{\text{min}} = 2,9$, voor granen $-0,7$ en suikerbieten $3,8^{\circ}\text{C}$ (zie Fig. 15 en Tabel 2).

In vergelijking (22) is $F_{\text{opt}}/F_{\text{werk}}$ een reductiefactor die bij te natte of te droge omstandigheden het trager tot stand komen van de voor kieming en opkomst benodigde warmtesom realiseert. Voor optimale vochtomstandigheden geldt:

$$\frac{F_{\text{opt}}}{F_{\text{werk}}} = 1 \quad (23)$$

Voor te droog geldt:

$$\frac{F_{\text{opt}}}{a \log(-h) + c} < 1 \quad (24)$$

Voor te nat geldt:

$$\frac{F_{\text{opt}}}{-a \log(-h) + b} < 1 \quad (25)$$

In vergelijking (22) wordt de $(T-T_{min})$ dus gereduceerd met bovengenoemde verhoudingen tot T_{eff} .

De berekeningsprocedure voor het vaststellen van het aantal dagen benodigd voor kieming en opkomst, n in vergelijking (21), gaat aldus:

- drukhoogte h in zaaibed van dag tot dag berekenen;
- F_{eff}/F_{werk} van dag tot dag vaststellen op basis van berekende h volgens vergelijking (23), (24) of (25) met gebruikmaking van waarden voor a , b en c uit Tabel 2;
- T_{eff} vaststellen van dag tot dag op basis van vergelijking (22);
- n vaststellen op basis van vergelijking (21).

3.6. MODELLERING VOCHTHUISHOUDING EN GEWASVERDAMPING (SWATRE)

SWATRE is ontwikkeld op het ICW (FEDDES et al., 1978; BELMANS et al., 1983) om het watertransport in een heterogeen bodem-plant systeem te simuleren. Het is een één-dimensionaal model dat voor een groot scala van toepassingen kan worden aangewend. SWATRE wordt gebruikt voor berekening van:

- werkelijke verdamping;
- gewasproductie;
- relatie waterhuishouding-gewasopbrengst;
- effect subinfiltratie op gewasopbrengst;
- effect bodemverdichting op opbrengst;
- vochtleverend vermogen van gronden in het kader van bodemclassificatie;
- waterhuishouding van micro-catchments in ariede gebieden ('water harvesting').

De basisvergelijkingen voor SWATRE zijn de wet van Darcy (vergelijking 3) en de continuïteitsvergelijking (vergelijking 1), welke in dit geval is uitgebreid met een term die de wateropname door de wortels representeert ('sink' term). Beide vergelijkingen worden gecombineerd tot de volgende niet-lineaire partiële differentiaalvergelijking:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{C(h)} \quad \frac{\delta}{\delta z} k(h) \left(\frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) - \frac{S(h)}{C(h)} \quad (26)$$

waarin: h = drukhoogte (cm)
 t = tijd (d)
 C = differentiële vochtcapaciteit (= $d\theta/dh$) (cm^{-1})

z = verticale afstand tot het maaiveld, positief
in opwaartse richting (cm)
 k = doorlatendheid (cm.d⁻¹)
 S = de hoeveelheid bodemvocht, die door de wortels
per volume-eenheid van de bodem per eenheid van
tijd wordt opgenomen (cm³.cm⁻³.d⁻¹)
 θ = volume vocht per volume bodem (cm³.cm⁻³)

Voor de oplossing van vergelijking (26) dient de $S(h)$ -functie bekend te zijn. Deze wordt gedefinieerd als (FEDDES et al., 1978):

$$S(h) = \alpha(h) S_{\max} \quad (27)$$

waarin: $\alpha(h)$ = dimensieloze functie van de drukhoogte

$S_{\max}$ = maximaal mogelijke wateronttrekking door de wortels (d⁻¹)

$S_{\max}$ wordt gedefinieerd als:

$$S_{\max} = \frac{E_{pl}^{pot}}{z_r} \quad (28)$$

waarin: E_{pl}^{pot} = potentiële transpiratiesnelheid (cm.d⁻¹)
 z_r = onderkant wortelzone (cm)

In de $\alpha(h)$ -functie (Fig. 17) wordt de wateropname door de wortels bij een drukhoogte boven h_1 (punt waar boven door zuurstofgebrek geen wateropname plaatsvindt) en beneden h_4 (verwelkingspunt) op nul gesteld. Tussen h_2 en h_3 (reductiepunt) is de wateropname maximaal. Tussen h_1 en h_2 en tussen h_3 en h_4 is een lineair verloop aangenomen. De waarde van h_3 wordt verder afhankelijk gesteld van de verdampingsvraag van de atmosfeer, en varieert dus met de potentiële transpiratiesnelheid E_{pl}^{pot} .

In Figuur 17 is deze afhankelijkheid aangegeven. Vergelijking (26) wordt opgelost door middel van een impliciet eindig differentieschema. Het systeem van vergelijkingen voor de afzonderlijke bodemcompartimenten wordt per tijdstap opgelost met behulp van het Thomas algoritme. De tijdstap-lengte is variabel en wordt gedefinieerd als:

$$\Delta t^{j+1} = \frac{\Delta \theta_{\max}}{(\Delta \theta / \Delta t)_{\max}^j} \quad (29)$$

waarin: j = index voor de tijd

$\Delta \theta_{\max}$ = een op te geven waarde: $\Delta \theta_{\max} \approx 0,005$

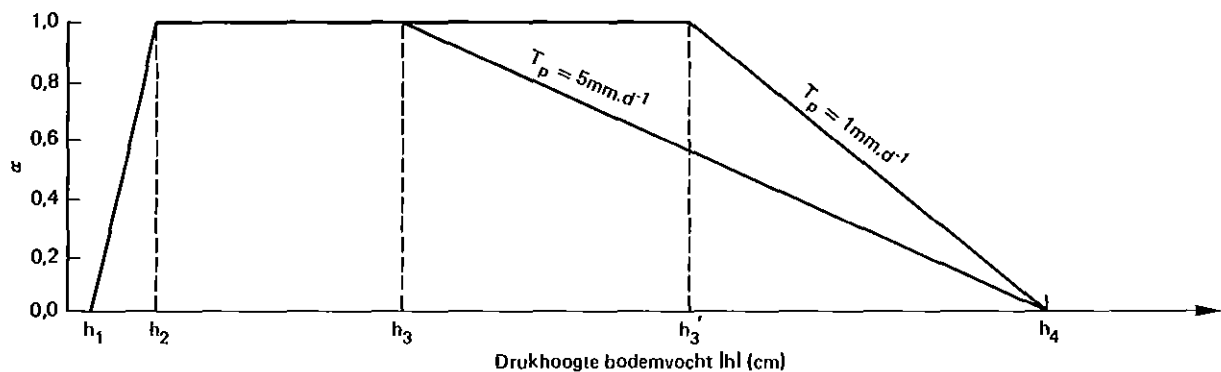


Fig. 17. Het verloop van de dimensieloze sink-term variabele α als functie van de absolute waarde van de drukhoogte van het bodemvocht, $|h|$ (FEDDES et al., 1978)

$$(\Delta\theta/\Delta t)_{\max}^j = i = 1, \dots, n S_{i,\max}^j + |(\Delta v/\Delta z)_i^j| \quad (30)$$

waarin: S_i^j = sink term in compartiment i
 v_i^j = flux door de grens van compartiment i
 n = aantal compartimenten

Wanneer de flux door de onderrand van het gedeeltelijk verzadigd systeem bekend is, wordt de grondwaterstand door het model op basis van de waterbalans berekend (zie BELMANS et al., 1983). Voor wat betreft de bovenrandvoorwaarden dienen 24-hr waarden voor de neerslag, de potentiële bodemevaportatie en potentiële transpiratie te worden ingevoerd. De potentiële evapotranspiratiesnelheid, E^{pot} , wordt berekend met de Priestley-Taylor vergelijking:

$$E^{\text{pot}} = \alpha \frac{\delta}{(\delta + \gamma)L} R_n \quad (31)$$

waarin: α = empirische factor ($\alpha = 1,35 \pm 0,10$)
 δ = helling van verzadigde dampspanningscurve ($\text{mbar} \cdot \text{K}^{-1}$)
 γ = psychrometerconstante ($\text{mbar} \cdot \text{K}^{-1}$)
 R_n = netto straling ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 L = specifieke verdampingswarmte van water ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

De potentiële bodemverdampingsintensiteit, E_s , wordt berekend volgens de Ritchie-vergelijking:

$$E_s = \frac{\delta}{(\delta + \gamma)L} R_n e^{-0,39I} \quad (32)$$

waarin: I = bladoppervlakte-index ($m^2 \cdot m^{-2}$)

De potentiële transpiratiesnelheid, E_{pl}^{pot} , wordt tenslotte gevonden als:

$$E_{pl}^{pot} = E^{pot} - E_s \quad (33)$$

De randvoorwaarde aan de onderzijde van het systeem wordt gegeven door een flux-grondwaterstand relatie; zie vergelijking (14) en (15). Voor verdere details wordt verwezen naar bovengenoemde literatuur.

De invoer in SWATRE omvat: begin-vochtverdeling met de diepte, neerslag, potentiële bodemverdamping en potentiële transpiratie op dagbasis, bodemvocht- en doorlatendheidskarakteristieken van de verschillende bodemlagen, kritieke drukhoogten voor wateropname door wortels (sink term) en draindiepte en -intensiteit. Het verloop van de bewortelingsdiepte met de tijd is ook een invoergegeven in het model (zie Paragraaf 4.7).

De uitvoer van het model betreft: alle termen van de waterbalans, de verdeling van vochtgehalte, drukhoogte en stroomsnelheid en wateropname door wortels met de diepte. De voornaamste uitvoer is de actuele transpiratiesnelheid, berekend als de integraal van de sink term met de diepte. Deze actuele transpiratie is een hoofd-invoergegeven in het gewasproductiemodel CROPR.

3.7. MODELLERING GEWASGROEI EN OPBRENGST (CROPR)

3.7.1. Fotosynthese en droge stofproductie

De dagelijkse actuele groeisnelheid van de droge stof, q_{act} , van een gewas kan, bij optimale bemesting, worden berekend volgens FEDDES et al. (1978) als:

$$\left(1 - \frac{q_{act}}{AE_{pl}/\Delta e}\right) \left(1 - \frac{q_{act}}{q_{max}}\right) = \zeta \quad (34)$$

waarin: A = maximum watergebruiksefficiëncy afgeleid uit veldmetingen
($kg \cdot ha^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot mbar$)

E_{pl} = actuele verdampingssnelheid ($cm \cdot d^{-1}$)

Δe = gemiddeld dampspanningsdeficiet van de lucht (mbar)

q_{max} = maximaal mogelijke groeisnelheid ($kg \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}$)

ζ = mathematische constante (-)

Deze hyperbolische relatie is weergegeven in Figuur 18. In jaren van verschillende droogtegraad is de relatie tussen produktie q en transpiratie E_{pl} verschillend, dat wil zeggen de helling A ($= q/E_{pl}$) varieert en daarmee varieert de produktie q bij gelijke transpiratie E_{pl} . Om nu de relatie tussen q en E_{pl} uniek te maken, dat wil zeggen in gelijke vorm toe te kunnen passen in verschillende jaren van droogte en in verschillende klimaatszones, wordt E_{pl} gedeeld ('genormaliseerd') door het verzadigd dampspanningsdeficiet, Δe , van de lucht. De grootte Δe verschilt in droge en natte jaren (en tussen klimaatszones).

De maximaal mogelijke groeisnelheid, q_{max} , in vergelijking (34), wordt afgeleid van de bruto maximale fotosynthesesnelheid van een 'standaard' gewas, P_{st} . Dit 'standaard-gewas' wordt gedefinieerd als een gewas met bladoppervlakte-index 5 (5 m^2 blad per m^2 bodemoppervlak) goed voorzien van water en voedingsstoffen. P_{st} wordt berekend als:

$$P_{st} = \Lambda P_0 + (1-\Lambda)P_C \quad (\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (35)$$

waarin: Λ = fractie van de tijd dat de lucht is bewolkt

P_0, P_C = bruto fotosynthesesnelheid van het standaard-gewas op bewolkte respectievelijk heldere dagen

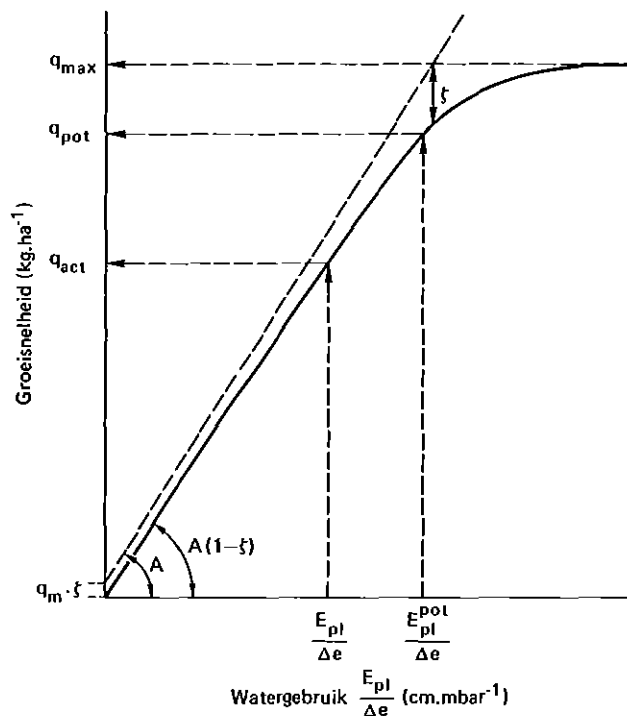
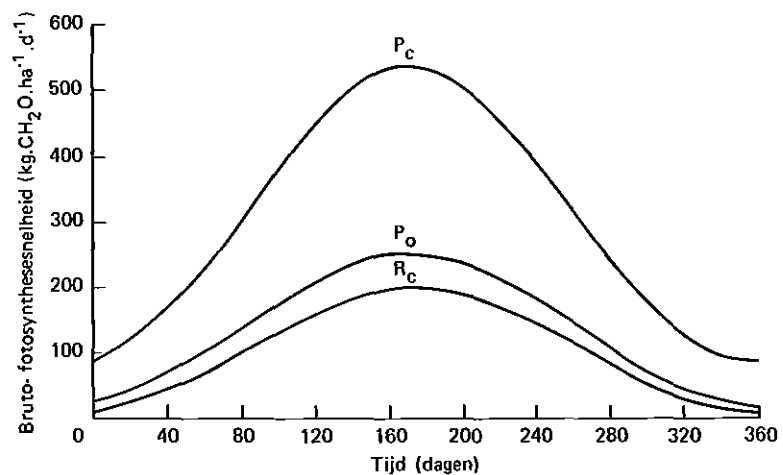


Fig. 18. Groeisnelheid in afhankelijkheid van het watergebruik door het gewas bij optimale bemesting

Fig. 19.

Het verloop gedurende het jaar van de bruto-fotosynthesesnelheid van een 'standaard-gewas op heldere, P_C en op bewolkte dagen, P_O , in afhankelijkheid van de fractie van de zonnestraling betrokken bij de fotosynthese op heldere dagen, R_C , in Nederland (52° NB)



De waarde van Λ wordt gevonden met:

$$\Lambda = \frac{R_C - 0,5R_S}{0,8R_C} \quad (36)$$

waarin: R_C = fractie van de zonnestraling betrokken bij de fotosynthese op heldere dagen

R_S = kortgolvlige stralingsflux

Het verloop gedurende het jaar P_O en P_C met dat van R_C in Nederland (52° NB) is weergegeven in Figuur 19.

De actuele fotosynthesesnelheid, P_{act} , van het werkelijke gewas met

bladoppervlakte-index kleiner dan 5, wordt berekend met:

$$P_{act} = P_{st}(1-e^{-\gamma I}) \quad (\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (37)$$

waarin: I = de bladoppervlakte-index

γ = de uitdrogingsfactor: $\gamma \approx 0,7$

$1-e^{-\gamma I}$ = lichtinterceptie van het gewas

Een deel van de gevormde carbohydraten wordt tijdens de groei verbruikt voor onderhouds- (X_m) en groeiademhaling. X_m wordt verkregen uit:

$$X_m = 0,01 Q 2^{\left(\frac{T-25}{10}\right)} \quad (\text{kg CH}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (38)$$

waarin: Q = droge stofproductie op tijdstip t

T = luchttemperatuur

De maximaal mogelijke droge stofproductiesnelheid, $q_{\max}$, kan nu worden berekend met:

$$q_{\max} = [P_{st}(1-e^{-\gamma I}) - X_m]c \quad (\text{kg ds} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (39)$$

waarin: c = factor voor de omzetting van carbohydraten in plantmateriaal ($c \approx 0,7$). De groeiademhalingsverliezen worden verdisconteerd als: $1-c$

Substitutie van vergelijking (39) in (34) levert de actuele groeisnelheid van het gewas, q_{act} , bij de actuele verdampingssnelheid E_{pl} :

$$q_{\text{act}} = 0,5 \left[A \frac{E_{\text{pl}}}{\Delta e} + q_{\max} - \left\{ (q_{\max} + A \frac{E_{\text{pl}}}{\Delta e})^2 - 4q_{\max} A \frac{E_{\text{pl}}}{\Delta e} (1-\zeta)^{0,5} \right\} \right] \quad (\text{kg ds} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}) \quad (40)$$

Op dezelfde wijze kan de potentiële groeisnelheid, q_{pot} bij de potentiële transpiratiesnelheid, $E_{\text{pl}}^{\text{pot}}$ worden berekend.

De met vergelijking (40) berekende dagelijkse droge stofproductie, q_{act} wordt op de volgende wijze toegevoegd aan hetgeen er al gegroeid was, waaruit tenslotte de eindopbrengst resulteert:

$$Q_t = Q_{t-1} + q_{\text{act}} \cdot \Delta t \quad (41)$$

waarin: Δt = 1 dag

Op analoge wijze kan het verloop van de potentiële opbrengst worden berekend.

3.7.2. Produktiemodel zomergranen

De ontwikkeling van een gewas is van jaar tot jaar verschillend, afhankelijk van omgevingsfactoren als temperatuur, daglengte, vochtomstandigheden in de wortelzone, etc. Voor de groei van een gewas zijn bij een bepaalde daglengte 3 temperatuurniveaus van belang: de minimum en maximum tempera-

tuur waar beneden en boven geen groei plaatsvindt, en een optimum temperatuur die de hoogste groeisnelheid geeft. In het gebied tussen minimum en optimum temperatuur is de groeisnelheid op ieder tijdstip rechtevenredig met de temperatuur. Bij een vast temperatuurniveau is de groeisnelheid rechtevenredig met de tijd. In analogie met wat reeds gesteld is voor kieming/opkomst (zie Paragraaf 3.5.) kan dit worden uitgedrukt als:

$$F = (T - T_{\min})t \quad (\text{graad-dagen}) \quad (42)$$

waarin: F = warmtesom nodig om een bepaald groeistadium te bereiken
 ($^{\circ}\text{C.d}$)

T = omgevings(lucht)temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{\min}$ = basistemperatuur waarbeneden geen groei optreedt

t = tijd nodig voor bereiken van een bepaald groeistadium

Vergelijking (42) kan worden herschreven als:

$$\frac{1}{t} = \frac{T - T_{\min}}{F} \quad (43)$$

waarin: $\frac{1}{t}$ = ontwikkelingssnelheid

In de hogere temperatuurtrajecten dichtbij de optimum temperatuur is het verband tussen ontwikkelingssnelheid en temperatuur gewoonlijk niet rechtlijnig.

Tot zover is de groeisnelheid alleen als functie van de temperatuur beschouwd bij constante daglengte. Gaat deze laatste ook variëren dan geldt algemeen voor de ontwikkelingssnelheid d_r :

$$d_r = \frac{1}{t}[f(\text{luchttemperatuur}) \cdot f(\text{daglengte})] \quad (44)$$

De integraal van d_r over de tijd geeft het ontwikkelingsstadium D_s . Het verloop van de gewasontwikkelingssnelheid in de tijd bepaalt het tempo waarbij de verschillende ontwikkelingsstadia, D_s , worden bereikt. D_s heeft de waarde 0 op de dag van opkomst en 1 op de dag van de oogst. Elk tussenliggend ontwikkelingsstadium wordt bepaald door de ontwikkelingssnelheid d_r . Hoe dit in verschillende jaren kan uitwerken is geïllustreerd in Figuur 20.

Voor zomergranen werden voor vergelijking (44) de volgende functies afgeleid (VAN HEEMST, 1986):

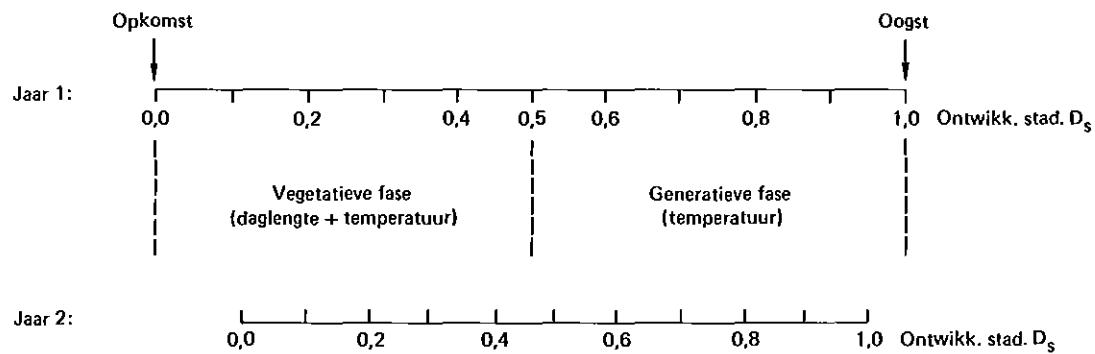


Fig. 20. Voorstelling van het verloop van het ontwikkelingsstadium voor 2 jaren waarbij de tijdstippen van opkomst en oogst verschillen

voor de vegetatieve fase ($D_s \leq 0,5$):

temperatuur $< 10^\circ\text{C}$:

$$d_r = 0,0136[e^{(0,845T-8,9)}] \cdot [1-e^{(-0,299D_1+2,75)}] \quad (45)$$

temperatuur $\geq 10^\circ\text{C}$:

$$d_r = 0,0136[1-e^{(0,146T+0,46)}] \cdot [1-e^{(0,299D_1+2,75)}] \quad (46)$$

waarin: D_1 = daglengte

voor de generatieve fase ($D_s > 0,5$):

$$d_r = 0,0238[1-e^{(-0,074T+0,64)}] \quad (47)$$

Met behulp van de vergelijkingen (45) tot en met (47) is op ieder tijdstip het ontwikkelingsstadium D_s te bepalen. De dagelijkse geproduceerde hoeveelheid droge stof wordt in een verhouding, die afhankelijk is van het bereikte ontwikkelingsstadium verdeeld over wortel en scheut, waarbij de toewijzing aan de scheut is onderverdeeld in blad, stengel en aar + korrels. Hoe dit in samenhang met het ontwikkelingsstadium gebeurt, is weergegeven in Figuur 21 en Tabel 9. Vanaf D_s 0,5 tot 1,0 gaat alle droge stof die nog gevormd wordt naar aar + korrels. Echter tijdens dit stadium van korrelvulling heeft er een herverdeling plaats van reeds eerder in stengel en blad gevormde carbohydraten ($0 < D_s \leq 0,5$) naar de korrels toe in afhankelijkheid van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur hoe beter de

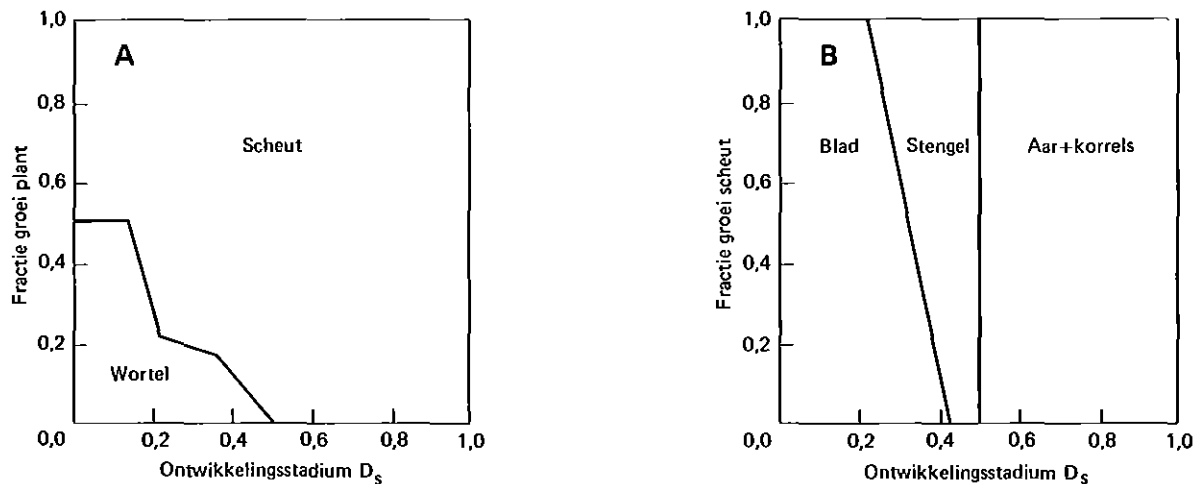


Fig. 21. Verdeling van de dagelijks geproduceerde droge stof over scheut en wortel (A) en van de scheut over blad, stengel en aar + korrels (B). (naar VAN HEEMST, 1986; c.f. PENNING DE VRIES and VAN LAAR, 1982)

korrelvulling. Hoge temperaturen gaan vaak gepaard met een hoge verdampingsvraag. BINDER et al. (1977) stelden bij tarwe vast dat onder omstandigheden van grote watertekorten 22% van de eerder in stengels en blad opgeslagen carbohydraten naar de korrels gaat. Onder omstandigheden van goede vochtvoorziening bedraagt dit 12%.

In dit onderzoek wordt er vanuit gegaan dat grote watertekorten gedurende het korrelvullingsstadium optreden bij een (cumulatieve) relatieve transpiratie, $\sum E_{pl} / \sum E_{pl}^{pot} = 0,2$. Goede vochtvoorziening treedt op bij relatieve transpiratie gelijk aan 1,0.

Bovenstaande beschouwing is samengevat in Figuur 22 waarbij wordt aangenomen dat vanaf een relatieve transpiratie van 0,2 de herverdelingsfaktor β lineair afneemt van $\beta = 0,22$ tot $\beta = 0,12$ bij een relatieve transpiratie van 1,0.

Uit de aldus bekende dagelijkse bijgroei van droge stof in het blad kan door deze hoeveelheid met het soortelijk bladoppervlak te vermenigvuldigen de dagelijkse verandering in bladoppervlakte-index worden berekend. De nieuwe bladoppervlakte-index, I_t , wordt vervolgens berekend als:

$$I_t = O_s (Q_{t-1}^{blad} + q^{blad} \cdot \Delta t) \quad (48)$$

waarin: O_s = soortelijk bladoppervlak ($\text{ha blad} \cdot \text{kg}^{-1}$ droge stof)

Q_{t-1}^{blad} = droge stof vastgelegd in het blad op tijdstip $t-1$ ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

q^{blad} = dagelijkse bijgroei van droge stof in blad ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

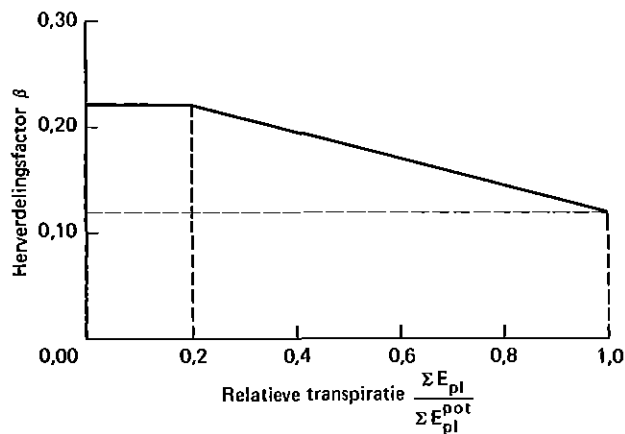


Fig. 22. Herverdeling van droge stof uit stengel en blad naar de korrel in afhankelijkheid van de relatieve transpiratie tijdens de korrelvullingsfase

Voor O_s in vergelijking (48) is een constante waarde van 0,002 ha blad per kg droge stof aangehouden (zie AASE, 1978). Om de afsterving van het gewas op het verloop van de bladoppervlakte-index in rekening te brengen, neemt tijdens de laatste helft van het groeiseizoen, dat wil zeggen bij $D_s > 0,5$, de droge stofhoeveelheid van het blad dagelijks af met 3%.

In deze generatieve fase is de temperatuur de sturende factor (zie vergelijking (47)) en wordt het oogsttijdstip bereikt bij $D_s = 1$.

3.7.3. Produktiemodel aardappelen

Voor aardappelen waren onvoldoende gegevens bekend over invloeden van daglengte en temperatuur op de ontwikkelingssnelheid. Tevens is het zo dat in de praktijk het gewas niet volledig afsterft, maar dat de boer een ingreep pleegt in de vorm van doodspuiten of loofklappen.

Een ander probleem is de berekening van de verandering van de bladoppervlakte-index tijdens het verloop van het groeiseizoen zoals dat bij zomergranen gebeurt met vergelijking (48). Toepassing van deze vergelijking bij aardappelen leidt tot resultaten die bij toetsing aan vele gegevens onwaarschijnlijk leken te zijn. De waarde van het soortelijk bladoppervlak (O_s) is niet constant, maar varieert sterk in de loop van het groeiseizoen, afhankelijk van onder andere de leeftijd van het blad: dunne bladeren in het jeugdstadium, dikkere in een laat stadium.

Voor aardappels is daarom voor een andere aanpak gekozen. Er wordt uitgegaan van een min of meer vastliggend oogsttijdstip. Het gewas veroudert

wel, maar blijft grotendeels groen tot het moment van loofklappen/doodspuiten. Hierdoor wordt, niet zoals bij granen, het moment van afsterven bepaald door de omgevingsfactoren. Dit betekent dat het verloop van het ontwikkelingsstadium voor ieder tijdstip t kan worden weergegeven met:

$$D_s = \frac{t - t_e}{t_h - t_e} \quad (49)$$

waarin: t_e = tijdstip opkomst (d)

t_h = tijdstip oogst (d)

Zowel t_e als t_h zijn bekend. De waarde van t_e wordt berekend zoals in Paragraaf 3.5. is weergegeven. De waarde van t_h is in overleg met teeltspecialisten voor consumptieaardappelen op 15 september en voor fabrieksaardappelen op 15 oktober gesteld (zie Paragraaf 3.8.).

Het eerder genoemde probleem van berekening van het verloop van de bladoppervlakte-index met vergelijking (48) werd opgelost toen uit een serie veldproeven een eenduidig verband kon worden afgeleid tussen de bodembedekking en het ontwikkelingsstadium van fabrieks- en consumptieaardappelen verbouwd op verschillende plaatsen en in verschillende jaren (HELLINGS e.a., 1982; WIEBING en ROZENVELD, 1983). Zoals Figuur 23 laat zien is het verloop van de bodembedekking in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium constant over de jaren.

Omdat er een vast verband bestaat tussen bladoppervlakte-index I en de fractie bodembedekking S_C (VAN DER SCHANS e.a., 1984):

$$I = 2,6S_C + 1,5S_C^2 + 0,9S_C^3 \quad (50)$$

is daarmee via de relatie $S_C(D_s)$ in Figuur 23, ook het verloop van I met D_s bekend.

Nu I bekend is, kan de dagelijkse potentiële en actuele droge stofproductie, q_{pot} en q_{act} , worden berekend met de vergelijkingen (39) en (40). Deze toename in de droge stofproductie behorend bij een bepaald ontwikkelingsstadium wordt vervolgens verdeeld over boven- en ondergrondse delen volgens een relatie ontleend aan meerjarige veldproeven (WIEBING en ROZENVELD, 1983; VAN DER SCHANS e.a., 1984) (Figuur 24).

Voor zowel boven- als ondergrondse delen worden de potentiële en actuele dagelijkse bijgroei volgens vergelijking (41) toegevoegd aan hetgeen reeds was geproduceerd.

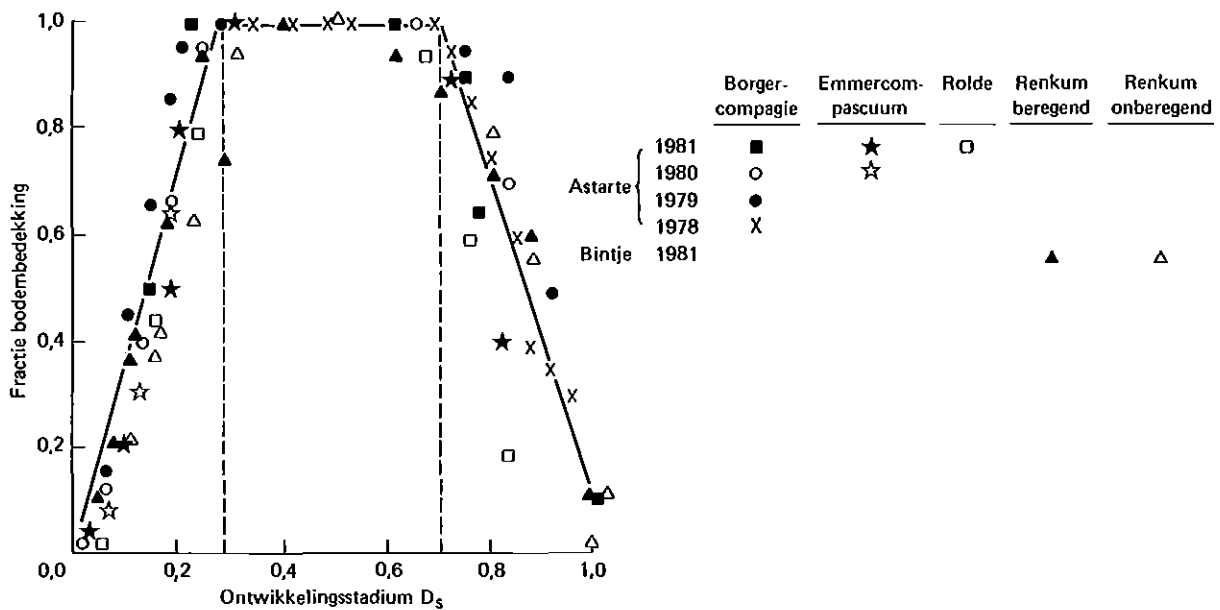


Fig. 23. Verloop van de bodembedekking van fabrieks- en consumptieaardappelen met het ontwikkelingsstadium afgeleid uit veldproeven op verschillende plaatsen in verschillende jaren

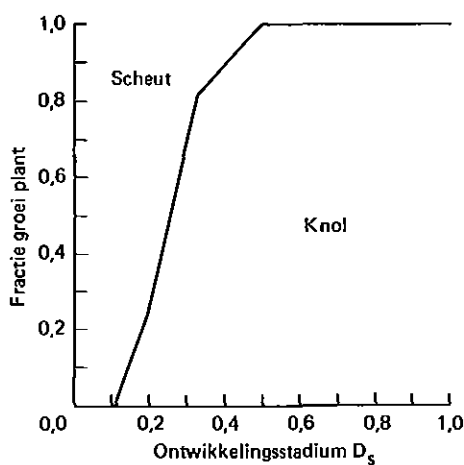


Fig. 24. Verdeling van de dagelijks geproduceerde hoeveelheid droge stof over scheut en knollen in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium bij aardappelen, zoals ontleend aan veldproeven

3.8. MODELLERING OOGSTTIJDSTIP VAN GRANEN, AARDAPPELEN EN BIETEN

De opbrengst van gewassen wordt mede bepaald door de lengte van het groeiseizoen. In het algemeen kan worden gesteld: hoe langer het gewas op het veld staat, hoe hoger de opbrengst. Afhankelijk van het weer in voor- en najaar varieert de lengte van het groeiseizoen van jaar tot jaar.

Bij granen bepaalt vooral de omgevingstemperatuur in de nazomer het tijdstip van afrijpen en dus van de oogst. Met behulp van vergelijking (47) kan op basis van de heersende temperatuur voor ieder jaar het tijdstip van

afrijping en daarmee van de oogst worden bepaald.

Voor vaststelling van het oogsttijdstip van aardappelen is overleg gevoerd met ing. J.T. Andringa, specialist mechanisatie akkerbouw van het Consulentenschap voor Landbouwwerktuigen en Arbeid. Hierbij kwam naar voren dat in de laatste 10 jaar de rooidatum is verlaagd naar eind september. In circa 90% van de gevallen worden consumptieaardappelen doodgespoten rond 15-20 september. Het rooien gebeurt dan in de laatste week van september. Reden voor de verlate rooidatum is de betere bestrijding van fytoftera. In de praktijk blijkt dat de belangrijkste effecten van ontwatering tijdens de oogst van aardappelen betrekking hebben op de werk/arbeidsorganisatie en de zeefbaarheid van de grond in de machine. Te natte omstandigheden leiden niet zozeer tot knol- ofwel droge stofverliezen op het veld, maar tot een lagere rooicapaciteit, afnemende zeefbaarheid, meer aanhangende grond en daardoor verliezen door slechte doorluchting bij bewaring. Voor aardappelen is in dit onderzoek uitgegaan van een vast oogsttijdstip: 15 september voor consumptie-aardappelen en 15 oktober voor fabrieksaardappelen.

Hoewel in het kader van deze studie niet toegepast, kan voor hakvruchten in het algemeen, evenals bij granen, gewerkt worden met een variabel en vooral van de bodemomstandigheden afhankelijk oogsttijdstip. Hoe deze aanpak gerealiseerd kan worden, wordt hierna uiteengezet.

De groei van aardappelen en bieten gaat in principe door tot ver in het najaar. Echter vanwege de toenemende natte omstandigheden in de herfst neemt het risico van oogstverliezen toe vanwege een verslechterende bodemsituatie. Dus wordt de boer ieder jaar geplaagd voor het dilemma wanneer hij het best met de oogst kan beginnen om een maximale opbrengst te halen. Wanneer hij vroeg start, heeft hij de zekerheid van gemiddeld genomen betere oogstomstandigheden en een tijdig klaar komen met de oogst. Daarbij weet hij ook dat hij een zekere hoeveelheid extra opbrengst misloopt. Om welke orde van grootte dit gaat, wordt duidelijk gemaakt voor suikerbieten in Figuur 25. Uitstellen van de oogst van 10 september tot 10 oktober levert gemiddeld een extra opbrengst van 4 ton bieten, terwijl het suikergehalte toeneemt van 15,5 tot 16%. Als men de variabiliteit van het oogsttijdstip van jaar tot jaar zou willen modelleren, dan zijn er 2 mogelijkheden.

De eerste wordt aangegeven door BUITENDIJK (1985). In Tabel 3 zijn de kritische drukhoogten in de bouwvoor aangegeven, waarbij oogstwerkzaamheden zonder nadelige effecten op de bodemstructuur en bij goede werking van

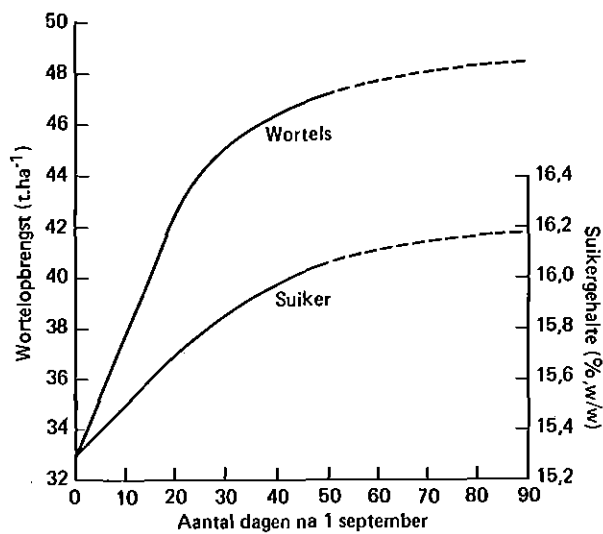


Fig. 25. Verband tussen oogst-tijdstip en de opbrengst van suikerbieten in Nederland, gemiddeld over de periode 1953-1972 (VAN DEN HIL, 1975). De onderbroken lijn is geëxtrapoleerd

Tabel 3. Drukhoogten h (cm) van het bodemvocht die minimaal vereist zijn op een diepte van 10 cm voor het oogsten van bieten en van 15 cm voor aardappelen. Alleen bij waarden droger dan deze drempelwaarden wordt structuurbederf aan de bodem voorkomen en werken rooimachines zonder problemen (BEUVING, 1982)

Grondsoort	Drukhoogte h (cm)	
	bieten	aardappelen
Zand- en veenkoloniale grond	- 50	- 60
Lichte zavel (8-20% deeltjes < 2 μ m)	-100	-100
Lichte klei (20-40% deeltjes < 2 μ m)	- 80	-120
Zware klei (>40% deeltjes < 2 μ m)	- 60	-180

machines nog juist mogelijk zijn of weer mogelijk worden. Met behulp van deze drempelwaarden kan voor ieder afzonderlijk jaar uit het van dag tot dag gesimuleerde verloop van de drukhoogte h het tijdstip en aantal dagen worden afgeleid, waarop verantwoord geoogst kan worden. Gegeven het aantal dagen dat nodig is voor de oogst en het uiterste tijdstip waarop de oogst beëindigd moet zijn (bijvoorbeeld voor suikerbieten 1 december), kan op basis van de verkregen verdeling van oogstbare dagen, worden vastgesteld wat de optimale datum voor het aanvangen van de oogst zou zijn geweest. Via Figuur 25 kan dan de bij dit oogsttijdstip behorende gemiddelde opbrengst worden verkregen.

De tweede mogelijkheid gaat niet uit van een gemiddeld verband tussen opbrengst en oogsttijdstip (Fig. 25), maar berekent met SWATRE/CPOPR de opbrengst voor ieder afzonderlijk jaar tot het uiterste tijdstip waarop de oogst beëindigd moet zijn, bijvoorbeeld voor suikerbieten tot 1 december. Vervolgens wordt op basis van de van dag tot dag gesimuleerde drukhoogte h in de bouwvoor voor elk afzonderlijk jaar, op retrospectieve wijze, nagegaan wanneer de laatste voor de oogst beschikbare werkbare dagen vielen en wat de op deze dagen berekende opbrengst was. Dit vormt dan de eindopbrengst.

4. UITGANGSPUNTEN EN INVOERGEGEVENS VOOR MODELBEREKENINGEN

4.1. VOCHT- EN DOORLATENDHEIDSKARAKTERISTIEKEN VAN BODEMPROFIELEN

In Paragraaf 2.1. is de keuze van de bodemprofielen behandeld en in Paragraaf 2.4. is beschreven hoe de voor de modelberekeningen benodigde bodemfysische karakteristieken, $h(\theta)$ en $k(h)$, zijn gemeten. Van elk van de acht bodemprofielen is door de Stichting voor Bodemkartering een profielbeschrijving gemaakt. Voor alle onderscheiden bodemhorizonten in deze profielen zijn bepaald: pH-KCl, CaCO_3 , humus, granulaire samenstelling, volumieke massa/poriënvolume en de vocht- en doorlatendheidskarakteristieken (zie BEUVING, 1984).

In de profielbeschrijvingen worden steeds 5 à 6 bodemhorizonten onderscheiden. Deze zijn op basis van overeenkomsten/verschillen in de doorlatendheidskarakteristieken, $k(h)$, vervolgens teruggebracht tot 2 à 3 bodemlagen. Deze schematisering is gebeurd om enerzijds nietodeloos onderscheid te maken tussen fysisch nagenoeg gelijke bodemlagen, en anderzijds om de zaak hanteerbaar en overzichtelijk te houden.

In Figuur 26 zijn de $h(\theta)$ en $k(h)$ -curven gegeven voor de 8 in het onderzoek betrokken bodemprofielen.

4.2. KARAKTERISERING ONTWATERING

Het doel van het onderzoek is om voor een aantal grondsoorten de invloed van de ontwatering op de gewasopbrengst vast te stellen. De stationaire stroming van grondwater naar een stelsel van evenwijdige ontwateringsmidelen (drains of sloten) kan worden beschreven volgens HOOGHOUT (1940) en ERNST (1956). Voor de hoogte van de grondwaterstand boven het ontwateringsniveau midden tussen de drains, m_0 (m), geldt:

$$m_0 = -v_D R_{\text{vert}} - v_D(R_{\text{hor}} + R_{\text{rad}}) \quad (51)$$

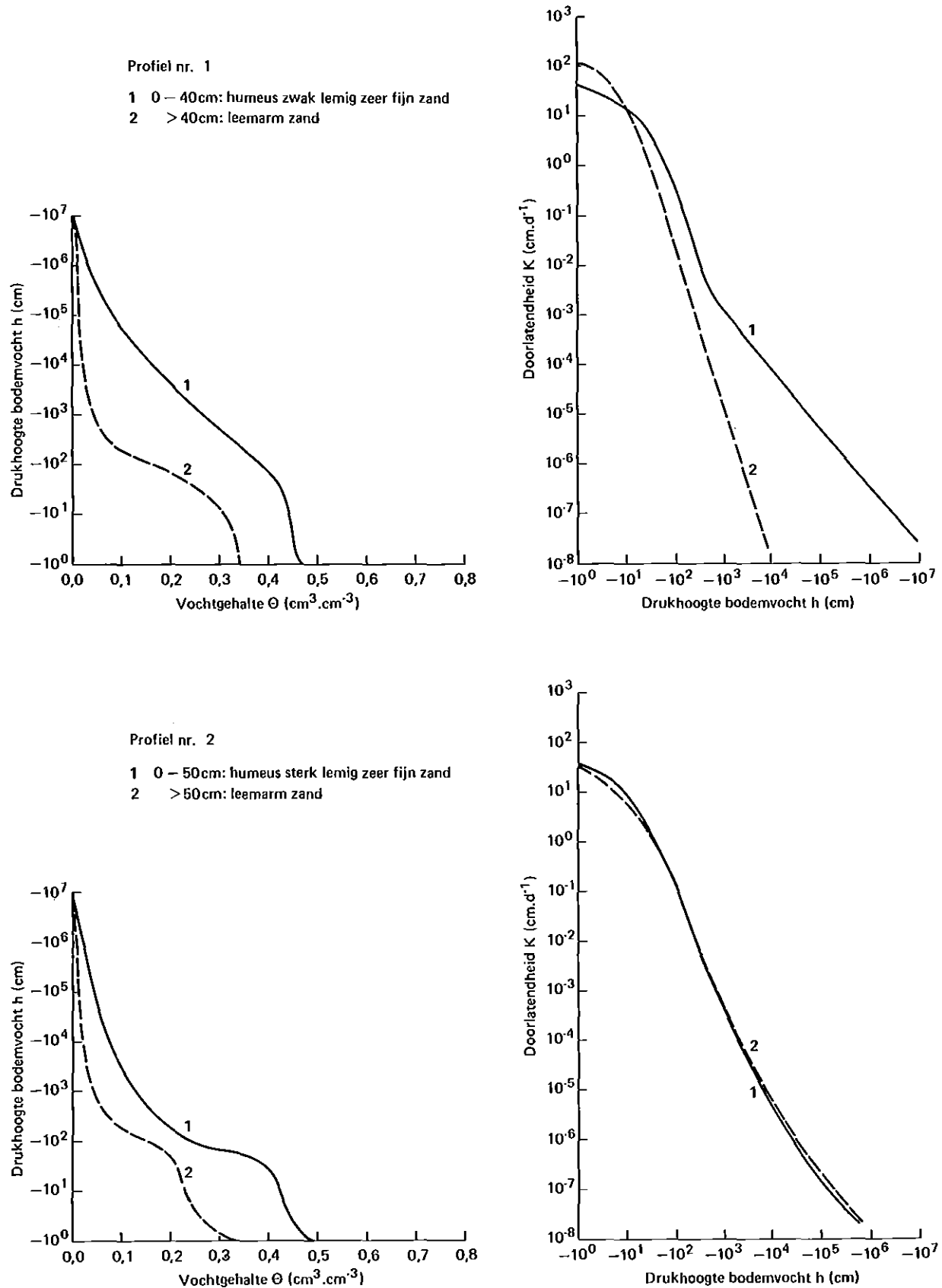
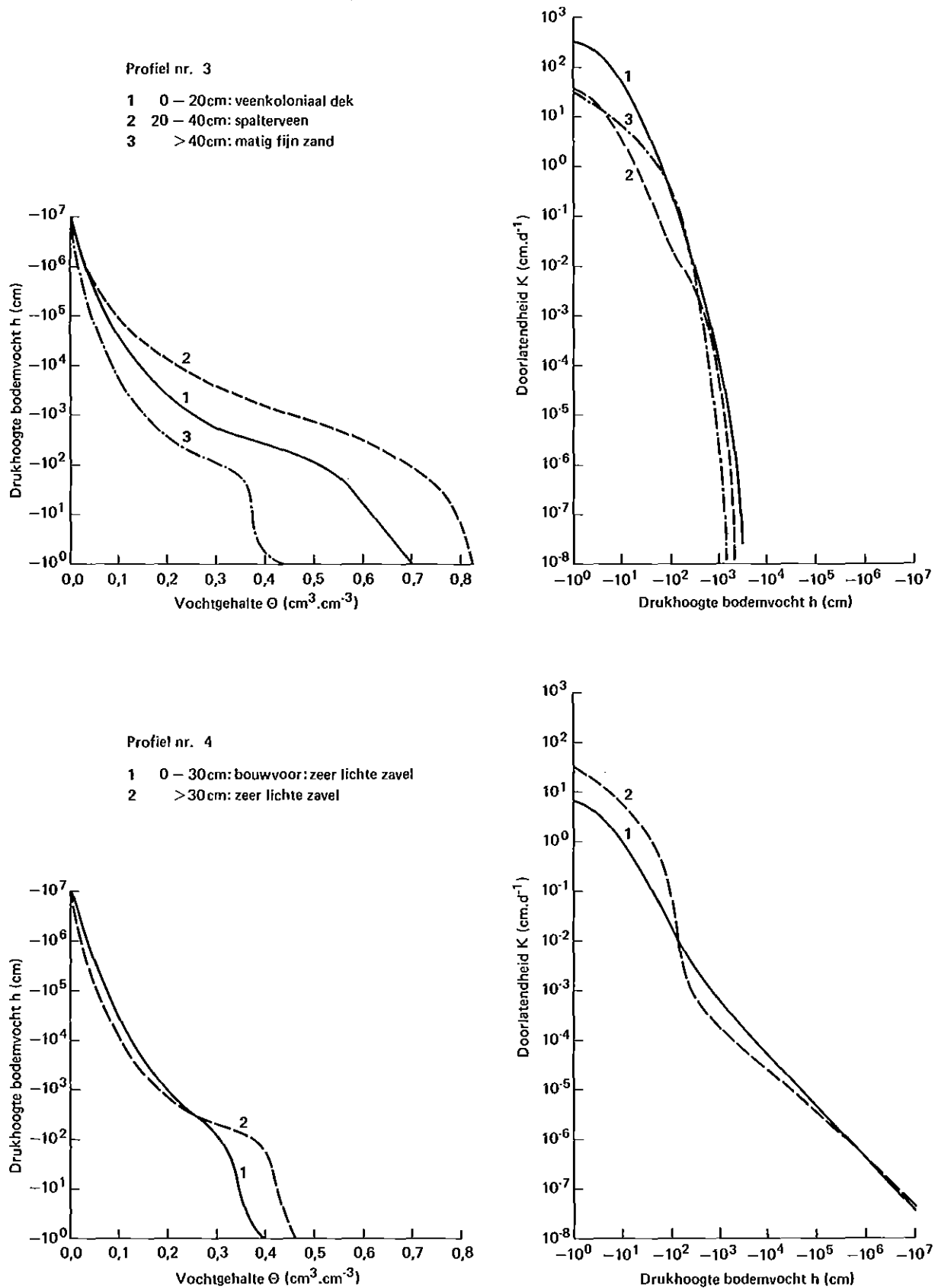


Fig. 26. Overzicht van de vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, $h(\theta)$ respectievelijk $k(h)$, van de in het onderzoek betrokken bodemprofielen



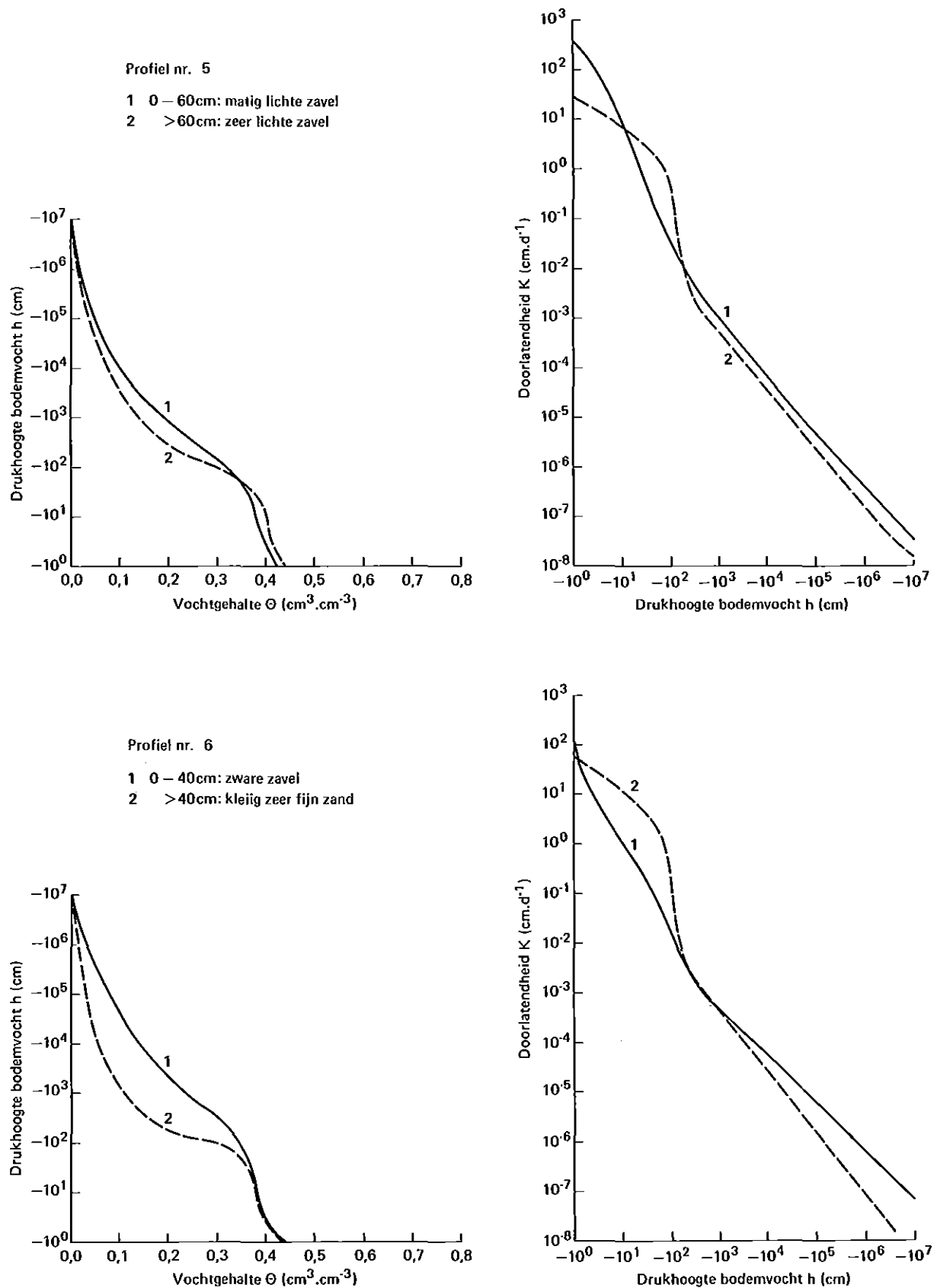


Fig. 26. Overzicht van de vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, $h(\theta)$ respectievelijk $k(h)$, van de in het onderzoek betrokken bodemprofielen (vervolg)

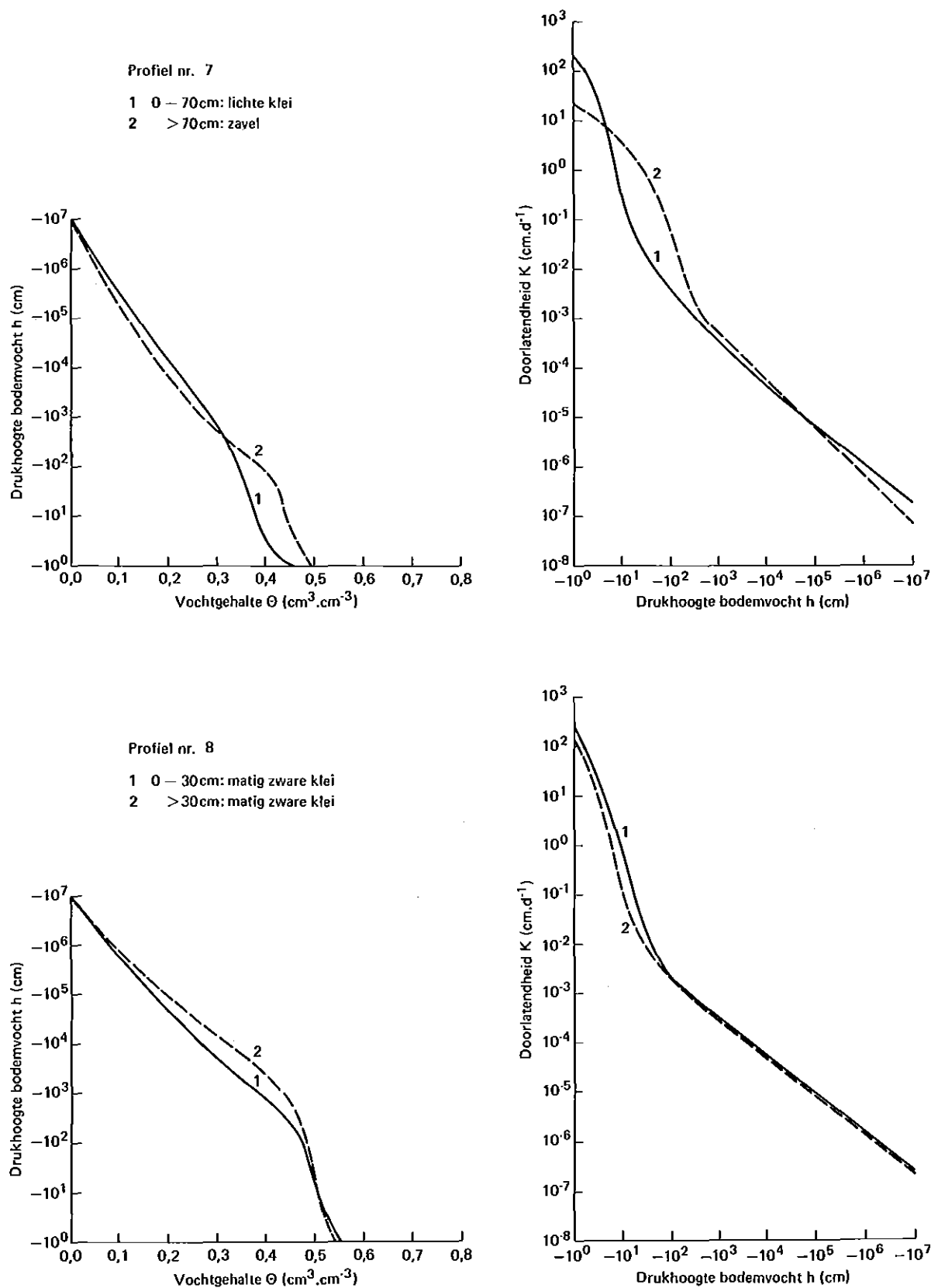


Fig. 26. Overzicht van de vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, $h(\theta)$ respectievelijk $k(h)$, van de in het onderzoek betrokken bodemprofielen (vervolg)

waarin: v_D = drainafvoer ($m \cdot d^{-1}$)
 R_{vert} = weerstand voor verticale stroming (d)
 R_{hor} = weerstand voor horizontale stroming (d)
 R_{rad} = weerstand voor radiale stroming (d)

$$R_{vert} = \frac{m_o}{k_s} \quad (52)$$

$$(R_{hor} + R_{rad}) = \frac{L^2}{8Kd} \quad (53)$$

waarin: k_s = verzadigde verticale doorlatendheid ($m \cdot d^{-1}$)₁
 K = verzadigde horizontale doorlatendheid ($m \cdot d$)
 L = drainafstand (m)
 d = dikte van de zogenaamde equivalentlaag (m)

Substitutie van vergelijkingen (52) en (53) in vergelijking (51) geeft:

$$m_o = -v_D \left(\frac{m_o}{k_s} \right) - v_D \frac{L^2}{8Kd} \quad (54)$$

In Figuur 27 wordt de dikte D van de laag die beschikbaar is voor horizontale stroming vervangen door een imaginaire minder dikke laag d om de radiale stroming in de vergelijking voor horizontale stroming (vergelijking 53) te verdisconteren. Deze d -waarde kan worden berekend (zie ERNST, 1962) met: $d/D_{hor} = L/(L + 8KD_{hor}R_{rad})$. In vergelijking (54) is $8Kd/L^2 = A$ de drainage-intensiteit (d^{-1}), zodat:

$$m_o = -v_D \left(\frac{m_o}{k_s} + \frac{1}{A} \right) \quad (55)$$

of expliciet naar v_D geschreven:

$$v_D = - \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{Am_o}} \quad (14)$$

In vergelijking (14) staat de term $1/k_s$ voor de weerstand voor verticale stroming (R_{vert}) en $1/Am_o$ voor de weerstand voor horizontale stroming (R_{hor}) plus de weerstand voor radiale stroming (R_{rad}) (zie Fig. 27). De term $1/k_s$ heeft betrekking op de stroming door de verzadigde laag boven de ontwateringsbasis. De betekenis van deze term neemt toe naarmate k_s kleiner wordt.

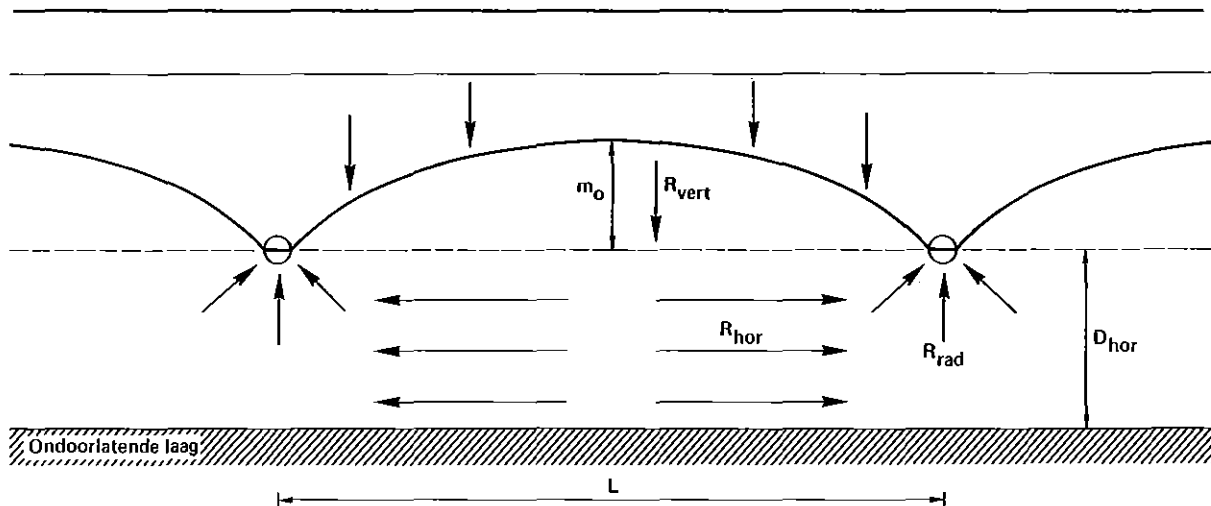


Fig. 27. Stationaire stroming naar twee evenwijdige ontwateringsmiddelen, gesplitst in de verticale, horizontale en radiale component. Voor verklaring symbolen zie tekst

De drainage-intensiteit, A , is een functie van de horizontale doorlatendheid K , de dikte van de (horizontaal) doorstroomde laag, D_{hor} , en van de afstand tussen de ontwateringsmiddelen, L . Bij gelijk houden van de ontwateringsbasis is A dus direct afhankelijk van L .

Om de invloed van de ontwatering op de opbrengst met behulp van een model vast te kunnen stellen, moeten modelmatig een aantal van nat naar droog variërende ontwateringssituaties worden gerealiseerd. Vrij algemeen worden ontwateringssituaties gekarakteriseerd aan de hand van grondwatertrappen. Hierbij wordt het verloop van de grondwaterstand weergegeven door een indeling in een aantal klassen, de zogenaamde grondwatertrappen (Gt's). Elk grondwatertrap is gedefinieerd door een traject waarbinnen de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) voorkomt en een traject voor de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) (Tabel 4).

De GHG en GLG worden uitgedrukt in cm beneden het maaiveld. Ook in de ontwatering-opbrengstdepressie tabellen, die bij de evaluatie van landinrichtingsprojecten worden gebruikt, wordt de Gt-indeling toegepast om aan te

Tabel 4 Grondwatertrappen (Gt's): globale boven-(GHG) en ondergrenzen (GLG) waartussen de grondwaterstand (cm-mv) zich over het jaar beweegt

Gt	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
GHG	-	-	<40	40- 80	< 40	40-80	> 80	>120
GLG	<50	50-80	80-120	80-120	>120	>120	>120	>120

geven in welke mate verschillen in ontwatering de opbrengst van landbouwgewassen op verschillende bodemtypen beïnvloeden.

In het model kan het traject van ontwateringssituaties zoals bestreken door de Gt-indeling in principe worden gerealiseerd door een variatie aan te brengen in ontwateringsbasis en -intensiteit. Om zowel zeer natte als droge situaties te kunnen realiseren, is gekozen voor vijf ontwateringsdiepten: 60, 90, 120, 150 en 180 cm -mv. Bij elke ontwateringsdiepte wordt de afvoersnelheid en daarmee het verloop van de grondwaterstand mede bepaald door de afstand van de ontwateringsmiddelen ofwel de drainageintensiteit. Hierdoor kunnen bij eenzelfde ontwateringsbasis vele ontwateringssituaties voorkomen. Van te voren is niet aan te geven tot welke Gt-klasse een bepaalde combinatie van draindiepte en -intensiteit voor een bepaalde grondsoort over een aantal jaren zal leiden.

In Figuur 28 is voor een kalkrijke, matig lichte zavel (profiel 5, Tabel 1) bij ontwateringsdiepten van 60 en 120 cm en drie verschillende drainageintensiteiten de gemiddelde overschrijdingsduur van grondwaterstanden gegeven. De overschrijdingsduurlijnen werden verkregen door verwerking van grondwaterstanden van dag tot dag gesimuleerd met FLOWEX over de periode

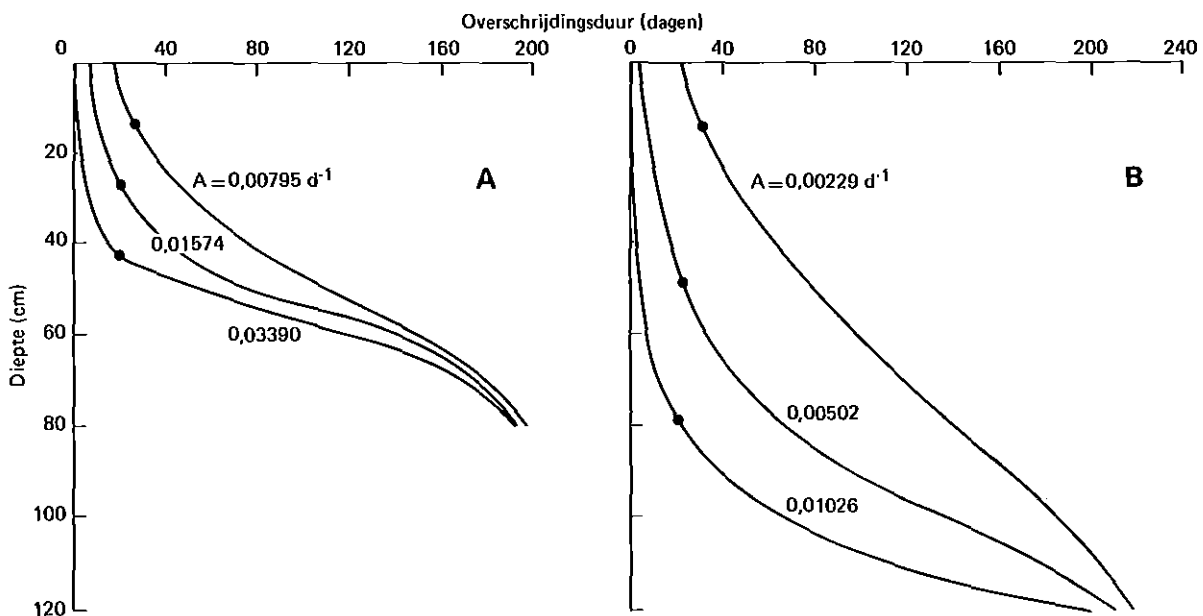


Fig. 28. Gemiddelde overschrijdingsduur van de winter-grondwaterstand (september t.m. mei) in een kalkrijke matig lichte zavel bij een draindiepte $D = 60$ cm (a) en 120 cm (b) en verschillende drainageintensiteiten A . De punten in de figuur geven de GHG's, die bereikt worden bij de verschillende drainage-intensiteiten

september tot en met mei van de jaren 1951 tot en met 1981. Uit Figuur 28 kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat een grondwaterstand van 40 cm-mv bij een ontwateringsdiepte D van 60 cm en een drainage-intensiteit $A = 0,00795 \text{ d}^{-1}$ gemiddeld gedurende 80 dagen wordt overschreden. Bij een D = 120 cm en een drie maal zo lage A van $0,00229 \text{ d}^{-1}$ wordt deze grondwaterstand van 40 cm gedurende 63 dagen overschreden.

Dus voor realisering van een bepaalde grondwaterstandssituatie kan bij een diepe ontwateringsbasis met een (veel) lagere drainage-intensiteit worden volstaan dan bij een ondiepe ontwateringsbasis. De in Figuur 28 aangegeven GHG's zijn berekend door over 30 jaren de per jaar voorkomende drie hoogste grondwaterstanden te middelen. Op basis van alleen de GHG's zouden de drie ontwateringssituaties behorend bij D = 60 cm in respectievelijk grondwatertrap I, III en IV (of VI) vallen en bij D = 120 cm in respectievelijk Gt I, IV (of VI) en VI.

Voor alle profielen gegeven in Tabel 1 werden met FLOWEX combinaties van ontwateringsdiepte D en drainage-intensiteit A bepaald. Uitgangspunten hierbij waren dat voor de verschillende profielen vergelijkbare GHG's werden verkregen en tevens dat per profiel, gaande van kleine naar grote ontwateringsdiepten, een breed traject van GHG's werd bestreken. Omdat van tevoren niet duidelijk is tot welke GHG een bepaalde combinatie van D en A zal leiden, werd een en ander 'by trial and error' gedaan.

In Tabel 5 is een overzicht gegeven van de per grondsoort uiteindelijk toegepaste combinatie van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit. Toepassing van de in Tabel 5 gegeven combinaties van D en A leveren per profiel 15 GHG's die ruwweg het grondwaterstandstraject van 10-100 cm bedekken, dus het traject van Gt II t.m. VII (Tabel 4). Bij elk van de vijf ontwateringsdiepten leidt de kleinste drainage-intensiteit tot GHG's in het traject van circa 10 tot 25 cm, de middelste van circa 25 tot 50 cm en de hoogste tot GHG's tussen circa 40 en 100 cm -mv. Gaande van ontwateringsdiepten van 60 tot 180 cm verschuift de GHG binnen deze drie trajecten naar hogere waarden (zie Fig. 28).

De andere grootte, die bepaalt met welke grondwatertrap een ontwateringssituatie globaal wordt gekarakteriseerd, is de GLG, de Gemiddelde Laagste Grondwaterstand.

In de praktijk heeft men te maken met allerlei situaties van kwel, wegzijging en infiltratie die het grondwaterstandsverloop en dus ook de GLG bepalen. Met de gebruikte modellen is het mogelijk om dergelijke situaties via toepassing van de geëigende onderrandvoorwaarden door te rekenen.

Tabel 5. Combinaties van ontwateringsdiepte (D) en drainage-intensiteit toegepast bij de acht bodemprofielen

Profiel		Drainage-intensiteit(d ⁻¹)					
nr	bodemtype	D =	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
1	Zwak lemig zeer fijn zand		0,00700	0,00344	0,00204	0,00153	0,00108
			0,01180	0,00549	0,00358	0,00246	0,00173
			0,03793	0,01354	0,00653	0,00420	0,00289
2	Sterk lemig zeer fijn zand		0,00718	0,00372	0,00222	0,00167	0,00117
			0,01235	0,00623	0,00416	0,00286	0,00199
			0,04411	0,01913	0,00881	0,00553	0,00370
3	Veenkoloniale grond		0,00700	0,00300	0,00160	0,00100	0,00060
			0,01200	0,00540	0,00320	0,00190	0,00110
			0,03600	0,01600	0,00810	0,00450	0,00250
4	Zeer lichte zavel		0,00944	0,00507	0,00284	0,00206	0,00123
			0,02102	0,00904	0,00546	0,00362	0,00251
			0,05435	0,02516	0,01101	0,00704	0,00469
5	Matig lichte zavel		0,00795	0,00428	0,00229	0,00174	0,00110
			0,01574	0,00734	0,00502	0,00326	0,00220
			0,03390	0,01818	0,01026	0,00633	0,00404
6	Zware zavel		0,00765	0,00411	0,00222	0,00169	0,00108
			0,01461	0,00686	0,00496	0,00307	0,00209
			0,02905	0,01552	0,00898	0,00567	0,00369
7	Lichte klei		0,00797	0,00420	0,00223	0,00169	0,00108
			0,01568	0,00711	0,00410	0,00309	0,00209
			0,03429	0,01683	0,00924	0,00571	0,00369
8	Matig zware klei		0,00946	0,00508	0,00348	0,00245	0,00174
			0,02112	0,01132	0,00695	0,00472	0,00336
			0,07130	0,02923	0,01741	0,01148	0,00925

In dit onderzoek wordt geabstraheerd van allerlei lokale, hydrologische situaties, en wel om effecten van grondsoort en ontwatering op de gewas-opbrengst onder volledig vergelijkbare omstandigheden te kunnen onderzoeken. Bovendien zou het aantal door te rekenen combinaties (nu al 15 per grondsoort en over 30 jaren!) met elke extra optie (bijvoorbeeld 0,0/0,5 mm infiltratie of wegzijging per dag) verdubbelen! Ter controle van deze keuze zijn op beperkte schaal berekeningen uitgevoerd met toepassing van infiltratie/wegzijging. Hieruit kan een indruk worden verkregen van de invloed ervan op de opbrengst en op de vorm van de opbrengst-ontwateringsdiepte curve (zie Par. 7.7).

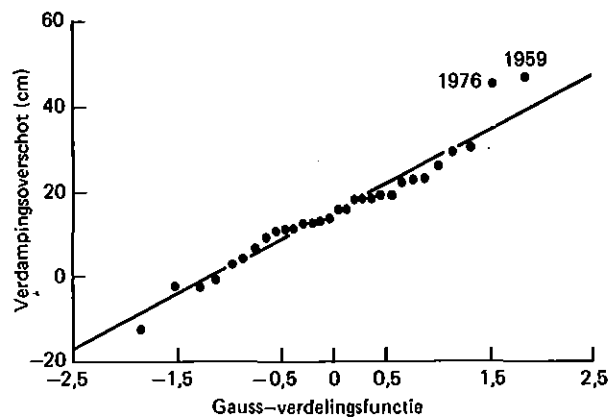
4.3. WEERSGESTELDHEID

Effecten van ontwatering zijn sterk weersafhankelijk. Vandaar dat bij onderzoek op dit gebied een lange reeks van jaren waarin allerlei weertypen voorkomen in beschouwing dient te worden genomen. In eerste instantie werd gevoelsmatig gekozen voor weersgegevens van De Bilt over een periode van 30 jaar: 1952 tot en met 1981. Vragen zijn nu: waarom De Bilt, is deze serie jaren voldoende lang en representatief?

Voor het weerstation De Bilt werd gekozen omdat het neerslagtekort daar redelijk tussen dat van West-Nederland (hoog) en dat van Oost-Nederland (laag) ligt. Een tweede overweging was de directe beschikbaarheid van alle benodigde meteorologische gegevens over deze 30-jarige periode op magneetband.

Voor bepaling van lengte en representativiteit van genoemde periode werd een statistische analyse uitgevoerd van het verdampingsoverschot: de open waterverdamping, E_0 , minus de neerslag, N . Decadewaarden van $(E_0 - N)$ voor de periode april tot en met september werden naar grootte gerangschikt en nagegaan werd of deze waarden aan een normale verdeling voldoen. Dit bleek inderdaad het geval te zijn zowel voor de afzonderlijke maanden, het voorjaar (april t.m. juni), zomer (juli t.m. september) als voor het groeiseizoen als geheel (april t.m. september). Voor de periode april tot en met september zijn in Figuur 29 de gecumuleerde $(E_0 - N)$ -waarden van de jaren 1952 tot en met 1981 uitgezet tegen de Gauss-verdelingsfunctie. De ligging van de punten wordt goed door een rechte lijn beschreven, dus is er geen reden om te twijfelen aan de hypothese dat de $(E_0 - N)$ waarden normaal verdeeld zijn. Ten overvloede is de aanname van een normale verdeling ook nog eens getoetst met de normaliteits-toets van Wilk en Shapiro.

Fig. 29. Het verdampingsoverschot (E_0-N) over de periode april tot en met september in de jaren 1952 tot en met 1981 versus de Gauss-verdelingsfunctie. Twee waarden springen er uit: de extreem droge zomers van 1959 en 1976



Voor de verschillende eerder genoemde perioden zijn ook de verwachtingswaarden en de varianties geschat. Met behulp hiervan kan voor ieder willekeurige (E_0-N) de bijbehorende kans van voorkomen worden berekend, en aldus de mate van droogte van de jaren 1952 tot en met 1981 worden aangegeven. Het resultaat hiervan is voor het groeiseizoen (april t.m. september) uitgezet in Figuur 30.

Voorbeelden. Voor 1967 was over april tot en met september $E_0-N = 232$ mm. Figuur 30 laat zien dat de kans dat deze hoeveelheid wordt overschreden 26,7% is: dus 1967 is nogal droog. Voor 1976 wordt een waarde $E_0-N = 452,6$ mm gemiddeld slechts 1 keer per 100 jaar overschreden: 1976 is dus zeer droog. Een zeer nat jaar is 1965: 98,4%.jaar.

Het blijkt dat de 10-jarige periode tussen 1960-1970 gemiddeld duidelijk te

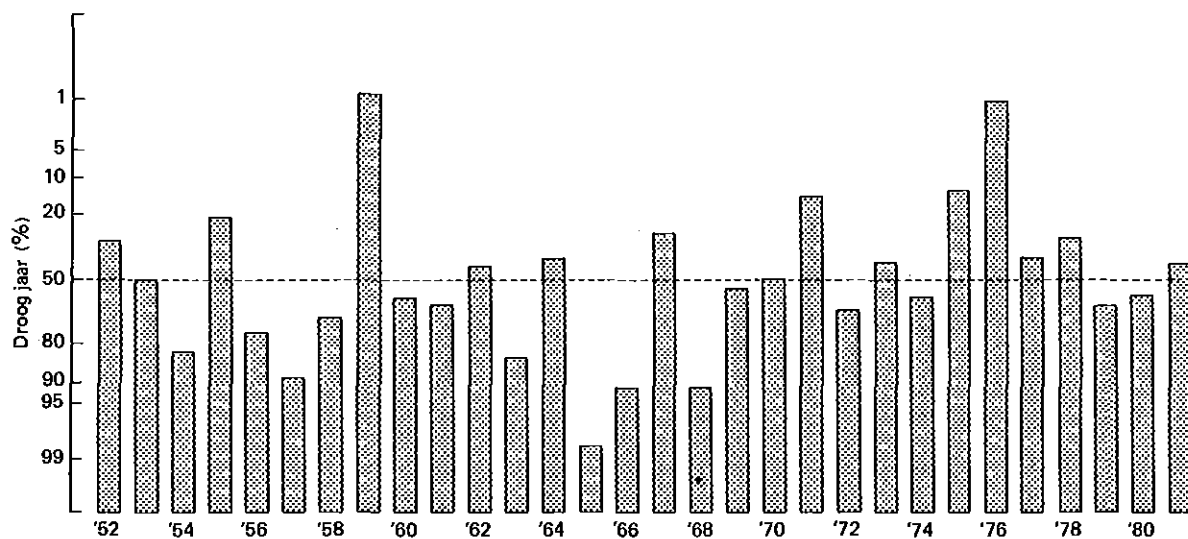


Fig. 30. De mate van droogte (% droog jaar) van het groeiseizoen april tot en met september in de jaren 1952 tot en met 1981

nat en de periode 1970-1980 gemiddeld te droog is. Gezien over de 30-jarige periode van 1952 tot en met 1981 komen droge, gemiddelde en natte jaren in ongeveer gelijke mate voor.

Op basis van Figuur 30 zou men op de gedachte kunnen komen het modelmatige rekenwerk tot enkele zogenaamde 'representatieve' droogtejaren te beperken. Echter men gaat dan voorbij aan het feit dat de overschrijdingskansen van E_0 en N negatief gecorreleerd moeten zijn om aan $(E_0 - N)$ dezelfde overschrijdingskans toe te kunnen kennen. Bovendien leidt een statistische bewerking van invoergegevens vooraf tot een afvlakking van vooral de verdeling van de neerslag en ook van de verdamping. Dit heeft bijvoorbeeld gevolgen voor de berekening van het aantal werkbare dagen, tijdstip van poten/zaaien en opkomst en de hoeveelheid beschikbaar vocht tijdens het groeiseizoen.

4.4. AANVANGSVOCHTVERDELING

Hoewel het onderzoek de effecten van ontwatering die vooral in voorjaar en groeiseizoen spelen beschouwt, wordt met de simulatie van de vochthuishouding in ieder jaar op 1 september begonnen. Dit is gedaan om de ontwateringssituaties, in het model gekarakteriseerd door ontwateringsbasis, D , en drainage-intensiteit, A , aan de hand van het verloop van de grondwaterstand in Gt-terminologie te kunnen uitdrukken. Om de GHG te kunnen vaststellen, moeten winter-grondwaterstanden bekend zijn, vandaar het gekozen begintijdstip van 1 september. Echter van jaar tot jaar is op het eind van de zomer de hoeveelheid en verdeling van het vocht over het profiel verschillend. Deze vochtverdeling zou in principe kunnen worden afgeleid door de vochtverdeling zoals die door SWATRE op de dag van de oogst is berekend als aanvangsvochtverdeling te nemen voor de volgende rekenperiode met FLOWEX. Een continu gekoppeld doorrekenen over een periode van 30 jaar van FLOWEX - SWATRE - FLOWEX bleek echter niet praktisch te zijn. Daarom is de aanvangsvochtverdeling voor FLOWEX op de volgende manier gegenereerd.

De vochtonttrekking tijdens de voorafgaande zomer kan globaal worden gesteld op $N - 0,8 E_0$. Uitgaande van een beginvochtverdeling in het profiel behorend bij een over het jaar gemiddelde stationaire afvoersnelheid van 1 mm/dag, wordt de hoeveelheid vocht aan het profiel onttrokken overeenkomend met het vocht/neerslagtekort, $N - 0,8 E_0$ in de voorafgaande zomer

(april t.m. augustus). In het model wordt dit gerealiseerd door vanaf 1 september wel de dagelijkse verdamping in te voeren doch niet de neerslag, net zolang totdat de som van de niet gegeven neerslag gelijk geworden is aan het neerslagtekort van de voorafgaande zomer. Vanaf dat moment wordt verder met de actuele neerslag-/verdampingsgegevens gewerkt.

4.5. DREMPELWAARDEN BODEMVOCHT VOORJAARSWERKZAAMHEDEN

In het voorjaar wordt de grond bewerkbaar als een bepaalde drempelwaarde van het vochtgehalte of de drukhoogte van het bodemvocht wordt bereikt waarbij zaai/pootwerkzaamheden zonder negatieve gevolgen voor de structuur kunnen worden uitgevoerd. In Paragraaf 3.3. is aangegeven hoe deze drempelwaarden voor de verschillende grondsoorten en gewassen zijn verkregen. Uit Figuur 10 zijn de voor het modelonderzoek benodigde drukhoogtedrempelwaarden af te leiden waarbij de praktijk de grond geschikt oordeelt voor het poten van aardappelen. Op dezelfde wijze als uit Figuur 10 voor aardappelen kan worden afgeleid, geeft Tabel 6 een overzicht van de drempelwaarden voor de drukhoogten vereist voor poten/zaaien van verschillende gewassen op een viertal bodemgroepen. Deze drempelwaarden verschillen voor de verschillende grondsoorten.

Aangetekend dient te worden dat de beoordeling 'goed bewerkbaar' op een zware kleigrond een andere inhoud heeft dan bijvoorbeeld op een zavelgrond.

Tabel 6. Drukhoogten h (cm) van het bodemvocht die minimaal vereist zijn op een diepte van 5 cm voor het zaaien van zomergraan, bieten en het poten van aardappelen. Alleen bij waarden gelijk/droger dan deze drempelwaarden wordt structuurbederf voorkomen en werken machines zonder problemen (BEUVING, 1982)

Grondsoort	Drukhoogte h (cm)		
	zomer- granen	bieten	aardappelen
Zand- en veenkoloniale grond	-50	- 70	- 70
Lichte zavel (8-20% deeltjes < 2 μm)	-80	-100	-100
Lichte klei (20-40% deeltjes < 2 μm)	-60	-100	-120
Zware klei (>40% deeltjes < 2 μm)	-40	- 60	- 80

Een lagere (dus drogere) drukhoogtegrenswaarde wil niet persé zeggen dat de betreffende grond in het voorjaar ook later bewerkbaar is. Dat hangt af van de eigenschappen van de grond en de ontwatering.

4.6. AANTAL DAGEN BENODIGD VOOR ZAAIEN EN POTEN

Het aantal dagen dat nodig is voor zaaien en poten verschilt van bedrijf tot bedrijf. Enerzijds hangt het af van de eigen mechanisatiegraad, anderzijds van de mate waarin loonwerkers worden ingezet. Een vergelijking van het aantal bedrijven naar inzet van eigen of loonwerker's mechanisatie laat zien dat in 1979 76% van de bedrijven voor zaaiwerkzaamheden en 47% voor het poten van aardappelen een beroep op de loonwerker deed (LEI/CBS, 1986). Aan de hand van deze cijfers kan als voorzichtige conclusie worden getrokken, dat het poten van aardappelen in belangrijke mate een activiteit van de boer zelf is en het zaaien van bieten voornamelijk door loonwerkers gebeurt.

Ter vaststelling van het aantal dagen dat op een gemiddeld bedrijf jaarlijks nodig is voor het zaaien van zomergraan en bieten en het poten van aardappelen is op ons verzoek door ir. H.J. Delbrugge van het Consulent-schap voor Landbouwwerktuigen en Arbeid een enquête gehouden onder haar specialisten in zeven verschillende gebieden in Nederland: de consulent-schappen Groningen (Bouman), noordwest Friesland (Miedema), Emmen (Kupers), Emmeloord (De Boer), Doetinchem en Tiel (Willemsen), Barendrecht (Pollema), Goes (Remijn), Zevenbergen (Peeters), Waalre (Smeets) en Roermond (Hogenboom).

Uit deze enquête kwam naar voren dat een boer voor het zaaien van zomergraan gemiddeld 1 dag, voor bieten 2 dagen en voor het poten van aardappelen 4 dagen nodig heeft.

4.7. WORTELGROEI EN WATEROPNAME

Ten aanzien van de maximale bewortelingsdiepte wordt nogal eens het begrip effectieve worteldiepte gehanteerd. Dit is het niveau in de grond tot waar een gewas voldoende wortels heeft om de grond volledig te kunnen uitputten. Vaak wordt hiervoor een diepte gekozen waarboven 80 tot 90% van het totaal

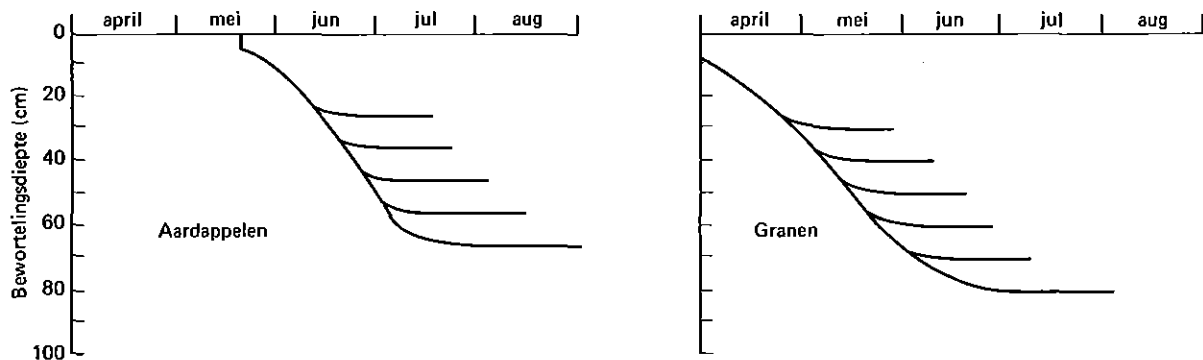


Fig. 31. Verloop van de bewortelingsdiepte van aardappelen en granen vanaf de opkomst tot het bereiken van niveaus van maximale bewortelingsdiepte. Het maximale niveau is afhankelijk van de profielopbouw (OVAA en VAN SOESBERGEN, 1978)

aantal wortels voorkomt. Veldervaring wijst op een grotere effectieve bewortelingsdiepte dan aangegeven door de 80 tot 90%-grens. Als definitie van volledig bewortelbare diepte (100% wortels) wordt die diepte aangehouden tot waar nog net een voldoende aantal wortels kunnen doordringen om vocht aan de grond te onttrekken.

Uit veldproeven (WERKGROEP, 1975; OVAA en VAN SOESBERGEN, 1978) is voor aardappelen en granen afgeleid hoe de wortelgroei vanaf de opkomst tot aan het moment van bereiken van de maximale bewortelingsdiepte verloopt in afhankelijkheid van deze diepte. In Figuur 31 is te zien voor aardappelen bij een opkomstdatum van 20 mei, dat een maximale bewortelingsdiepte van ≤ 25 cm wordt bereikt na ongeveer 21 dagen, van 30-40 cm na 31 dagen en van ≥ 45 cm na 42 dagen. Deze figuur laat ook zien dat voor granen bij opkomstdatum 1 april een maximale bewortelingsdiepte van ≤ 30 cm wordt bereikt na 19 dagen, van 40-50 cm na 39 dagen, van 60-70 cm na 61 dagen en van ≥ 80 cm na 80 dagen.

Een verloop van de worteldiepte, z_r , met de tijd na opkomst, t , als geïllustreerd in Figuur 31 kan in het algemeen worden beschreven met de functie:

$$z_r = z_r^{\max} (1 - ae^{-bt}) \quad (56)$$

waarin: z_r = bewortelingsdiepte (cm)

$z_r^{\max}$ = volledige bewortelingsdiepte (cm)

a, b = parameters, die aangeven hoe snel de maximale worteldiepte wordt bereikt

Tabel 7. Maximale bewortelingsdiepte, $z_r^{\max}$, voor aardappelen en granen per grondsoort

Profiel		Maximale bewortelingsdiepte (cm)	
nr.	bodemtype	aardappelen	granen
1	Zwak lemig zeer fijn zand	40	50
2	Sterk lemig zeer fijn zand	40	50
3	Veenkoloniale grond	20	25
4	Zeer lichte zavel	40	80
5	Matig lichte zavel	40	75
6	Zware zavel	40	55
7	Lichte klei	70	80
8	Matig zware klei	80	100

Voor toepassing in SWATRE is in Tabel 7 voor elk bodemtype de maximale bewortelingsdiepte gegeven. Deze waarden werden afgeleid uit veldonderzoek (zie Paragraaf 2.3.2.). Op basis van Figuur 31 zijn voor de wortelgroei-parameters a en b -waarden van respectievelijk 1 en 0,1 gekozen.

Eigenlijk zou het verloop van de wortelgroei met de tijd afhankelijk moeten worden gesteld van de omgevingsfactoren, zoals bijvoorbeeld bodemtemperatuur, vochtgehalte, luchtgehalte en de diepte van de grondwaterstand. Hiervoor is echter niet gekozen omdat deze benadering èn teveel invoerparameters vereist, die moeilijk te verkrijgen zijn, èn bovendien een wortelgroei voorspellen die bij sterk wisselende omgevingsfactoren weinig realistisch is.

Bij een ondiepe ontwateringsbasis en lage drainage-intensiteit zullen in natte jaren de grondwaterstanden tot in de wortelzone kunnen stijgen. De mogelijkheden van wateropname door de wortels zijn dan vanwege de zuurstoftekorten praktisch nul.

Het verschijnsel dat wortels weinig tot geen water opnemen onder omstandigheden van òf teveel òf te weinig water is daarom in de sinkterm verdisconteerd:

$$S = \alpha(h) S_{\max} \quad (27)$$

Tabel 8. Kritieke waarden voor de drukhoogte h (cm) van het bodemvocht die de wateropname door de wortels reguleren (zie ook Fig. 17)

Gewas	h_1	h_2	h_3	h_3'	h_4
Aardappelen	-10	-35	- 320	- 600	- 8 000
Granen: $0 \leq D_s < 0,85$	0	- 1	- 500	- 900	-16 000
$0,85 \leq D_s \leq 1,0$	0	- 1	-8000	-12 000	-16 000

De kritieke waarden van de dimensieloze functie van de drukhoogte, $\alpha(h)$, zijn voor aardappelen en granen weergegeven in Tabel 8 (zie ook Fig. 17). De waarden van h_1 en h_2 zijn via modelcalibratie afgeleid en die van h_3 en h_3' zijn ontleend aan veldproeven (HELLINGS e.a., 1982; VAN DER SCHANS e.a., 1984) en aan TAYLOR and ASHCROFT (1972). Het verloop tussen h_3 en h_4 is lineair genomen en niet hyperbolisch. In het lineaire geval is h_4 gelijk genomen aan het verwelkingspunt. Bij een lineaire benadering komen we uit op waarden voor h_4 van -8 tot -16 000 cm. Uit gevoeligheidsanalyses is gebleken dat de positie van de bovengrens van de wortelopnamefunctie, h_4 , op dit niveau weinig invloed heeft op de uiteindelijke resultaten.

4.8. GEWASONTWIKKELING EN DROGE STOFVERDELING

In de Paragrafen 3.7.2. en 3.7.3. zijn de produktiemodellen van zomergranen en aardappelen uitvoerig beschreven. Voor zomergranen wordt het ontwikkelingsstadium voorspeld in afhankelijkheid van de heersende luchttemperatuur en de daglengte volgens de vergelijkingen (45) tot en met (47). De verdeling van de fractiegroei wordt gedaan volgens Figuur 21, welke in getalvorm in Tabel 9 is weergegeven. Voor aardappelen wordt het ontwikkelingsstadium berekend met vergelijking (49), waarbij het oogsttijdstip, t_h , voor consumptie-aardappelen 15 september is en voor fabrieksaardappelen 15 oktober. Vervolgens wordt uit Figuur 23 het verloop van de bodembedekking, S_c , in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium bepaald voor:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq D_s \leq 0,30 &\rightarrow & 0 \leq S_c \leq 1,0 \\
 0,30 < D_s \leq 0,70 &&\rightarrow & S_c = 1,0 \\
 0,70 < D_s \leq 1,0 &&\rightarrow & 1,0 \geq S_c \geq 0
 \end{aligned}$$

Met behulp van de aldus verkregen S_c wordt uit vergelijking (50) de bladoppervlakte-index I verkregen. Invoering van I in vergelijkingen (39)

Tabel 9. Verdeling van de fractie groei van zomertarwe over de verschillende delen van de plant in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium (D_S) (Fig. 21)

	Fractie groei								
	$D_S = 0$	0,13	0,23	0,25	0,35	0,43	0,50	0,501	1,0
Wortel/scheut	0,5	0,5		0,22	0,19		0		0
Blad/scheut	1,0		1,0			0			0
Stengel/scheut	0		0			1,0	1,0	0	0
Aar + korrels/scheut	0						0	1,0	1,0

Tabel 10. Verdeling van de fractie groei van aardappelen over de knol en de rest van de plant in afhankelijkheid van het ontwikkelingsstadium zoals afgeleid uit veldproeven (zie ook Fig. 24)

Ontwikkelingsstadium, D_S :	0	0,11	0,20	0,335	0,50	1,00
Knol/totale produktie :	0	0,00	0,26	0,82	1,00	1,00

en (40) levert respectievelijk de maximale $q_{\max}$, en de actuele q_{act} , dagelijkse groei, welke aan de hand van Figuur 24 over boven- en ondergrondse delen wordt verdeeld, welke in getalvorm in Tabel 10 is weergegeven.

4.9. WATERGEBRUIK EN GEWASPRODUKTIE

Op basis van het watergebruik berekend met SWATRE wordt de droge stofproduktie bepaald volgens Figuur 18. Voor aardappelen is de waarde voor de maximale watergebruiksefficiëncy, A , ontleend aan 3 jaar veldproeven op de proefboerderij Sinderhoeve te Renkum (HELLINGS e.a., 1982; NIEUWENHUIS en PALLAND, 1982). Uit genoemde proeven blijkt dat de A -waarde niet gelijk is in de verschillende groeistadia. Echter de spreiding is zodanig dat toch gekozen is voor een constante A over het groeiseizoen. Gebaseerd op bovengenoemde proeven is voor A een seizoensgemiddelde waarde van $2500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mbar}$ aangehouden. Toepassing van deze constante A over een reeks van 30 jaar blijkt voor extreem droge jaren, zoals 1959 en 1976, met een zeer hoog verzadigingsdampspanningsdeficiet van de lucht, Δe , tot te lage potentiële produkties te leiden. Dit kwam ook naar voren in proeven

van RIJTEMA en ENDRÖDI (1970), die voor het zeer droge jaar 1959 een over het groeiseizoen gemiddelde A vonden in de orde van $3500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mbar}$. Op basis van de in deze paragraaf genoemde literatuur werd de volgende lineaire relatie tussen A en Ae afgeleid:

$$A = 854,7A_e - 850,4 \quad (57)$$

Invulling in vergelijking (57) van de per jaar over het groeiseizoen gemiddelde Ae levert per jaar een waarde voor A, die hoger is naarmate het groeiseizoen droger is. De parameter ζ in vergelijking (40) en Figuur 18 bepaalt de kromming van de groeicurve. In principe zou ζ afgeleid moeten worden uit experimenteel bepaalde groeicurven. In dit onderzoek is voor ζ een waarde van 0,01 aangehouden. Tenslotte werd aan de conversiefactor, c, in vergelijking (39), die de efficiency van de omzetting van carbohydraten in droge stof tot uitdrukking brengt, een waarde van 0,75 kg droge stof/kg carbohydraten toegekend.

Voor granen is de waarde voor de maximale watergebruiksefficiency, A, ontleend aan RYHINER and MATSUDA (1978). Over een viertal proefjaren werden A-waarden gemeten variërend tussen 1276 en 1492. In dit onderzoek is voor zomergranen een $A = 1400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mbar}$ aangehouden. De waarde van $\zeta = 0,01$ en $c = 0,70 \text{ kg droge stof/kg carbohydraten}$.

4.10. TIJD-BASIS MODELLEN

Doelstelling van het onderzoek is het vaststellen van effecten van ontwatering op zoveel mogelijk aspecten die bij de teelt van gewassen een rol spelen. Bovendien kunnen effecten van ontwatering dan pas goed worden geëvalueerd indien een lange reeks van jaren wordt beschouwd. Dit houdt in dat dan niet automatisch voor elk jaar kan worden uitgegaan van een vaste begindatum van het groeiseizoen en een van tevoren opgelegd vast groeiverloop, omdat deze nu juist door de ontwatering sterk worden beïnvloed. Vandaar wordt in dit onderzoek het begin van het groeiseizoen voor ieder jaar apart berekend op basis van bewerkbaarheid, zaai/poottijdstip en kieming en opkomst. De bewerkbaarheid en het zaai/poottijdstip worden in sterke mate bepaald door de dagelijkse gang van de vochtomstandigheden in de bouwvoor. Ook de berekening van de voor kieming en opkomst benodigde

temperatuursom vraagt informatie over de vochtomstandigheden in het kiembed en de gemiddelde luchttemperatuur op dagbasis (zie Par. 3.5.). Het groeiverloop na opkomst wordt gegenereerd aan de hand van de dagelijkse optredende luchttemperatuur en de daglengte.

Om de invloeden van ontwatering op bodemgebruiksomstandigheden en groei te bepalen zijn op grond van bovenstaande argumenten modellen nodig die werken op dagbasis. Zowel FLOWEX als SWATRE voldoen hieraan. De tijdstap waarmee deze modellen werken is echter kleiner dan een dag. Dat is nodig om de vochthuishouding van de bodem nauwkeurig naar diepte en tijd te kunnen simuleren. Pseudo-stationaire modellen zijn in het algemeen niet geschikt om dagelijkse veranderingen in de vochthuishouding van de bodem in detail te beschrijven.

Een en ander betekent dat de weersgegevens op 24 uurs-basis in de modellen worden ingevoerd, met uitzondering van de potentiële bodemverdamping in het voorjaar. De potentiële bodemverdamping wordt in FLOWEX ingevoerd als geconcentreerd zijnde tussen 10.00 en 16.00 uur. Dit blijkt namelijk tot andere vochtomstandigheden in de bouwvoor en daarmee tot verschillen in bewerkbaarheid te leiden als wanneer met een 24-uurs gemiddelde wordt gewerkt.

5. VERIFICATIE MODELRESULTATEN AAN MEETGEGEVENS

Alvorens simulaties uit te voeren over een 30-tal jaren, dient nagegaan te worden of de simulaties realiteitswaarde hebben.

In het algemeen dient men te toetsen aan veld-/meetgegevens die niet zelf als basis hebben gediend om bepaalde relaties, gebruikt in het model, af te leiden. Bij een geïntegreerde modelaanpak zoals in dit onderzoek gevolgd, doen zich in opeenvolgende stadia diverse mogelijkheden voor om deelresultaten te toetsen: bijvoorbeeld vochtspanningen in de bouwvoor, diepte van de grondwaterstand, kiemingsduur, transpiratie, gewasopbrengst e.d. Hierbij wordt opgemerkt dat toetsing van modelresultaten dient plaats te vinden bij uiteenlopende omstandigheden, bijvoorbeeld droog/nat jaar, diepe/ondiepe grondwaterstanden, lage/hoge vochtgehalten, etc. In het algemeen moet bij vergelijking van modelresultaten met meetgegevens zowel het niveau goed zijn als de fluctuaties rondom dit niveau gevolgd worden.

5.1. DRUKHOOGTE BODEMVOCHT EN GRONDWATERSTAND

In de modelaanpak is de vaststelling van het aantal en tijdstip van bewerkbare dagen, zaaien/poten en kieming en opkomst gebaseerd op het verloop van de drukhoogte op 5 cm diepte in de bouwvoor. Om na te gaan of met de gebruikte bodemfysische eigenschappen en toegepaste randvoorwaarden de vochthuishouding juist wordt beschreven, werden voor alle in Tabel 1 genoemde bodemprofielen testruns gemaakt voor de voorjaren van 1979 (nat) en 1980 ('normaal'). De hiervoor benodigde calibratiegegevens zoals drukhoogte van het bodemvocht en de grondwaterstandsdiepte waren uit veldonderzoek beschikbaar (zie Par. 2.3.1.).

In Figuur 32 is als voorbeeld het verloop van de drukhoogte in de bouwvoor en van de grondwaterstand in het voorjaar van 1980 gegeven voor een matig lichte zavel. Het blijkt dat zowel het niveau als de fluctuatie met FLOWEX goed worden gesimuleerd. Bij een gebleken overeenstemming tussen meting en simulatie zoals in Figuur 32 is weergegeven, is er van uitgegaan dat met behulp van de gebruikte bodemfysische parameters en randvoorwaarden

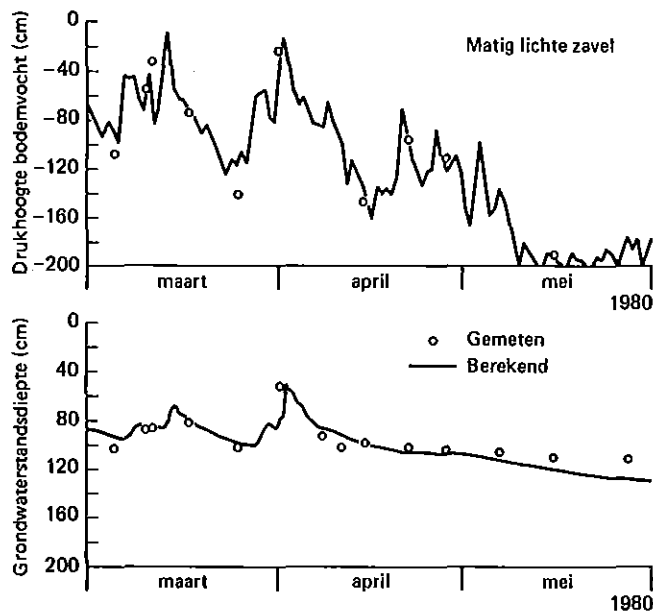


Fig. 32. Vergelijking van het verloop van de drukhoogte van het bodemvocht op 5 cm diepte en van de grondwaterstand, zoals gesimuleerd met het model en gemeten in het veld

de vochthuishouding van de bodem goed wordt beschreven en simulatie over 30 jaar verantwoord is.

5.2. VERDAMPING EN PRODUCTIE

Voor verificatie van het modelgedrag tijdens het groeiseizoen zijn gedurende een reeks van jaren uitvoerige veldproeven verricht op het beregningsproefveld De Sinderhoeve. Verdamping en produktie van verschillende gewassen werden hier gemeten. Voor het jaar 1982 zijn met het SWATRE/CROPR-model berekeningen uitgevoerd van verdamping en produktie van aardappelen (Bintje). In Figuur 33A is het verloop van de werkelijke verdamping gegeven. Figuur 31B laat het verloop van de dagelijkse groeisnelheid en de gecumuleerde droge stofproduktie zien. Het blijkt dat de in het veld gemeten waarden met het model goed te benaderen zijn.

Ook blijkt dat met het model gewasopbrengsten in samenhang met bodemkundige verschillen goed kunnen worden gesimuleerd. Figuur 34 geeft het verloop van de knolproduktie van aardappelen in het droge jaar 1976 op een losse, een aangereden en een grond met een duidelijke ploegzool. Zowel het verloop van de opbrengst als de eind oogst worden met het model redelijk benaderd.

Op basis van dit soort vergelijkingen tussen gemeten en berekend mag de conclusie worden getrokken dat het gebruik van het model leidt tot realistische uitkomsten.

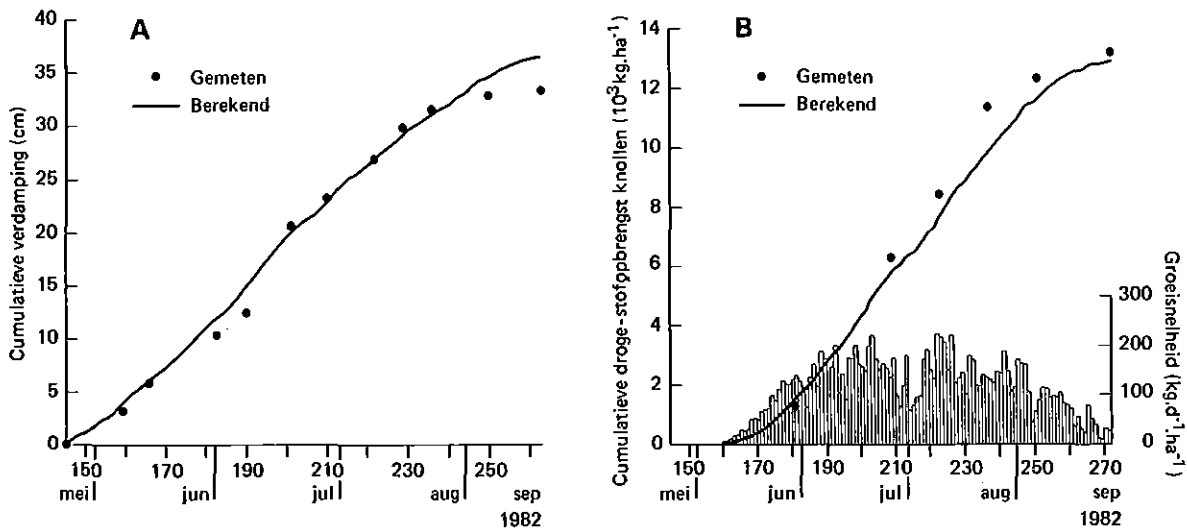
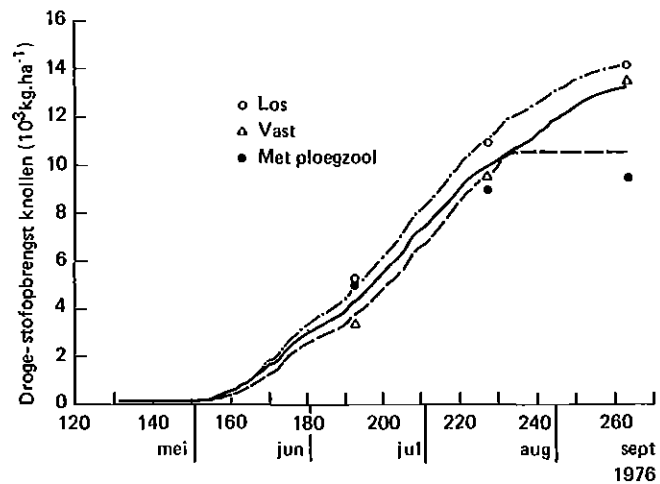


Fig. 33. Vergelijking van gemeten en berekende verdamping (A) en droge stofproductie (B) van aardappelen over het jaar 1982

Fig. 34. Vergelijking van gemeten en berekende droge stofproductie van aardappelen op een losse en aangereden grond en een grond met een ploegzool in de Flevopolder (FEDDES et al., 1987)



6. KARAKTERISERING EFFECTEN VAN ONTWATERING OP GEWASOPBRENGST

6.1. KARAKTERISERING EFFECTEN ONTWATERING IN VOORJAAR EN GROEISEIZOEN

Ontwatering beïnvloedt in het algemeen de gewasproductie via effecten die optreden in het voorjaar, in het groeiseizoen en het najaar.

In het algemeen leidt ontwatering in het voorjaar tot vervroeging van bewerking/zaai- en pootbedbereiding/kieming en opkomst. In de zomer kan ontwatering enerzijds wateroverlast voorkomen, anderzijds een eventueel watertekort vergroten. In het najaar kan ontwatering leiden tot vermindering van het oogstrisico en daarmee tot verlenging van het groeiseizoen.

Genoemde effecten werken verschillend uit voor verschillende bodemtypen. Het ene bodemtype is vroeger dan het andere. Daarnaast treden verschillen in droogtegevoeligheid tussen grondsoorten op.

Ten einde nu de ontwateringsinvloed op de gewasopbrengst die optreedt als gevolg van effecten in het voorjaar, zomer en bodemtype te kunnen karakteriseren wordt de volgende terminologie geïntroduceerd. Voor een bepaald bodemtype geldt voor de opbrengst van een gewas in een zeker jaar:

- $Q_{\max}$ - de droge stofopbrengst die maximaal haalbaar is. Deze wordt verkregen onder de heersende klimaatomstandigheden bij die ontwateringstoestand die de vroegst mogelijke opkomstdatum geeft bij optimale vochtvoorziening tijdens het groeiseizoen.
- Q_{pot} - de droge stofopbrengst die potentieel haalbaar is. Deze wordt verkregen onder de heersende klimaatomstandigheden, uitgaande van de bij een bepaalde ontwateringstoestand behorende opkomstdatum met een optimale watervoorziening gedurende het groeiseizoen.
- Q_{act} - de werkelijke droge stofopbrengst. Deze wordt verkregen onder de heersende klimaatomstandigheden, uitgaande van de bij een bepaalde ontwateringstoestand behorende opkomstdatum met de actuele watervoorziening tijdens het groeiseizoen.

Genoemde begrippen worden toegelicht in Figuur 35. Uit deze figuur wordt duidelijk dat het voorjaarseffect berust op het verschil in opkomst-tijdstip, dus vroegheid. We mogen dit voorjaarseffect alleen bezien bij

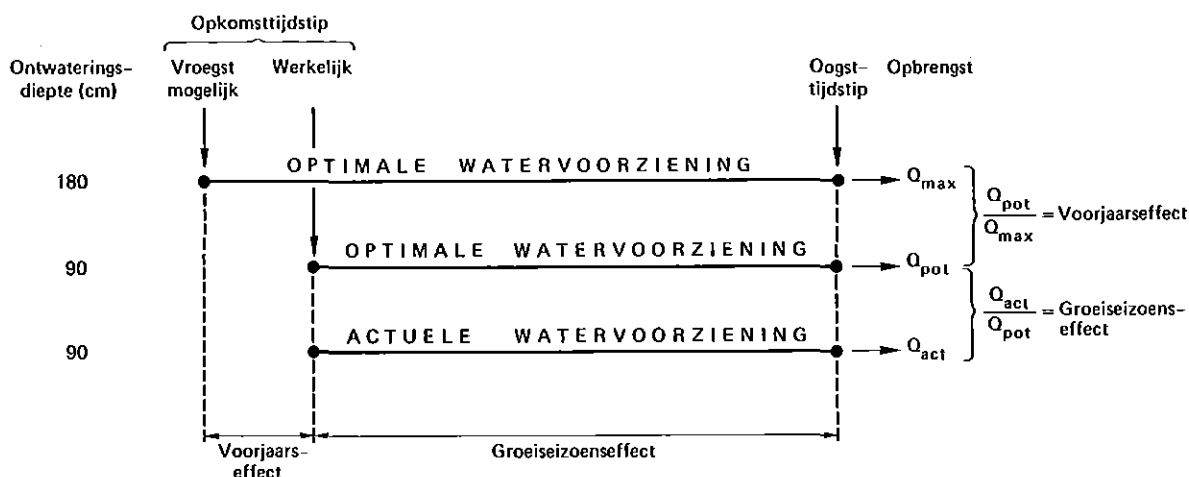


Fig. 35. Procedure om het totale ontwateringseffect te kunnen opsplitsen in een voorjaars- en groeiseizoeneffect

optimale vochtomstandigheden aangezien anders een additioneel effect van vochttekort er door heen gaat spelen. Onder veldomstandigheden kan dit voorjaarseffect alleen worden gekwantificeerd indien men in staat is tijdens het groeiseizoen een optimale watervoorziening (bijvoorbeeld via berekening) te bewerkstelligen. De vroegst mogelijke opkomstdatum zal voorkomen op het object met de beste ontwatering. In het onderhavige onderzoek komt dit laatste overeen met een ontwateringsdiepte van 180 cm met de hoogste drainage-intensiteit.

Naarmate de ontwateringstoestand slechter wordt zal het verschil tussen de vroegst mogelijke en de bij die ontwateringstoestand behorende werkelijke opkomstdatum toenemen.

Om het groeiseizoeneffect vast te kunnen stellen, moet het voorjaarseffect buiten beschouwing worden gelaten, dat wil zeggen er moet worden uitgegaan van eenzelfde begin van het groeiseizoen. De verschillen in opbrengst die aldus worden verkregen, kunnen dan volledig aan een verschil in vochtvoorziening worden toegeschreven.

Het totale ontwateringseffect kan worden opgesplitst in een voorjaars- en groeiseizoeneffect volgens de vergelijking:

$$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}} \cdot \frac{Q_{act}}{Q_{pot}} = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} \quad (58)$$

voorjaarseffect · groeiseizoeneffect = totaal effect

6.2. ONTWATERINGSEFFECT IN RELATIE TOT BODEMTYPE

Bij vergelijking (58) wordt het ontwateringseffect beschouwd voor zover dat binnen één bepaald bodemtype optreedt. Tussen bodemtypen onderling komen verschillen voor doordat de ene grond in het voorjaar vroeger is dan de andere. Inzicht omtrent het verschil in produktievermogen tussen grondsoorten onderling kan worden verkregen door hun maximale opbrengstwaarden, $Q_{\max}$, te vergelijken. Vergelijking (58) kan dan worden uitgebreid tot:

$$\frac{Q_{\text{pot},2}}{Q_{\max,2}} \cdot \frac{Q_{\text{act},2}}{Q_{\text{pot},2}} \cdot \frac{Q_{\max,2}}{Q_{\max,1}} = \frac{Q_{\text{act},2}}{Q_{\max,1}} \quad (59)$$

voorjaarseffect . groeiseizoenseffect . bodemeffect = totaal effect
waarin de index 2 op bodemtype 2 en de index 1 op bodemtype 1 slaat.
Bodemtype 1 wordt hier beschouwd als het bodemtype dat bij dezelfde zeer goede ontwatering het vroegste opkomsttijdstip heeft. De term $Q_{\max,2}/Q_{\max,1}$ is altijd een reductiefactor die de achterstand van in dit geval bodemtype 2 ten opzichte van bodemtype 1, in rekening brengt. Een en ander wordt verduidelijkt in het schema van Figuur 36.

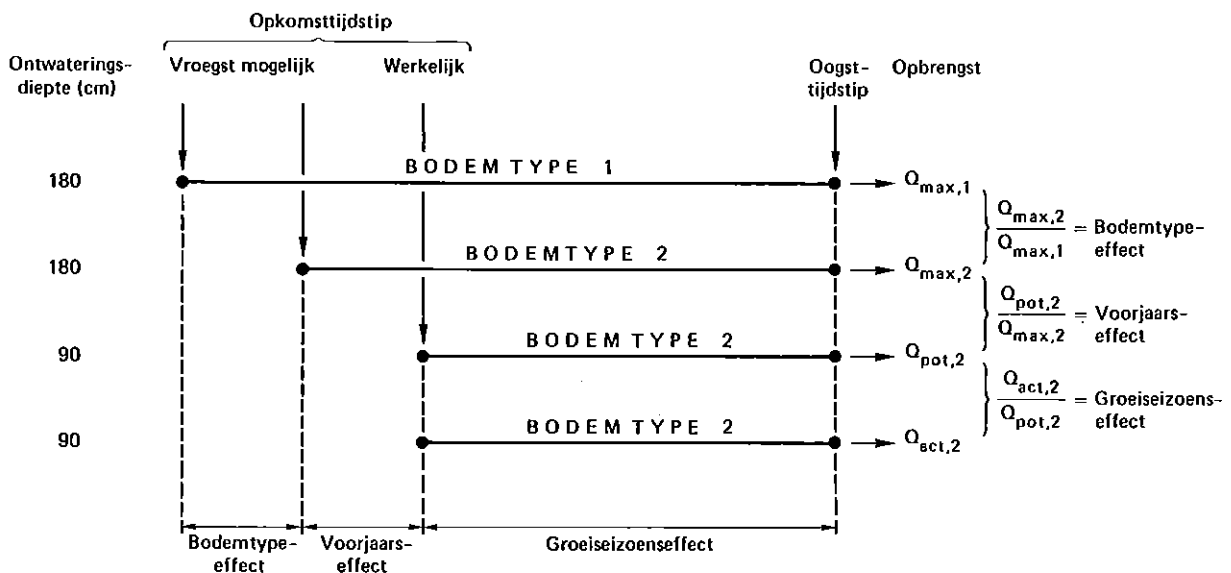


Fig. 36. Procedure om naast het voorjaars- en groeiseizoenseffect van ontwatering op gewasopbrengst ook de verschillen in opbrengstniveau tussen bodemtypen onderling te kunnen vergelijken

6.3. ONTWATERINGSEFFECT IN RELATIE TOT STIKSTOFVOORZIENING

In het algemeen leidt een verbetering van de ontwatering tot een hogere stikstofopname vanuit de bodem door het gewas. Dit als gevolg van een betere aëratie en een gemiddeld hogere bodemtemperatuur waardoor een grotere hoeveelheid stikstof door mineralisatie beschikbaar komt. Tevens zal op natte gronden eerder denitrificatie optreden. Dit verschijnsel doet zich op verschillende grondsoorten niet even sterk voor. Op veengronden is de mineralisatie van stikstof bij toenemende ontwatering zeer groot. VAN WIJK en FEDDES (1975) en SCHOTHORST (1982) leidden uit veldproeven op grasland op veengrond bij een slootpeilverlaging van 40 tot 100 cm-mv een extra bijdrage van stikstofleverantie door de bodem af in de orde van grootte van 250 kg. ha^{-1} . Ook op kleigronden kan een aanzienlijke extra stikstoflevering ten gevolge van ontwatering voorkomen. VAN HOORN (1958) vond op het ontwateringsproefveld 'Nieuwe Beerta' een extra stikstofleverantie door de bodem van 100 kg. ha^{-1} wanneer de gemiddelde grondwaterstand gedurende het groeiseizoen werd verlaagd van 40 tot 150 cm-mv.

In het algemeen is op zavel- en zandgronden de stikstofmineralisatie bij toenemende ontwatering van minder betekenis. Vergelijking van gewasgroei op zavel met die op kleigronden geeft het algemene beeld dat de gewassen op kleigronden in de nazomer/herfst langer doorgroeien als gevolg van een grotere beschikbaarheid van bodemstikstof (VAN DER VALK en SCHONEVELD, 1963; VAN DER VALK en NICOLAI, 1969; FEDDES, 1971)

Bij de modelberekeningen van gewasopbrengst in afhankelijkheid van ontwatering wordt er steeds van uitgegaan dat de nutriëntenvoorziening, i.e. stikstof, optimaal is. In werkelijkheid kunnen verschillen in stikstofvoorziening voorkomen bij verschillende ontwateringsdiepten. Deze stikstof is afkomstig uit 2 bronnen: N-mineralisatie uit humus en uit wortel-gewasresten. Bij minerale gronden zit de humus overwegend in de bovenste 20 à 30 cm. In deze laag wordt de humus met de grootste afbreekbaarheid aangetroffen. De organische stof op grotere diepten zal nauwelijks een rol spelen bij de levering van N ten gevolge van diepere ontwatering.

De organische stof die achterblijft van gewassen heeft een (veel) hogere mineralisatiesnelheid dan humus. De totale N-mineralisatie wordt veel meer bepaald door het voorgaande gewas dan door verschillen in grondsoort (Proefveldgegevens IB: Neeteson). SIEBEN (1974: Fig. 34 en Fig. 35) vond op kaal gehouden proefvelden een verschil in gemineraliseerde nitraatstik-

stof van slechts circa 20 kg tussen een het gehele jaar door goed ontwaterde en een in de winter en voorjaar slecht ontwaterde zavelgrond. Dit bevestigt de bovengenoemde conclusie dat gewasresten uit het voorgaande jaar de belangrijkste bron van gemineraliseerde stikstof zijn. Om gedifferentieerd naar grondsoort en ontwateringsdiepte de hoeveelheid gemineraliseerde stikstof aan te kunnen geven, ontbreken helaas de nodige proefveldgegevens (persoonlijke mededeling STEENVOORDEN, 1988).

Om in deze modelaanpak toch rekening te kunnen houden met aan ontwatering gekoppelde stikstofeffecten is de volgende procedure ontwikkeld. Hierbij wordt uitgegaan van de korrelopbrengsten van granen in afhankelijkheid van stikstofbemesting bij gemiddelde grondwaterstanden van 40, 90 en 150 cm-mv op een matig zware klei in Nieuw Beerta (VAN HOORN, 1958). Uit Figuur 37 kan worden afgelezen dat bij een N-bemesting van $0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de korrelopbrengst voor granen bij grondwaterstanden van 40, 90 en 150 cm-mv respectievelijk 1900, 3800 en 4400 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ bedraagt. Op basis van deze gegevens is in Figuur 38 het verband weergegeven tussen korrelopbrengst en gemiddelde grondwaterstand tijdens het groeiseizoen geldend voor een N-gift van $0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Tevens geeft Figuur 38 het verband tussen de N-leverantie door de bodem en de grondwaterstand, zoals dat eveneens uit Figuur 37 kan worden afgeleid. Figuur 38 laat zien dat de toename in opbrengst bij een diepere grondwaterstand volledig kan worden toegeschreven aan de extra N-leverantie door de bodem (curven lopen nagenoeg parallel). Deze leverantie

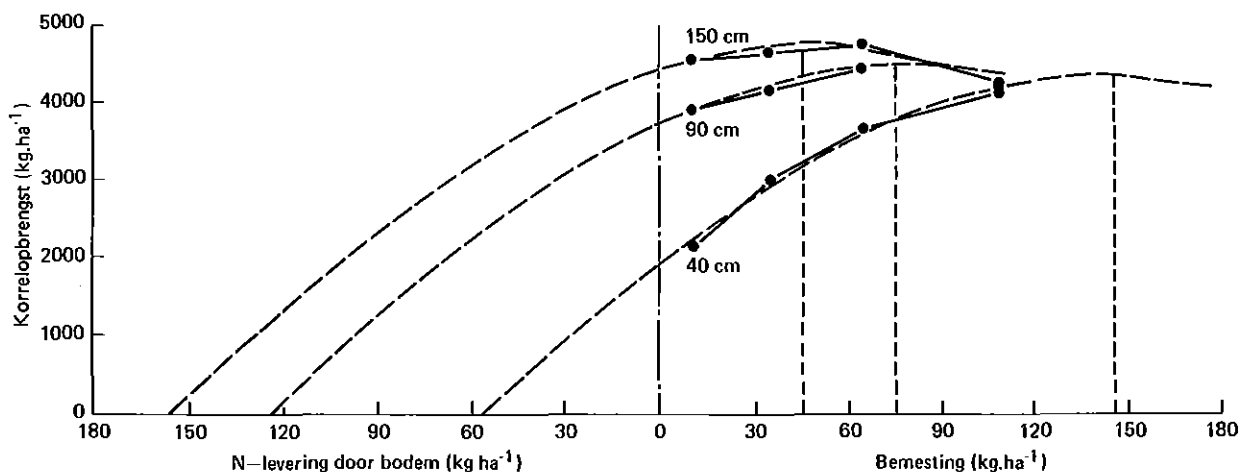
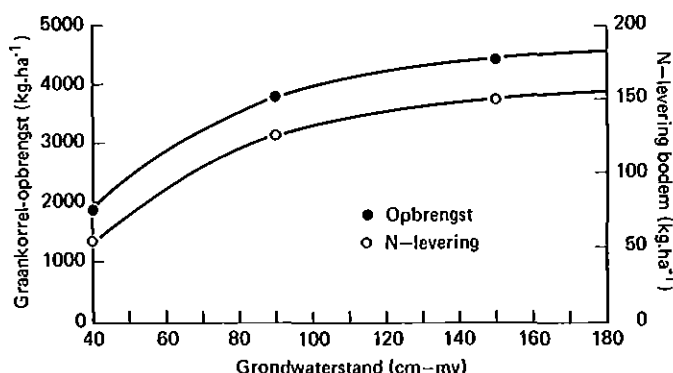


Fig. 37. Relaties tussen korrelopbrengst van granen in afhankelijkheid van de stikstofbemesting op een matig zware klei bij gemiddelde grondwaterstanden van 40, 90 en 150 cm gedurende het groeiseizoen (rechts). Daarvan afgeleid de N-leverantie door de bodem bij dezelfde grondwaterstandsdiepten (links). (VAN HOORN, 1958)

Fig. 38.

Verband tussen korrelopbrengst van graan en de N-levering door de bodem versus de gemiddelde grondwaterstand gedurende het groeiseizoen bij een bemesting van $0 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ voor matig zware kleigrond; afgeleid van Figuur 37



is maximaal bij grondwaterstandsdiepten in de orde van 180 cm-mv.

Worden de bij de verschillende grondwaterstandsdiepten verkregen opbrengsten gerelateerd aan de opbrengst behorend bij een grondwaterstandsdiepte van 180 cm-mv, dan kunnen opbrengstreductiefactoren als gevolg van N-tekorten bij ondiepere grondwaterstanden worden afgeleid uit Figuur 39.

De curve in Figuur 39 voldoet aan de vergelijking:

$$\nu = -0,28 + (2,23 \times 10^{-2})h_g - (1,36 \times 10^{-4})h_g^2 + (2,87 \times 10^{-7})h_g^3 \quad (60)$$

waarin: h_g = gemiddelde grondwaterstand (cm -mv) gedurende het groeiseizoen

$\nu = \frac{Q(h_g \leq 180)}{Q(h_g = 180)}$ is de opbrengstreductiefactor als gevolg van N-tekort bij grondwaterstanden ondieper dan 180 cm. Voor $h_g \geq 180$ wordt gesteld: $\nu = 1$

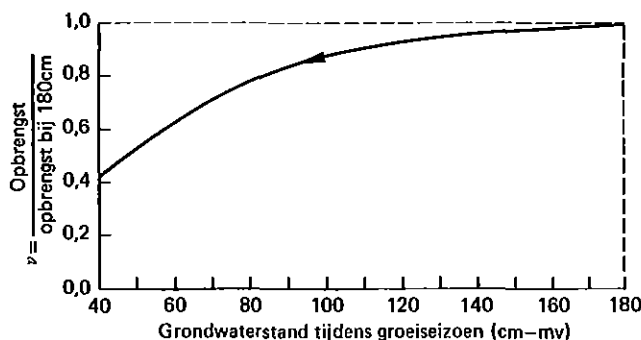


Fig. 39. Verband tussen de relatieve opbrengst (opbrengst bij grondwaterstandsdiepte 180 cm-mv gelijkgesteld aan 100%) en de constante grondwaterstand gedurende het groeiseizoen (1 maart-1 november) voor matig zware klei, zoals afgeleid uit Figuur 38. Hieruit kunnen dus opbrengstreductiefactoren als gevolg van N-tekorten worden afgeleid voor een breed traject van grondwaterstandsdiepten

Het model gaat in haar berekeningen uit van optimale nutriëntenvoorziening. Teneinde de N-levering door de bodem als gevolg van ontwatering in rekening te brengen, moet de met vergelijking (59) berekende relatieve opbrengst vermenigvuldigd worden met de reductiefactor ν :

$$\left(\frac{Q_{act,2}}{Q_{max,1}} \right)_{N = opt} \times \nu = \left(\frac{Q_{act,2}}{Q_{max,1}} \right)_{N = act} \quad (61)$$

7. EFFECTEN VAN ONTWATERING OP GEWAS- OPBRENGST TOEGELICHT AAN AARDAPPE- LEN OP EEN MATIG LICHTTE ZAVEL

In dit Hoofdstuk wordt de in het voorafgaande beschreven modelaanpak, geïllustreerd aan de hand van aardappelen 'verbouwd' op een lichte zavelgrond: profielnummer 5.

7.1. INVOERGEGEVENS

Tabel 11. Combinaties van ontwateringsdiepten en drainage-intensiteiten

Ontwateringsdiepte D	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Drainage-intensiteit A (d^{-1})	0,00795	0,00428	0,00229	0,00174	0,00110
	0,01574	0,00734	0,00502	0,00326	0,00220
	0,03390	0,01818	0,01026	0,00633	0,00404

- De bij de berekeningen gebruikte $k(h)$ en $h(\theta)$ -relaties van de matig lichte zavel zijn gegeven in Figuur 26.
- Voor differentiatie in ontwateringssituatie zijn de in Tabel 11 gegeven combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit toegepast. De drainage-intensiteiten verhouden zich per ontwateringsdiepte ruwweg als 1:2:4.

7.2. VOORBEELD UITVOERGEGEVENS

Tabel 12A geeft een voorbeeld van de uitvoer van FLOWEX over 30 jaar voor de periode 1 oktober tot en met de opkomstdatum van zomergranen, bieten en aardappelen in het daaropvolgend voorjaar op de matig lichte zavel bij een ontwateringsdiepte van 90 cm-mv en een drainage-intensiteit van $0,00734 d^{-1}$. Het linker deel van Tabel 12A geeft een karakterisering van de ontwateringssituatie van 1 oktober tot en met 31 mei door middel van SOW

Tabel 12A. Voorbeeld uitvoer van FLOWEX over 30 jaar voor de periode 1 oktober tot en met opkomstdatum van zomergranen, bieten en aardappelen (voorgekiemd en niet voorgekiemd) bij een ontwateringsdiepte van 90 cm-mv en een drainage-intensiteit van 0,00734 d⁻¹ voor een matig lichte zavel

8

```
*****
* KORTGENE          * S.O.W. ZAAI/POOT- EN OPKOMSTDATA  EVENT. ZONDAGEN NIET MEEGEREKEND.      06-MAR-83 *
* *****          *                               *****
* DRAIN             * GRANEN: 1 WERKB. DAG(EN), START OP 1e WERKB. DAG. BEW.GRENS: -80 CM. BODENVOCHTDRIUKH. *
* -DIEPTE 90 CM.-MV. * BIETEN: 2 WERKB. DAG(EN), START OP 1e WERKB. DAG. BEW.GRENS:-100 CM. BODENVOCHTDRIUKH. *
* -INTENS. 0.0073   * AARD. : 4 WERKB. DAG(EN), START OP 1e WERKB. DAG. BEW.GRENS:-100 CM. BODENVOCHTDRIUKH. *
* *****
```

JR	10 CH-MV	20 CH-MV	30 CH-MV	40 CH-MV	60 CH-MV	80 CH-MV	100 CH-MV	120 CH-MV	150 CH-MV	180 CH-MV	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490	1491	1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499	1500	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1507	1508	1509	1510	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1518	1519	1520	1521	1522	1523	1524	1525	1526	1527	1528	1529	1530	1531	1532	1533	1534	1535	1536	1537	1538	1539	1540	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547	1548	1549	1550	1551	1552	1553	1554	1555	1556	1557	1558	1559	1560	1561	1562	1563	1564	1565	1566	1567	1568	1569	1570	1571	1572	1573	1574	1575	1576	1577	1578	1579	1580	1581	1582	1583</
----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	--------

Tabel 12B. Voorbeeld uitvoer van produktiegegevens van aardappelen, berekend met SWATRE/CROPR vanaf opkomstdatum, bij een ontwateringsdiepte van 90 cm en een drainage-intensiteit van 0,00734 d⁻¹ voor een matig lichte zavel

JAAR	*	VROEGSTE BPK.DAG	QMAX	*	OERK.BPK.DAG	QDOT	QADT	*	QDOT/QMAX	QADT/QDOT	QADT/QMAX	*	GEM.L.GRU.*	JAAR
1952	*	107	15502.	*	121	14424.	14282.	*	0.9128	0.9901	0.9038	*	-201	* 1952
1953	*	109	16088.	*	121	14917.	14690.	*	0.9272	0.9847	0.9131	*	-189	* 1953
1954	*	112	14541.	*	123	13582.	13558.	*	0.9340	0.9932	0.9324	*	-170	* 1954
1955	*	117	14849.	*	132	13368.	12730.	*	0.9003	0.9522	0.8573	*	-195	* 1955
1956	*	110	13555.	*	123	12526.	12479.	*	0.9168	0.9981	0.9132	*	-171	* 1956
1957	*	107	15726.	*	119	14359.	13837.	*	0.9131	0.9636	0.8798	*	-196	* 1957
1958	*	122	13107.	*	129	12559.	12541.	*	0.9582	0.9996	0.9568	*	-187	* 1958
1959	*	111	17183.	*	132	14658.	11468.	*	0.8530	0.7824	0.6674	*	-204	* 1959
1960	*	102	15323.	*	115	14114.	14004.	*	0.9211	0.9922	0.9139	*	-193	* 1960
1961	*	109	13962.	*	141	10854.	10831.	*	0.7781	0.9970	0.7758	*	-179	* 1961
1962	*	125	13204.	*	152	10713.	10684.	*	0.8113	0.9973	0.8091	*	-185	* 1962
1963	*	112	14333.	*	150	10609.	10569.	*	0.7402	0.9962	0.7374	*	-154	* 1963
1964	*	117	15509.	*	134	13779.	13661.	*	0.8884	0.9915	0.8808	*	-191	* 1964
1965	*	132	12147.	*	152	10120.	9936.	*	0.8332	0.9868	0.8221	*	-124	* 1965
1966	*	123	14086.	*	137	12714.	12019.	*	0.9026	0.9453	0.8533	*	-133	* 1966
1967	*	119	15211.	*	129	14017.	13181.	*	0.9215	0.9404	0.8666	*	-197	* 1967
1968	*	107	15311.	*	113	14767.	14760.	*	0.9644	0.9996	0.9640	*	-167	* 1968
1969	*	121	14446.	*	152	11015.	10455.	*	0.7625	0.9674	0.7376	*	-173	* 1969
1970	*	127	14249.	*	139	13126.	12976.	*	0.9212	0.9886	0.9106	*	-182	* 1970
1971	*	111	16172.	*	121	15130.	14629.	*	0.9256	0.9669	0.9046	*	-191	* 1971
1972	*	121	13378.	*	129	12598.	12574.	*	0.9417	0.9981	0.9399	*	-170	* 1972
1973	*	124	15034.	*	147	12346.	11244.	*	0.8212	0.9108	0.7479	*	-195	* 1973
1974	*	97	16935.	*	108	15977.	15777.	*	0.9375	0.9937	0.9316	*	-197	* 1974
1975	*	125	15175.	*	146	12850.	11825.	*	0.8468	0.9202	0.7792	*	-191	* 1975
1976	*	110	17163.	*	123	15722.	12898.	*	0.9160	0.8204	0.7515	*	-206	* 1976
1977	*	122	13143.	*	145	11078.	10894.	*	0.8428	0.9834	0.8288	*	-187	* 1977
1978	*	119	14227.	*	138	12512.	12048.	*	0.8795	0.9629	0.8469	*	-184	* 1978
1979	*	127	12710.	*	150	10151.	10066.	*	0.7987	0.9916	0.7920	*	-184	* 1979
1980	*	114	14760.	*	132	12974.	12952.	*	0.8790	0.9982	0.8775	*	-166	* 1980
1981	*	109	15275.	*	129	13280.	13226.	*	0.8694	0.9959	0.8659	*	-173	* 1981
Gemidd.	*	116	14757.	*	133	13025.	12568.	*	0.8809	0.9670	0.8520	*	-180	*

(Som Overschrijding Waterstand). In de rechter helft van de tabel zijn de zaai-, poot- en opkomsttijdstippen voor granen, bieten en voor wel en niet voorgekiemde aardappelen gegeven, berekend zoals toegelicht in Hoofdstuk 3.

Tabel 12B geeft voor hetzelfde object een voorbeeld van de uitvoer van SWATRE/CROPR voor aardappelen vanaf de opkomstdatum. Achtereenvolgens worden per jaar uitgevoerd de vroegst mogelijke opkomstdatum (ontleend aan 180 cm-object met de hoogste drainage-intensiteit), de daarbij behorende maximaal mogelijke opbrengst ($Q_{\max}$), de bij het 90 cm-object behorende werkelijke opkomstdatum, de potentiële (Q_{pot}) en actuele (Q_{act}) droge stofproductie, de verhoudingen tussen respectievelijk $Q_{\text{pot}}/Q_{\max}$ (voorjaars-effect) $Q_{\text{act}}/Q_{\text{pot}}$ (groeiseizoen-effect) en $Q_{\text{act}}/Q_{\max}$ (totaal effect) en tenslotte de GLG (gemiddelde laagste grondwaterstand).

Analoge tabellen zijn uitgevoerd voor zowel granen als aardappelen, steeds voor 30 jaar, voor de 8 bodemtypen met elk 15 combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit.

7.3. VERKREGEN ONTWATERINGSSITUATIES

De in Tabel 11 gegeven combinaties van D en A zijn afgeleid op de wijze zoals beschreven in Paragraaf 4.2.

In Figuur 40 is bij genoemde combinaties de gemiddelde overschrijdingsduur van grondwaterstanden voor de periode september tot en met mei van de jaren 1951 tot en met 1981 weergegeven, zoals van dag tot dag gesimuleerd met FLOWEX. De punten in de figuur geven de bijbehorende GHG's aan. Op basis van de verkregen GHG's is een breed traject van ontwateringssituaties verkregen. Combinatie van de GHG's met de GLG's, verkregen uit waterbalansberekeningen over de 30 groeiseizoenen met SWATRE levert het in Tabel 13 gegeven beeld.

Uit Tabel 13 blijkt dat de grondwatertrappen variëren tussen V en VII. Bij de berekeningen is uitgegaan van het meest algemene geval, dat noch wegzijging, noch infiltratie optreedt. Hierdoor zakt de grondwaterstand in het groeiseizoen verder weg dan bij aanvoer door infiltratie of kwel het geval zou zijn. Echter men dient te bedenken dat in dit onderzoek geabstraheerd is van allerlei lokaal optredende hydrologische situaties. Dit om effecten van bodemtype en ontwatering op de gewasopbrengst onder volledig vergelijkbare omstandigheden te kunnen onderzoeken!

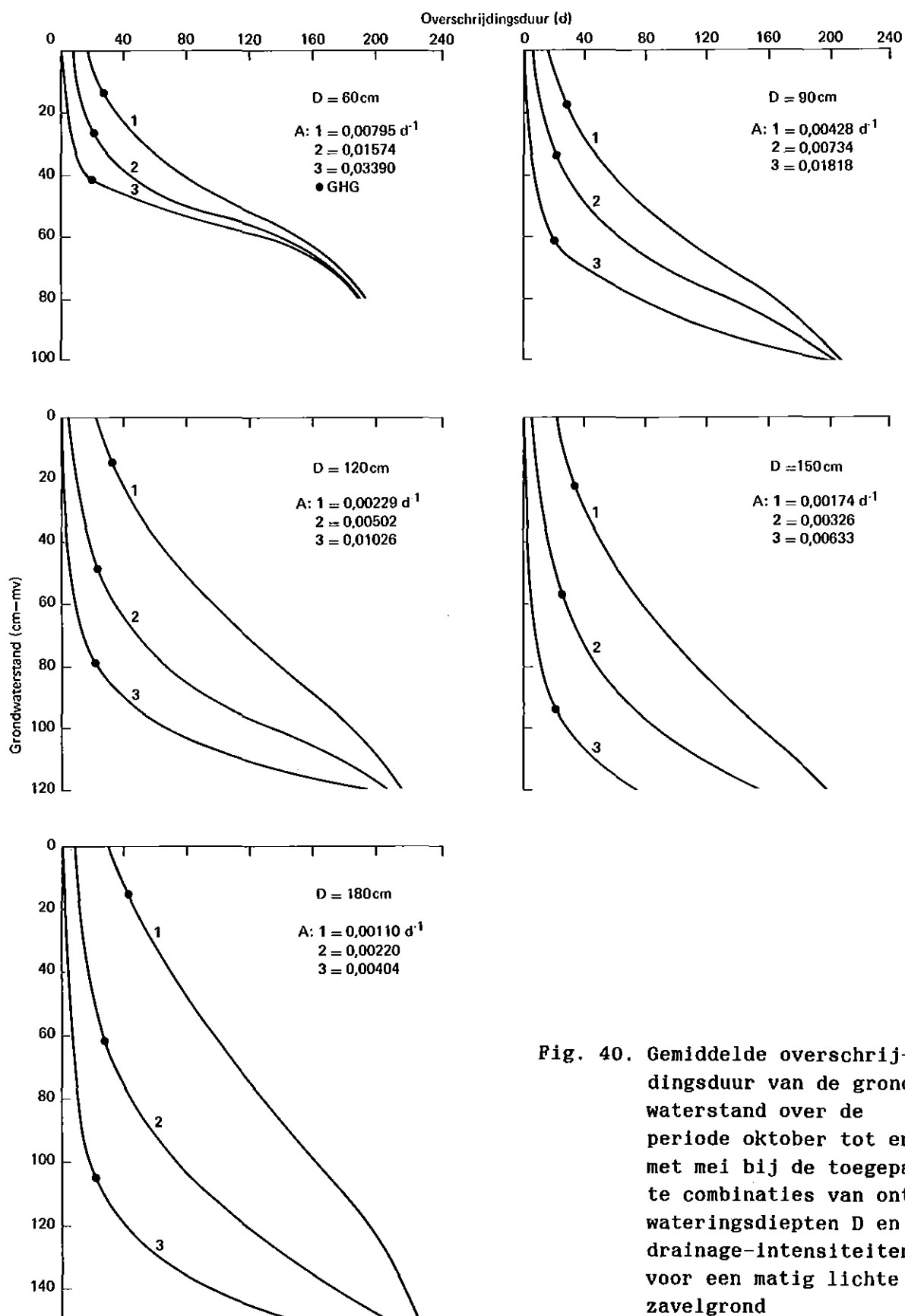


Fig. 40. Gemiddelde overschrijdingsduur van de grondwaterstand over de periode oktober tot en met mei bij de toegepaste combinaties van ontwateringsdiepten D en drainage-intensiteiten A voor een matig lichte zavelgrond

Tabel 13. Gemiddelde hoogste-, laagste grondwaterstand en grondwatertrap zoals verkregen bij de toegepaste combinaties van ontwateringsdiepten en drainage-intensiteiten

Ontwaterings- diepte D (cm -mv)	Drainage- intensiteit A (d ⁻¹)	Gem. hoogste grondwaterstand GHG (cm -mv)	Gem. laagste grondwaterstand GLG (cm -mv)	Grondwater- trap Gt
60	0,00795	13	168	V
	0,01574	26	170	V
	0,03390	41	172	VI
90	0,00428	17	177	V
	0,00734	34	180	V
	0,01818	61	184	VI
120	0,00229	14	182	V
	0,00502	49	189	VI
	0,01026	79	192	VI
150	0,00174	22	189	V
	0,00326	57	195	VI
	0,00633	94	199	VII
180	0,00110	15	191	V
	0,00220	62	201	VI
	0,00404	105	206	VII

Worden de in de Tabel 13 gegeven combinaties van ontwateringsdiepten en drainage-intensiteiten vergeleken met stationaire en pseudo-stationaire drainagecriteria, dan treedt het volgende beeld op.

In Figuur 41 is voor de 5 ontwateringsdiepten het verband weergegeven tussen GHG en drainage-intensiteit (zie Tabel 13), zoals berekend met het dynamische model FLOWEX over 30 jaar voor de matig lichte zavel. Het blijkt dat dit verband, op semi-logaritmische schaal uitgezet, lineair is. De punten op de lijnen in de figuur geven de in deze studie toegepaste drainage-intensiteiten aan. Het blijkt dat voor het bereiken van eenzelfde GHG een grotere drainage-intensiteit vereist is naarmate de ontwateringsdiepte geringer is. Figuur 41 stelt ons dus in staat om, voor een bepaald

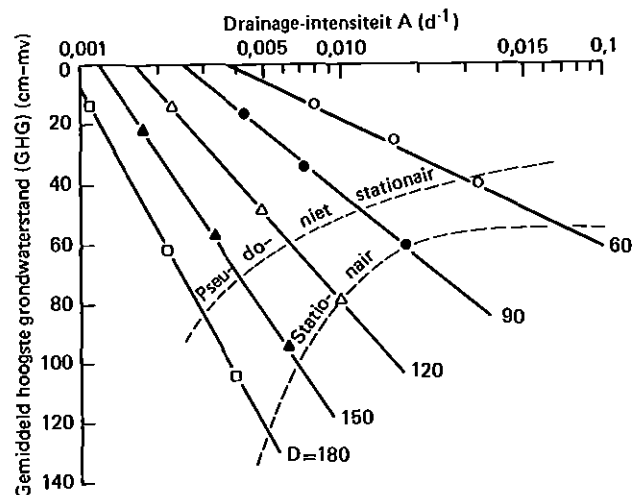


Fig. 41. Verband tussen gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) en drainage-intensiteit bij vijf ontwateringsdiepten voor een matig lichte zavelgrond. Verbanden zijn verkregen uit een simulatie met het dynamische model FLOWEX over 30 jaar (1951-1982). Tevens zijn voor elke draindiepte met stippellijnen de drainage-intensiteiten aangegeven, zoals verkregen volgens stationaire en pseudo-niet-stationaire beschouwingen (zie tekst)

bodemprofiel, bij gegeven ontwateringsdiepten, GHG's te vertalen in drainage-intensiteiten of omgekeerd.

In Figuur 41 is ook het stationaire drainagecriterium voor bouwland aangegeven dat voorschrijft dat bij een grondwaterstand van 50 cm-mv de afvoer 7 mm.d^{-1} dient te zijn. Dit wil zeggen dat bij de beschouwde ontwateringsdiepten van 60, 90, 120, 150 en 180 cm de drainage-intensiteit A respectievelijk 0,070, 0,0175, 0,010, 0,007 en 0,0054 bedragen (zie onderste gestippelde lijn). Het blijkt dat de door ons als hoogst gekozen drainage-intensiteiten ongeveer overeenkomen met het stationair drainagecriterium.

Naast het genoemde stationaire drainagecriterium wordt ook het ontwerpcriterium gebruikt dat een grondwaterstand van 25 cm-mv één keer per jaar mag worden overschreden. Toepassing van de pseudo-niet stationaire beschouwing van WESSELING (1969) waarin gewerkt wordt met een constante bergingscoëfficiënt, μ , levert voor de matig lichte zavel met een $\mu = 0,10$ de door de bovenste stippellijn in Figuur 41 gegeven drainage-intensiteiten op. Deze intensiteiten zijn dus lager dan verkregen volgens de stationaire benadering. Ze liggen verder duidelijk binnen het door ons toegepaste gebied. Het criterium van één maal per jaar overschrijding van 25 cm-mv vereist overigens een ontwateringstoestand gepaard gaande met een GHG die duidelijk dieper ligt dan 25 cm-mv.

7.4. ONTWATERING, BEWERKBAARHEID, TIJDSTIP POTEN

Op basis van het over de periode herfst 1951 tot en met voorjaar 1981 van dag tot dag gesimuleerde vochtspanningsverloop op 5 cm diepte werd met behulp van de in Tabel 6 gegeven bewerkbaarheidsdrempelwaarden het in de periode 20 maart-31 mei voorkomende aantal en verdeling van werkbare dagen vastgesteld.

Figuur 42 laat resultaten van modelberekening zien van het aantal dagen, dat in de periode van 2 maart tot 31 mei beschikbaar is voor het poten van aardappelen bij twee verschillende ontwateringsdiepten. Elk punt in de figuur vertegenwoordigt één jaar uit de beschouwde 30 jaar. Gaande van rechts naar links zijn de 30 jaren gerangschikt in volgorde van weinig naar veel beschikbare werkbare dagen. Bij geringe ontwateringsdiepte komen er jaren voor zonder werkbare dagen (1969 en 1973). In dergelijke jaren zal de praktijk niet willen wachten, maar de grond bewerken onder te natte omstandigheden met het gevaar voor structuurbederf en eventueel lagere opbrengst. Vergroting van de ontwateringsdiepte van 60 naar 120 cm doet het aantal werkbare dagen duidelijk toenemen. In zeer natte jaren is bij $D = 120$ cm een kans van nagenoeg 100% op 13 (1965) of meer werkbare dagen. Dat de volgorde waarin de jaren voorkomen bij toenemend aantal bewerkbare dagen niet hetzelfde is voor de twee ontwateringsdiepten is te verklaren uit enerzijds de absolute waarde van de bewerkbaarheidsgrens en anderzijds uit het niet lineaire stromingsproces in de onverzadigde zone.

Figuur 43 geeft voor $D = 60, 90$ en 120 cm de vroegst mogelijke pootdatum in de periode 1952-1981. De vroegst mogelijke pootdatum geeft de volgens vergelijking (17a) berekende gemiddelde datum van poten bij benutting van de vier eerste voorkomende werkbare dagen ná 20 maart. De figuur laat zien dat:

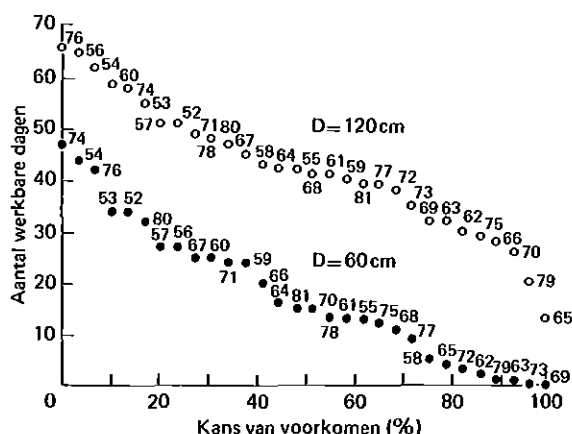


Fig. 42. De kans dat in de periode tussen 20 maart en 31 mei voor de jaren 1952 tot en met 1981 een aantal werkbare dagen wordt overschreden bij ontwateringsdiepten $D = 60$ en 120 cm voor een matig lichte zavel

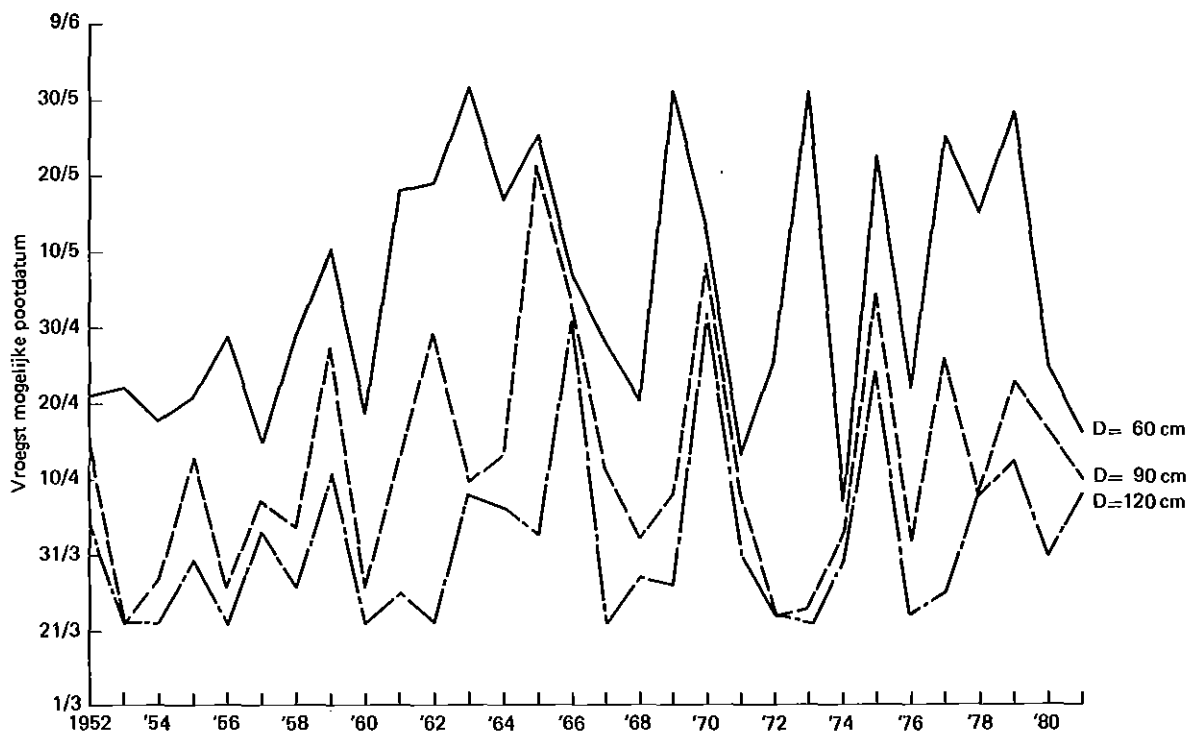


Fig. 43. Vroegst mogelijke pootdatum van aardappelen gesimuleerd over een 30-jarige periode bij draindiepten $D = 60$, 90 en 120 cm en de middelste drainage-intensiteit (zie Tabel 13) voor een matig lichte zavel

- vergroting van de ontwateringsdiepte van 60 naar 90 respectievelijk 120 cm een vervroeging geeft van gemiddeld 22 , respectievelijk 33 dagen;
- van jaar tot jaar aanzienlijke verschillen in tijdstip van poten voorkomen, die op kunnen lopen tot circa 40 dagen. Het valt op dat de fluctuaties afnemen naarmate de ontwateringsdiepte groter wordt.

7.5. ONTWATERING, KIEMING, OPKOMST EN TIJDIGHEIDSVIERLIEZEN

Is eenmaal met het model voor ieder jaar de pootdatum vastgesteld, dan wordt achtereenvolgens de kiemingsduur en vroegst mogelijke opkomstdatum berekend op basis van de gemiddelde dagtemperatuur, en de berekende drukhoogte in het pootbed (zie Paragraaf 3.5.).

Figuur 44 geeft de vroegst mogelijke opkomstdatum van aardappelen voor ieder afzonderlijk jaar voor drie ontwateringsdiepten bij steeds de middelste drainage-intensiteit. Toeneming van de ontwateringsdiepte vervroegt de opkomstdatum aanzienlijk. Gaande van $D = 60$ naar $D = 90$ en 120 cm, wordt

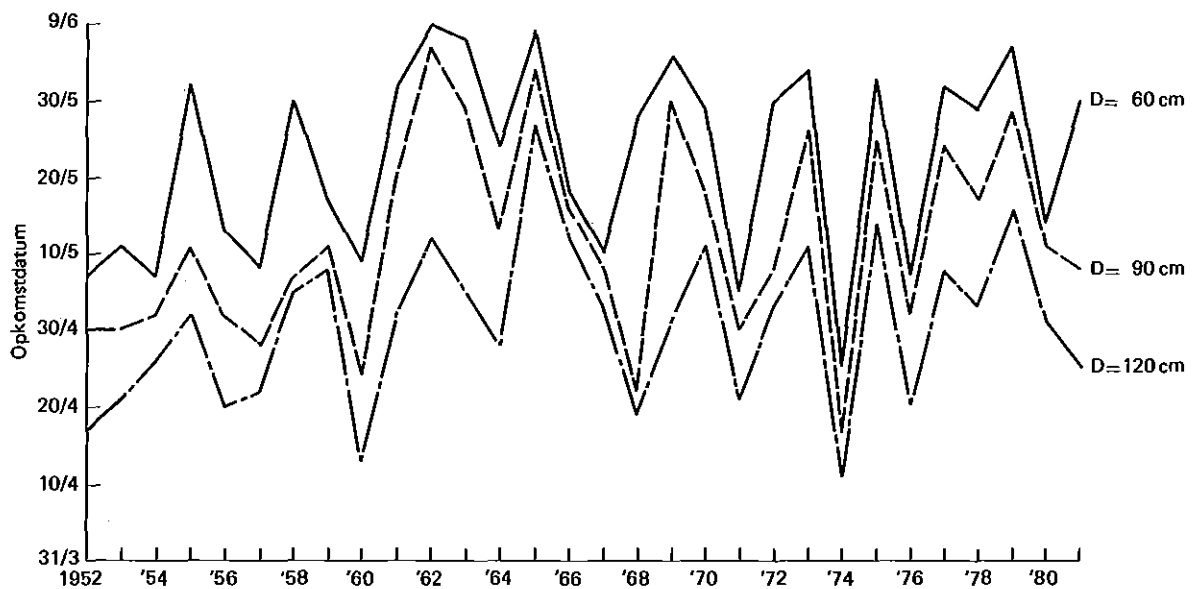


Fig. 44. Vroegst mogelijke opkomstdatum van aardappelen gesimuleerd over een 30-jarige periode bij draaindiepten $D = 60$, 90 en 120 cm en de middelste drainage-intensiteit (zie Tabel 13) voor een matig lichte zavel

de over 30 jaren gemiddelde opkomstdatum met 10 respectievelijk 21 dagen vervroegd (De vervroeging in opkomstdatum wordt minder sterk bij nog grotere ontwateringsdiepten). De vervroeging wordt verklaard door het feit dat grotere ontwateringsdiepten gepaard gaan met diepere grondwaterstanden, dus met verminderde capillaire opstijging en dus een snellere uitdroging van de bovengrond. De verschillen in opkomstdatum kunnen van jaar tot jaar bij een bepaalde ontwateringsdiepte oplopen tot meer dan een maand.

Figuur 45 geeft de samenhang tussen kiemingsduur en pootdatum gebaseerd op simulaties over 30 jaren, vijf ontwateringsdiepten en drie drainage-intensiteiten. Figuur 45 laat zien dat bij vroeg (30 maart) poten de

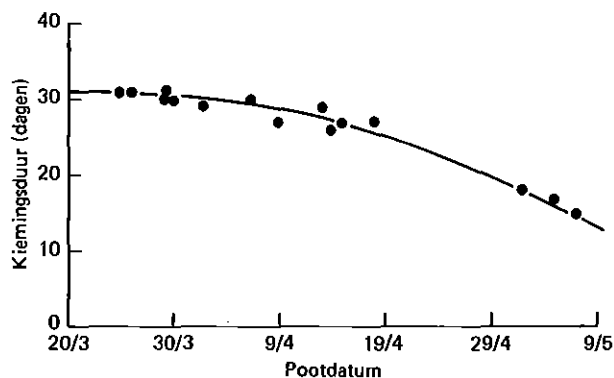
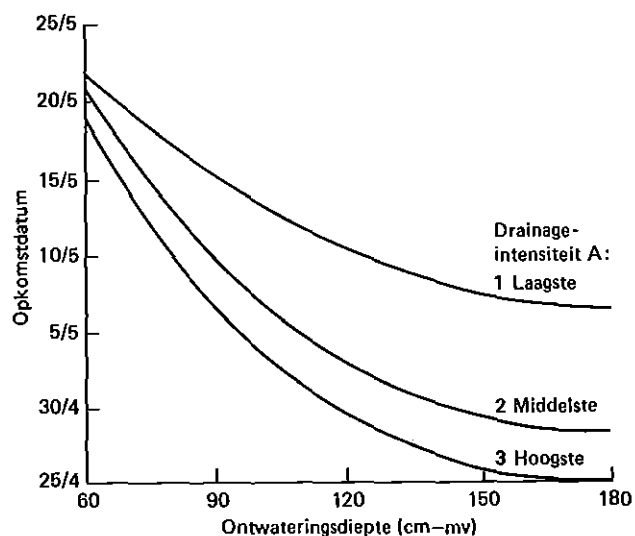


Fig. 45. Kiemingsduur van aardappelen in relatie tot de pootdatum, zoals verkregen uit simulaties over 30 jaren, vijf ontwateringsdiepten en drie drainage-intensiteiten voor een matig lichte zavel

kiemingsduur circa 30 dagen en bij laat (10 mei) poten (als gevolg van te natte omstandigheden) circa 15 dagen bedraagt. Echter de vertraging in pootdatum van 30 maart tot 10 mei (40 dagen) wordt bij lange na niet gecompenseerd door de kortere kiemingsduur van gemiddeld 15 dagen bij poten later in het seizoen.

Figuur 46 geeft een samenvatting van 30-jarige gemiddelden van de opkomstdatum voor alle in Tabel 11 gegeven combinaties van ontwateringsdiepten en drainage-intensiteiten. De vroegheid van opkomst van aardappelen op deze matig lichte zavel wordt sterk beïnvloed door ontwateringsdiepte en -intensiteit, hoewel de invloed van ontwateringsdiepte aanzienlijk groter is. Een vergroting van de ontwateringsdiepte van 60 tot 150 à 180 cm leidt tot een vervroeging van de opkomstdatum met gemiddeld ruim drie weken. Voor deze grond moet de ontwateringsdiepte uit oogpunt van bewerkbaarheid in het voorjaar zeker 150 cm bedragen. Voor een goede vochtvoorziening in het groeiseizoen is dit echter te diep, waardoor voordelen van een vroege start van het groeiseizoen, door droogteschade weer verloren kunnen gaan (zie hiervoor Paragraaf 7.6.). Het model maakt het mogelijk de verschillen in tijdigheid, dit wil zeggen in poot- en opkomstdatum ten gevolge van verschillen in ontwatering te kwantificeren in termen van opbrengst. Om het zuivere effect van de voorjaarsomstandigheden op de opbrengst te kunnen vaststellen, dienen opbrengstverschillen als gevolg van vochttekorten in het volgende groeiseizoen buiten beschouwing te worden gelaten; met andere woorden vanaf de opkomst wordt de opbrengst berekend bij optimale vochtvoorziening gedurende het groeiseizoen.

Fig. 46. Invloed van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit (zie Tabel 13) op de opkomstdatum van aardappelen op basis van simulaties over de periode 1952-1981 voor een matig lichte zavel



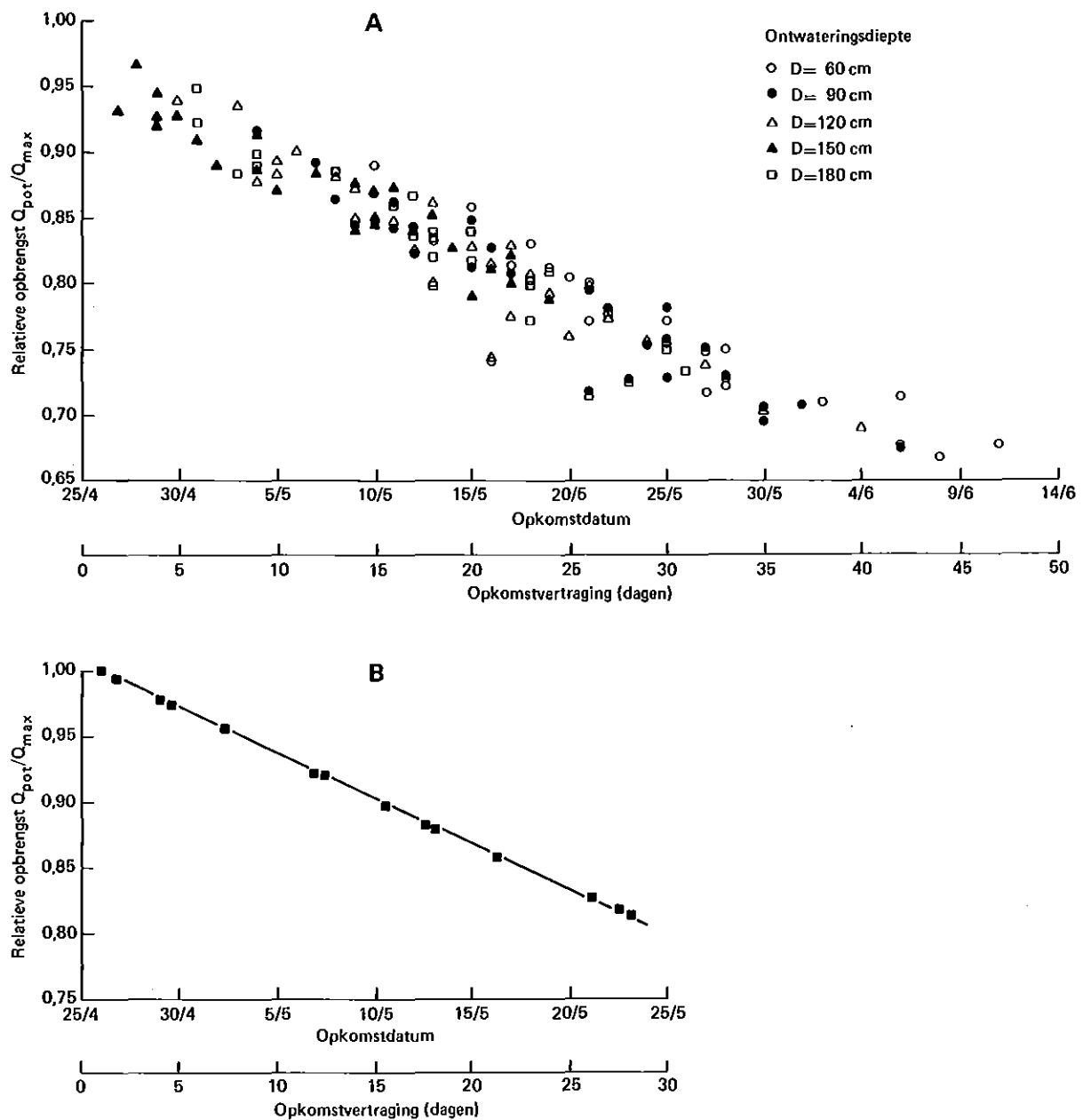


Fig. 47. Invloed van opkomstdatum/opkomstvertraging op de relatieve opbrengst van aardappelen op een matig lichte zavel. A: gebaseerd op simulaties over 30 afzonderlijke jaren (1952-1981) voor vijf ontwateringsdiepten en de laagste drainage-intensiteit. B: als 30-jarig gemiddelde bij vijf ontwateringsdiepten en drie drainage-intensiteiten

Zoals in Paragraaf 6.1 is beschreven wordt de relatieve opbrengst behorend bij een bepaalde opkomstdatum verkregen uit de verhouding $Q_{\text{pot}}/Q_{\text{max}}$. Hierbij is Q_{max} de per jaar maximaal haalbare produktie bij de vroegst mogelijke opkomstdatum. Deze treedt op bij de ontwateringsdiepte van 180 cm-mv met de hoogste drainage-intensiteit. Q_{pot} is de potentiële opbrengst (i.e. zonder vochttekorten) berekend vanaf de voor ieder jaar en object werkelijk optredende opkomstdatum. Voor het best ontwaterde object valt de werkelijke dus samen met de vroegst mogelijke opkomstdatum.

In Figuur 47A is voor 30 afzonderlijke jaren bij vijf ontwateringsdiepten met de laagste drainage-intensiteiten de relatieve produktie gegeven als functie van de opkomstdatum/opkomstvertraging voor de matig lichte zavel. De beter ontwaterde objecten (150 en 180 cm -mv) worden het vaakst linksboven in de figuur gevonden en de natste objecten (60 cm -mv) rechts-onder. Echter er worden ook in natte jaren op de beter ontwaterde objecten aanzienlijke opkomstvertragingen aangetroffen. In feite is Figuur 47A het resultaat van een 30-jarige poot/opkomsttijdenproef op een proefveld met 15 objecten verschillend in ontwateringsdiepte en vergelijkbare drainage-intensiteit (zie Tabel 11). De variatie in opkomstdatum van aardappelen ligt tussen 26 april en circa 10 juni.

Figuur 47B geeft hetzelfde weer als Figuur 47A, maar nu als 30-jarig gemiddelde voor alle 15 combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit. Gebaseerd op dit 30-jarig gemiddelde varieert de opkomstdatum tussen 26 april en 23 mei. Figuur 47B laat zien dat vertraging in opkomst in de periode eind april-mei gemiddeld gepaard gaat met een opbrengst-verlies van 0,7%/dag.

7.6. ONTWATERING, VERDAMPING EN PRODUKTIE

Is eenmaal de opkomstdatum, die dus voor ieder jaar en object verschillend is bekend, dan kunnen vervolgens de transpiratie en de produktie worden berekend volgens de methodiek zoals in de Paragrafen 3.6. en 3.7. is beschreven.

In Figuur 48 is het verband weergegeven tussen relatieve droge stofproduktie en de relatieve transpiratie van aardappelen voor 30 afzonderlijke jaren bij een ontwateringsdiepte van 180 cm -mv en de middelste drainage-intensiteit. Berekening van de produktie is gebeurd met het niet-lineaire

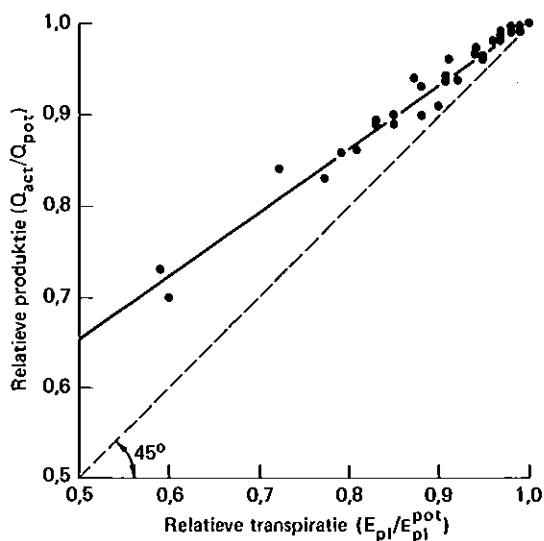


Fig. 48. Relatieve produktie van aardappelen, zoals berekend met CROPR, als functie van de relatieve transpiratie zoals berekend met SWATRE voor de periode 1952-1981 bij ontwateringsdiepte $D = 180$ cm-mv en de middelste drainage-intensiteit voor een matig lichte zavel

produktiemodel CROPR op dag voor dag-basis. Dit levert voor het totale groeiseizoen een relatieve produktie op die afwijkt van het vaak in de praktijk aangehouden 1:1-verband tussen relatieve produktie en relatieve verdamping gerekend als totalen over het seizoen. De verschillen zijn het grootst in droge jaren zoals 1959 en 1976.

In Figuur 49 is voor de matig lichte zavel de absolute droge stofopbrengst van aardappelen als gemiddelde over 30 jaren weergegeven als functie van de ontwateringsdiepte en de drainage-intensiteit (zie ook Tabel 11). Het blijkt dat er een duidelijke invloed is van zowel de ontwateringsdiepte als de drainage-intensiteit op de opbrengst. De voor de opbrengst optimale draindiepte varieert voor deze matige lichte zavel tussen 130 en 150 cm. De hoogste opbrengst wordt verkregen bij de hoogste drainage-intensiteit (curve 3). Echter de droge stofopbrengst bij de middelste drainage-intensiteit (curve 2) is niet veel kleiner ($\approx 2\%$), terwijl de drainage-

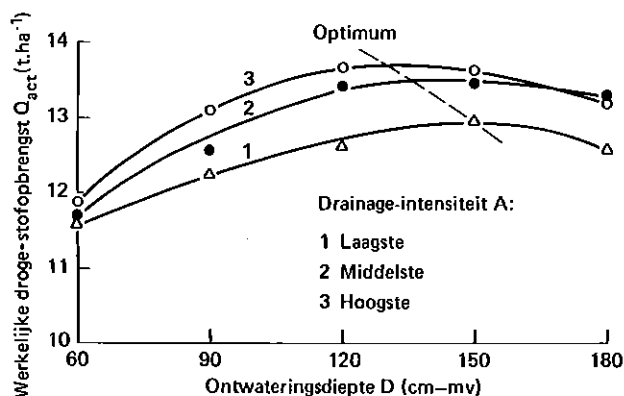


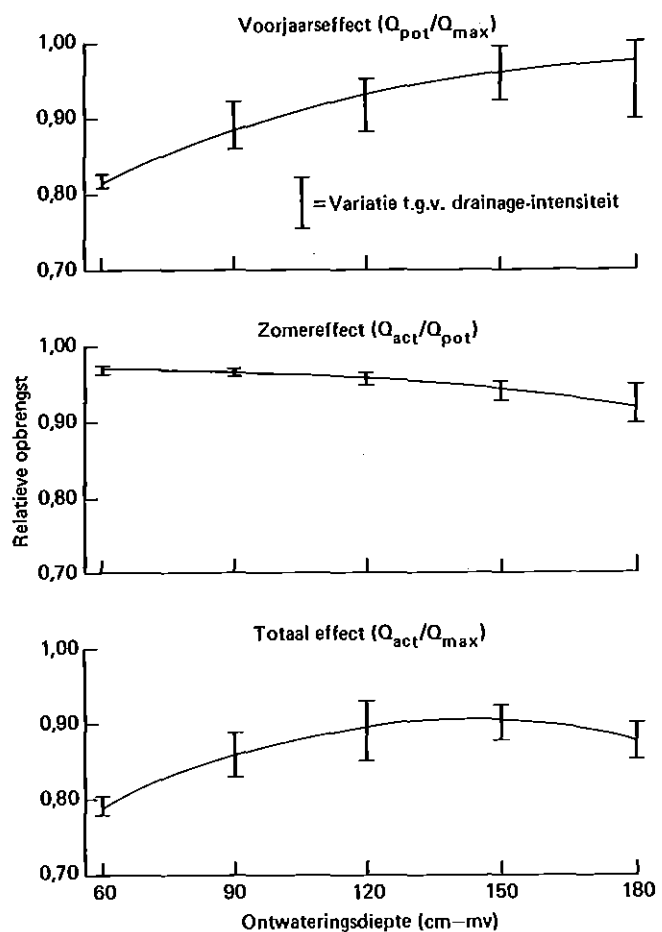
Fig. 49. Droge stofopbrengst van aardappelen als functie van de ontwateringsdiepte bij drie drainage-intensiteiten als 30-jarig gemiddelde over de periode 1952-1981 voor een matig lichte zavel

intensiteit ruwweg een factor 2 lager is (zie Tabel 11). Het verschil in droge stofopbrengst tussen curve 3 en curve 1 bedraagt rond het ontwateringsoptimum van circa 130 cm $\approx$ 6%, terwijl de drainage-intensiteit behorend bij beide curven een factor 4 verschilt.

De drainage-intensiteiten waarmee opbrengst-ontwateringscurve 3 is verkregen, komen volgens Figuur 41 nagenoeg overeen met drainage-intensiteiten verkregen met het in de praktijk gehanteerde stationaire drainagecriterium van een afvoer van 7 mm.d⁻¹ bij een maatgevende grondwaterstand van 50 cm- mv.

In Figuur 50 zijn de relatieve opbrengsten gemiddeld over 30 jaar weer-gegeven als functie van de ontwateringsdiepte voor de matig lichte zavel. De ontwateringseffecten zijn uitgesplitst naar invloeden van ontwatering die respectievelijk spelen in het voorjaar (bewerkbaarheid, tijdigheid, vroegheid) en het groeiseizoen (vochtvoorziening). Het totale effect wordt verkregen door vermenigvuldiging van beide effecten (zie vergelijking 58 en Figuur 35). De verticale lijnen in Figuur 50 geven de variatie in relatieve opbrengst als gevolg van verschillen in drainageintensiteit. Het effect van

Fig. 50. Relatieve opbrengst gemiddeld over 30 jaren (1952-1981) op een matig lichte zavel bij vijf ontwateringsdiepten. De verticale lijnen geven per ontwateringsdiepte de spreiding in opbrengst aan als gevolg van verschillen in drainage-intensiteit. De opbrengst is uitgesplitst naar effecten van ontwatering in het voorjaar (bewerkbaarheid, tijdigheid) en in de zomer (droogte). Het produkt van beide levert het totaal effect van ontwatering op opbrengst

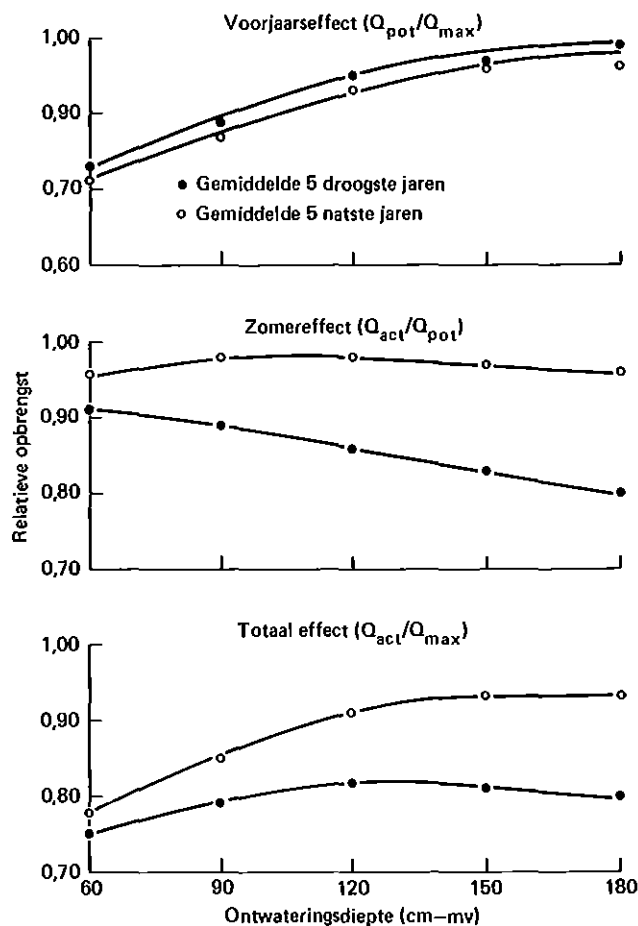


ontwatering in het voorjaar is bij deze matig lichte zavel groot: 18% opbrengstreductie bij een ontwateringsdiepte van 60 cm. Om opbrengstreductie ten gevolge van verlate bewerkbaarheid en opkomst te voorkomen, is voor deze grond een ontwateringsdiepte van 150 tot 180 cm vereist. De opbrengstreductie door vochttekort in de zomer is bij een ontwateringsdiepte van 180 cm gemiddeld 8%. Rekening houdend met zowel het voorjaars- als zomereffect bedraagt de optimale ontwateringsdiepte 130 tot 140 cm. Bij deze matig lichte zavelgrond wordt de opbrengstreductie vooral veroorzaakt door verschillen in bewerkbaarheid en opkomst. In Figuur 50 wordt nergens een relatieve opbrengst van 1,0 gehaald. Dit is logisch aangezien het hier een 30-jarig gemiddelde betreft. Een relatieve opbrengst van 1,0 kan alleen worden gehaald in jaren met de voor dat jaar geldende vroegst mogelijke opkomstdatum gevolgd door een groeiseizoen zonder enig vochttekort, dus een vroeg voorjaar gevolgd door een natte zomer. Deze situatie doet zich bij deze grond alleen voor op objecten met ontwateringsdiepten van 150 tot 180 cm-mv.

Figuur 51 is analoog aan Figuur 50 maar nu voor de vijf natste (1957, '63, '65, '66 en '68) en vijf droogste (1955, '59, '71, '75 en '76) jaren uit de periode 1952 tot 1981 (zie ook Fig. 30). Deze jaren zijn geselecteerd op basis van verdampingsoverschot over de periode april tot en met september. Voor de voorjaarsomstandigheden zijn de geselecteerde natte en droge jaren weinig representatief vanwege de keuze op basis van het verdampingsoverschot over de aaneengesloten periode april tot en met september. Een nadere analyse van de modelresultaten van afzonderlijke jaren leert dat er jaren voorkomen waarin, ondanks diepe ontwatering vanwege een ongunstige neerslagverdeling, de bewerkbaarheid voortdurend slecht is. Daarnaast zijn er jaren met een nagenoeg permanent goede bewerkbaarheid ook bij ondiepe ontwatering. Het blijkt dat de vochtomstandigheden en daarmee de bewerkbaarheid van de bouwvoor bij relatief geringe ontwateringsdiepten veel effectiever te beïnvloeden is door aanpassing van de diepte dan van de intensiteit van de ontwateringsmiddelen.

In droge zomers wordt op deze opdrachtig matig lichte zavel toch nog een opbrengstreductie van 10% bij 60 cm tot 20% bij 180 cm ontwateringsdiepte opgelopen. Wordt ontwateringsdiepte afgestemd op alleen de droogste respectievelijk de natste jaren dan is de optimale ontwateringsdiepte 120 respectievelijk 150 cm-mv.

Fig. 51. Als Figuur 50, maar nu voor de vijf natste respectievelijk vijf droogste jaren bij de middelste drainage-intensiteit



7.7. EFFECT VAN INFILTRATIE EN WEGZIJGING OP DE OPBRENGST

In deze studie is er steeds van uitgegaan dat er noch wegzijging, noch infiltratie optreedt. Dit is gedaan om te abstraheren van allerlei lokaal optredende hydrologische situaties. Aldus kunnen effecten van bodemtype en ontwatering op de gewasopbrengst onder volledig vergelijkbare omstandigheden worden onderzocht.

In Figuur 52 is een voorbeeld gegeven van wat er zou gebeuren als een infiltratie van 0,5 respectievelijk 1,0 mm.d⁻¹ en een wegzijging van 0,5 respectievelijk 1,0 mm.d⁻¹ optreedt. In deze figuur zijn effecten op de opbrengst gegeven bij 5 ontwateringsdiepten en de middelste drainage-intensiteit over 30 jaren. Het blijkt dat bij bijvoorbeeld 150 cm ontwateringsdiepte de opbrengst met respectievelijk 2 en 4% toe/afneemt wanneer de infiltratie/wegzijging respectievelijk 0,5 en 1,0 mm.d⁻¹ bedraagt.

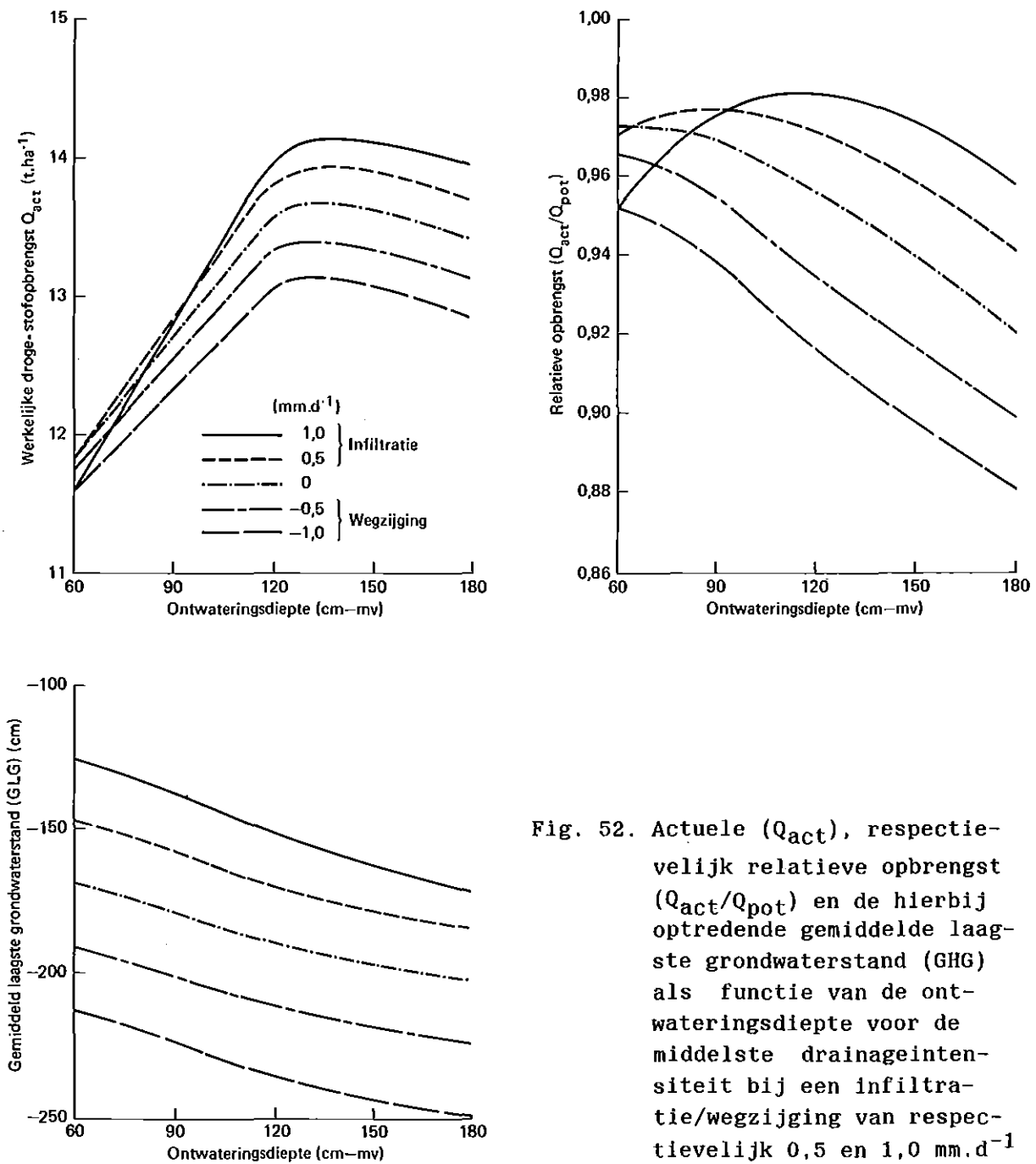


Fig. 52. Actuele (Q_{act}), respectievelijk relatieve opbrengst (Q_{act}/Q_{pot}) en de hierbij optredende gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) als functie van de ontwateringsdiepte voor de middelste drainageintensiteit bij een infiltratie/wegzijging van respectievelijk 0,5 en 1,0 mm.d⁻¹

Uit Fig. 52 blijkt tevens dat infiltratie bij een ontwateringsdiepte van 60 cm leidt tot schade door wateroverlast. De optimum ontwateringsdiepte van 130-150 cm en de vorm van de opbrengst-ontwateringsdieptecurve zoals gevonden in Figuur 50, blijkt bij deze grond, door infiltratie of kwel nauwelijks te veranderen.

De gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) reageert duidelijk op infiltratie/wegzijging: de curven lopen met toenemende ontwateringsdiepte nagenoeg parallel. Per 0,5 mm.d⁻¹ verschil in infiltratie/wegzijging treedt bij deze matig lichte zavel een verschil in GHG op van ca. 20 cm.

8. EFFECTEN VAN ONTWATERING OP DE OPBRENGST VAN AARDAPPELEN EN ZOMERGRANEN OP 8 BODEMPROFIELEN

8.1. INLEIDING

Effecten van ontwatering op de gewasopbrengst, zoals toegelicht in Hoofdstuk 7 voor aardappelen op matig lichte zavel, kunnen op dezelfde wijze worden uitgewerkt voor aardappelen en zomergranen voor alle grondsoorten. Echter we beperken ons hier tot de volgende hoofdlijnen:

- effecten van ontwatering in het voorjaar;
- effecten van ontwatering in het groeiseizoen;
- effecten van verschil in bodemtype;
- effecten van stikstofleverantie door de bodem als reactie op ontwatering;
- geïntegreerd effect van ontwatering op opbrengst voor acht bodemprofielen.

8.2. AARDAPPELEN

8.2.1. Effecten van ontwatering in het voorjaar op de opbrengst

Op basis van 30-jarige simulatie van zaai/poottijdstip en kiemingsduur zijn voor alle 8 bodemprofielen bij 5 ontwateringsdiepten en 3 drainage-intensiteiten de opkomstdata van aardappelen en zomergranen berekend. De curven in Figuur 53 geven 30-jarige gemiddelden van de per jaar en per ontwateringsobject berekende vroegst mogelijke opkomstdatum. Het blijkt dat de 8 bodemprofielen, wat betreft effect van ontwatering op opkomstdatum, kunnen worden verdeeld in drie groepen: lichte gronden, zware zavel- en kleigronden. Wat de laatste groep betreft kunnen nog twee niveaus worden onderscheiden. De vroegheid van de opkomst van aardappelen en zomergranen wordt bij toenemende zwaarte van de grond in afnemende mate beïnvloed door de ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit. Verschillen in opkomstdatum van 2 à 3 weken tussen ondiep en diep ontwaterde objecten op lichtere gronden vallen terug tot verschillen van slechts enkele dagen bij kleigronden. Deze via modelberekeningen verkregen verschillen in reactie op ontwatering zijn ook bekend uit onderzoek op grondwaterstandsproefvelden.

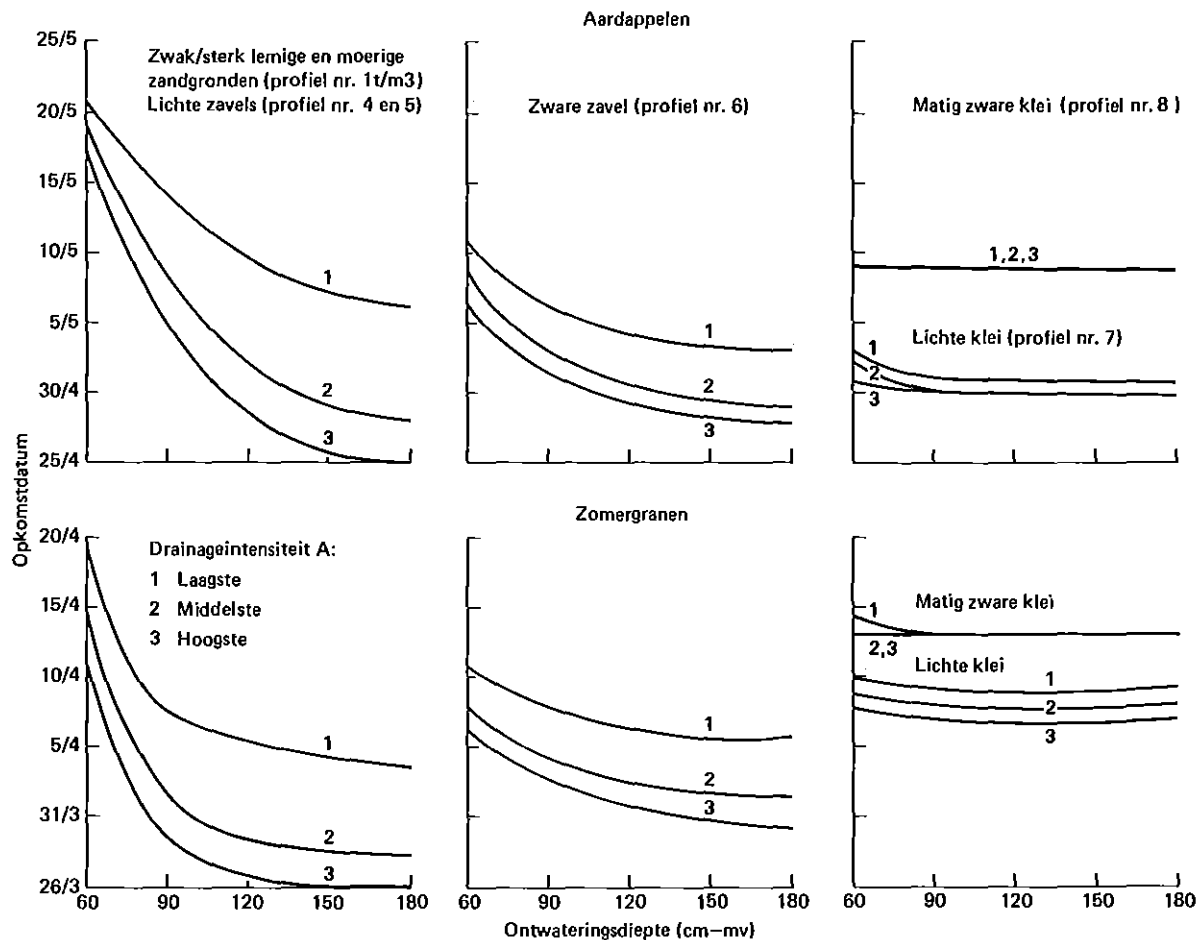


Fig. 53. Effect van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit op de opkomstdatum van aardappelen en zomergranen voor alle 8 onderzochte bodemprofielen, gebaseerd op modelsimulaties over de periode 1952 tot en met 1981. De curven geven 30-jarige gemiddelden van de per jaar en per ontwateringsobject berekende vroegst mogelijke opkomstdatum

VAN HOORN (1958) vond op matig zware klei geen verschillen in kieming/opkomst en eerste groei bij verschillen in ontwatering tussen 40 en 150 cm-mv. VAN DER VALK en SCHONEVELD (1963) en FEDDES (1971) vonden, dat op kleigronden de vroegheid van zaaien en planten werd begrensd door de late bewerkbaarheid van deze gronden. Bewerkbaarheid/opkomst werden door de grondwaterstandsdiepten in het traject van 30-150 cm-mv niet beïnvloedt maar waren volledig afhankelijk van de optredende weersomstandigheden. Het verschil in gedrag tussen lichte en zware gronden kan worden toegeschreven aan het verschil in onverzadigde doorlatendheid, die binnen het in het voorjaar belangrijke traject van -50 tot -200 cm drukhoogte voor zware

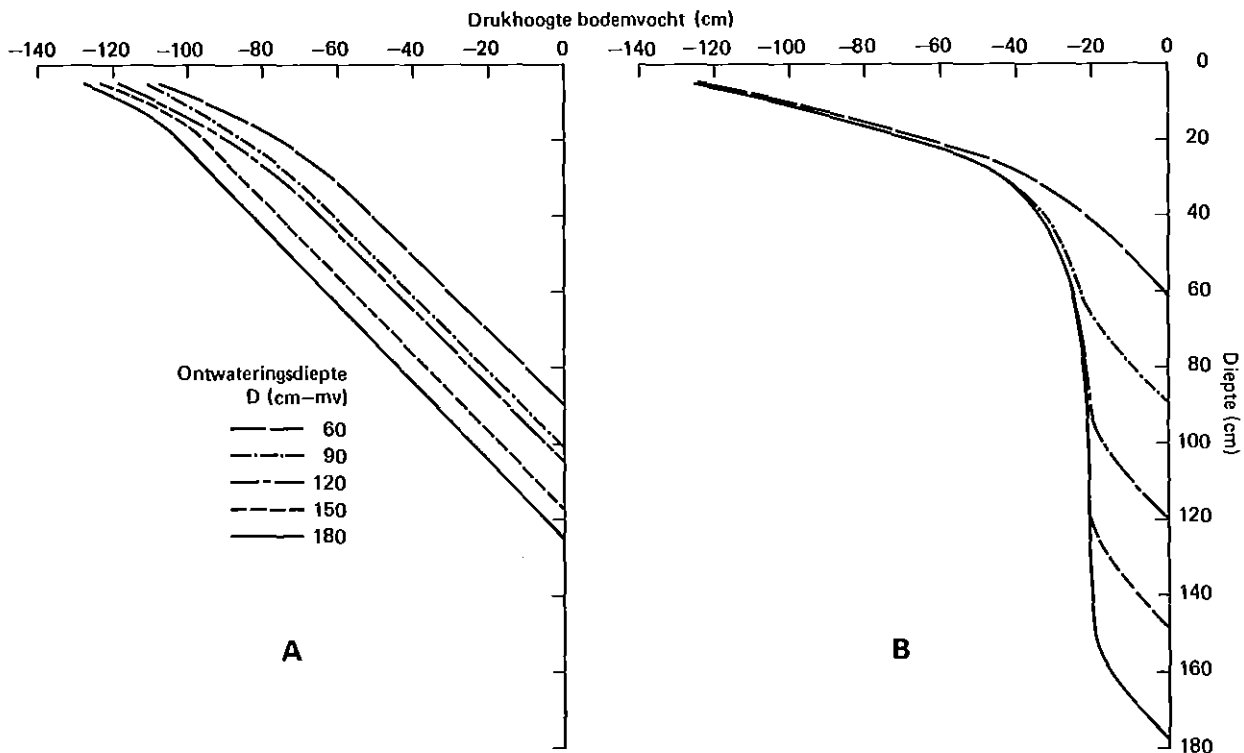


Fig. 54. Vochtverdeling ten tijde van de opkomstdatum van zomergranen op een matig lichte zavel (A) en op een matig zware klei (B)

gronden aanzienlijk lager is dan voor lichte gronden. Hoe lager het capillair geleidingsvermogen des te minder de capillaire aanvoer vanaf het grondwater naar maaiveld. Met andere woorden: de verdamping uit de bovengrond kan niet worden bijgehouden door de aanvoer van onderen, waardoor de vochtomstandigheden in de bovengrond veel minder direct reageren op verschillen in diepte van de grondwaterstand. Dit doet zich sterker voor naarmate de grond zwaarder is. Een en ander kan worden geïllustreerd aan de vochtverdeling met de diepte ten tijde van de opkomstdatum van zomergranen (Fig. 54).

Bij de beter doorlatende matig lichte zavel, profiel nr 5, vertoont deze vochtverdeling een duidelijk verband met de grondwaterstand, terwijl voor de matig zware klei (Fig. 54B) dit niet het geval is. In het laatste geval vindt men in het voorjaar een relatief sterk uitgedroogde dunne bovenlaag boven een relatief natte ondergrond. Op lichtere gronden wordt een meer geleidelijke uitdroging met de diepte waargenomen. Dit verschijnsel verklaart dus waarom zand-, zavel- en lichte kleigronden aanzienlijk sterker op ontwateringsmiddelen reageren wat betreft bewerkbaarheid en tijdigheid dan zwaardere gronden. Door hun betere doorlatendheid zijn de lichte gron-

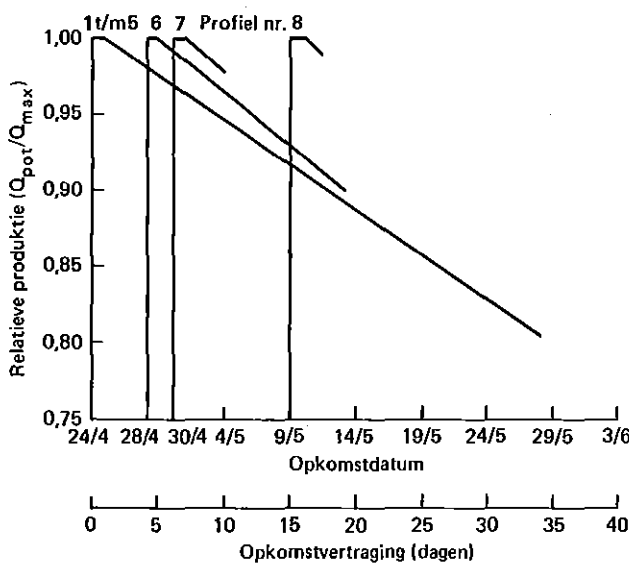


Fig. 55. Verband tussen relatieve produktie en opkomstdatum/opkomstvertraging als 30-jarig gemiddelde voor aardappelen op 8 bodemprofielen, voor 5 ontwateringsdiepten en 3 drainage-intensiteiten

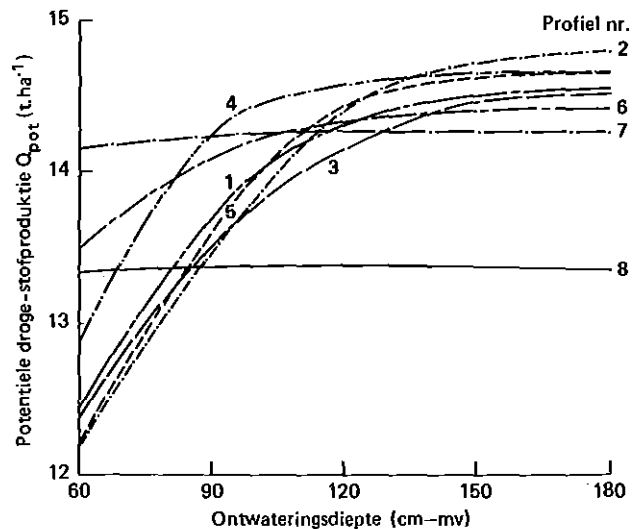
den bij hoge grondwaterstanden opdrachtig. Verschillen in grondwaterstanden werken daardoor sterker door op de vochtomstandigheden in de bouwvoor.

Op basis van Figuur 53 zou de verkeerde conclusie getrokken kunnen worden dat op zwaardere kleigronden met een ondiepe ontwatering zou kunnen worden volstaan. Echter dan wordt vergeten dat de effecten van diepere ontwatering zich op deze gronden vooral manifesteren tijdens het groeiseizoen via een ruimere leverantie van stikstof (zie Paragraaf 6.3. en Figuur 39).

Het effect van verschillen in vroegheid (zie Figuur 53) kan per bodemtype worden gekwantificeerd door met het watergebruiks-/produktiemodel SWATRE/CROPR over 30 jaar, voor elk jaar, vanaf de berekende werkelijke opkomstdatum, de gewasproduktie in het groeiseizoen bij optimale watervoorziening (Q_{pot}), uit te rekenen. Als referentie wordt de produktie bij optimale watervoorziening vanaf de vroegst mogelijke opkomstdatum (Q_{max}) gebruikt. Zoals weergegeven in Paragraaf 6.1. en toegelicht in Figuur 35 is Q_{max} de opbrengst op object 180 cm -mv bij de hoogste drainage-intensiteit.

In Figuur 55 staat voor aardappelen de relatieve produktie als gevolg van verschillen in vroegheid in het voorjaar, Q_{pot}/Q_{max} , uitgezet tegen de tijd c.q. de opkomstvertraging voor alle bodemprofielen. Omdat de verschillen in opkomstdatum voor de profielnrs 1 tot en met 5 gering zijn, zijn deze samengenomen in de curve aangeduid met profielnr 1. Van de profielnrs 1 tot en met 5 varieert de vroegste opkomstdatum, gemiddeld over 30 jaar genomen, van 24 tot 27 april (voor de 30 afzonderlijke jaren varieert deze tussen 8 april en 14 mei). Voor zware zavel (profielnr. 6) valt de vroegste opkomstdatum gemiddeld op 28 april (variatie tussen 11 april en 14 mei); voor lichte klei (nr. 7) op 30 april (variatie tussen 11 april en 16 mei) en voor matig zware klei (nr. 8) op 9 mei (variatie tussen 12 april en

Fig. 56. Potentiële opbrengst van aardappelen als gevolg van verschillen in ontwatering voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit



1 juni). Dus het verschil in 30-jarig gemiddelde vroegste opkomstdatum tussen zand-/lichte zavelgronden en zware klei bedraagt circa 15 dagen. De opbrengstreductie als gevolg van te laat poten c.q. opkomstvertraging kan worden afgeleid uit de helling van de curve en bedraagt circa 0,7% per dag (zie ook Fig. 47B). Het traject waarover de 30-jarig gemiddelde opkomstdata in afhankelijkheid van de ontwatering is gespreid, is groot voor de lichte gronden en zeer klein voor de zware gronden (zie Fig. 55 en Fig. 53).

De invloed van verschillen in opkomstdatum tengevolge van verschillen in ontwatering op de opbrengst kunnen worden gekwantificeerd door de vanaf die opkomstdata berekende potentiële produkties te vergelijken (zie Paragraaf 6.1.). Dit wordt gedaan in Figuur 56, waar per bodemtype de potentiële droge stofopbrengst is uitgezet tegen de ontwateringsdiepte. De potentiële droge stofopbrengst wordt in feite bepaald door de lengte van het groeiseizoen (zie ook Fig. 35). Deze wordt het sterkst beïnvloed door de ontwatering bij de lichtere gronden (zie ook Fig. 53). De zwaardere gronden (profielnrs. 7 en 8) reageren nagenoeg niet op ontwatering wat betreft opkomstdatum en vertonen dus ook geen verschillen in produktie. Door het altijd later zijn in het voorjaar van de zwaardere gronden liggen de potentiële produkties op een lager niveau.

In Figuur 57 is de relatieve produktie als gevolg van het voorjaarseffect, Q_{pot}/Q_{max} , voor aardappelen uitgezet als functie van de ontwateringsdiepte voor de hoogste drainage-intensiteit. In Figuur 57 is per bodemtype de bij elke ontwateringsdiepte verkregen potentiële opbrengst gerelateerd aan de hoogst haalbare opbrengst, i.e. bij 180 cm ontwateringsdiepte (zie

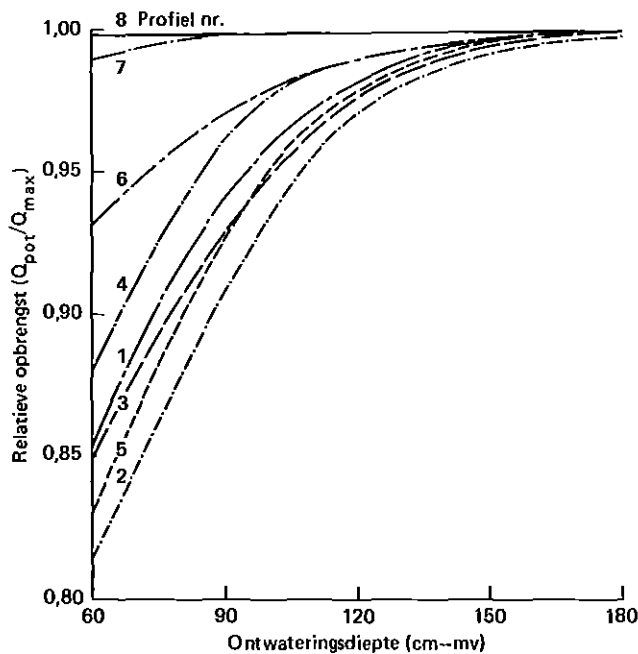


Fig. 57. Reductie in relatieve opbrengst van aardappelen als gevolg van 'te laat' in het voorjaar in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepte voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit

Fig. 56). Bij deze ontwateringsdiepte is, per bodemtype, $Q_{pot} = Q_{max}$. (Let op: Q_{max} verschilt uiteraard voor de diverse bodemtypen!). De grootste schade door te laat zijn in het voorjaar wordt gevonden bij ontwateringsdiepten van 60 en 90 cm-mv op de zand- en zavelgronden (profielnrs. 1 t.m. 5). Deze effecten zijn minder aanwezig op de zware zavel (nr. 6) en nageenog niet bij de lichte klei (nr. 7) en matig zware klei (nr. 8).

Om schade door 'te laat' in het voorjaar te beperken, moet bij deze hoogste drainage-intensiteit de ontwateringsdiepte in de orde van 150 tot 180 cm-mv zijn. Men dient bij Figuur 56 echter wel te bedenken dat de profielnrs. 1 tot en met 8 niet alleen op basis van het voorjaarseffect mogen worden vergeleken. Andere effecten zoals door verschillen in vocht- en stikstofvoorziening tijdens het groeiseizoen tussen de acht bodemtypen, moeten hier nog aan worden toegevoegd.

Tabel 14 geeft een overzicht van 30-jarig gemiddelden van relatieve opbrengsten van aardappelen als gevolg van effecten van ontwatering in het voorjaar (Q_{pot}/Q_{max}), groeiseizoen (Q_{act}/Q_{pot}) en het gecombineerde effect (Q_{act}/Q_{max}) van de acht onderzochte bodemprofielen bij vijftien combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit.

Tabel 14. Overzicht van 30-jarig gemiddelden van relatieve opbrengsten van aardappelen ten gevolge van effecten van ontwatering in het voorjaar (Q_{pot}/Q_{max}), in het groeiseizoen (Q_{act}/Q_{pot}) en het en het gecombineerde effect (Q_{act}/Q_{max}) bij vijf ontwateringsdiepten en drie drainageintensiteitsiteiten (l = laag; m = midden; h = hoog)

Nr	Profiel	Drainage- intensiteit	60 cm			90 cm			120 cm			150 cm			180 cm		
			$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{max}}$
1	Zwak lemig zeer fijn zand	l	0,84	0,90	0,76	0,88	0,89	0,78	0,90	0,86	0,77	0,94	0,82	0,77	0,93	0,81	0,75
		m	0,84	0,90	0,76	0,90	0,88	0,79	0,96	0,83	0,80	0,99	0,80	0,79	0,98	0,78	0,76
		h	0,85	0,90	0,76	0,94	0,86	0,81	0,98	0,82	0,80	1,00	0,78	0,78	1,00	0,77	0,77
2	Sterk lemig zeer fijn zand	l	0,80	0,95	0,76	0,86	0,96	0,83	0,88	0,95	0,84	0,90	0,94	0,85	0,90	0,93	0,84
		m	0,81	0,97	0,79	0,87	0,96	0,84	0,93	0,94	0,87	0,96	0,91	0,87	0,97	0,89	0,86
		h	0,82	0,97	0,80	0,90	0,95	0,85	0,97	0,93	0,90	0,99	0,90	0,89	1,00	0,87	0,87
3	Veenkoloniale grond	l	0,83	0,89	0,74	0,86	0,84	0,72	0,86	0,80	0,69	0,85	0,80	0,68	0,85	0,79	0,67
		m	0,84	0,88	0,74	0,90	0,77	0,69	0,92	0,69	0,63	0,93	0,65	0,60	0,92	0,66	0,61
		h	0,85	0,87	0,74	0,93	0,74	0,69	0,97	0,58	0,56	1,00	0,49	0,49	1,00	0,44	0,44
4	Zeer lichte zavel	l	0,86	0,93	0,80	0,92	0,91	0,84	0,93	0,90	0,84	0,94	0,89	0,84	0,92	0,88	0,81
		m	0,87	0,93	0,81	0,95	0,91	0,86	0,98	0,89	0,87	0,98	0,87	0,85	0,99	0,85	0,84
		h	0,88	0,93	0,82	0,97	0,90	0,87	0,99	0,89	0,88	1,00	0,86	0,86	1,00	0,84	0,84
5	Matig lichte zavel	l	0,81	0,96	0,78	0,86	0,96	0,83	0,89	0,96	0,85	0,92	0,95	0,87	0,90	0,95	0,85
		m	0,82	0,97	0,80	0,88	0,96	0,84	0,96	0,95	0,91	0,97	0,94	0,91	0,98	0,92	0,90
		h	0,83	0,97	0,81	0,92	0,96	0,88	0,98	0,95	0,93	1,00	0,93	0,93	1,00	0,90	0,90
6	Zware zavel	l	0,91	0,92	0,84	0,95	0,92	0,87	0,95	0,91	0,86	0,97	0,90	0,87	0,95	0,89	0,85
		m	0,93	0,93	0,86	0,96	0,92	0,88	0,98	0,90	0,88	0,99	0,88	0,87	0,99	0,86	0,85
		h	0,93	0,93	0,86	0,97	0,92	0,89	0,99	0,90	0,89	1,00	0,87	0,87	1,00	0,84	0,84
7	Lichte klei	l	0,98	0,77	0,75	0,99	0,83	0,82	0,99	0,83	0,82	0,99	0,82	0,81	0,99	0,82	0,81
		m	0,99	0,81	0,80	1,00	0,84	0,84	1,00	0,83	0,83	1,00	0,81	0,81	1,00	0,80	0,80
		h	1,00	0,82	0,82	1,00	0,84	0,84	1,00	0,83	0,83	1,00	0,81	0,81	1,00	0,79	0,79
8	Matig zware klei	l	1,00	0,81	0,81	1,00	0,83	0,83	1,00	0,83	0,83	1,00	0,82	0,82	1,00	0,82	0,82
		m	1,00	0,82	0,82	1,00	0,84	0,84	1,00	0,83	0,83	1,00	0,82	0,82	1,00	0,82	0,82
		h	1,00	0,84	0,84	1,00	0,84	0,84	1,00	0,83	0,83	1,00	0,82	0,82	1,00	0,82	0,82

8.2.2. Effecten van ontwatering in het groeiseizoen op de opbrengst

In Figuur 58 is voor de acht bodemprofielen de actuele droge stof-opbrengst van aardappelen uitgezet tegen de ontwateringsdiepte. Het blijkt dat de veenkoloniale grond (profielnr. 3) met de ondiepe beworteling (zie Tabel 7) het sterkst heeft te leiden van vochttekorten als gevolg van een grotere ontwateringsdiepte. De lichtere gronden (nrs. 1, 2, 4 en 5) geven een duidelijk optimum in de opbrengst-ontwateringscurve te zien. Links van het optimum worden lagere opbrengsten gevonden als gevolg van een korter groeiseizoen door latere opkomst in het voorjaar, en rechts als gevolg van vochttekorten tijdens het groeiseizoen. Dit optimum is zwakker naarmate de grond zwaarder wordt: dit wil zeggen nagenoeg geen verschillen in start van het groeiseizoen bij de verschillende ontwateringsdiepten. Dit geldt dus binnen één bodemtype. De niveauverschillen tussen de bodemtypen onderling kunnen enerzijds verklaard worden door verschillen in lengte van het groeiseizoen als gevolg van verschillen in vroegheid (zie Fig. 53), anderzijds door vochtlevering tijdens het groeiseizoen.

Zoals in Paragraaf 6.5. en Figuur 35 is toegelicht, wordt voor berekening van het groeiseizoeneffect uitgegaan van de voor elk jaar en ontwaterings-

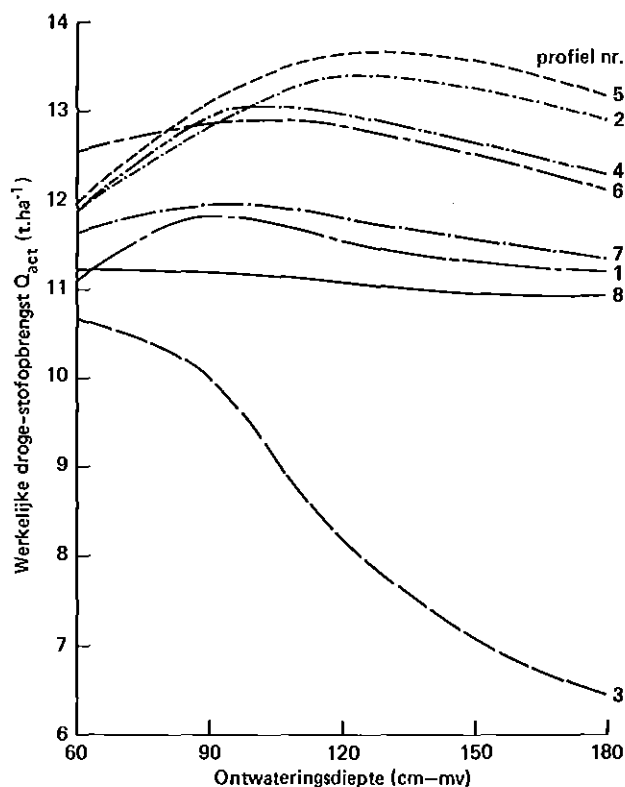
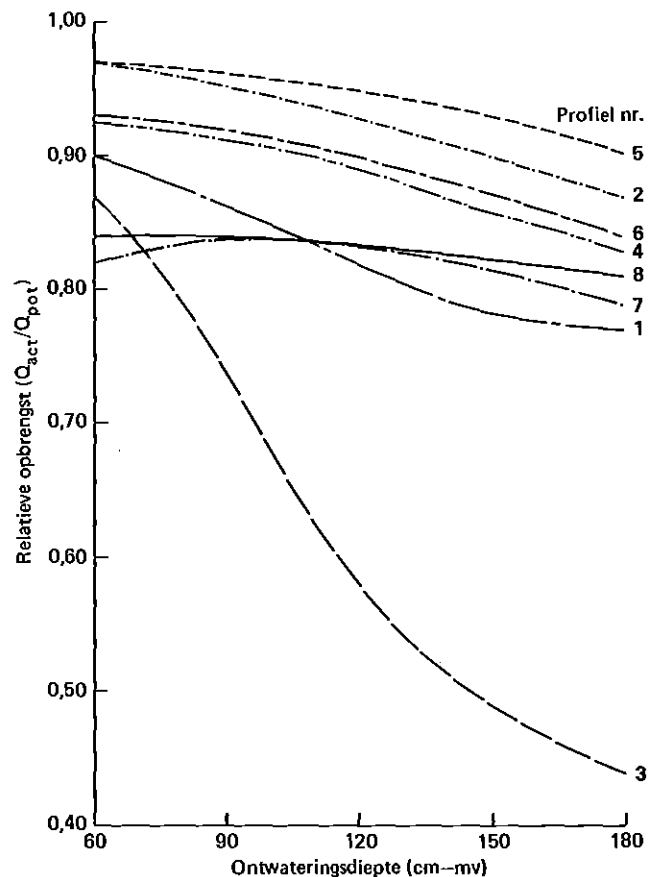


Fig. 58. Actuele opbrengst van aardappelen als gevolg van verschillen in ontwatering voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit

Fig. 59. Opbrengstreductie van aardappelen als gevolg van vochttekorten in het groeiseizoen in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepte voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit



situatie werkelijke opkomstdatum. De gewasproductie wordt berekend onder optimale vochtomstandigheden, Q_{pot} , en de werkelijk optredende vochtvoorziening, Q_{act} . De aldus verkregen verschillen in opbrengst zijn zo vrij van de invloed van vroegheid en kunnen volledig aan verschillen in vochtvoorziening worden toegeschreven.

In Figuur 59 zijn per bodemtype de actuele opbrengsten, Q_{act} , uit Figuur 58 gerelateerd aan de per ontwateringsdiepte geldende potentiële opbrengsten, Q_{pot} , uit Figuur 56. De aldus verkregen relatieve opbrengsten, Q_{act}/Q_{pot} , zijn voor de acht bodemprofielen in Figuur 59 uitgezet tegen de ontwateringsdiepte. De gevolgde procedure van het relateren van Q_{act} aan Q_{pot} , (per profiel en ontwateringssituatie steeds berekend vanaf dezelfde opkomstdatum) geeft het zuivere groeiseizoeneffect ten gevolge van vochttekorten, en is dus vrij van effecten ten gevolge van verschillen in vroegheid in het voorjaar. Het algemene beeld van Figuur 59 is een toenemende opbrengstreductie met toenemende ontwateringsdiepte.

In Figuur 59 is te zien dat de grootste schade door vochttekort als gevolg van te diep ontwateren, optreedt bij de (onverbeterde) veenkoloniale grond (profielnr. 3): een veenkoloniaal dek op 20 cm veen op een zandonder-

grond. Ook redelijk droogtegevoelig is de veldpodzol (nr. 1): 40 cm humeus zwak lemig zeer fijn zand op leemarm zand. De zwaardere gronden (profiel-nrs. 7 en 8) reageren slechts zwak op toenemende ontwateringsdiepten. Lemig zand (nr. 2), lichte (nr. 4) en matig lichte (nr. 5) en zware (nr. 6) zavel reageren op vergelijkbare wijze. De verklaring voor de verschillen in niveaus van produktie volgen uit Figuur 56 en Figuur 58.

8.2.3. Effecten van verschil in bodemtype op de opbrengst

In Paragraaf 6.2. en in Figuur 36 is uiteengezet hoe verschillen in potentieel produktieniveau tussen bodemtypen onderling kunnen worden gekwantificeerd. Dit betreft verschillen in vroegheid die los staan van ontwateringsinvloeden op vroegheid binnen één bodemtype, zoals die reeds in Paragraaf 8.2.1 zijn besproken.

De procedure is nu als volgt. De vroegste opkomstdatum op het ontwateringsobject 180 cm -mv met de hoogste drainage-intensiteit levert per bodemtype bij optimale vochtvoorziening de maximaal mogelijke opbrengst, $Q_{\max}$. In Tabel 15 zijn deze weergegeven. Deze $Q_{\max}$ -waarden zijn vervolgens

Tabel 15. Maximaal mogelijke opbrengst van aardappelen, $Q_{\max}$ i.e. de opbrengst bij het diepste ontwateringsobject, de hoogste drainage-intensiteit en optimale vochtvoorziening voor de 8 onderzochte bodemtypen. Het bodemtype effect wordt verkregen door $Q_{\max}$ te relateren aan de hoogst voorkomende waarde, i.e. $Q_{\max}$ op profiel-nr. 2

Profiel nr	Bodemtype	Maximaal mogelijke opbrengst $Q_{\max}$ (kg ds.ha ⁻¹)	Bodemtype effect $\frac{Q_{\max}}{Q_{\max, \text{prof. 2}}}$
1	Zwak lemig zeer fijn zand	14 573	0,98
2	Sterk lemig zeer fijn zand	14 861	1,00
3	Veenkoloniale grond	14 528	0,98
4	Zeer lichte zavel	14 675	0,99
5	Matig lichte zavel	14 757	0,99
6	Zware zavel	14 478	0,97
7	Lichte klei	14 255	0,96
8	Matig zware klei	13 382	0,90

gerelateerd aan de hoogst voorkomende $Q_{\max}$, i.e. aan die van profielnr. 2, sterk lemig zeer fijn zand. De lichte gronden, profielnrs. 1 tot en met 5, vertonen relatief weinig verschillen in vroegheid. Naarmate de gronden zwaarder worden, zijn ze in het voorjaar later en blijft de maximaal haalbare produktie achter bij die van de lichtere gronden. Dit loopt voor de matig zware klei op tot circa 10%.

8.2.4. Effecten van ontwatering ten gevolge van extra stikstof leverantie door de bodem op de opbrengst

Om het effect van extra stikstofleverantie door de bodem, tengevolge van een diepere ontwatering in rekening te brengen, is de procedure zoals beschreven in Paragraaf 6.3. gevolgd. Hierbij kan via de gemiddelde grondwaterstand tijdens het groeiseizoen de opbrengstreductie worden bepaald als gevolg van verminderde stikstofleverantie bij hogere grondwaterstanden (zie Figuur 39).

Uit de modelsimulaties volgt voor ieder ontwateringsobject per dag een grondwaterstand. Deze wordt gemiddeld over het groeiseizoen en gesubstitueerd in vergelijking (60). Dit levert voor elk object de opbrengst-reductiefactor ν als gevolg van N-tekort bij grondwaterstanden hoger dan 180 cm-mv. In Tabel 16 zijn deze opbrengst-reductiefactoren, ν , gegeven voor de acht bodemprofielen bij de verschillende ontwateringsobjecten. Het blijkt dat tussen de ontwateringsdiepten 60 en 180 cm-mv niet te verwaarlozen verschillen in opbrengst ten gevolge van N-leverantie voorkomen. Door toevoeging van het N-effect aan de resultaten, gegeven in Tabel 14, wordt $Q_{\text{act}}/Q_{\max}$ gereduceerd, en wel sterker naarmate de ontwatering slechter is. Dit heeft vooral gevolgen voor de opbrengst-ontwateringsdiepterelaties van de zwaardere gronden, die zonder dit effect een nagenoeg vlak verloop vertonen.

8.2.5. Totaal effect van ontwatering op de gewasopbrengst

In Tabel 17 is een samenvattend overzicht gegeven van het totaal effect van ontwatering op gewasopbrengst voor aardappelen op acht bodemprofielen, elk met 15 combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit. Het totaal effect gegeven in de laatste kolom van Tabel 17 is verkregen door vermenigvuldiging van voorjaarseffect ($Q_{\text{pot}}/Q_{\max}$) met groeiseizoenseffect

Tabel 16. Opbrengstreductiefactoren ν voor aardappelen als gevolg van verminderde stikstofleverantie bij grondwaterstanden hoger dan 180 cm-mv zoals berekend volgens vergelijking (60) voor acht bodemprofielen bij vijf ontwateringsdiepten (D) en drie drainageintensiteiten (l = laag; m = midden; h = hoog). Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaren (1952-1981)

Nr.	Profiel	Drainage- intensiteit	Opbrengstreductie factor (-)					
			D =	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
1	Zwak lemig zeer fijn zand	l		0,92	0,94	0,95	0,96	0,98
		m		0,93	0,94	0,95	0,97	0,98
		h		0,93	0,94	0,96	0,97	0,99
2	Sterk lemig zeer fijn zand	l		0,93	0,96	0,97	0,98	0,99
		m		0,94	0,97	0,98	0,99	1,00
		h		0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
3	Veenkoloniale grond	l		0,84	0,89	0,91	0,91	0,90
		m		0,84	0,91	0,94	0,96	0,95
		h		0,85	0,92	0,96	0,97	0,98
4	Zeer lichte zavel	l		0,96	0,97	0,98	0,98	0,99
		m		0,97	0,97	0,98	0,99	1,00
		h		0,97	0,98	0,99	0,99	1,00
5	Matig lichte zavel	l		0,95	0,97	0,98	0,98	0,99
		m		0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
		h		0,96	0,98	0,99	1,00	1,00
6	Zware zavel	l		0,94	0,96	0,97	0,98	0,98
		m		0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
		h		0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
7	Lichte klei	l		0,87	0,95	0,97	0,98	0,98
		m		0,90	0,96	0,98	0,99	1,00
		h		0,92	0,97	0,98	1,00	1,00
8	Matig zware klei	l		0,91	0,94	0,95	0,97	0,99
		m		0,92	0,94	0,96	0,97	0,99
		h		0,93	0,95	0,96	0,98	1,00

Tabel 17. Samenvattend overzicht van 30-jarig gemiddelden van de gemiddelde hoogste en de gemiddelde laagste grondwaterstand, de afzonderlijke effecten van 'te laat' in het voorjaar (voorjaars-effect), van vochttekorten in het groeiseizoen (groeiseizoenseffect), van verschillen in vroegheid tussen de bodemtypen onderling (bodemtype-effect), van extra stikstofleverantie door de bodem (stikstofleverantie-effect) en het totaal geïntegreerde effect voor vijf ontwateringsdiepten elk gecombineerd met drie drainage-intensiteiten voor acht bodemprofielen

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot} Q_{max}	Q_{act} Q_{pot}	Q_{max} $Q_{max, prof.2}$		Q_{act} $Q_{max, prof.2}$

Profiel nr. 1: 40 cm humeus zwak lemig zeer fijn zand op leemarm zand

AARDAPPELEN

60	0,00700	10	132	0,84	0,90	0,98	0,92	0,68
	0,01180	24	133	0,84	0,90	0,98	0,93	0,69
	0,03793	50	134	0,85	0,90	0,98	0,93	0,69
90	0,00344	15	136	0,88	0,89	0,98	0,94	0,71
	0,00549	34	137	0,90	0,88	0,98	0,94	0,72
	0,01354	65	139	0,94	0,86	0,98	0,94	0,74
120	0,00204	17	139	0,90	0,86	0,98	0,95	0,71
	0,00358	45	142	0,96	0,83	0,98	0,95	0,74
	0,00653	73	143	0,98	0,82	0,98	0,96	0,75
150	0,00153	23	148	0,94	0,82	0,98	0,96	0,72
	0,00246	52	151	0,99	0,80	0,98	0,97	0,75
	0,00420	83	153	1,00	0,78	0,98	0,97	0,74
180	0,00108	22	169	0,93	0,81	0,98	0,98	0,72
	0,00173	54	169	0,98	0,78	0,98	0,98	0,73
	0,00289	91	173	1,00	0,77	0,98	0,99	0,74

Profiel nr. 2: 50 cm humeus sterk lemig zeer fijn zand op leemarm zand

AARDAPPELEN

60	0,00718	14	160	0,80	0,95	1,00	0,93	0,71
	0,01235	25	163	0,81	0,97	1,00	0,94	0,74
	0,04411	48	166	0,82	0,97	1,00	0,95	0,76
90	0,00372	18	172	0,86	0,96	1,00	0,96	0,80
	0,00623	34	176	0,87	0,96	1,00	0,97	0,81
	0,01913	66	180	0,90	0,95	1,00	0,97	0,82
120	0,00222	19	180	0,88	0,95	1,00	0,97	0,81
	0,00416	45	188	0,93	0,94	1,00	0,98	0,85
	0,00881	76	192	0,97	0,93	1,00	0,98	0,88
150	0,00167	25	188	0,90	0,94	1,00	0,98	0,83
	0,00286	52	197	0,96	0,91	1,00	0,99	0,86
	0,00553	88	201	0,99	0,90	1,00	0,99	0,88
180	0,00117	24	193	0,90	0,93	1,00	0,99	0,83
	0,00199	57	204	0,97	0,89	1,00	1,00	0,86
	0,00370	98	211	1,00	0,87	1,00	1,00	0,87

Tabel 17 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseisoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot}	Q_{act}	Q_{max}		Q_{act}
				Q_{max}	Q_{pot}	$Q_{max, prof. 2}$		$Q_{max, prof. 2}$

Profiel nr. 3: 20 cm veenkoloniaal dek op 20 cm spalterveen op zand

AARDAPPELEN

60	0,00700	14	112	0,83	0,89	0,98	0,84	0,61
	0,01200	25	113	0,84	0,88	0,98	0,84	0,61
	0,03600	48	115	0,85	0,87	0,98	0,85	0,62
90	0,00300	18	123	0,86	0,84	0,98	0,89	0,63
	0,00540	34	128	0,90	0,77	0,98	0,91	0,62
	0,01600	66	132	0,93	0,74	0,98	0,92	0,63
120	0,00160	18	130	0,86	0,80	0,98	0,91	0,62
	0,00320	45	139	0,92	0,69	0,98	0,94	0,58
	0,00810	76	145	0,97	0,58	0,98	0,96	0,53
150	0,00100	25	135	0,85	0,80	0,98	0,91	0,61
	0,00190	52	149	0,93	0,65	0,98	0,96	0,57
	0,00450	88	158	1,00	0,49	0,98	0,97	0,47
180	0,00060	24	135	0,85	0,79	0,98	0,90	0,59
	0,00110	57	154	0,92	0,66	0,98	0,95	0,57
	0,00250	98	173	1,00	0,44	0,98	0,98	0,42

Profiel nr. 4: Kalkrijke zeer lichte zavel

AARDAPPELEN

60	0,00944	14	173	0,86	0,93	0,99	0,96	0,76
	0,02102	29	176	0,87	0,93	0,99	0,97	0,78
	0,05435	44	177	0,88	0,93	0,99	0,97	0,79
90	0,00507	20	180	0,92	0,91	0,99	0,97	0,81
	0,00904	39	184	0,95	0,91	0,99	0,97	0,82
	0,02516	67	186	0,97	0,90	0,99	0,98	0,84
120	0,00284	21	184	0,93	0,90	0,99	0,98	0,81
	0,00546	50	188	0,98	0,89	0,99	0,98	0,84
	0,01101	79	190	0,99	0,89	0,99	0,99	0,86
150	0,00206	25	187	0,94	0,89	0,99	0,98	0,81
	0,00362	59	192	0,98	0,87	0,99	0,99	0,83
	0,00704	94	193	1,00	0,86	0,99	0,99	0,84
180	0,00123	18	190	0,92	0,88	0,99	0,99	0,79
	0,00251	64	197	0,99	0,85	0,99	1,00	0,83
	0,00469	105	200	1,00	0,84	0,99	1,00	0,83

Tabel 17 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot} Q_{max}	Q_{act} Q_{pot}	Q_{max} $Q_{max, prof. 2}$		Q_{act} $Q_{max, prof. 2}$

Profiel nr. 5: 60 cm kalkrijke matig lichte zavel op kalkrijke zeer lichte zavel

AARDAPPELEN

60	0,00795	13	168	0,81	0,96	0,99	0,95	0,73
	0,01574	26	170	0,82	0,97	0,99	0,95	0,75
	0,03390	41	172	0,83	0,97	0,99	0,96	0,77
90	0,00428	17	177	0,86	0,96	0,99	0,97	0,80
	0,00734	34	180	0,88	0,96	0,99	0,97	0,81
	0,01818	61	184	0,92	0,96	0,99	0,98	0,85
120	0,00229	14	182	0,89	0,96	0,99	0,98	0,82
	0,00502	49	189	0,96	0,95	0,99	0,98	0,88
	0,01026	79	192	0,98	0,95	0,99	0,99	0,91
150	0,00174	22	189	0,92	0,95	0,99	0,98	0,84
	0,00326	57	195	0,97	0,94	0,99	0,99	0,89
	0,00633	94	199	1,00	0,93	0,99	1,00	0,92
180	0,00110	15	191	0,90	0,95	0,99	0,99	0,83
	0,00220	62	201	0,98	0,92	0,99	1,00	0,89
	0,00404	105	206	1,00	0,90	0,99	1,00	0,89

Profiel nr. 6: 40 cm kalkrijke zware zavel op zeer fijn kleiig zand

AARDAPPELEN

60	0,00765	15	160	0,91	0,92	0,97	0,94	0,76
	0,01461	29	162	0,93	0,93	0,97	0,95	0,79
	0,02905	42	164	0,93	0,93	0,97	0,95	0,79
90	0,00411	21	166	0,95	0,92	0,97	0,96	0,81
	0,00686	38	168	0,96	0,92	0,97	0,96	0,82
	0,01552	62	170	0,97	0,92	0,97	0,97	0,83
120	0,00222	17	170	0,95	0,91	0,97	0,97	0,81
	0,00496	54	174	0,98	0,90	0,97	0,97	0,82
	0,00898	78	175	0,99	0,90	0,97	0,98	0,84
150	0,00169	24	174	0,97	0,90	0,97	0,98	0,82
	0,00307	57	178	0,99	0,88	0,97	0,98	0,82
	0,00567	91	180	1,00	0,87	0,97	0,99	0,83
180	0,00108	19	178	0,95	0,89	0,97	0,98	0,80
	0,00209	60	185	0,99	0,86	0,97	0,99	0,81
	0,00369	100	188	1,00	0,84	0,97	1,00	0,81

Tabel 17 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot}	Q_{act}	Q_{max}		Q_{act}
				Q_{max}	Q_{pot}	$Q_{max, prof. 2}$		$Q_{max, prof. 2}$

Profiel nr. 7: 70 cm kalkrijke lichte klei op kalkrijke matig zware klei

AARDAPPELEN

60	0,00797	17	160	0,98	0,77	0,96	0,87	0,63
	0,01568	30	166	0,99	0,81	0,96	0,90	0,69
	0,03429	43	170	1,00	0,82	0,96	0,92	0,73
90	0,00420	21	182	0,99	0,83	0,96	0,95	0,75
	0,00711	38	185	1,00	0,84	0,96	0,96	0,78
	0,01683	62	188	1,00	0,84	0,96	0,97	0,79
120	0,00223	17	189	0,99	0,83	0,96	0,97	0,77
	0,00410	43	194	1,00	0,83	0,96	0,98	0,78
	0,00924	76	196	1,00	0,83	0,96	0,98	0,78
150	0,00169	22	197	0,99	0,82	0,96	0,98	0,76
	0,00309	54	203	1,00	0,81	0,96	0,99	0,77
	0,00571	88	205	1,00	0,81	0,96	1,00	0,78
180	0,00108	16	200	0,99	0,82	0,96	0,98	0,76
	0,00209	55	210	1,00	0,80	0,96	1,00	0,77
	0,00369	95	214	1,00	0,79	0,96	1,00	0,76

Profiel nr. 8: Kalkrijke matig zware klei

AARDAPPELEN

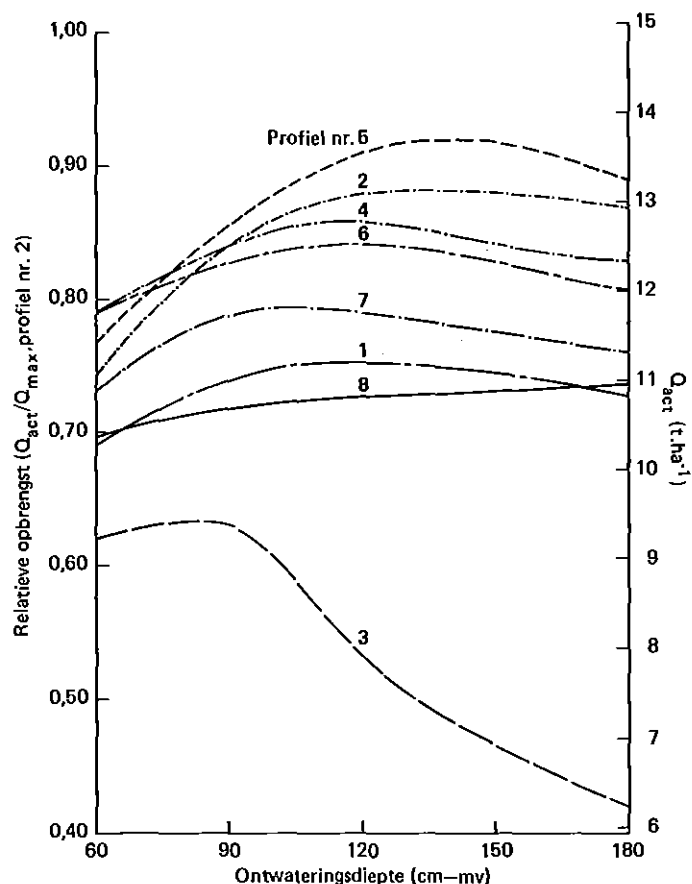
60	0,00946	12	141	1,00	0,81	0,90	0,91	0,66
	0,02112	28	143	1,00	0,82	0,90	0,92	0,68
	0,07130	47	145	1,00	0,84	0,90	0,93	0,70
90	0,00508	13	147	1,00	0,83	0,90	0,94	0,70
	0,01132	36	148	1,00	0,84	0,90	0,94	0,71
	0,02923	63	148	1,00	0,84	0,90	0,95	0,72
120	0,00348	16	150	1,00	0,83	0,90	0,95	0,71
	0,00695	43	151	1,00	0,83	0,90	0,96	0,72
	0,01741	80	150	1,00	0,83	0,90	0,96	0,72
150	0,00245	18	157	1,00	0,82	0,90	0,97	0,72
	0,00472	49	159	1,00	0,82	0,90	0,97	0,72
	0,01148	97	160	1,00	0,82	0,90	0,98	0,72
180	0,00174	17	177	1,00	0,82	0,90	0,99	0,73
	0,00336	52	181	1,00	0,82	0,90	0,99	0,73
	0,00925	123	184	1,00	0,82	0,90	1,00	0,74

(Q_{act}/Q_{pot}), met bodemtype effect ($Q_{max}/Q_{max,prof.2}$) en met stikstofleverantie-effect (ν). In feite worden dus de gegevens uit Tabel 14 vermenigvuldigd met die van de Tabellen 15 en 16. Om de gegevens uit tabel 17 meer inzichtelijk te maken is per bodemtype en wel bij de hoogste drainage-intensiteit in Figuur 60 de opbrengst-ontwateringsdieptecurve gegeven. Enige belangrijke concluderende opmerkingen die ten aanzien van Tabel 17 en Figuur 60 kunnen worden gemaakt, zijn:

- De optimale ontwateringsdiepte varieert van ± 90 cm bij profiel nr 3 niet-verbeterde veenkoloniale grond tot ca. 130-140 cm bij profiel nr 5, een matig lichte zavel.
- Het effect van 'te nat' is het sterkst op de profielen nr 2 en 5, een sterk lemig zeer fijn zand en een opdrachtige matig lichte zavel. Gaande van 60 naar 90 en 120 cm stijgt de relatieve opbrengst van respectievelijk 0,77 via 0,85 tot 0,91. Voor profiel nr 2 gaat het van 0,76 via 0,82 tot 0,88.
- Naarmate de gronden zwaarder worden, profielnrs 6, 7 en 8, is het effect van 'te nat' minder uitgesproken.

Fig. 60.

Totale opbrengstreductie ($Q_{act}/Q_{max,prof.2}$) van aardappelen als gevolg van het geïntegreerde effect van 'te laat' in het voorjaar, van vochttekorten in het groeiseizoen, van verschil in vroegheid tussen de bodemtypen onderling, en van extra stikstofleverantie door de bodem, in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepten bij hoogste drainage-intensiteit voor de 8 bodemprofielen. Tevens is aangegeven het absolute werkelijke productieniveau, Q_{act} . Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaren (1952-1981)



- Het effect van 'te droog' is het meest uitgesproken op de niet-verbeterde veenkoloniale grond, profielnr 3. Vanaf de ontwateringsdiepte van 90 cm neemt de relatieve opbrengst af van 0,63 tot 0,42 bij een ontwateringsdiepte van 180 m-mv.
- Bij de andere profielen is het effect van 'te droog' aanzienlijk geringer: 1 tot 3% over het traject 120 tot 180 m-mv.
- De matig zware klei, profielnr 8, laat bij toenemende ontwateringsdiepte een toenemende opbrengst zien. Dit gedrag is in Figuur 61 voor alle drie drainage-intensiteiten weergegeven. Het opbrengst verhogend effect van diepere ontwatering is het grootst voor de laagste drainage-intensiteit. De relatieve opbrengst neemt toe van 0,66 bij ontwateringsdiepte 60 cm tot 0,73 bij 180 m-mv. Zoals uit tabel 17 is af te leiden kan dit opbrengst verhogende effect bij diepere ontwatering nagenoeg geheel worden toegeschreven aan de toenemende stikstofleverantie van de bodem.
- In Tabel 18 is het effect van vergroting van de drainage-intensiteit op de relatieve opbrengst weergegeven (zie ook Tabel 5). De gegevens in Tabel 18 zijn afgeleid uit de laatste kolommen (= totaal effect) van Tabel 17. Gaande van de laagste naar de middelste drainage-intensiteit geeft voor de 8 profielen en 5 draaindiepten een opbrengstverhoging die varieert van ≤ 0 tot 6%. Het merendeel van de ontwateringsobjecten geeft een opbrengstverhoging van 1 tot 3%. Gaande van de middelste naar de hoogste drainage-intensiteit wordt nog eens een extra opbrengstverhoging verkregen die varieert van 0 tot 4%. Het merendeel van de ontwateringsobjecten geeft een opbrengstverhoging van 0 tot 2%.

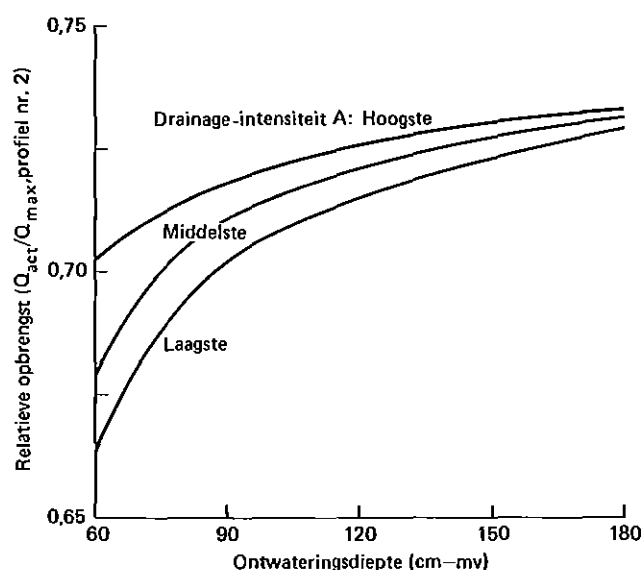


Fig. 61. Totale opbrengst-reductie van aardappelen $Q_{act}/Q_{max,2}$ op profielnr 8 als functie van de ontwateringsdiepte bij 3 drainage-intensiteiten

Tabel 18. Extra relatieve opbrengst (%) van aardappelen indien de drainage-intensiteit wordt vergroot van de laagste naar de middelste respectievelijk van de middelste naar de hoogste intensiteit. De vijf toegepaste ontwateringsdiepten zijn weergegeven met de volgende codes: 1 = 60, 2 = 90, 3 = 120, 4 = 150 en 5 = 180 cm-mv

Profiel nr	≤ 0	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	≥ 10%
Middelste-laagste intensiteit											
1		1,2,5		3,4							
2		2		1,4,5	3						
3	1,2,3,4,5										
4		2	1,4	3	5						
5		2	1			4	3,5				
6	4	2,3,5		1							
7		3,4,5		2			1				
8	4,5	2,3	1								
Hoogste-middelste intensiteit											
1	1,4	3,5	2								
2		2,5	1,4	3							
3	3,4,5	1,2									
4	5	1,4	2,3								
5	5		1	3,4	2						
6	1,5	2,4	3								
7	3,5	2,4			1						
8	3,4	2,5	1								

De huidige drainagepraktijk maakt gebruik van het stationaire drainage-criterium, dat voorschrijft dat bij een grondwaterstand van 50 cm-mv de afvoer 7 mm.d^{-1} dient te zijn. Zoals in Figuur 41 is weergegeven valt dit nagenoeg samen met de door ons toegepaste hoogste drainage-intensiteit. Uit Tabel 18 blijkt dat dit een fors criterium is. Halvering hiervan komt ongeveer overeen met de door ons gehanteerde middelste drainage-intensiteit, hetgeen een verlaging in opbrengst van ruwweg 2% geeft. Om te beoordelen of een minder zwaar criterium kan worden toegestaan dient een economische analyse te worden uitgevoerd, waarin ook het verschil in kosten van drainage aan bod komt.

8.3. ZOMERGRANEN

8.3.1. Effecten van ontwatering in het voorjaar op de opbrengst

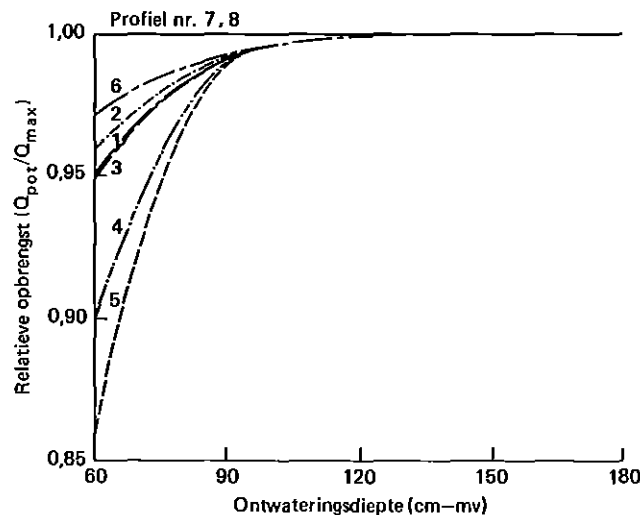


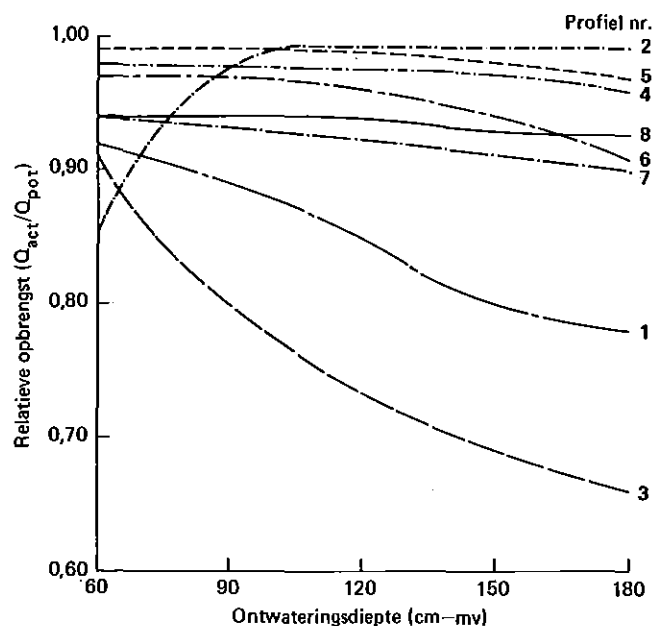
Fig. 62. Reductie in relatieve opbrengst van zomergranen als gevolg van 'te laat' in het voorjaar in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepte voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit

In Figuur 62 is de relatieve productie als gevolg van het voorjaarseffect, Q_{pot}/Q_{max} , voor zomergranen uitgezet als functie van de ontwateringsdiepte voor de hoogste drainage-intensiteit. De grootste schade door 'te laat' in het voorjaar wordt gevonden bij de profielnrs 5 en 4, de lichte zaveln. Bij de profielnrs 1, 2, 3 en 6 is de schade veel minder, terwijl bij 7 en 8 er schijnbaar geen schade optreedt. Voor beide gronden geldt dat het bewerkingstijdstip onafhankelijk is van de ontwateringsdiepte. Ze zijn echter in doorsnee wel later bewerkbaar dan de andere genoemde profielen (zie ook Fig. 53). Uit het oogpunt van vroeg bewerkbaar zijn in het voorjaar blijkt uit Figuur 62 dat de ontwateringsdiepte tenminste 100 à 110 cm moet bedragen. Bij aardappelen is dit 150 à 180 cm (Fig. 57). De verschillen tussen granen en aardappelen zoals die uit de Figuren 62 en 57 naar voren komen zijn terug te voeren tot verschillen in de drempelwaarden voor de drukhoogte van het bodemvocht nodig voor het zaaien en poten van deze gewassen (zie Tabel 6).

8.3.2. Effecten van ontwatering in het groeiseizoen op de opbrengst

In Figuur 63 zijn de relatieve opbrengsten, Q_{act}/Q_{pot} , als gevolg van vochttekorten in het groeiseizoen voor de 8 bodemprofielen uitgezet tegen de ontwateringsdiepte bij de hoogste drainage-intensiteit. Het algemene

Fig. 63. Opbrengstreductie van zomergranen als gevolg van vochttekorten in het groeiseizoen in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepte voor de 8 bodemprofielen. Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaar bij de hoogste drainage-intensiteit



beeld is dat de opbrengst afneemt bij grotere ontwateringsdiepte. De grootste schade door 'te droog' treedt op bij de onverbeterde veenkoloniale grond, profielnr 3. Ook nogal droogtegevoelig is profielnr 1, 40 cm humeus zwak lemig zeer fijn zand op leemarm zand. De overige gronden reageren slechts zwak op toenemende ontwateringsdiepte. Opvallend is het verloop van de relatieve opbrengstcurve van profielnr 2, sterk lemig zeer fijn zand. Bij ondiepe ontwatering wordt een grote opbrengstreductie gevonden als gevolg van wateroverlast/zuurstoftekort in de wortelzone in vooral de zeer natte jaren. De verschillen in niveau tussen de curven onderling is een gevolg van verschillen in mate van vochttekort tijdens het groeiseizoen. Vergelijken we zomergranen (Fig. 63) met aardappelen (Fig. 59) dan blijkt bij toenemende ontwateringsdiepte bij granen nogal wat minder droogteschade op te treden dan bij aardappelen. Dit is een gevolg van enerzijds de grotere bewortelingsdiepte van granen (zie Tabel 7), anderzijds van verschil in groeiseizoen dat voor granen vroeger afloopt dan voor aardappelen.

8.3.3. Effecten van verschil in bodemtype op de opbrengst

In tabel 19 zijn de maximaal mogelijke korrelopbrengsten, Q_{max} , voor de 8 bodemtypen weergegeven. Deze is afgeleid van het ontwateringsobject 180 cm-mv met de hoogste drainageintensiteit bij steeds optimale vochtvoorziening. Dit object heeft de vroegste opkomstdatum en dus het langste groeiseizoen. De verkregen Q_{max} -waarden zijn vervolgens gerelateerd aan de

Tabel 19. Maximaal mogelijke opbrengst van zomergranen, $Q_{\max}$, i.e. de opbrengst bij het diepste ontwateringsobject, de hoogste drainage-intensiteit en optimale vochtvoorziening voor de 8 onderzochte bodemtypen. Het bodemtype-effect wordt verkregen door $Q_{\max}$ te relateren aan de hoogst voorkomende waarde, i.e. $Q_{\max}$ op profiel nr 2

Profiel nr	Bodemtype	Maximaal mogelijke opbrengst $Q_{\max}$ (kg ds.ha ⁻¹)	Bodemtype effect $\frac{Q_{\max}}{Q_{\max, \text{prof. 2}}}$
1	Zwak lemig zeer fijn zand	6392	1,00
2	Sterk lemig zeer fijn zand	6412	1,00
3	Veenkoloniale grond	6397	1,00
4	Zeer lichte zavel	6392	1,00
5	Matig lichte zavel	6406	1,00
6	Zware zavel	6341	0,99
7	Lichte klei	6241	0,97
8	Matig zware klei	6141	0,96

hoogst voorkomende $Q_{\max}$, i.e. aan die van profiel nr 2. De profielnrs 1 tot en met 5, de lichtere gronden vertonen praktisch geen verschil in vroegheid. Naarmate gronden zwaarder zijn, zijn ze in het voorjaar later en blijft de maximaal haalbare opbrengst wat achter bij die van de lichtere gronden, max. 4%. Bij aardappelen zijn deze verschillen wat geprononceerder (zie Tabel 15).

8.3.4. Effecten van ontwatering ten gevolge van extra stikstofleverantie door de bodem op de opbrengst

In Tabel 20 zijn de opbrengstreductiefactoren, ν , zoals berekend met vergelijking (60) weergegeven voor de 8 bodemprofielen bij de verschillende ontwateringsobjecten. Het blijkt dat tussen de ontwateringsdiepten 60 en 180 m-mv niet te verwaarlozen verschillen in opbrengst tengevolge van verschillen in N-leverantie voorkomen. In vergelijking met aardappelen (Tabel 16) zijn de opbrengstreductiefactoren, ν , bij granen groter als gevolg van gemiddeld iets hogere grondwaterstanden tijdens het groeiseizoen.

Tabel 20. Opbrengstreductiefactoren ν voor zomergranen als gevolg van verminderde stikstofleverantie bij grondwaterstanden hoger dan 180 cm-mv zoals berekend volgens vergelijking (60) voor acht bodemprofielen bij vijf ontwateringsdiepten (D) en drie drainageintensiteiten (l = laag; m = midden; h = hoog). Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaren (1952-1981)

Nr.	Profiel	Drainage- intensiteit	Opbrengstreductie factor (-)					
			D =	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
1	Zwak lemig zeer fijn zand	l		0,89	0,91	0,93	0,95	0,95
		m		0,90	0,92	0,94	0,96	0,97
		h		0,90	0,93	0,95	0,97	0,98
2	Sterk lemig zeer fijn zand	l		0,80	0,92	0,95	0,97	0,97
		m		0,83	0,94	0,97	0,98	0,99
		h		0,87	0,96	0,98	0,99	1,00
3	Veenkoloniale grond	l		0,80	0,86	0,88	0,87	0,85
		m		0,82	0,89	0,93	0,94	0,93
		h		0,84	0,92	0,95	0,97	0,98
4	Zeer lichte zavel	l		0,94	0,96	0,97	0,98	0,98
		m		0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
		h		0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
5	Matig lichte zavel	l		0,93	0,95	0,96	0,97	0,98
		m		0,94	0,96	0,98	0,99	0,99
		h		0,94	0,97	0,98	0,99	1,00
6	Zware zavel	l		0,92	0,94	0,95	0,97	0,97
		m		0,93	0,95	0,97	0,98	0,98
		h		0,93	0,96	0,97	0,98	0,99
7	Lichte klei	l		0,89	0,95	0,96	0,97	0,97
		m		0,91	0,96	0,97	0,99	0,99
		h		0,93	0,96	0,98	0,99	1,00
8	Matig zware klei	l		0,93	0,95	0,96	0,97	0,99
		m		0,94	0,95	0,96	0,98	0,99
		h		0,94	0,95	0,97	0,98	1,00

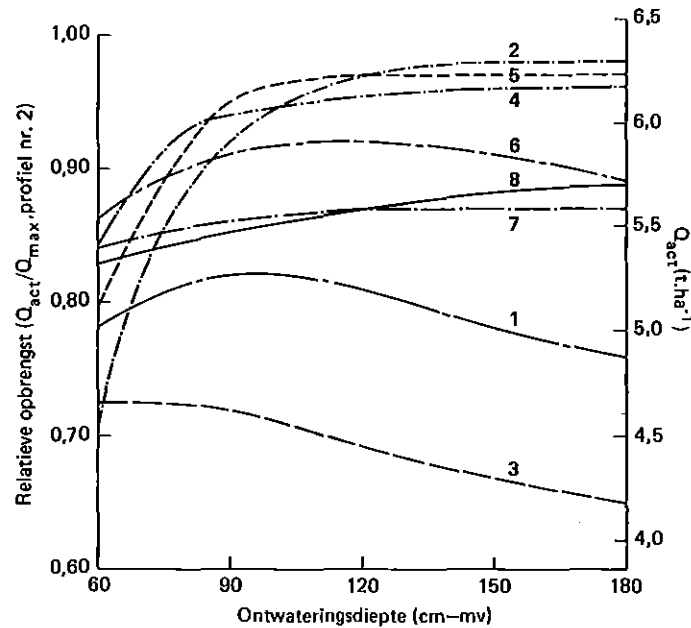


Fig. 64. Totale opbrengstreductie ($Q_{act}/Q_{max, profiel nr. 2}$) van zomergranen als gevolg van het geïntegreerde effect van 'te laat' in het voorjaar, van vochttekorten in het groeiseizoen, van verschil in vroegheid tussen de bodemtypen onderling, en van extra stikstofleverantie door de bodem, in afhankelijkheid van de ontwateringsdiepten bij hoogste drainage-intensiteit voor de 8 bodemprofielen. Tevens is aangegeven het absolute werkelijke produktieniveau, Q_{act} . Resultaten zijn gebaseerd op simulaties over 30 jaren (1952-1981)

8.3.5. Totaal effect van de ontwatering op de gewasopbrengst

In Tabel 21 is een samenvattend overzicht gegeven van het totaal effect van ontwatering op gewasopbrengst voor zomergranen op acht bodemprofielen, elk met 15 combinaties van ontwateringsdiepte en drainage-intensiteit. Om de gegevens in Tabel 20 meer inzichtelijk te maken is per bodemtype, en wel bij de hoogste drainage-intensiteit in Figuur 64 de opbrengst-ontwateringsdieptecurve gegeven.

De volgende concluderende opmerkingen ten aanzien van Tabel 21 en Figuur 64 kunnen worden gemaakt.

- De optimale ontwateringsdiepte varieert van ca. 60 tot 90 cm bij profielnr 3, de niet verbeterde veenkoloniale grond tot ca. 120 tot 150 cm bij profielnr 2, sterk lemig zeer fijn zand.
- Het effect van 'te nat' is het sterkst op de profiel nrs 2 en 5, een sterk lemig zeer fijn zand en een opdrachtige matig lichte zavel. Bij profielnr 2 is dit te wijten aan zowel 'te laat' in het voorjaar als aan 'te nat' gedurende het groeiseizoen.

Tabel 21. Samenvattend overzicht van 30-jarig gemiddelden van de gemiddelde hoogste en de gemiddelde laagste grondwaterstand, de afzonderlijke effecten van 'te laat' in het voorjaar (voorjaars-effect), van vochttekorten in het groeiseizoen (groeiseizoenseffect), van verschillen in vroegheid tussen de bodemtypen onderling (bodemtype-effect), van extra stikstofleverantie door de bodem (stikstofleverantie-effect) en het totaal geïntegreerde effect voor vijf ontwateringsdiepten elk gecombineerd met drie drainage-intensiteiten voor acht bodemprofielen

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot} Q_{max}	Q_{act} Q_{pot}	Q_{max} $Q_{max, prof.2}$		Q_{act} $Q_{max, prof.2}$

Profiel nr. 1: 40 cm humeus zwak lemig zeer fijn zand op leemarm zand

ZOMERGRANEN

60	0,00700	10	130	0,91	0,94	1,00	0,89	0,77
	0,01180	24	132	0,94	0,93	1,00	0,90	0,78
	0,03793	50	133	0,95	0,92	1,00	0,90	0,78
90	0,00344	15	134	0,95	0,91	1,00	0,91	0,78
	0,00549	34	136	0,97	0,90	1,00	0,92	0,80
	0,01354	65	138	0,99	0,89	1,00	0,93	0,82
120	0,00204	17	138	0,96	0,89	1,00	0,93	0,79
	0,00358	45	141	0,99	0,87	1,00	0,94	0,81
	0,00653	73	142	1,00	0,85	1,00	0,95	0,81
150	0,00153	23	146	0,97	0,85	1,00	0,95	0,78
	0,00246	52	150	0,99	0,82	1,00	0,96	0,78
	0,00420	83	152	1,00	0,80	1,00	0,97	0,78
180	0,00108	22	155	0,96	0,84	1,00	0,95	0,77
	0,00173	54	164	0,99	0,80	1,00	0,97	0,77
	0,00289	91	171	1,00	0,78	1,00	0,98	0,76

Profiel nr. 2: 50 cm humeus sterk lemig zeer fijn zand op leemarm zand

ZOMERGRANEN

60	0,00718	14	121	0,89	0,75	1,00	0,80	0,54
	0,01235	25	130	0,93	0,80	1,00	0,83	0,61
	0,04411	48	141	0,96	0,85	1,00	0,87	0,71
90	0,00372	18	159	0,94	0,91	1,00	0,92	0,78
	0,00623	34	169	0,98	0,95	1,00	0,94	0,87
	0,01913	66	179	0,99	0,98	1,00	0,96	0,92
120	0,00222	19	175	0,94	0,96	1,00	0,95	0,85
	0,00416	45	191	0,99	0,99	1,00	0,97	0,95
	0,00881	76	197	1,00	0,99	1,00	0,98	0,97
150	0,00167	25	187	0,95	0,98	1,00	0,97	0,90
	0,00286	52	202	0,99	0,99	1,00	0,98	0,96
	0,00553	88	209	1,00	0,99	1,00	0,99	0,98
180	0,00117	24	191	0,94	0,98	1,00	0,97	0,89
	0,00199	57	210	0,99	0,99	1,00	0,99	0,97
	0,00370	98	220	1,00	0,98	1,00	1,00	0,98

Tabel 21 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot} Q_{max}	Q_{act} Q_{pot}	Q_{max} $Q_{max, prof. 2}$		Q_{act} $Q_{max, prof. 2}$

Profiel nr. 3: 20 cm veenkoloniaal dek op 20 cm spalterveen op zand

ZOMERGRANEN

60	0,00700	14	107	0,87	0,93	1,00	0,80	0,65
	0,01200	25	113	0,92	0,92	1,00	0,82	0,70
	0,03600	48	118	0,95	0,91	1,00	0,84	0,72
90	0,00300	18	120	0,90	0,90	1,00	0,85	0,69
	0,00540	34	132	0,96	0,84	1,00	0,89	0,72
	0,01600	66	138	0,99	0,80	1,00	0,91	0,72
120	0,00160	18	125	0,87	0,90	1,00	0,88	0,69
	0,00320	45	144	0,97	0,79	1,00	0,93	0,72
	0,00810	76	153	1,00	0,73	1,00	0,95	0,69
150	0,00100	25	125	0,83	0,89	1,00	0,86	0,64
	0,00190	52	152	0,96	0,78	1,00	0,94	0,71
	0,00450	88	166	1,00	0,69	1,00	0,97	0,67
180	0,00060	24	121	0,77	0,89	1,00	0,85	0,59
	0,00110	57	152	0,94	0,80	1,00	0,93	0,70
	0,00250	98	178	1,00	0,66	1,00	0,98	0,65

Profiel nr. 4: Kalkrijke zeer lichte zavel

ZOMERGRANEN

60	0,00944	14	170	0,84	0,97	1,00	0,94	0,76
	0,02102	29	175	0,88	0,98	1,00	0,95	0,82
	0,05435	44	176	0,90	0,98	1,00	0,96	0,84
90	0,00507	20	183	0,92	0,98	1,00	0,96	0,86
	0,00904	39	187	0,96	0,98	1,00	0,97	0,91
	0,02516	67	191	0,99	0,98	1,00	0,97	0,94
120	0,00284	21	184	0,91	0,98	1,00	0,97	0,86
	0,00546	50	194	0,99	0,98	1,00	0,98	0,95
	0,01101	79	195	1,00	0,97	1,00	0,98	0,95
150	0,00206	25	189	0,91	0,97	1,00	0,98	0,86
	0,00362	59	198	0,99	0,97	1,00	0,99	0,95
	0,00704	94	200	1,00	0,97	1,00	0,99	0,96
180	0,00123	18	191	0,89	0,97	1,00	0,98	0,84
	0,00251	64	203	0,99	0,96	1,00	1,00	0,95
	0,00469	105	206	1,00	0,96	1,00	1,00	0,96

Tabel 21 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseizoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d^{-1})	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	Q_{pot}	Q_{act}	Q_{max}		Q_{act}
				Q_{max}	Q_{pot}	$Q_{max, prof. 2}$		$Q_{max, prof. 2}$

Profiel nr. 5: 60 cm kalkrijke matig lichte zavel op kalkrijke zeer lichte zavel

ZOMERGRANEN

60	0,00795	13	157	0,81	0,98	1,00	0,93	0,73
	0,01574	26	162	0,83	0,98	1,00	0,94	0,76
	0,03390	41	164	0,86	0,99	1,00	0,94	0,80
90	0,00428	17	176	0,93	0,99	1,00	0,95	0,87
	0,00734	34	180	0,97	0,99	1,00	0,96	0,92
	0,01818	61	184	0,99	0,99	1,00	0,97	0,95
120	0,00229	14	181	0,94	0,99	1,00	0,96	0,89
	0,00502	49	191	0,99	0,99	1,00	0,98	0,96
	0,01026	79	193	1,00	0,99	1,00	0,98	0,97
150	0,00174	22	188	0,95	0,99	1,00	0,97	0,91
	0,00326	57	198	0,99	0,99	1,00	0,99	0,97
	0,00633	94	201	1,00	0,98	1,00	0,99	0,97
180	0,00110	15	188	0,92	0,98	1,00	0,98	0,88
	0,00220	62	204	0,99	0,98	1,00	0,99	0,96
	0,00404	105	209	1,00	0,97	1,00	1,00	0,97

Profiel nr. 6: 40 cm kalkrijke zware zavel op zeer fijn kleiig zand

ZOMERGRANEN

60	0,00765	15	155	0,95	0,97	0,99	0,92	0,84
	0,01461	29	157	0,96	0,97	0,99	0,93	0,86
	0,02905	42	158	0,97	0,97	0,99	0,93	0,86
90	0,00411	21	161	0,96	0,97	0,99	0,94	0,86
	0,00686	38	164	0,98	0,97	0,99	0,95	0,89
	0,01552	62	165	0,99	0,97	0,99	0,96	0,91
120	0,00222	17	165	0,96	0,96	0,99	0,95	0,86
	0,00496	54	170	0,99	0,96	0,99	0,97	0,91
	0,00898	78	171	1,00	0,96	0,99	0,97	0,92
150	0,00169	24	170	0,97	0,96	0,99	0,96	0,88
	0,00307	57	175	0,99	0,95	0,99	0,98	0,91
	0,00567	91	177	1,00	0,94	0,99	0,98	0,91
180	0,00108	19	174	0,96	0,95	0,99	0,97	0,87
	0,00209	60	182	0,99	0,93	0,99	0,98	0,89
	0,00369	100	187	1,00	0,91	0,99	0,99	0,89

Tabel 21 (vervolg)

Ontwaterings- diepte	Drainage- intensiteit	Gem. hoogste grondwaterstand	Gem. laagste grondwaterstand	Voorjaars- effect	Groeiseisoens- effect	Bodemtype- effect	Stikstof- leverantie- effect ν	Totaal effect
D (cm-mv)	A (d ⁻¹)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	$\frac{Q_{pot}}{Q_{max}}$	$\frac{Q_{act}}{Q_{pot}}$	$\frac{Q_{max}}{Q_{max, prof.2}}$		$\frac{Q_{act}}{Q_{max, prof.2}}$

Profiel nr. 7: 70 cm kalkrijke lichte klei op kalkrijke matig zware klei

ZOMERGRANEN

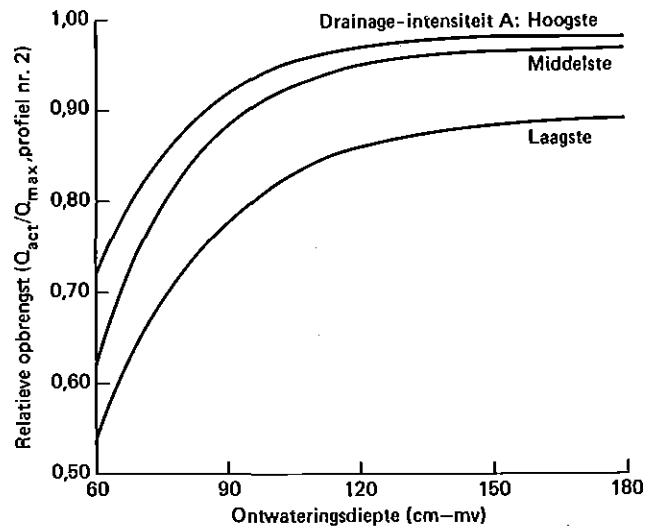
60	0,00797	17	157	0,99	0,91	0,97	0,89	0,77
	0,01568	30	164	1,00	0,93	0,97	0,91	0,82
	0,03429	43	168	1,00	0,94	0,97	0,92	0,84
90	0,00420	21	167	0,99	0,93	0,97	0,95	0,85
	0,00711	38	180	1,00	0,93	0,97	0,96	0,86
	0,01683	62	182	1,00	0,93	0,97	0,96	0,86
120	0,00223	17	183	0,99	0,93	0,97	0,96	0,85
	0,00410	43	188	1,00	0,93	0,97	0,97	0,87
	0,00924	76	191	1,00	0,92	0,97	0,98	0,87
150	0,00169	22	191	0,99	0,92	0,97	0,97	0,85
	0,00309	54	198	1,00	0,92	0,97	0,99	0,88
	0,00571	88	200	1,00	0,91	0,97	0,99	0,87
180	0,00108	16	193	0,98	0,92	0,97	0,97	0,84
	0,00209	55	205	1,00	0,90	0,97	0,99	0,86
	0,00369	95	210	1,00	0,90	0,97	1,00	0,87

Profiel nr. 8: Kalkrijke matig zware klei

ZOMERGRANEN

60	0,00946	12	154	0,99	0,92	0,96	0,93	0,81
	0,02112	28	154	1,00	0,93	0,96	0,94	0,84
	0,07130	47	152	1,00	0,94	0,96	0,94	0,85
90	0,00508	13	156	0,99	0,93	0,96	0,95	0,84
	0,01132	36	156	1,00	0,94	0,96	0,95	0,85
	0,02923	63	155	1,00	0,94	0,96	0,95	0,85
120	0,00348	16	157	1,00	0,93	0,96	0,96	0,85
	0,00695	43	157	1,00	0,94	0,96	0,96	0,86
	0,01741	80	157	1,00	0,94	0,96	0,97	0,87
150	0,00245	18	162	1,00	0,93	0,96	0,97	0,86
	0,00472	49	163	1,00	0,93	0,96	0,98	0,87
	0,01148	97	164	1,00	0,93	0,96	0,98	0,87
180	0,00174	17	179	1,00	0,92	0,96	0,99	0,87
	0,00336	52	181	1,00	0,93	0,96	0,99	0,88
	0,00925	123	184	1,00	0,93	0,96	1,00	0,89

Fig. 65. Totale opbrengstreductie van zomergranen, $Q_{act}/Q_{max, prof. 2}$ op profiel nr 2, sterk lemig zeer fijn zand, als functie van de ontwateringsdiepte bij 3 drainage-intensiteiten



- Bij de profielen 1, 4, 6, 7 en 8 is het effect van 'te nat' minder uitgesproken en wel des te minder naarmate de grond zwaarder is.
- Het effect van 'te droog' is het grootst op de niet verbeterde veenkoloniale grond, profiel nr 3. Voor profiel nr 1, zwak lemig zeer fijn zand, geldt in wat mindere mate hetzelfde.
- De andere profielen geven behalve profiel nr 6, 40 cm zware zavel op zeer fijn kleiig zand geen afname van de opbrengst te zien bij toeneming van ontwateringsdiepte.
- De niveauverschillen tussen de curven zijn voornamelijk een gevolg van in eerste instantie een verschil in vochttekorten in het groeiseizoen in tweede instantie een gevolg van verschillen in stikstofleverantie door de bodem.
- De meest uitgesproken verschillen in relatieve opbrengst ten gevolge van verschillen in drainage-intensiteit (Fig. 65) wordt gevonden bij profiel nr 2, sterk lemig zeer fijn zand. Bij onvoldoende ontwatering door zowel ondiepe ontwateringsbasis als een lage drainage-intensiteit, is deze grond vaak 'laat' in het voorjaar door 'te nat'. Daarnaast heeft deze grond onder genoemde drainageomstandigheden in natte groeiseizoenen te lijden van wateroverlast in de wortelzone.
- In Tabel 22 is het effect van vergroting van de drainage-intensiteit op de relatieve opbrengst weergegeven (zie ook Tabel 5). De gegevens in tabel 22 zijn afgeleid uit de laatste kolommen (= totaal-effect) van Tabel 21. Gaande van de laagste naar de middelste drainage-intensiteit geeft voor de 8 profielen en 5 draaindiepten een opbrengstverhoging, die varieert van ≤ 0 tot 10% of meer. Het is opvallend dat de lichtere gron-

Tabel 22. Extra relatieve opbrengst (%) van zomergranen indien de drainage-intensiteit wordt vergroot van de laagste naar de middelste respectievelijk van de middelste naar de hoogste intensiteit. De vijf toegepaste ontwateringsdiepten zijn weergegeven met de volgende codes: 1 = 60, 2 = 90, 3 = 120, 4 = 150 en 5 = 180 cm-mv

[illegible]

LITERATUUR

- AASE, J.K. 1978. Relationship between leaf area and dry matter in winter wheat. *Agron. J.* 70: 563-565.
- ARYA, L.M., D.A. FARRELL and G.R. BLAKE. 1975. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots. I. Determination of hydraulic properties of the soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 424-430.
- BELMANS, C., J.G. WESSELING and R.A. Feddes. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* 63, 3/4: 271-286.
- BEUVING, J. 1982. Onderzoek naar bodem- en waterhuishoudkundige gegevens voor invoer in en verificatie van een model voor berekening van de effecten van de waterhuishouding. Nota 1378. ICW, Wageningen. 29 pp.
- BEUVING, J. 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel-, klei- en veengronden. Rapport nr 10. ICW, Wageningen. 26 pp.
- BIDINGER, F., R.B. MUSGRAVE and R.A. FISHER. 1977. Contribution of stored pre-anthesis assimilate to grain yield in wheat and barley. *Nature (London)* 270: 431-433.
- BOELS, D., J.B.H.M VAN GILS, G.J. VEERMAN and K.E. Wit. 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities. *Soil Sci.* 126: 191-199. Verspr. Overdr. ICW 222.
- BOUMA, J. 1977. Soil survey and the study of water in unsaturated soil. Paper 13. Soil Survey Institute, Wageningen. 107 pp.
- BUITENDIJK, J. 1984. FLOWEX: een numeriek model voor simulatie van verticale stroming van water door onverzadigde gelaagde grond. Nota 1494. ICW, Wageningen. 61 pp.
- BUITENDIJK, J. 1985. Effect of workability index, degree of mechanization and degree of certainty on the yield of sugar beet. *Soil Tillage Res.* 5: 247-257.
- ERNST, L.F. 1956. Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross sections. *Neth. J. Agric. Sci.*: 126-131.
- ERNST, L.F. 1962. Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij de aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Versl. Landbouwk. Onderz. 67.15. PUDOC, Wageningen. 189 pp.

- FEDDES, R.A., J.G. WESSELING and WIEBING. 1984. Simulation of transpiration and yield of potatoes with the SWACRO model. 9th Triennial Conference of the European Association of Potato Research (EAPR) Interlaken, Switzerland.
- FEDDES, R.A. 1971. Water, heat and crop growth. Dissertatie Med. Landbouwh. school, Wageningen 71-12, 184 pp.
- FEDDES, R.A. and A.L.M. VAN WIJK. 1977. An integrated model-approach to the effect of water management on crop yield. Agric. Water Man. 1.1: 3-20.
- FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARADNY. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monograph. PUDOC, Wageningen. 189 pp.
- FEDDES, R.A., M. DE GRAAF, J. BOUMA and C.D. VAN LOON. 1987. Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction. Potato RES. 31: 225-239. TB 79.
- potato production as affected by soil compactation. Potato RES. (in druk).
- HEEMST, H.D.J. VAN. 1986. Crop phenology and dry matter distribution. In: Modelling of agricultural production: weather, soils and crops (H. van Keulen and J. Wolf, eds.). Simulation Monograph. PUDOC, Wageningen: 27-40.
- HELLINGS, A.J.M., M. DE GRAAF en D.A. VAN DER SCHANS. 1982. De relatie tussen wateraanvoer, verdamping en produktie bij het gewas aardappelen. Nota 1376. ICW, WAGENINGEN. 49 pp.
- HIL, J. VAN DEN. 1975. Premies voor vroege en late levering. Maandblad Suikerunie 7: 8-10.
- HOOGHOUDT, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van den grond. Deel 7. Versl. Landbouwk. Onderz. 46(14): 515-707.
- HOORN, J.W. VAN, 1958. Results of a groundwater level experimental field with arable crops on clay soil. Neth. J. Agric Sc. 6, 1-11. ICW-T.B1.
- JORRITSMA, J. 1975. Length of growing period and yield of sugar beet. 38th Winter congress, Session 1. Report No. 1.3.
- LEI/CBS. 1986. Landbouwcijfers 1985.
- NIEUWENHUIS, G.J.A. en C.L. PALLAND. 1982. Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing. Rapport nr 2. ICW, Wageningen. 68 pp.
- OVAA, I. en G.A. VAN SOESBERGEN. 1978. Het effect van diepe grondbewerking op de wortelontwikkeling van akkerbouwgewassen op klei- en zavelgronden. Stencil nr 6272. STIBOKA, Wageningen. 26 pp.

- PENNING DE VRIES, F.W.T. and H.H. VAN LAAR. 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen. 308 pp.
- RIJTEMA, P.E. and G. ENDRODI. 1970. Calculation of production of potatoes. Neth. J. Agric. Sci. 18: 26-36. Techn. Bull. 70. ICW, Wageningen.
- RYHINER, A.H. and MATSUDA. 1978. Effect of plant density and water supply on wheat production. Neth. Journ. of Agric. Science 26: 200-209.
- SCHANS, D.A. VAN DER, M. DE GRAAF en A.J. HELLINGS. 1984. De relatie tussen wateraanvoer, verdamping en produktie bij het gewas aardappelen. Nota 1539. ICW, Wageningen, 47 pp.
- SCHOTHORST, C.J. 1982. Drainage and behaviour of peat soils. ICW-Report 3, 18 p.
- SIEBEN, W.H. 1974. Over de invloed van de ontwatering op de stikstoflevering en de opbrengst van jonge zavelgronden in de IJsselmeerpolders. Van Zee tot Land 51, 180 p.
- SLOOTS, G.B. 1971. Samenhang tussen zaai capaciteit en opbrengst bij zomergranen. Int. Rapport 242. Rijksdienst IJsselmeerpolders, Kampen. 49 pp.
- TAYLOR, S.A. and G.L. ASHCROFT. 1972. Physical edafology. The physics of irrigated and nonirrigated soils. Freeman Comp., San Francisco. 533 pp.
- VALK, G.G.M. VAN DER en J.A. SCHONEVELD. 1963. Invloed van grondwaterstand op de produktie van enkele gewassen op klei- en zavelgronden. Meded. Dir. Tuinb 26, 5: 296-300. Meded. ICW 56.
- VALK, G.G.M. en P. NICOLAI. 1969. Groenteteelt en ontwatering van klei- en zavelgronden. Tuinb. Meded. 32, 4: 173-179 en 203.
- VISSER, W.C. 1958. De landbouwwaterhuishouding van Nederland. Rapport 1. Comm. Onderz. Landbouwwaterh. Nederland TNO. 159 pp.
- WERKGROEP. 1975. De invloed van verdichtingen in en onder de bouwvoor van een zavelgrond op de wortel-, knol- en loofontwikkeling van consumptie-aardappelen in 1973. Rapport PAGV, STIKBOKA, Landbouwuniversiteit. 46 pp.
- WERKGROEP HERZIENING EVALUATIE LANDINRICHTINGSPLANNEN (HELP). 1978. Methode voor de evaluatie van landinrichtingsplannen, Utrecht.
- WERKGROEP 'HELP-TABEL'. 1987. De invloed van de waterhuishouding op de landbouwkundige produktie. Med. Landinrichtingsdienst 176.
- WESSELING, J. 1969. Bergingsfactor en drainagecriterium. Meded. 118. Institute for Land and Water Management Research (ICW), Wageningen. 8 pp.

- WIEBING, R. en T. ROZENVELD. 1983. Uitkomsten van de proefrooiiingen. In: Verslag Wergroep Optimalisering van de fabrieksaardappelenteelt. Stichting interprovinciaal onderzoekcentrum akkerbouw op zand- en veenkoloniale grond in middenoost en noordoost Nederland (SIO). Bijlage 3. 8 pp.
- WIJK, A.L.M. VAN en R.A. FEDDES. 1975. Invloed van de waterhuishouding op de opbrengst van landbouwgewassen. Nota 867. ICW, Wageningen. 43 pp.
- WIJK, A.L.M. VAN. 1980. A soil technological study on effectuating and maintaining adequate playing conditions of grass sports fields. Agric. Res. Rep. 903. Pudoc, Wageningen. 124 p.
- WIJK, A.L.M. VAN and R.A. FEDDES. 1982. A model approach to the evaluation of drainage effects. In: M.J. Gardiner (ed.). Land Drainage. A seminar in the EC Programme of Coordination of Research on Land Use and Rural Resources, Cambridge, 27-31 July 1981. A.A. Balkema, Rotterdam: 131-149.
- WIJK, A.L.M. VAN and R.A. FEDDES. 1986. Simulating effects of soil type and drainage on arable crop yield. In: A.L.M. van Wijk and J. Wesseling (eds.). Agricultural Water Management. Proc. Symp. on Agric. Wat. Man., Arnhem, 18-21 June 1985. A.A. Balkema, Rotterdam: 97-112.
- WIND, G.P. 1960. Opbrengstderving door 'te laat' zaaien. Landbouwk. Tijdschr. 72, 111-118.
- WIND, G.P. 1979. Analog modeling of transient moisture flow in unsaturated soil. Agric. Res. Rep. 894. Pudoc, Wageningen. 54 p.

OVERZICHT VERSCHENEN RAPPORTEN

Nr	Auteur(s) + Titel	Prijs (Hfl)
1.	Sprik, J.B. en G.H. Horst. 1982. Onderzoek naar capaciteitsnormen voor diepploegen bulldozers en hydraulische graafmachines.	15,-
2.	Nieuwenhuis, G.J.A. en C.L. Palland. 1982. Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing	10,-
3.	Hoeks, J. en G.J. Agelink. 1982. Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen.	5,-
4.	Alderwegen, H.A. van. 1982. Planning van openluchtrecreatievoorzieningen bij voorbereiding van landinrichtingsprojecten	*
5.	Rijtema, P.E. et al. 1982. Bemesting, waterhuishouding, perceelscheidingen en landbouw. Commentaar op een RIN-rapport.	5,-
6.	Harmsen, J. en H. van Drumpt. 1982. Conservering van watermonsters.	5,-
7.	Ernst, L.F. 1983. Wegzijging en kwel; de grondwaterstroming van hogere naar lagere gebieden.	7,50
8.	Steenvoorden, J.H.A.M. en M.J. de Heus. 1984. Fosfaatbalansstudies en de bijdrage van diffuse bronnen.	7,50
9.	Wijk, A.L.M. van. 1984. Landbouwkundige aspecten van ontwatering in veenweidegebieden. Commentaar op een literatuuranalyse.	5,-
10.	Beuving, J. 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand-, zavel, klei- en veengronden.	7,50
11.	Weerd, B. van der en L.F. Ernst. 1984. Een prognose van het effect van een peilverhoging in het Philippinekanaal (Zeeland) op de grondwaterstand in de aangrenzende polders.	7,50
12.	Werkgroep nitraatuitspoeling in waterwingebieden. 1985. Nitraatproblematiek bij grondwaterwinning in Nederland. Onderzoek naar alternatieve maatregelen.	12,50
13.	Wilde, J.G.S. de. 1984. Dammen van riet, heide of boomschors als perceelverbinding in veenweidegebieden.	10,-
14.	Kemmers, R.H. en P.C. Jansen. 1985. Stikstofmineralisatie in onbemeste half-natuurlijke graslanden.	7,50
15.	Bakel, P.J.T. van. 1985. Effecten van peilbeheer in het gebied 'De Monden' (Drenthe).	15,-
16.	Wilde, J.G.S. de. 1985. Rekenmodel en produktienormen voor grondtransport met getrokken en zelfrijdende dumpers.	10,-
17.	Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. 1985. Onderzoek naar de mogelijkheden van operationele toepassing van remote sensing technieken in de landbouw en het natuurbeheer. Eindrapport.	12,50
18.	Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving. 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks.	10,-

Nr	Auteur(s) + Titel	Prijs (Hfl)
19.	Rijtema, P.E., C.W.J. Roest en J. Pankow. 1986. Onderzoek naar de waterbalans van vuilstortplaatsen.	20,-
20.	Bakker, J.W., F.R. Boone en P. Boekel. 1987. Diffusie van gassen in grond en zuurstofdiffusiecoëfficiënten in Nederlandse akkerbouwgronden	15,-
21.	Hoeks, J., A.H. Ryhiner en J. van Dommelen. 1987. Onderzoek naar de praktische uitvoerbaarheid van bovenafdichting op afvalstortterreinen.	25,-
22.	Bronswijk, J.J.B. en J.J. Evers-Vermeer. 1987. Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland.	12,50
23.	Adriaanse, P.I. 1987. Hydrologische veranderingen in natuurgebieden: Overzicht van benodigde gegevens, analysemethoden en modellen.	12,50
24.	Bruin, A.H. de, A. van Hoorn en C.F. Jaarsma. 1988. Ontwikkeling van een methode ter bepaling van het gebruik van openluchtrecreatie-projecten.	30,-
25.	Bogaard, E.A.J.M. van den en J. Hoeks. 1988. Milieu-effecten en milieutechnische maatregelen betreffende de stortplaats Linne/Montfort	25,-
26.	Drent, J., J.G. Kroes en P.E. Rijtema. 1988. Nitraatbelasting van het grondwater in het zuidoosten van Noord-Brabant.	20,-
27.	Adriaanse, P.I. en R.H. Kemmers. 1988. Bufferzones tegen Nitraatinspoeling in beekdalen; Een methode om ligging en breedte vast te stellen	25,-
28.	Hulst, S.H.M. en J. Hoeks. 1988. Effecten van vuilstortplaats De Dukenburg op het natuurreserveaat De Bruuk in Groesbeek	25,-
29.	Vink, L.W. en J.B.H.M. van Gils. 1988. Methode voor registratie van grondgebruik en structuurkenmerken van bedrijven en gebieden met tuinbouw onder glas	25,-
30/I.	Jansen, E.J. 1988. Invloed van de landbouw op de kwaliteit van oppervlaktewater. Hoofdrapport.	20,-
30/II.	Jansen, E.J. 1988. Invloed van de landbouw op de kwaliteit van oppervlaktewater. Macronutriënten.	(in druk)
30/III.	Jansen, E.J. 1988. Invloed van de landbouw op de kwaliteit van oppervlaktewater. Zware metalen en organische microverontreinigingen.	20,-
31.	Wijk, A.L.M. van, R.A. Peddes, J.G. Wesseling en J. Buitendijk. 1988. Effecten van grondsoort en ontwatering op de opbrengst van akkerbouwgewassen. Een modelsimulatie over 30 jaren van de opbrengst van aardappelen en zomergraan op acht bodemprofielen bij vijftien combinaties van drainagediepte en -intensiteit.	25,-

***Uitverkocht**

De RAPPORTEN zijn te bestellen door storting van het verschuldigde bedrag op giro 817672 t.n.v. ICW, Wageningen, onder vermelding van de gewenste publikatie en het aantal exemplaren. Toezending geschiedt na ontvangst van het bedrag