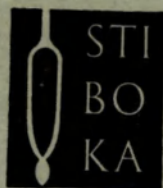


31396.1432.2

STICHTING VOOR BODEMKARTERING
WAGENINGEN

WATERWINGEBIED 't KLOOSTER

Toelichting bij de veldbodemkundige gevoeligheidsanalyse



047001
1500-
Stichting voor Bodemkartering
Postbus 98
6700 AB Wageningen
Tel. 08370-19100

PROLIFEREREN
WAGENINGEN 1979

Rapport nr. 1432
Project nr. 163.31

WATERWINGEBIED 't KLOOSTER

Toelichting bij de veldbodemkundige gevoeligheidsanalyse

J. Bouma
en
H.C. van Heesen

Basisrapport Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland



0000 0031 9117

Wageningen, februari 1979

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Stichting voor Bodemkartering en de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland.

ISBN 100531-04
15 1979

WATERWINGEBIED 't KLOOSTER

Toelichting bij de veldbodemkundige gevoeligheidsanalyse

J. Bouma en H.C. van Heesen

Inhoud:

	<u>blz.</u>
Woord vooraf	5
1. Inleiding	6
2. Gefaseerde toekenning van bodemkundige gegevens	8
3. Resultaten	11
3.1 Toetsing van simulatieresultaten	11
3.2 Een vergelijking van de verschillende fasen op basis van gemeten en berekende grondwaterstanden	11
3.2.1 Resultaten zonder meetgegevens voor de diepere ondergrond	11
3.2.2 Het model met meetgegevens voor de diepere ondergrond	12
3.3 Een vergelijking van de verschillende fasen op basis van berekende verdamping en equivalent opbrengsten	13
4. Evaluatie en conclusies	17
5. Appendix: Gebruikte pF en K- Ψ relaties, inclusief gemeten waarden	20
6. Literatuur	21

Lijst van afbeeldingen

1. Ligging van de knooppunten en bijbehorende representatieve oppervlakten van 25 ha	8
2. Profielbeschrijving voor een beekeerdgrond (tZg45)	8
3. Profielbeschrijving voor een enkeerdgrond (E53)	8
4. Profielbeschrijving voor een vorstvaaggrond (Zb52)	8
5. Profielbeschrijving voor een veldpodzolgrond (Hn53)	8
6. Relatieve kosten van gegevensverzameling in de fasen I t/m IV	10
7. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor een meerjarige periode	11
8. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 70	11
9. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 73	11
10. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 95	11
11. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 98	11
12. Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 112	11

	<u>blz.</u>
13. Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode nabij het pompstation	13
14. Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode aan de rand van het onttrekkingsgebied van het pompstation	13
15. Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode in stambuis 41A11 buiten de onttrekkingssfeer van het pompstation	13
16. Berekende verdampingen voor knooppunt 70 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV	14
17. Berekende verdampingen voor knooppunt 73 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV	14
18. Berekende verdampingen voor knooppunt 95 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV	14
19. Berekende verdampingen voor knooppunt 98 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV	14
20. Berekende verdampingen voor knooppunt 112 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV	14
21. Stijgcurven voor drie constante snelheden behorend bij drie K- ψ relaties	20
22. Stijgcurven voor vier constante snelheden bij drie K- ψ relaties, zoals gedefinieerd door De Laat en afgeleid van op het ICW gemeten curven	20
23. Gemeten K- ψ en K- θ relatie van de diepere ondergrond (hete-luchtmethode) en bijbehorende gemeten pF-curven (poreuze kop)	20
24. Opstelling voor de meting van pF-curven zoals toegepast voor de diepere ondergrond (tot pF 2.0)	20
 Lijst van tabellen	
* 1. De voor de verschillende fasen gebruikte fysische karakteristieken voor de vijf gekozen knooppunten	8
2. Absolute afwijkingen van de verdamping in mm per groeiseizoen tussen de aangegeven fasen en referentiefase IV	14
3. Equivalent-produkties berekend voor de vijf knooppunten per groeiseizoen voor de onderzochte fasen	15
4. De in dit rapport gebruikte pF-curven zoals schematisch weergegeven in tabel 1	21
5. Resultaten van ongeveer 10 boringen in april 1979 voor ieder van de vijf knooppunten, die een nadere evaluatie van de fase III gegevens (gebaseerd op één boring) mogelijk maken	17

* Tabel 1 is achter het verslag ingebonden.

WOORD VOORAF

Dit rapport is één van de drie basisrapporten van Stiboka voor de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, die betrekking hebben op de onderzoeksperiode 1975-1978. In dit rapport wordt de veldbodemkundige gevoeligheidsanalyse voor proefgebied 't Klooster behandeld. Het betreffende onderzoek is een voortzetting van het in de eerste fase (1971-1974) van het Commissieonderzoek verrichte werk in gebied 't Klooster, zoals beschreven door Van Holst, Van Heesen en Makken in 1974 (Stiboka rapport 1109: Waterwingebied 't Klooster: toelichting op en verwerking van bodemkundige gegevens).

Het in dit rapport te bespreken onderzoek werd geleid door Dr.Ir. J. Bouma. De rekenresultaten werden geleverd door Ir. P.J.M. de Laat (Int. Inst. for Hydr. and Ev. Engineering, Delft) en Ir. R.H.C.M. Awater (Dienst Informatieverwerking, Rijkswaterstaat, Rijswijk). Bij de bespreking van de gegevens in dit rapport zijn door hen veel waardevolle commentaren geleverd. Daarvoor zijn de schrijvers hen zeer erkentelijk.

DE DIRECTEUR,

Ir. R.P.H.P. van der Schans.

1. INLEIDING

De door Stiboka in 1974 geleverde bodemkundige gegevens zijn gebruikt bij het simuleren van onderdelen van de waterhuishouding in het gebied 't Klooster (Van Holst e.a., 1974). De resultaten van deze simulaties met model GELGAM zijn nu door De Laat en Awater samengevat in een basisrapport (De Laat en Awater, 1979). Het model GELGAM is voortdurend onderhevig aan veranderingen. Het verdient wellicht aanbeveling de in dit rapport gebruikte versie te beschouwen als GELGAM (versie 't Klooster). Uit de door De Laat en Awater gegeven toelichting blijkt dat de bodemkundige gegevens van 1974 niet zonder meer konden worden gebruikt. Er bleek behoefte te zijn aan aanvullende fysische metingen, die dan ook door Stiboka zijn verricht. De meetresultaten zullen in dit deelrapport nader worden geanalyseerd.

Iedere simulatie behoort vergezeld te gaan van een gevoeligheidsanalyse die aangeeft welk relatief gewicht de verschillende variabelen bezitten. Dit aspect is, uiteraard, van eminent belang bij het vaststellen van de meest efficiënte bemonsteringsprocedure, die moet worden gevolgd bij het verzamelen van de in te voeren basisgegevens. Deze gevoeligheidsanalyse kan strict fysisch zijn, in die zin dat de gebruikte fysische constanten en grootheden één voor één op arbitraire wijze kunnen worden gevarieerd, terwijl alle andere waarden constant worden gehouden. Dit soort analyse is uitgevoerd voor één knooppunt (no. 59) waarbij voor de waterstand bepaalde aannamen zijn gedaan (zie Feddes en Van Bakel, 1979). Deze procedure wijkt af van de GELGAM procedure waarbij interacties tussen omringende knooppunten, de op een bepaald knooppunt berekende waarde mede bepalen. Er bestaat echter ook aanleiding om een ander soort gevoeligheidsanalyse uit te voeren, die meer gericht is op een toetsing van operationele, veldbodemkundige aspecten. Immers, de door Van Holst e.a. in 1974 geleverde gegevens waren gebaseerd op uitgebreid veldwerk, waarbij binnen de grootste bodemkundige eenheid in het representatief oppervlak voor ieder knooppunt ter plaatse éénmaal werd geboord. Op grond van deze veldwaarnemingen werden bewortelingsdiepten waargenomen en K- Ψ en pF-gegevens zo goed mogelijk geschat, waarbij gebruik werd gemaakt van reeds beschikbare gegevens van elders (pF) of van standaardreeksen gebaseerd op textuur (K- Ψ). De hier gevolgde methode is arbeidsintensief en kostbaar. De vraag is dus, in principe, gerechtvaardigd of relevante gegevens ook met meer eenvoudige en goedkopere procedures zouden kunnen worden verkregen. Daarbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het gebruik van bodemkaarten met de bijbehorende toelichting. Deze benadering zou een duidelijke vereenvoudiging en kostenbesparing inhouden ten opzichte van de in 1974 gevolgde procedure. Ook kan in dit verband de vraag worden gesteld of het verantwoord is om zoveel veldwerk te verrichten wanneer het gewenste produkt in feite blijkt te berusten op empirische schattingen op basis van globale standaardreeksen. Zou daarom mogelijk meting van K- Ψ en pF-curven per knooppunt aan te bevelen zijn ter vergroting van het rendement van het veldwerk? Deze vragen zijn belangrijk op langere termijn wanneer soortgelijk onderzoek mogelijk ook in andere gebieden zal worden toegepast. Hoewel de vraag weinig relevant lijkt, moet ook het effect worden onderzocht van het niet beschikbaar zijn van veldbodemkundige gegevens. In dit geval zou voor heel het gebied één bepaalde bodemeenheid met gelijke eigenschappen kunnen worden ingevoerd.

Samenvattend kan worden gesteld dat het van belang is vast te stellen welke graad van detail noodzakelijk is bij het verzamelen van relevante veldbodemkundige gegevens voor toepassing in simulatiemodellen zoals GELGAM. Met nadruk is het woord relevant gebruikt bij het omschrijven van de meest gewenste soort gegevens. Immers, er is hier geen sprake van "goed" of "fout". Ieder simulatiemodel is gebaseerd op sterke simplificaties van

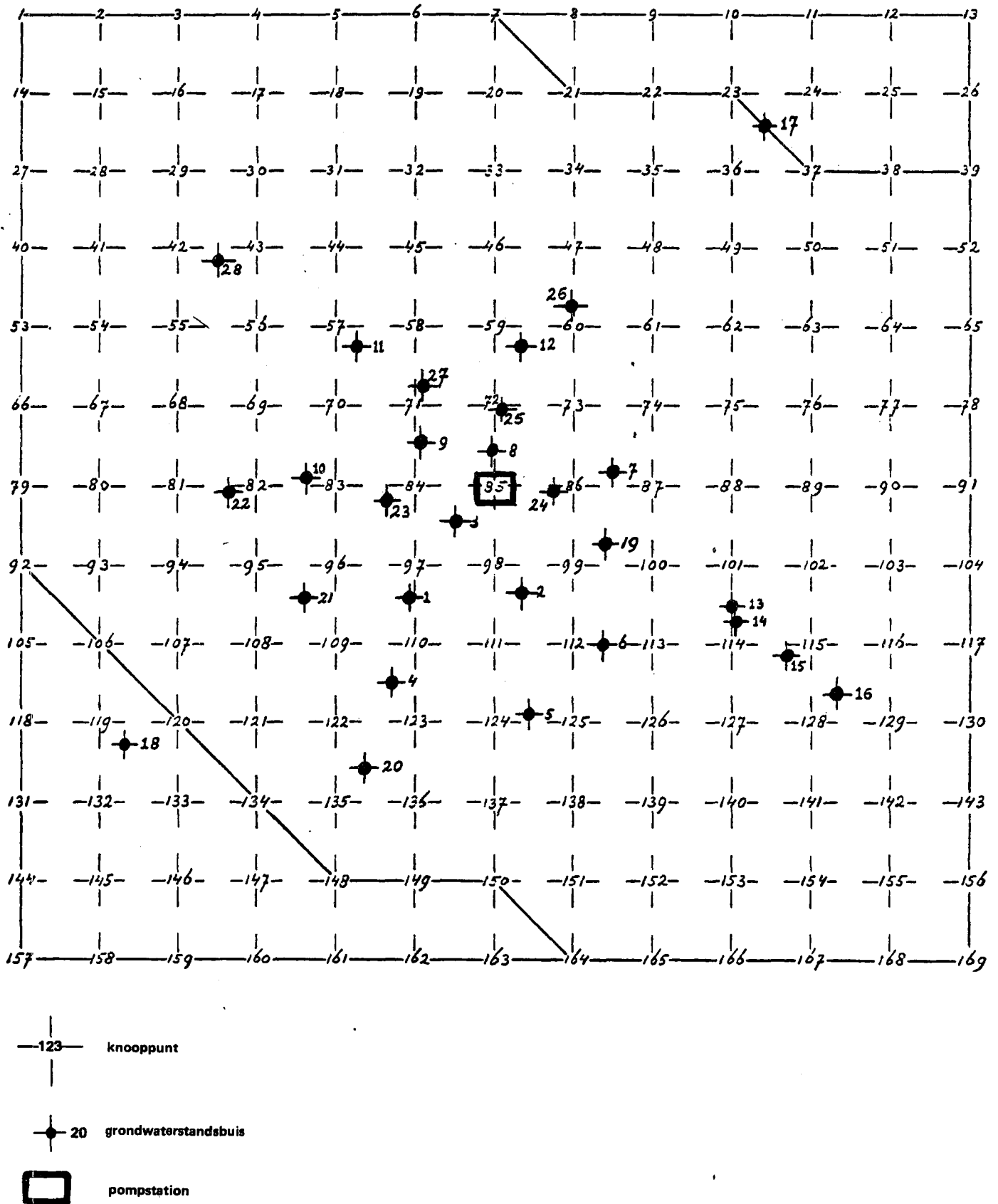
een uiterst complexe werkelijkheid en levert resultaten die door middel van verificatie met gemeten waarden moeten worden beoordeeld. Vaak zijn de verificatiemogelijkheden beperkt, of zijn de gemeten waarden zelf onderhevig aan een relatief grote variatie. Het is in alle gevallen belangrijk om het doel van de simulatie steeds in relatie te zien tot de verificatiemogelijkheid, en om de verschillende te volgen procedures vanuit dit gezichtspunt te beoordelen. Wanneer globale resultaten gezien de doelstelling bevredigend zijn, heeft het geen zin om een grotere nauwkeurigheid na te streven bij de verschillende te volgen deelprocedures, en kan een dergelijk globaal resultaat, toch als "goed" worden beoordeeld. Het accent in de komende hoofdstukken zal liggen op het rapporteren en interpreteren van een in de geschetste trant opgezette veldbodemkundige gevoeligheidsanalyse met behulp van simulatieresultaten voor het gebied 't Klooster. Deze resultaten zijn geleverd door Awater en De Laat en ze zijn verkregen door toepassing van het simulatiemodel GELGAM. De bodemkundige gegevens zijn verzameld voor een vierkant oppervlak ter grootte van 25 ha, liggend rond ieder knooppunt. In dit verband zal in dit rapport worden gesproken over "knooppuntsoppervlak" of, afgekort, "knooppunt". Het woord "element" wordt niet gebruikt in dit verband omdat bij de verzameling van de geohydrologische gegevens voor GELGAM dit begrip is gekoppeld aan het vierkante oppervlak tussen 4 bijeengelegen knooppunten.

2. GEFASEERDE TOEKENNING VAN BODEMKUNDIGE GEGEVENS

Bij het verzamelen van voor de simulatie relevante bodemkundige gegevens is gebruik gemaakt van vier verschillende procedures die een reeks vormen van toenemende complexiteit en kosten. Bij de beschrijving van gegevens die met deze procedures zijn verkregen, zal in dit verband worden gesproken van fasen I t/m IV. Ter toelichting van deze benadering kan het volgende worden opgemerkt. Iedere gebruiker van een simulatiemodel, zoals hier toegepast, kan zich op het standpunt stellen dat bodemkundige gegevens niet erg belangrijk zijn voor het uiteindelijk simulatieresultaat en dat het kiezen van "een gemiddelde" bodemeenheid bevredigend zou kunnen zijn. We introduceren dus in dit verband een fase I waarin identieke gegevens worden geleverd voor alle knooppunten, uitgaande van "een gemiddelde" bodemeenheid. De simulatieresultaten in termen van berekende grondwaterstanden, kunnen worden getoetst aan de hand van gemeten waarden en kunnen worden vergeleken met resultaten van benaderingen in latere fasen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de gemiddelde hoogteligging van ieder knooppunt in alle fasen, dus ook in fase I, wordt gebruikt. Het is duidelijk dat het verschaffen van bodemkundige gegevens in fase I zeer eenvoudig en weinig kostbaar is.

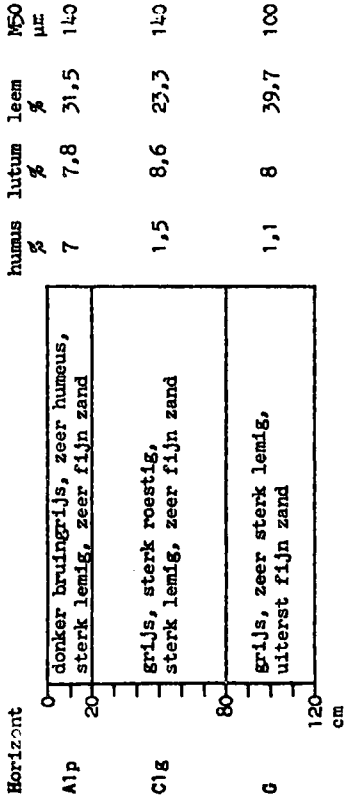
Voor het gebied 't Klooster is gekozen voor de meest voorkomende bodemeenheid in dit gebied, nl. een veldpodzolgrond (legenda-eenheid: Hn53). Overigens betekent de keuze van deze grond toch al de inbreng van een zekere bodemkundige kennis. De bodemeenheid Hn53 heeft een aangenomen dikte van de wortelzone van 40 cm; pF-curve bovengrond no. 4.4 en K- Ψ ondergrond: R.3 met bijbehorende pF no. 4.6. De in dit rapport gebruikte pF en K- Ψ gegevens zijn samengevat in hoofdstuk 5.

In fase II wordt gebruik gemaakt van bestaande bodemkaarten, zoals de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000, of ruilverkavelings- of andere karteringen. Voor ieder representatief oppervlak van 25 ha kan met behulp van de bodemkaart worden vastgesteld welke bodemeenheid het grootste oppervlak inneemt (Het "representatief" profiel) zoals al eerder toegelicht door Van Holst e.a. (1974). Vervolgens kan aan de hand van de beschrijving in het bijbehorende rapport en de in het kader van de kartering beschreven boringen een schatting worden gemaakt van de texturen van onder- en bovengrond en de bijbehorende fysische karakteristieken (pF en K- Ψ). Deze procedure speelt zich af op kantoor en houdt in dat er geen veldwerk wordt verricht. In het kader van de hier uitgevoerde gefaseerde benadering is in fase II geen gebruik gemaakt van de specifiek voor de Commissie Waterhuishouding Gelderland in 1973 vervaardigde bodemkaart van het gebied 't Klooster. De daarbij verzamelde kennis vanuit een duidelijk hydrologisch-gerichte probleemstelling zou niet-objectieve gegevens voor fase II hebben geleverd. Er is daarom gebruik gemaakt van de bodemkaart voor de ruilverkaveling Hengelo-Zelhem (Kleinsman e.a. 1973), waarbij de onderscheiden bodemeenheden in een nabij gelegen gebied duidelijk zijn omschreven. De discussie in de rest van dit rapport zal zich toespitsen op vijf knooppunten, waar verschillende representatieve profielen van het gebied 't Klooster voorkomen. Dit zijn de knooppunten 70, 73, 95, 98 en 112, die alle binnen de onttrekkingssfeer van het pompstation (zie afb. 1) liggen. Voor deze punten werden op basis van de bodemkaart de in tabel 1 weergegeven bodemeenheden als "representatief" onderscheiden omdat ze binnen de 25 ha het grootste oppervlak innamen. De standaardbeschrijvingen uit het ruilverkavelingsrapport van de betreffende gronden zijn gereproduceerd in de afb. 2 t/m 5, en zijn gebruikt om pF en K- Ψ gegevens en bewortelingsdiepten te schatten met behulp van bestaande standaardreeksen. De pF-curven werden geschat op basis van de in de profielbeschrijvingen genoemde texturen en organische-stofgehalten van zowel boven- als ondergronden. De schatting gebeurde analoog aan die zoals be-



Afb. 1 Ligging van de knooppunten en bijbehorende representatieve oppervlakten van 25 ha.

Kaarteenheid: t2g45 **Oppervlakte:** 217 ha = 2,6 %
Omschrijving: dums bekeerdgronden in sterk lemig, zeer fijn en matig fijn zand
Grondwatertrappen: IIIa III V
Oppervlakte in ha: 69 75 73
Oppervlakte in %: 0,8 0,9 0,9
Analyse nr.: H29
Profielischets: t2g35 met Ot III
Horizont



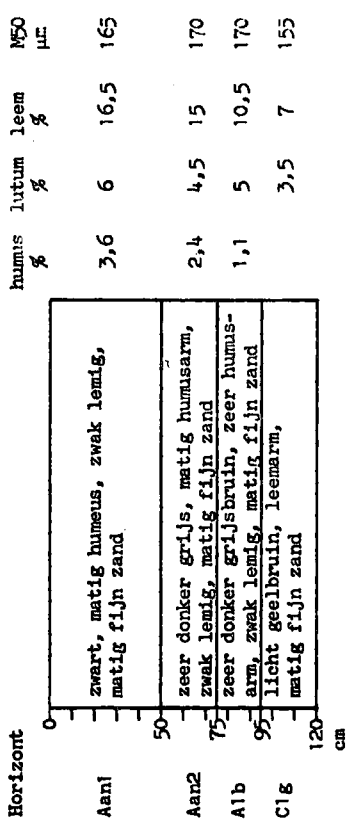
Verbreiding: Ten oosten van Hengelo en in het noorden van het gebied.

Toelichting: Dit zijn bekeerdgronden die plaatselijk zeer fijnzandig en plaatselijk matig fijnzandig zijn. Deze gronden zijn bijna overal sterk lemig. Op de plaatsen waar deze gronden zeer fijnzandig zijn bedraagt het leemgehalte meestal + 30 %, de gedeelten met matig fijnzand zijn aanmerkelijk lichter en hebben een leemgehalte van + 20 %.

Deze gronden zijn voor een deel slecht doorlatend. Het gedeelte dat van deze gronden is verwerkt is met een toevoeging aangegeven.

Afb. 2 Profielbeschrijving voor een bekeerdgrond (t2g45). Ontleend aan het ruilverkavelingsrapport Hengelo-Zelhem

Kaarteenheid: E53 **Oppervlakte:** 1095 ha = 13,1 %
Omschrijving: zwarte enkeerdgronden in zwak lemig, matig fijn zand
Grondwatertrappen: VI VII VIII
Oppervlakte in ha: 49 469 577
Oppervlakte in %: 0,6 5,7 6,8
Toevoeging: d
Analyse nr.: 40F79, HZ10, 34C21
Profielischets: E53 met Ot VIII
Horizont



Verbreiding: Met uitzondering van het zuidwesten, verspreid liggende over het gebied.

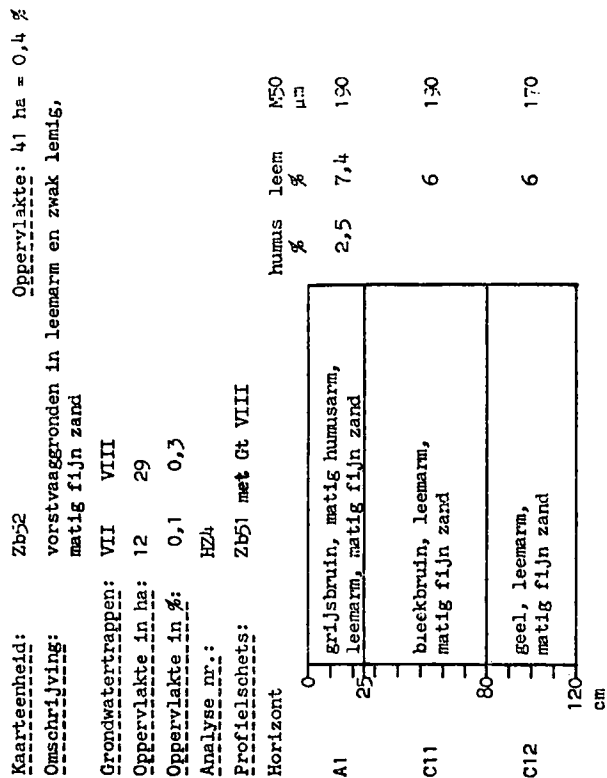
Toelichting: In het noordoostelijke gedeelte van het gebied is het humagehalte gemiddeld hoger en varieert het van + 3,5 tot + 5,5 %. Ook de kleur van de humus is daar duidelijk zwarter. Naar het westen toe wordt de kleur meer bruingrijs tot grijs.

De dikte van de humushoudende laag is in het algemeen vrij constant. Een uitzondering hierop komt voor in een strook langs de weg van Zelhem naar Hengelo en in de Varselsche enk. Hier is de dikte nogal wisselend; op korte afstand variërend van ca. 50 cm tot soms dikker dan 100 cm.

De ondergrond is over het geheel leemarm tot zwak lemig en matig fijnzandig. Wat de korrelgrootte betreft komt een uitzondering voor in het noordoostelijke gedeelte: M50 is daar plaatselijk iets lager dan 150 µm, zodat de gronden daar plaatselijk zeer fijnzandig zijn.

De ondergrond is meestal licht, rossig bruin van kleur waarbij op enkele plaatsen een moderpodzol ontwikkeld is en op enkele andere plaatsen, voornamelijk in de lagere gedeelten, een humuspodzolprofiel is ontstaan.

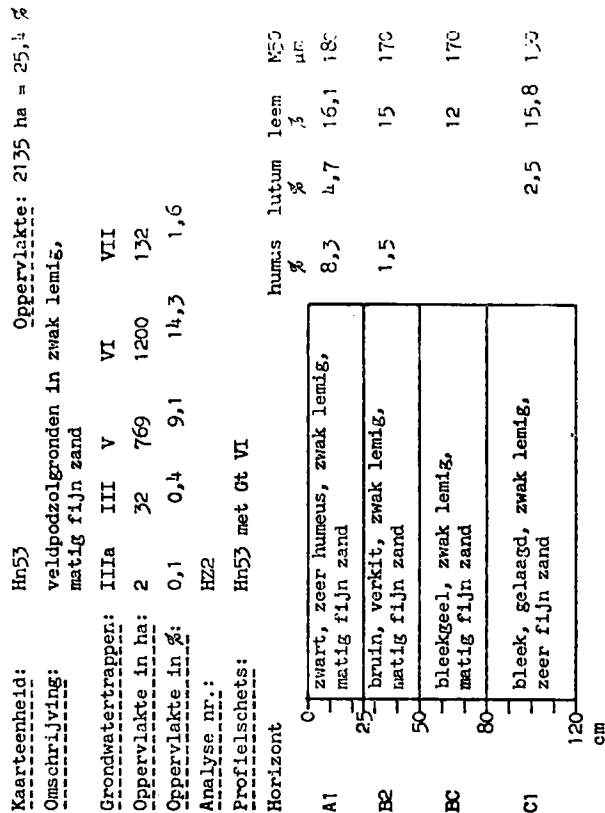
Afb. 3 Profielbeschrijving voor een enkeerdgrond (E53). Ontleend aan het ruilverkavelingsrapport Hengelo-Zelhem



Verbreiding:
 Ten zuiden van de Baksche Kamp en verder enkele kleine vlakjes die verspreid liggen in het oosten.

Toelichting:
 Dit zijn hooggelegen gronden, zonder hydromorfe kenmerken, met een humusarme A1 die overwegend leemarm tot zwak lemig is. In de ondergrond die meestal leemarm en matig fijnzandig is met een N50 van 170 à 200 μm, komt meestal geen B-horizont voor. Onder de A1-horizont komt vaak een lichtbruine laag in de positie van een B voor die geleidelijk overgaat in geel, matig fijn, leemarm tot zwak lemig zand.
 Het zijn zeer droogtegevoelige gronden.

Afb. 4 Profielbeschrijving voor een vorstvaaggrond (Zb52). Ontleend aan het ruilverkavelingsrapport Hengelo - Zelhem



Verbreiding:
 Verspreid ten oosten van Zelhem en ten noordoosten van Hengelo.

Toelichting:
 De bovengrond is vaak zeer humeus, maar plaatselijk matig humeus tot humusarm. Dit is meestal een gevolg van egalisatie, waarbij de hogere gedeelten worden afgeschoven zodat een laag humusgehalte ontstaat. De ondergrond is vooral bij de hogere veldpodzolgronden meestal leemarm en matig fijnzandig. Daarnaast komt bij de lagere gronden vaak lemig, zeer fijn zand in de ondergrond voor (zie bijl. 3).
 In de B-horizont en de BC-horizont komen vooral in het oosten van het gebied plaatselijk stugge soms verkitte lagen voor (zie bijl. 3). De veldpodzolgronden die in bos liggen, zijn, vooral in de omgeving van Huize Zelle, 60 à 80 cm verwerkt.

Afb. 5 Profielbeschrijving voor een veldpodzolgrond (Hn53). Ontleend aan het ruilverkavelingsrapport Hengelo-Zelhem

schreven door Van Holst e.a. (1974), waar werd uitgegaan van de standaardreeks van Krabbenborg (1973). Bij de schatting van K- Ψ relaties werd eveneens de door Van Holst e.a. (1974) gevolgde procedure toegepast, waarbij aan leemarme ondergronden een Rijtema 2, aan zwak lemige ondergronden een Rijtema 3 en aan sterk lemige ondergronden een Rijtema 4 werd toegekend. Door De Laat zijn deze relaties veranderd in resp. L1, L2 en L3. De Rijtema-nummers hebben betrekking op de bekende standaardreeks (Rijtema, 1969). De K- Ψ relaties en de bijbehorende capillaire stijgcuren zijn samengevat in afb. 21 + 22 in hoofdstuk 5. De bewortelingsdiepte (die, zoals voorgesteld door Rijtema, wordt uitgedrukt in termen van de dikte van de "effectieve" wortelzone waarin zich 80% van de wortels bevindt) is voor fase II geschat op basis van de gegevens van afb. 2 t/m 5. De A-horizonten en de B- of een deel van de B-horizonten en soms het bovenste deel van de C-horizonten, behoren tot de effectieve wortelzone. Op basis van al deze gegevens is tabel 1 samengesteld.

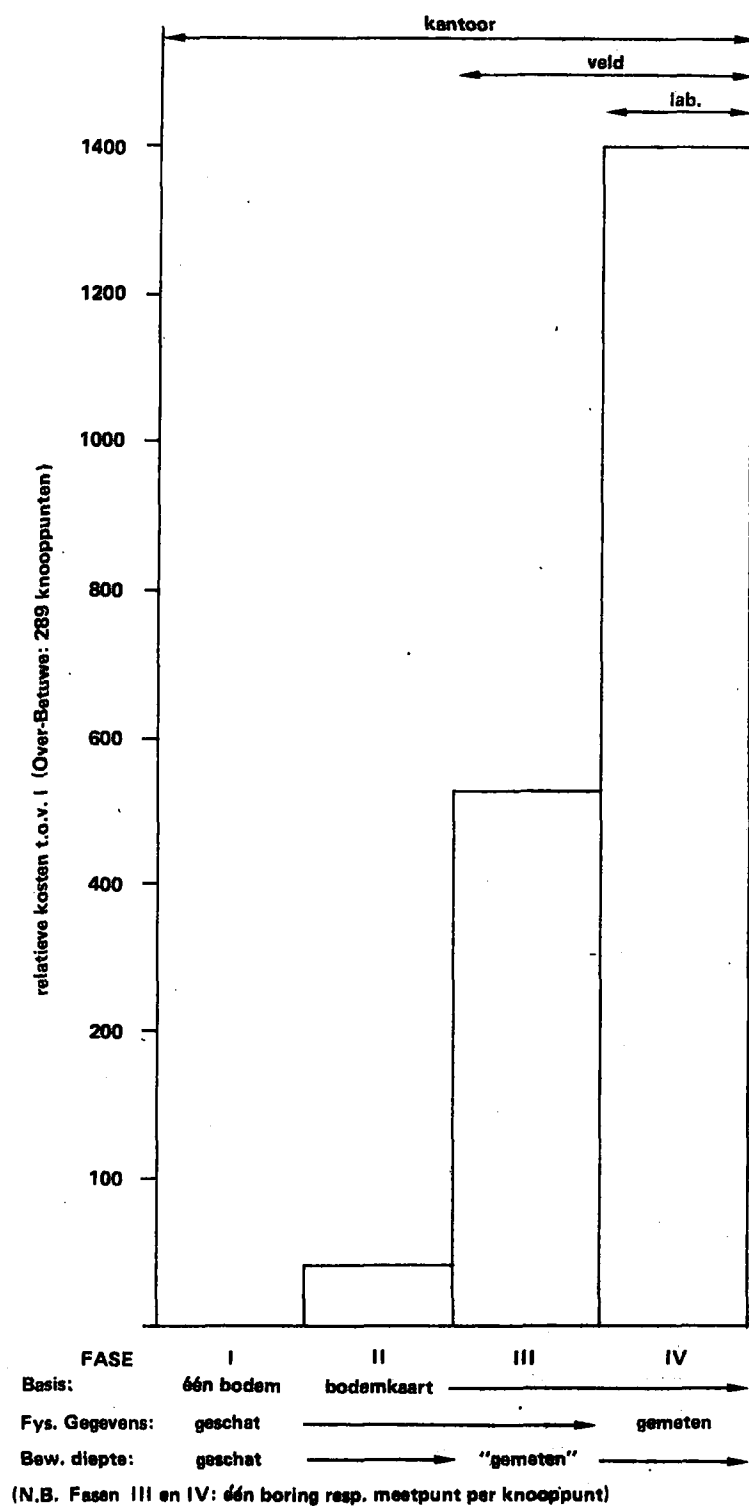
In fase III wordt in het veld één boring uitgevoerd per 25 ha groot representatief oppervlak, in de meest voorkomende bodemeenheid zoals afgelezen van de bodemkaart. De resultaten van deze waarnemingen, waarbij opnieuw op basis van in hoofdzaak textuurschattingen, pF- en K- Ψ gegevens worden geschat, zijn gegeven door Van Holst e.a. (1974). Deze gegevens hebben de basis gevormd voor de simulatie met GELGAM. Boringen voor bodemkartering verschaffen over het algemeen gegevens tot een diepte van ten hoogste 120 cm - mv., terwijl in fase III in het kader van dit project vaak dieper is geboord. Dit met als doel wat inzicht in de dieper gelegen lagen te verkrijgen. Wel moet reeds nu worden opgemerkt dat de ene boring per knooppunt nogal beperkt is. Het gevaar bestaat dat de resultaten van één boring als representatief voor een knooppunt worden beschouwd, terwijl meerdere boringen mogelijk een zekere variatie zouden kunnen aantonen binnen het knooppuntsoppervlak (zie hoofdstuk 4). De voor de vijf knooppunten op basis van één boring gekozen gegevens voor fase III zijn samengevat in tabel 1. Ten opzichte van fase II zijn er enkele verschillen. De bodemeenheden zijn uiteraard voor ieder knooppunt hetzelfde omdat de grootste bodemeenheid per representatief oppervlak is gekozen. De schatting van de pF-curve bovengrond was kennelijk op basis van de bodemkaartgegevens al vrij nauwkeurig want waarnemingen ter plaats gaven geen aanleiding de eerdere schatting te herzien. Anders was dit voor de ondergrond, waar voor alle knooppunten andere pF- of K- Ψ gegevens werden geschat op basis van de per boorpunt waargenomen texturen. De bewortelingsdiepten zijn in deze fase waargenomen, voor zover dit gezien de optredende variatie mogelijk is. In fase II heeft bodemeenheid tZg45 uiteraard een constante bewortelingsdiepte, zoals geschat vanuit de standaardbeschrijving van deze bodemeenheid. In fase III zijn verschillende waarden ingevoerd voor knooppunten 70 en 95 op basis van veldwaarnemingen. De op grond van de standaardprofielbeschrijving geschatte bewortelingsdiepte van 95 cm voor knooppunt 73 (E53: zwarte enkeerdgrond) werd op basis van de veldwaarnemingen verlaagd tot 85 cm. In de verdere discussie tot hoofdstuk 4 wordt uitgegaan van de hier vermelde procedure waarbij in fase III één boring per knooppunt is verricht. In hoofdstuk 4 wordt de betrouwbaarheid van deze procedure nader geanalyseerd op basis van een groter aantal boringen dat in april 1979 is verricht voor de vijf knooppunten. Deze boringen geven een beter beeld van de optredende variatie en maken een meer realistische evaluatie mogelijk van fase II.

In fase IV, tenslotte, wordt, voortbouwend op fase III, het accent gelegd op het meten van de benodigde fysische bodemkarakteristieken, in plaats van het schatten door middel van standaardreeksen (fasen I t/m III). Uiteraard zijn standaardreeksen verkregen door metingen elders. Naarmate elders meer metingen zijn verricht neemt de kans toe dat redelijke schattingen kunnen worden gemaakt van pF- en K- Ψ gegevens voor identieke gronden waar niet gemeten is. Metingen in het kader van fase IV houden in dat er zowel pF- als K- Ψ waarden worden bepaald. Van speciaal belang hierbij

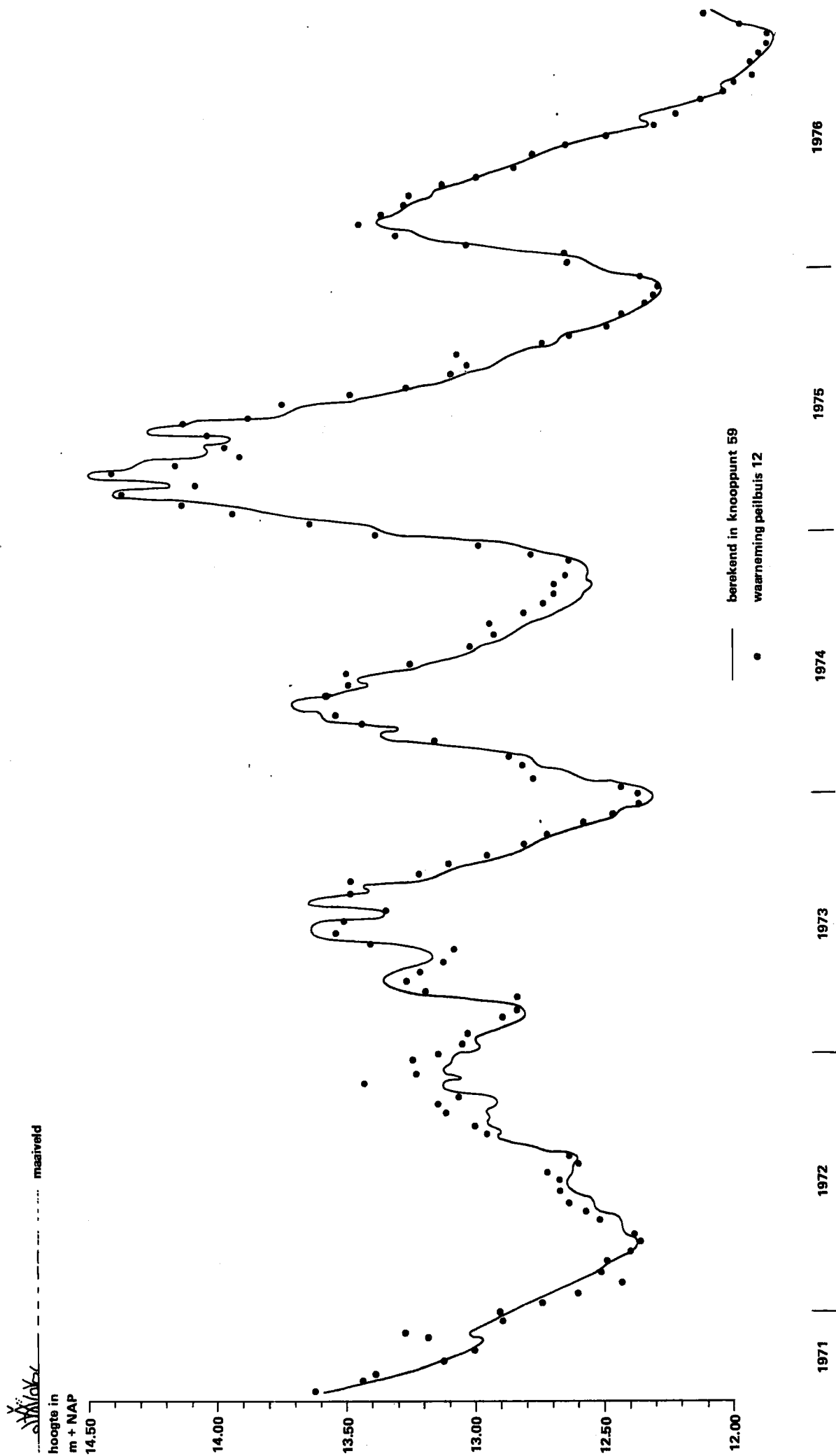
zijn de metingen in de diepere ondergrond. Het model GELGAM gebruikt in ieder knooppunt voor het oplossen van de flux door de onderzijde van de wortelzone één van de drie $K-\Psi$ relaties aangeduid met L1, L2 en L3 (zie hoofdstuk 5). Iedere $K-\Psi$ relatie is gecombineerd met twee pF-curven. Voor een laag van 50 cm juist onder de wortelzone geldt de curve van Van Holst e.a. (1974), daaronder geldt voor alle knooppunten een zelfde (gemeten) curve. Indien de stroming in de onverzadigde ondergrond bij benadering constant is met de diepte, wordt met de oplossing van de flux aan de bovenzijde tevens de flux ter hoogte van het phreatisch vlak gevonden. Voor een situatie met capillaire opstijging en een neerwaarts gerichte flux aan de onderzijde van het profiel, moet deze laatste afzonderlijk worden opgelost. Bepalend voor de grootte van deze flux is de $K-\theta$ relatie op grotere diepte. Hiervoor is een diepte groter dan $W + 50$ cm gekozen, waarbij W = bewortelingsdiepte. De uit gemeten $K-\Psi$ en $\theta-\Psi$ afgeleide $K-\theta$ relatie geldt voor het gehele gebied.

De fasenbenadering is, zoals reeds gesteld, vooral van belang op basis van economische overwegingen. Getracht is daarom de relatieve kosten van de te volgen procedures in de verschillende fasen te schatten. Uit afb. 6 (die is afgeleid van de projectboekhouding voor gebied Over-Betuwe) blijkt dat de kosten zeer sterk toenemen naarmate er veld- en laboratoriumwerkzaamheden nodig zijn.

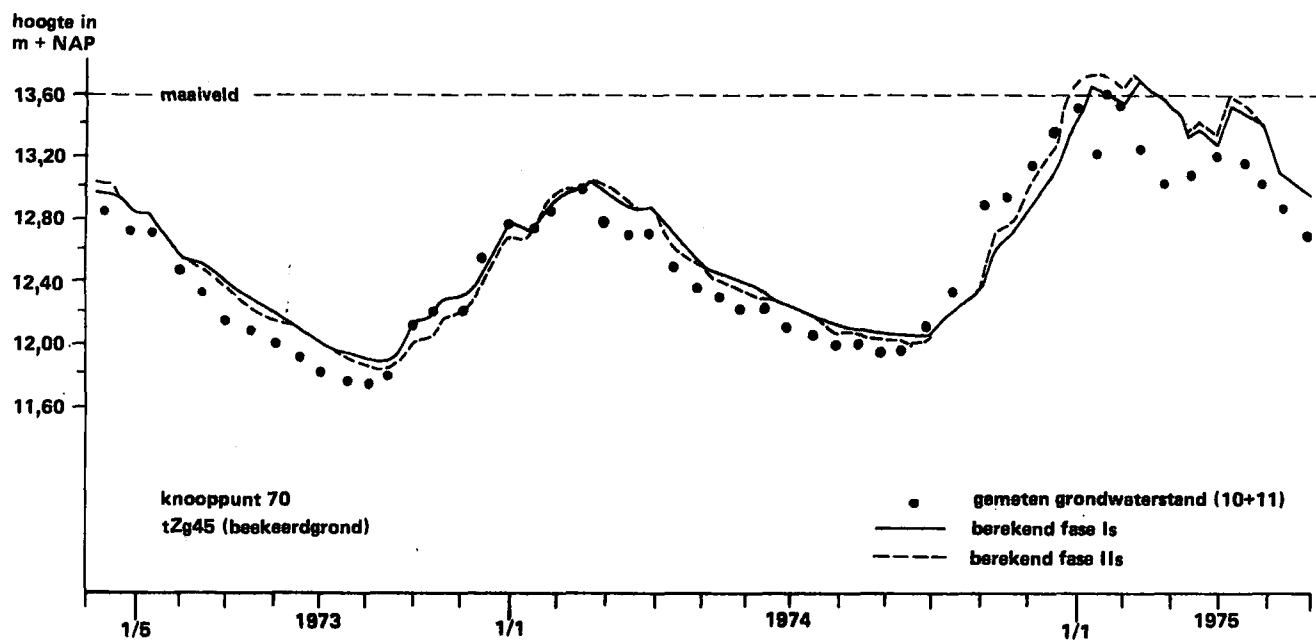
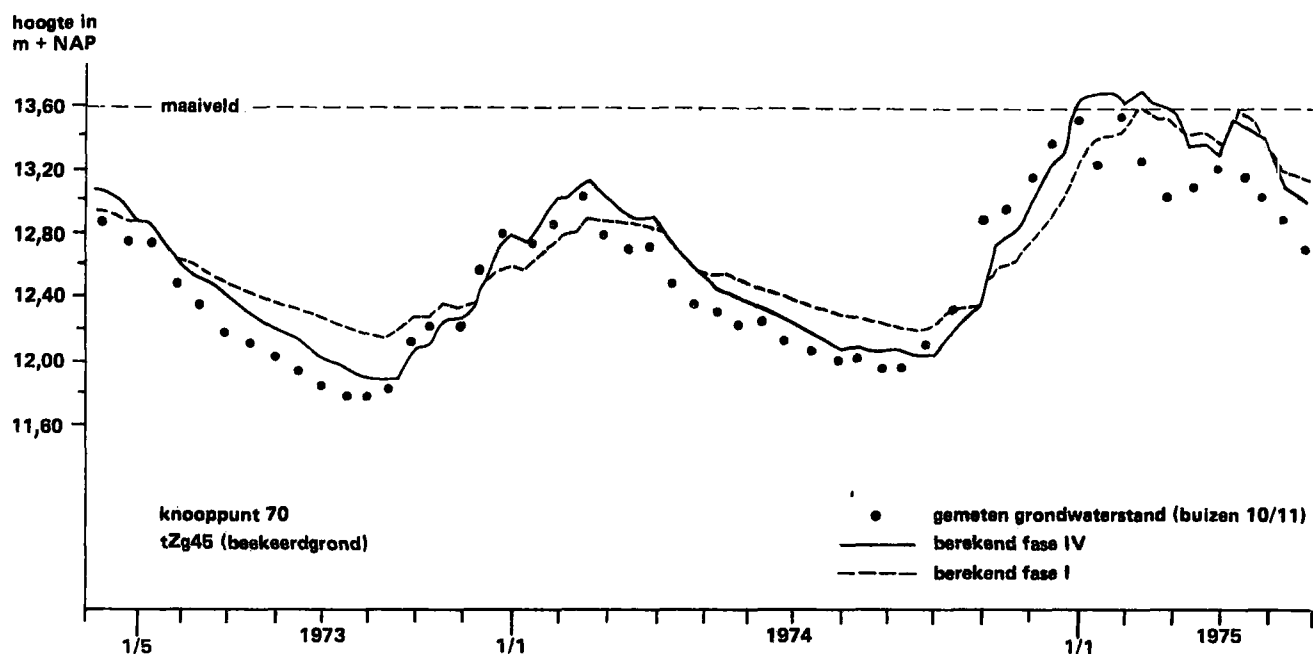
Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat alleen resultaten zijn berekend voor ieder knooppunt op basis van de volgens de bodemkaart meest voorkomende bodemeenheid. Het oorspronkelijke plan om de berekeningen per knooppunt ook toe te passen voor de bodemeenheid die precies op het knooppunt voorkwam, is niet uitgevoerd. Het verschil met de nu gevolgde procedure bestaat uit het planimetrezen van de binnen het representatief oppervlak op de bodemkaart voorkomende eenheden. Dit neemt relatief gezien weinig tijd, waardoor de nu gevolgde procedure het meest zinvol lijkt, omdat uiteindelijk uitspraken over een oppervlak van 25 ha worden gedaan.



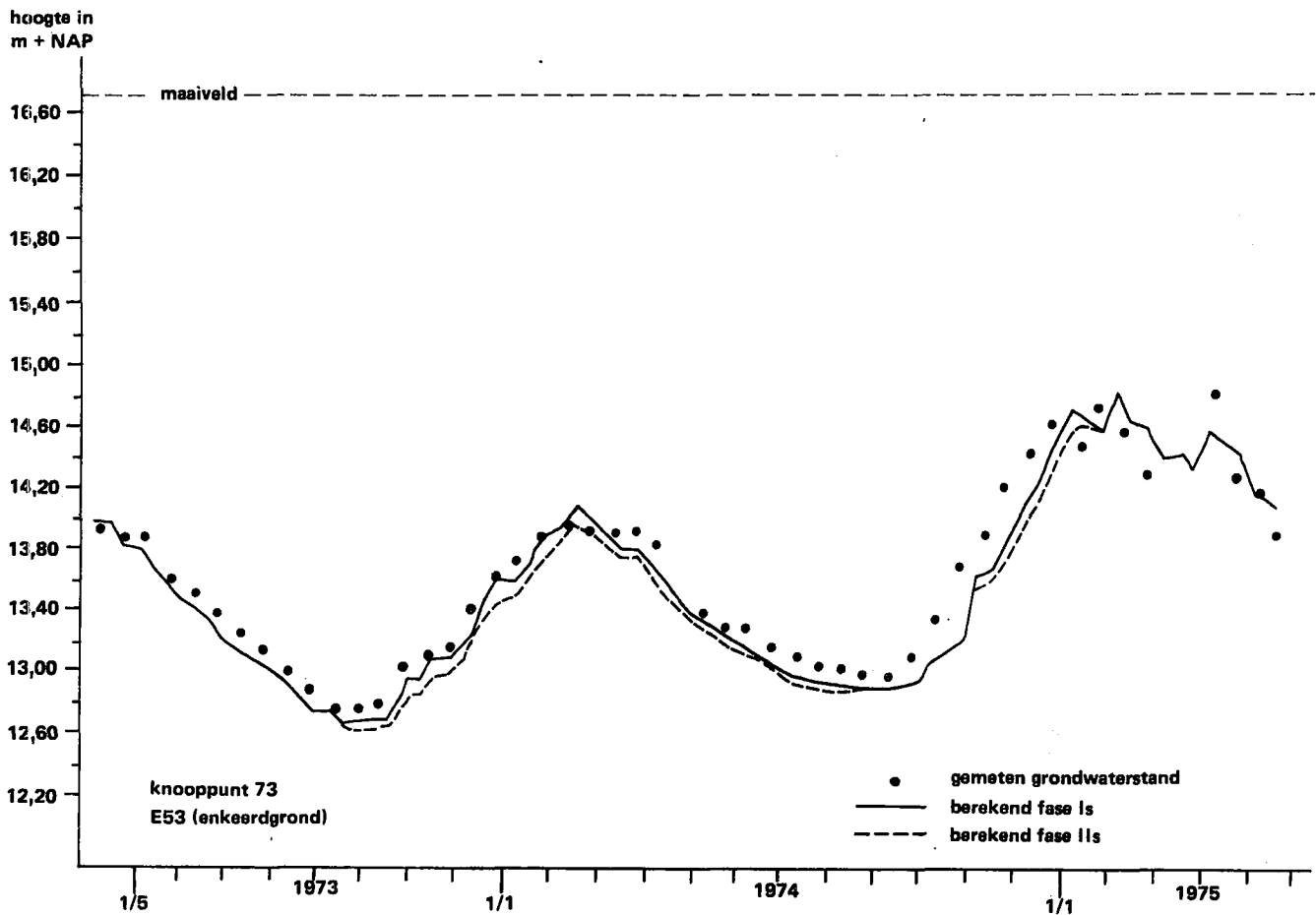
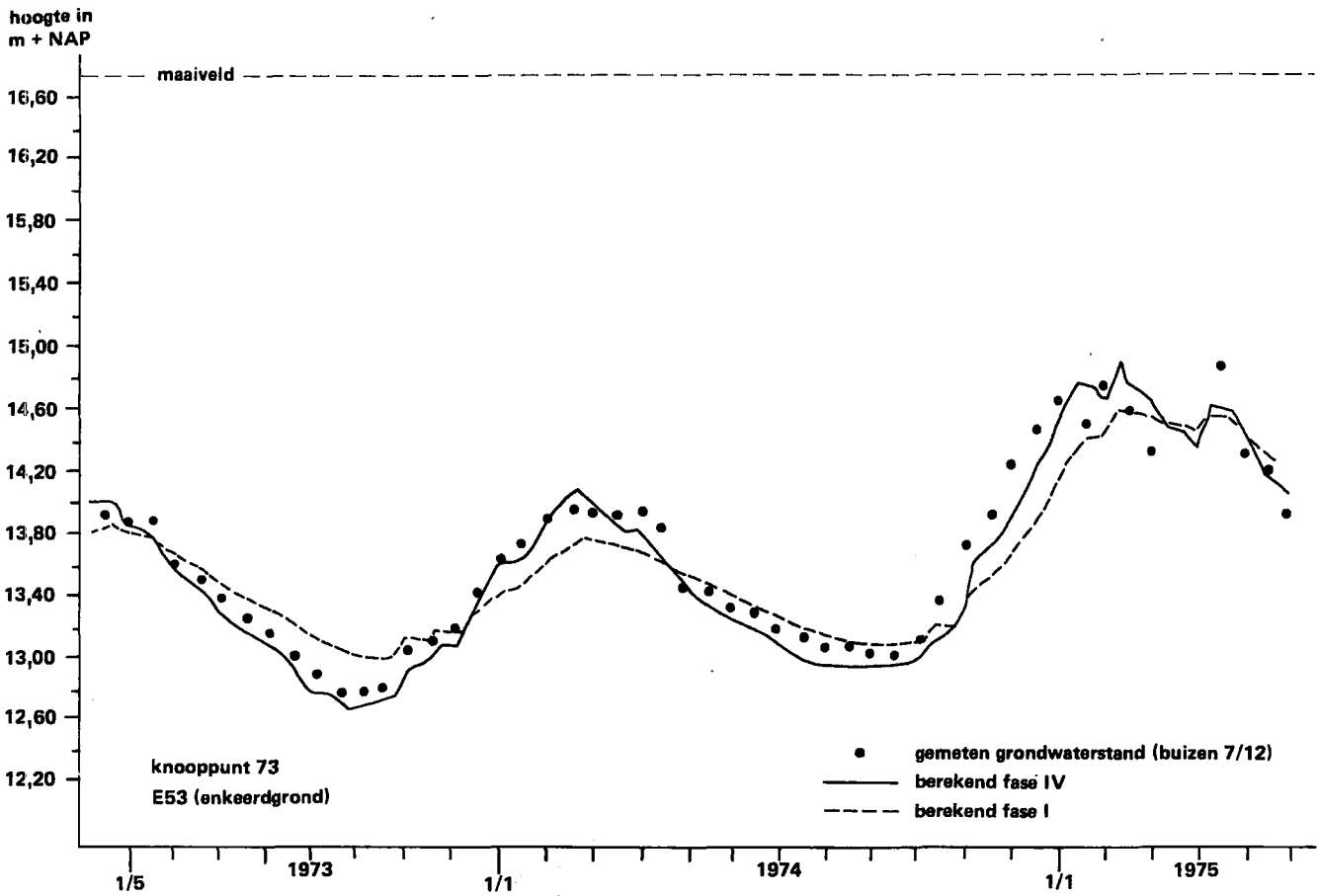
Afb. 6 Relatieve kosten van gegevensverzameling in de fasen I t/m IV en samenvatting van de procedures behorend bij de verschillende fasen



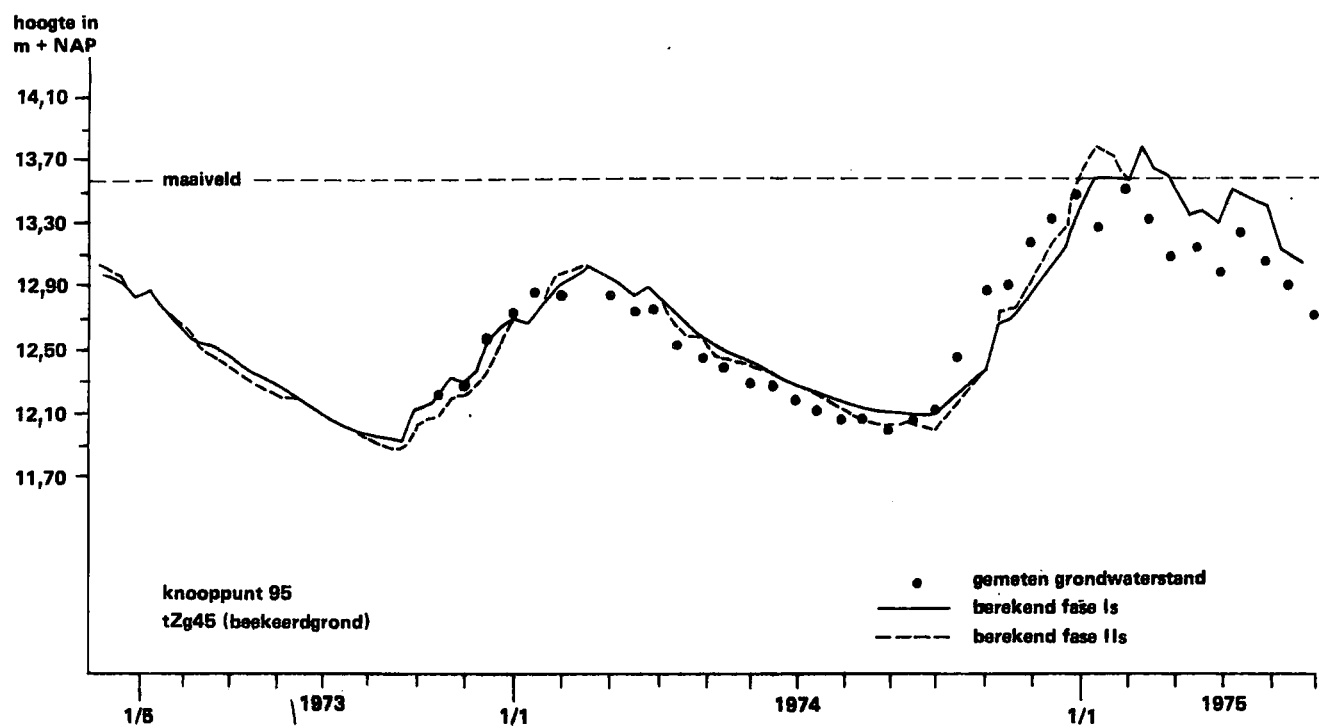
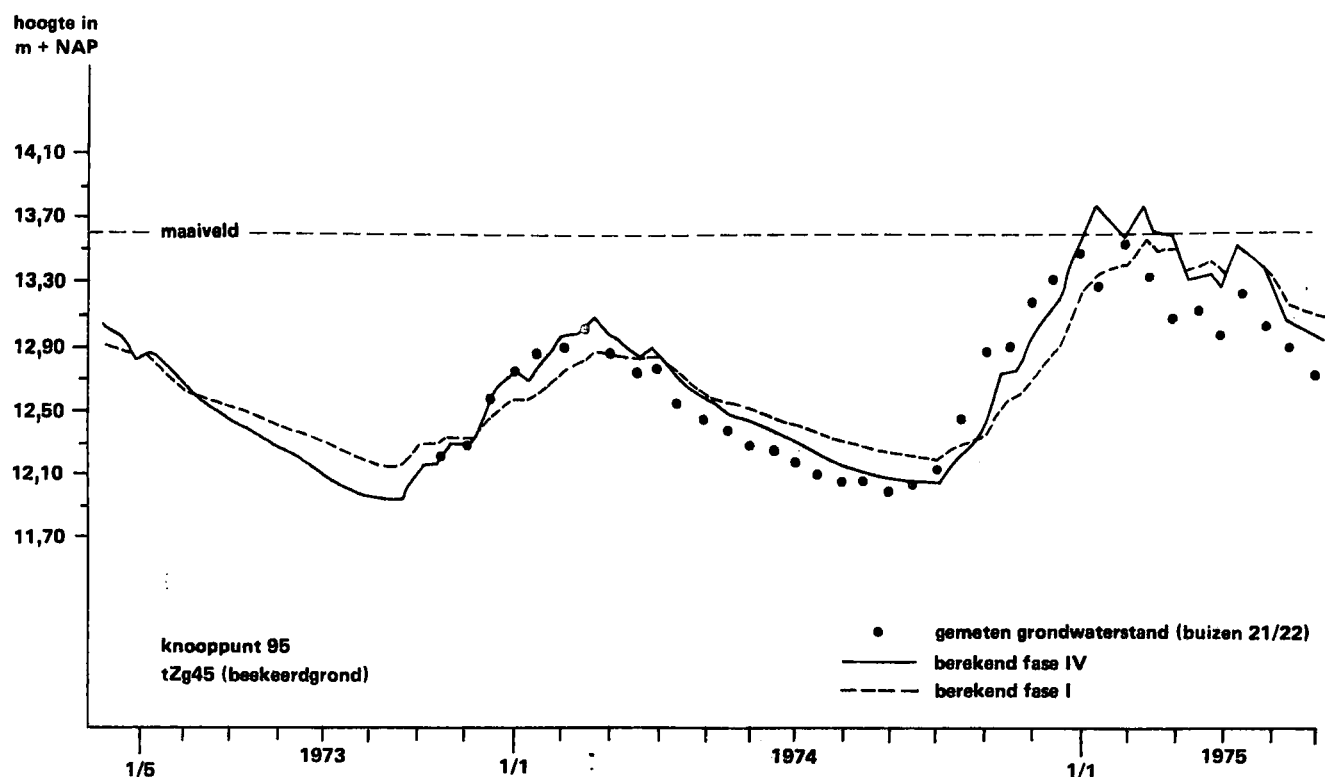
Afb. 7 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor een meerjarige periode (ontleend aan De Laat en Awater, 1979).



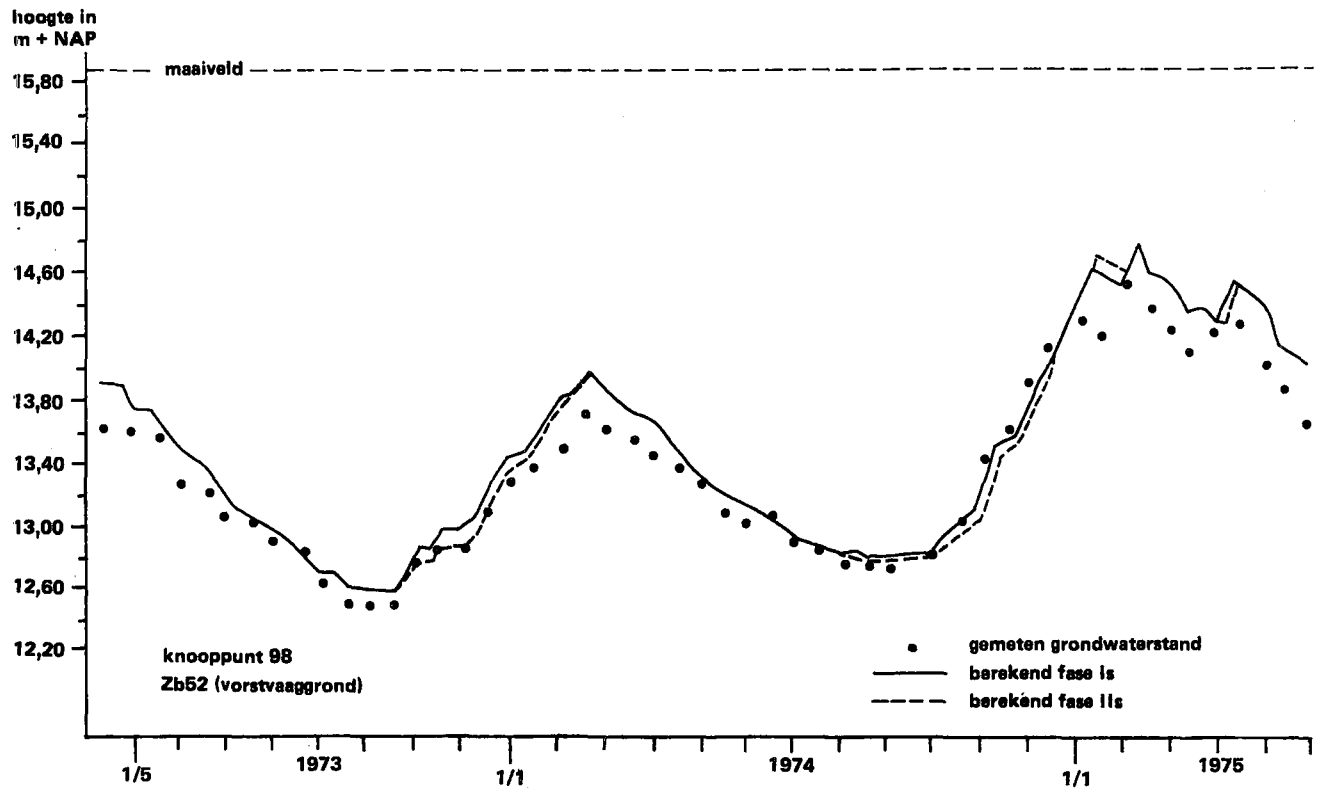
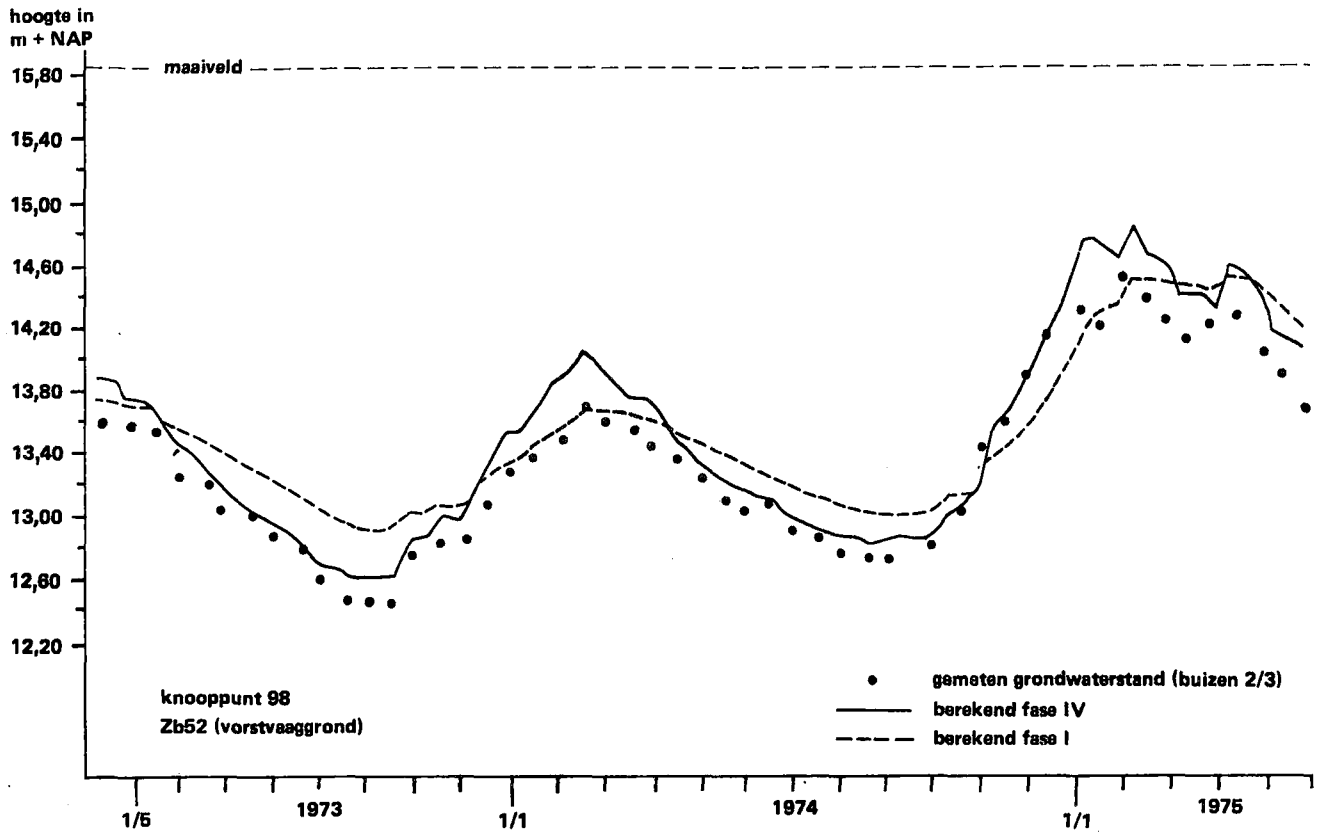
Afb. 8 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 70.



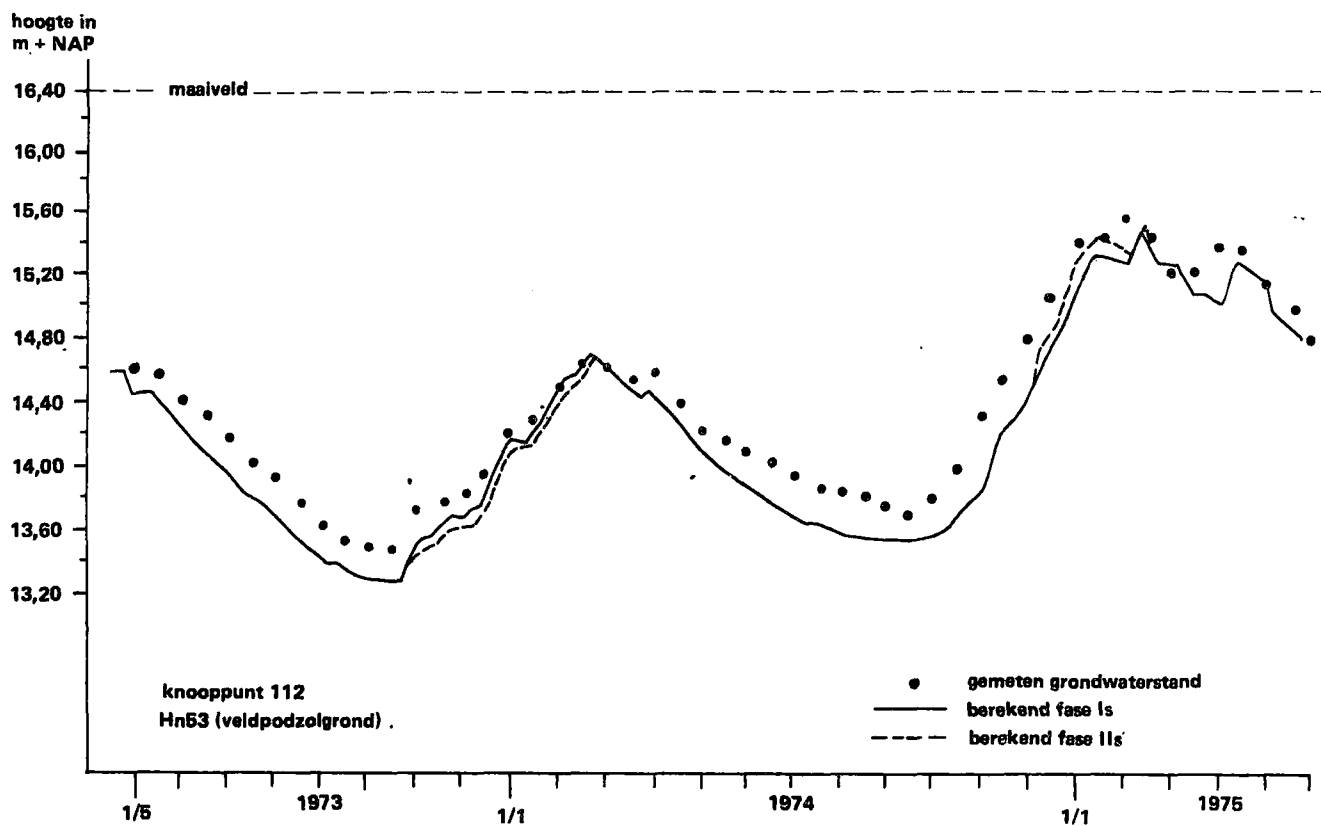
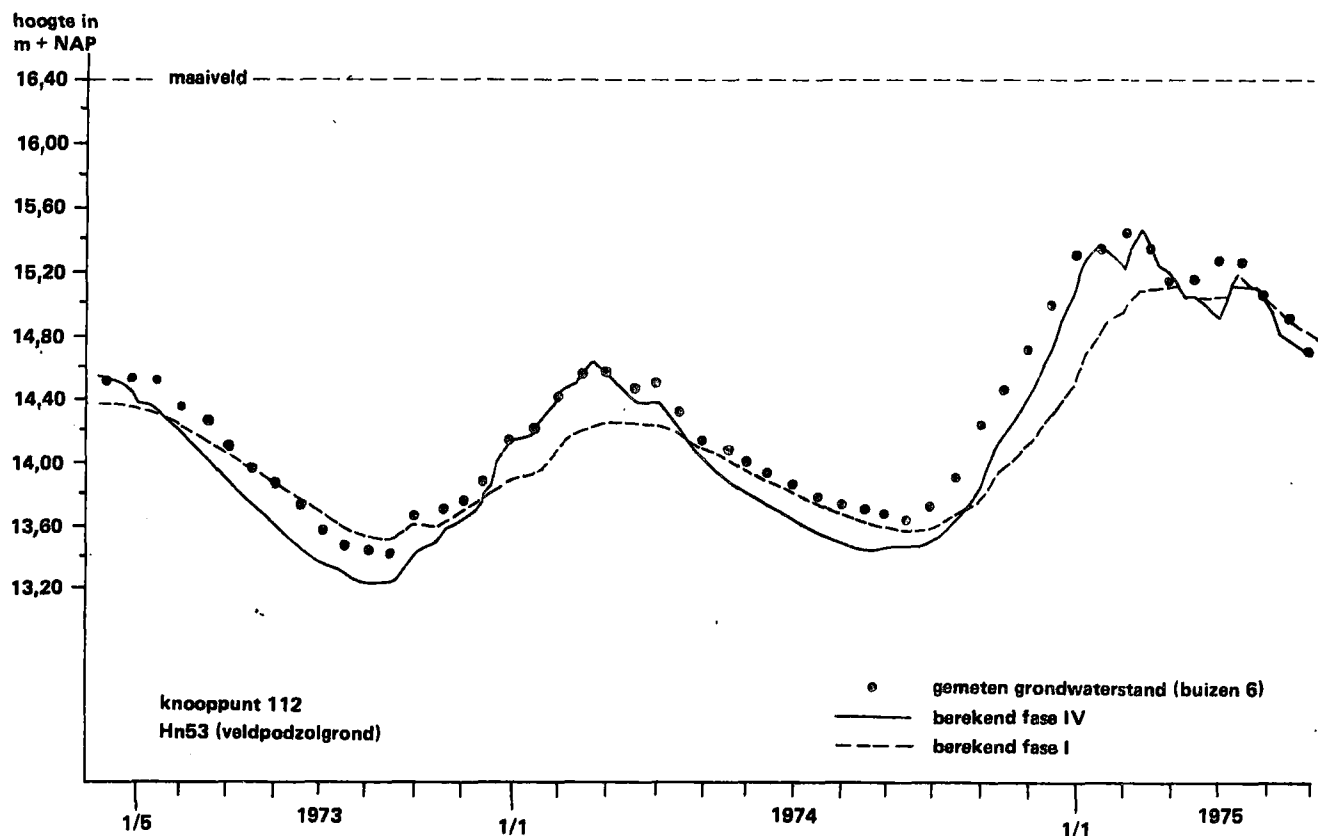
Afb. 9 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 73.



Afb. 10 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 95.



Afb. 11 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 98.



Afb. 12 Gemeten en berekende grondwaterstanden voor verschillende fasen voor knooppunt 112.

3. RESULTATEN

3.1 Toetsing van simulatieresultaten

Toetsing of verificatie van simulatieresultaten gebeurt veelal met behulp van gemeten afvoeren of grondwaterstanden, die veel gemakkelijker zijn te meten dan andere componenten van de waterbalans. In het gebied 't Klooster zijn in dit verband de waterstanden in verschillende grondwaterstandsbuizen gemeten gedurende de onderzoeksperiode. De locaties van de buizen staan weergegeven in afb. 1. De Laat en Awater (1978) presenteren een afbeelding (hier gereproduceerd als afb. 7) die de berekende grondwaterstand (fase IV) toont voor knooppunt 59 gedurende enkele jaren en de gemeten waarden voor de vlak daarbij gelegen grondwaterstandsbuis no. 12 (afb. 1). Toetsing van berekende en gemeten waarden kan visueel geschieden, maar ook bijvoorbeeld door middel van zgn. efficiency factoren (E in %) die nader door De Laat en Awater in hun rapport zijn toegelicht. Omdat efficiency factoren helaas niet zijn bepaald voor de verschillende fasen die in dit rapport worden onderscheiden, zal hier slechts een visuele vergelijking van gemeten en berekende waarden kunnen worden gegeven. Visueel blijkt uit afb. 7 dat de berekende waterstand in slechts acht gevallen ongeveer 20 cm afwijkt van de waargenomen stijghoogte, terwijl in achttien gevallen de afwijking ongeveer 10 cm is, op een totaal van 137 waarnemingen. Nu is de grondwaterstand op zichzelf niet het meest interessante produkt van de simulatie, die in de praktijk ondermeer gericht zal zijn op het bepalen van eventuele landbouwschade die een gevolg is van grondwaterstandsverlagingen. Berekenende verdampingen kunnen echter veel minder goed worden vergeleken met gemeten waarden dan grondwaterstanden, omdat meting veel moeilijker is. De door De Laat en Awater gevolgde procedure houdt daarom in dat de resultaten van berekeningen voor andere factoren dan de grondwaterstand (zoals verdamping, etc.), worden getoetst ten opzichte van berekenende resultaten in die fase waarbij voor de grondwaterstanden de beste resultaten werden verkregen. Aangenomen wordt dus in feite dat wanneer de resultaten voor de grondwaterstandssimulatie relatief goed zijn, zij ook voor de andere factoren goed zullen zijn.

3.2 Een vergelijking van de verschillende fasen op basis van gemeten en berekende grondwaterstanden

3.2.1 Resultaten zonder meetgegevens voor de diepere ondergrond

Door De Laat en Awater zijn voor de testperiode 1973-1975 de waterstanden voor alle knooppunten uitgerekend. In dit rapport zal het accent liggen op de vijf reeds genoemde knooppunten 70, 73, 95, 98 en 112. De resultaten zijn samengevat in de afbeeldingen 8 t/m 12, waarbij ten behoeve van de verificatie voor de vijf knooppunten de (gemiddelde) gemeten waterstanden zijn gebruikt in de buizen 10 en 11, 12 en 7, 22 en 21, 2 en 3 en 6 respectievelijk (zie afb. 1).

Voor de vijf punten afzonderlijk zijn de resultaten van fase I onbevredigend (afb. 8 t/m 12). Afwijkingen tussen berekende en gemeten grondwaterstanden waren vaak groter dan 40 cm. Gegevens verzameld in het kader van fase II en III gaven geen significante verbetering te zien van deze resultaten, die waren gebaseerd op het invoeren van een geschatte pF-curve voor zowel de boven- als de ondergrond, één geschatte K- ψ relatie voor de ondergrond en een effectieve bewortelingsdiepte (geschat t/m fase II, "bepaald" in het veld in fase III). Resultaten voor fase II en III zijn niet grafisch weergegeven omdat ze in essentie identiek zijn aan die van fase I. Een grote verbetering van de resultaten trad pas op bij fase IV, waarbij ondermeer metingen van pF en K- ψ werden verricht in de diepere ondergrond (zie afb. 8 t/m 12). Metingen aan monsters uit de diepere ondergrond (1,50 m - maaiveld) die, in het kader van de voorgestelde fasering worden gerekend tot fase IV, toonden aan dat de dichtere pakking van de zandkorrels in de ondergrond resulteerde in andere pF- en K- ψ relaties dan die voor de ondergrond direct beneden de doorwortelde zone. De voor de

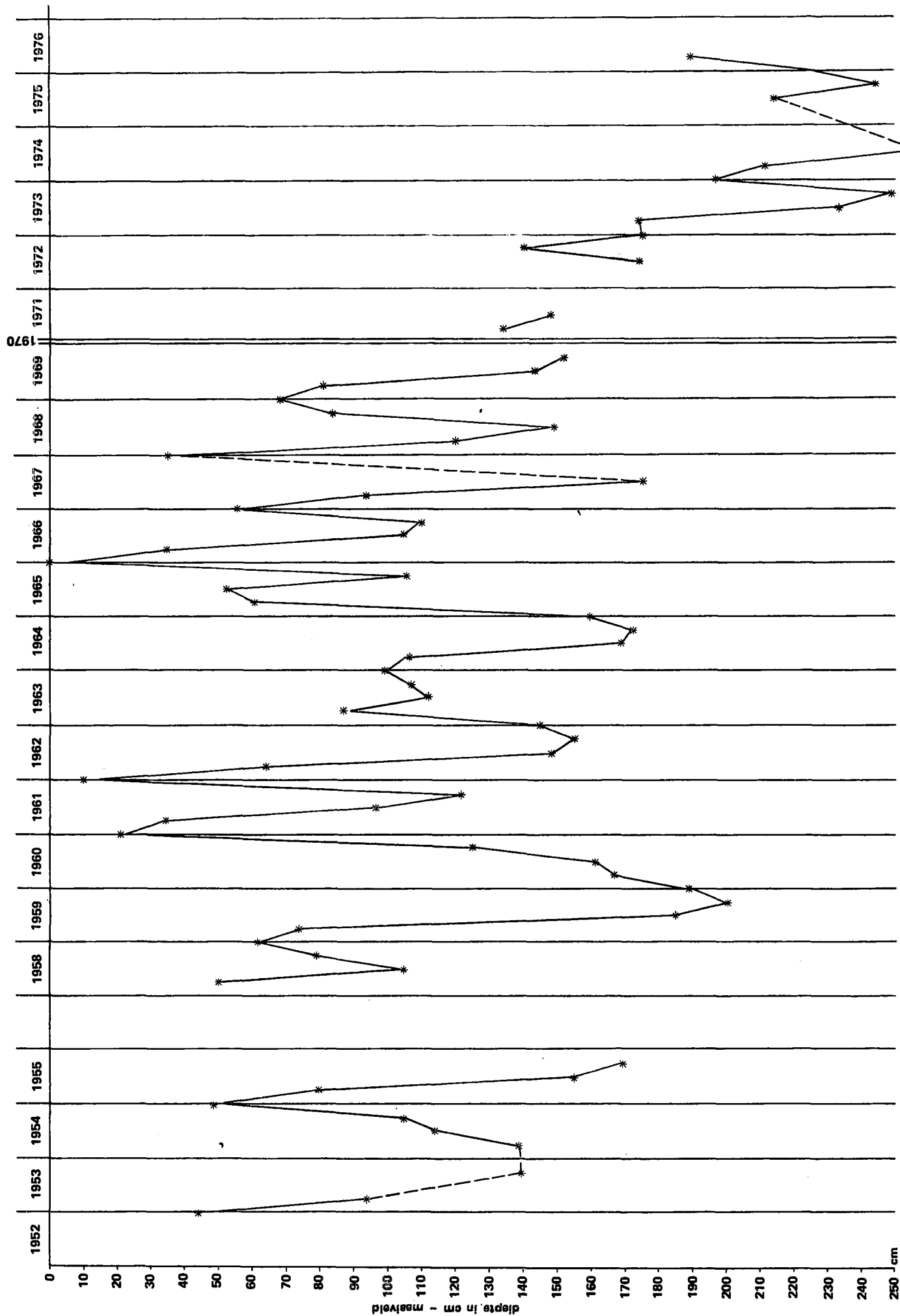
diepere lagen gemeten lagere bergingscapaciteit resulteerde in sterkere fluctuaties van de grondwaterstand bij dezelfde flux. (Deze gegevens worden afzonderlijk gepresenteerd en toegelicht in hoofdstuk 5). Profielonderzoek suggereerde dat deze, van de standaardreeks-Rijtema afwijkende, waarden zouden moeten worden toegepast vanaf ongeveer 50 cm beneden de doorwortelde zone en dieper. Dit is in fase IV dan ook gebeurd (zie tabel 1). Zoals reeds gesteld, zijn de GELGAM resultaten voor fase IV goed te noemen. De in de afbeeldingen 8 t/m 12 getoonde berekende grondwaterstanden voor het knooppunt komen inderdaad redelijk overeen met de gemeten waarden in nabij gelegen waterstandsbuizen die zijn toegerekend naar het knooppunt (De Laat en Awater, 1979). Wel valt op dat de verschillen toch vaak wel 5 à 15 cm zijn. Dit resultaat lijkt op zichzelf het maximaal haalbare, gezien alle aanwezige foutenbronnen en het toch altijd globale karakter van de schattingen, die betrekking hebben op eigenschappen van vlakken. Weliswaar zijn deze schattingen gebaseerd op puntmetingen, maar het is niet reëel daar teveel absolute waarde aan te hechten gezien het feit dat eigenschappen van vlakken in principe in termen van puntenzwermen en niet als lijnen moeten worden uitgedrukt.

De toetsing van de berekende resultaten in de verschillende fasen wordt hier verricht aan de hand van de gemeten grondwaterstanden. Dit lijkt zinnvoller te zijn dan een toetsing aan de hand van de rekenresultaten van één van de fasen (b.v. fase IV), omdat dan een op zichzelf al van de "werkelijkheid" afwijkend gegeven als een soort absolute maatstaf wordt gehanteerd. Dit kan bij onzorgvuldige interpretatie tot misverstanden leiden.

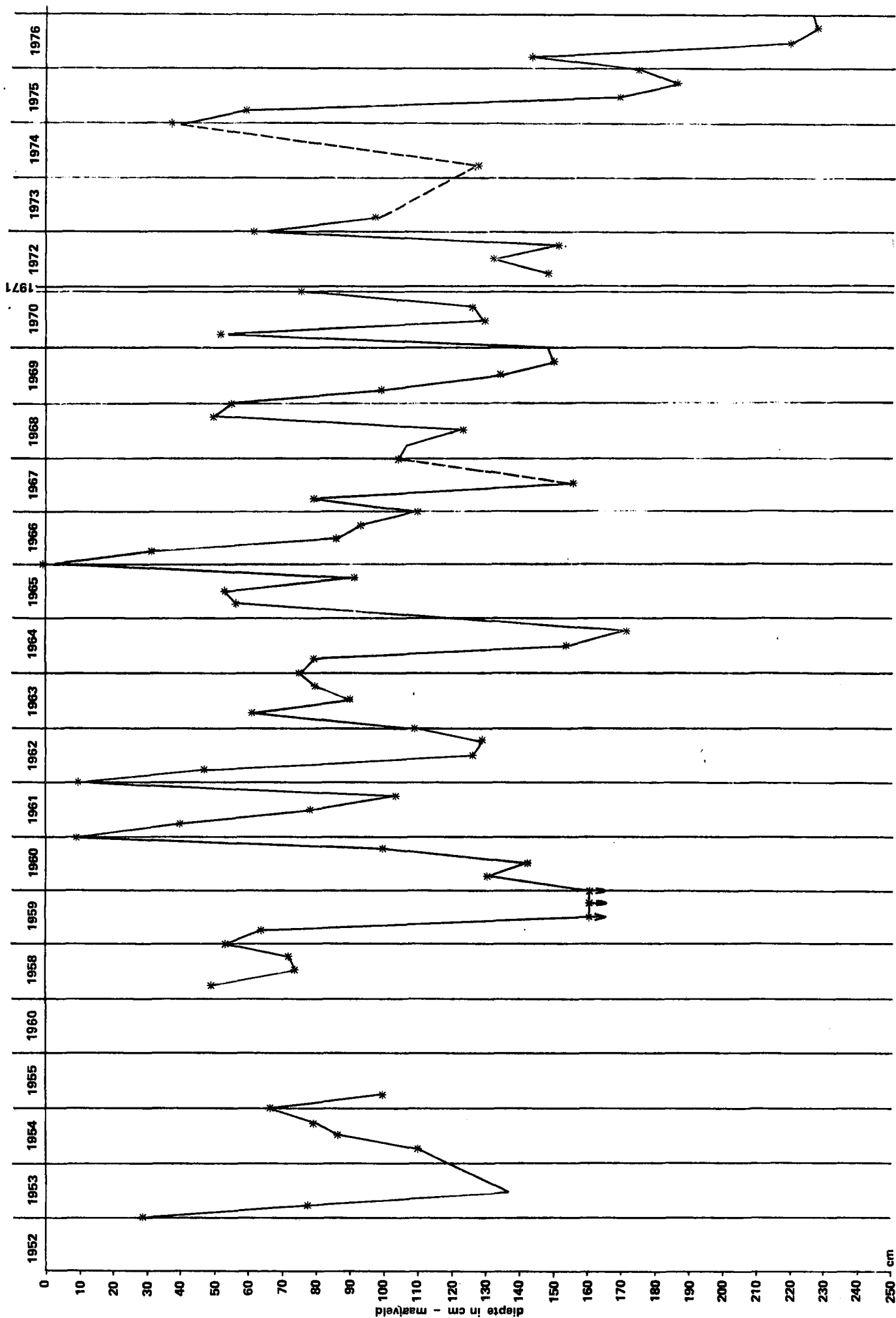
De in dit hoofdstuk geformuleerde conclusie dat de resultaten van fase IV het beste zijn zou kunnen resulteren in de meer algemene conclusie dat boringen in de meest voorkomende bodemeenheid per knooppunt en meting per knooppunt van pF- en K- Ψ curven (zonnodig in meerdere lagen) nodig zijn om aanvaardbare basisgegevens voor GELGAM te verkrijgen. Dit immers definieert fase IV. De bodemkaart zou in dit verband alleen worden gebruikt om de grootste bodemeenheid voor ieder knooppunt vast te stellen. Genoemde procedure zou zeer kostbaar zijn, zoals al werd geïllustreerd in afb. 6, waar de relatieve kosten van de te volgen procedures in de verschillende fasen werden weergegeven. Arbeidsintensief veld- en laboratoriumwerk verhoogt de kosten sterk. Een praktische vraag blijft dus of, met name, de bodemkaart toch niet wat uitgebreider kan worden toegepast. Bijvoorbeeld, het meten van pF- en K- Ψ waarden, zoals besproken, heeft betrekking op een tweelagig systeem in de ondergrond, waarbij de grondwaterstandsschommeling zich in hoofdzaak afspeelt in de diepere ondergrond waarvoor een pF- en K- Ψ relatie werd gemeten. Op grond van deze overweging werd besloten de gevoeligheidsanalyse van fasen I t/m IV te herhalen, maar dan uitgaande van een uit twee lagen bestaande ondergrond onder de effectieve wortelzone (Nummering: Is t/m IIIs, zie tabel 1). Hierbij wordt dus de laag die begint op 50 cm beneden de onderkant van de wortelzone, gekarakteriseerd door de gemeten pF-relatie (hoofdstuk 5). Verder wordt de neerwaartse waterbeweging in de diepere ondergrond met de gemeten K- θ relatie beschreven (De Laat en Awater, 1979). Oorspronkelijk was het de bedoeling om in de fasen I t/m III uit te gaan van de door Rijtema gegeven K- Ψ waarden (R1, R2, R3, zie hoofdstuk 5) omdat deze de al bestaande reeks vormden. Bij de simulatie zijn deze waarden echter alleen gebruikt voor fase I (zie tabel 1). Voor fasen Is, II, IIs, III en IIIs zijn de op metingen in de omgeving gebaseerde L1, L2 en L3 relaties gebruikt (zie tabel 1 en hoofdstuk 5). Hierdoor is IIIs identiek aan IV. Om een consistent betoog te verkrijgen is de codering 1 t/m IV gehandhaafd (zie tabel 1).

3.2.2 Het model met meetgegevens voor de diepere ondergrond

De verkregen resultaten voor fase Is zijn in alle gevallen verrassend goed, zoals blijkt uit de grafieken in de afbeeldingen 8 t/m 12. Dit betekent dat een homogeen bodemprofiel (Veldpodzolgronden: Hn53) voor alle elementen met overal dezelfde pF- en K- Ψ relaties, goede resultaten levert bij het berekenen van de grondwaterstand. Later zal blijken dat dit niet geldt voor de berekende verdamping, een praktisch gezien veelal belangrijker gegeven. De resultaten voor fase IIs, waarbij dus niet dezelfde bodem-



Afb. 13 Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode nabij het pompstation (buis 19, zie afb. 1).



Afb. 14 Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode aan de rand van het onttrekkingsgebied van het pompstation

eenheid voor alle elementen wordt ingevoerd maar de op de bodemkaart waargenomen bodemeenheid die het grootste oppervlak inneemt binnen het representatief oppervlak rond het knooppunt, zijn in essentie identiek aan die voor fase Is (afb. 8 t/m 12). De bodemeenheid heeft in dit gebied weinig invloed op de berekende grondwaterstand. Het niveau van de waterstand wordt, in zijn algemeenheid bepaald door aan- en afvoer vanuit de onder- en bovengrond. In de zomer is er in dit gebied duidelijk sprake van wegzijgingsprofielen (De Laat en Awater, 1979), met een duidelijke neerwaartse afvoer. Deze is uiteraard afhankelijk van de voorkomende bodemeenheden. Daarnaast resulteert capillaire opstijging vanuit het grondwater naar de onderkant van de wortelzone in principe in een daling van de waterstand, die niet optreedt wanneer genoemde afstand groot is, en de opstijging te verwaarlozen is. In dit geval spreken we, zoals bekend, van "hangwaterprofielen". Op basis van de in hoofdstuk 5 (afb. 23) gegeven stijgcurven en de getoonde grondwaterstanden in de afbeeldingen 8 t/m 12, moet worden geconcludeerd dat alleen de knooppunten 70 en 95 als duidelijke niet hangwaterprofielen (grondwaterprofielen) kunnen worden beschouwd. In de overige drie knooppunten is de afstand tussen grondwater en onderkant wortelzone groot en biedt deze slechts de mogelijkheid voor geringe capillaire opstijging. Binnen het onttrekkingsgebied zijn 28 peilbuizen geanalyseerd waaruit bleek dat 66% van de bijbehorende profielen als "hangwaterprofielen" moeten worden beschouwd. De in dit gebied waargenomen diepe grondwaterstanden zijn een gevolg van een aantal factoren zoals goede ontwateringstoestand, de weersomstandigheden in de beginjaren '70 en grondwateronttrekking door het pompstation sinds 1966. Voor dit verslag is alleen de waarneming relevant dat op dit moment de waterstanden relatief diep zijn. Op de oorzaken, die door Bloemen (1973) nader zijn geanalyseerd, wordt hier niet verder ingegaan. De daling van de grondwaterstand, vergeleken met de toestand in de jaren vijftig en zestig, is voor een drietal punten ter illustratie weer gegeven in de afbeeldingen 13 t/m 15. De oude toestand vóór het begin van de onttrekking in 1966 is voor de drie waterstandsbuizen gebaseerd op gegevens van het archief voor grondwaterstanden. Besproken is nu de zomersituatie uitgaande van een verdampingsoverschot. In de winterperiode en in natte perioden in de zomer met een neerslagoverschot, treedt voeding op van het grondwater vanuit de bovengrond. Een diepere, meer vochthoudende bovengrond kan meer water vasthouden, waardoor minder water naar het grondwater stroomt. In dit geval zou een duidelijk effect van de bodemeenheid op de grondwaterstand aanwezig moeten zijn. Inderdaad kan uit de afbeeldingen 8 t/m 12 worden geconcludeerd dat bij de stijgende grondwaterstanden in de winter over het algemeen de grondwaterniveaus voor fase IIs wat hoger zijn dan die voor Is, wanneer de bewortelingsdiepten geringer zijn (zie knooppunten 70, 95). Het omgekeerde treedt op bij knooppunt 73 waar de bewortelingsdiepte groter is voor fase IIs. Overigens zijn deze verschillen uiterst gering en alleen van academisch belang. De hoofdconclusie blijft dat berekende grondwaterstanden in dit gebied blijkbaar zeer weinig afhankelijk zijn van de voorkomende bodemeenheid. Zij kunnen met GELGAM vrij nauwkeurig worden berekend.

3.3 Een vergelijking van de verschillende fasen op basis van berekende verdamping en equivalent opbrengsten

De door De Laat en Awater uitgevoerde simulatieberekeningen zullen ondermeer in de praktijk worden toegepast bij het schatten van eventuele landbouwkundige schade die een gevolg is van grondwateronttrekking ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Niet de door het model berekende grondwaterstanden, maar de berekende verdamping en de daarmee samenhangende (equivalent) produkties zijn praktisch het meest van belang. Zoals reeds gesteld, is het moeilijk om berekende verdamping in een gegeven jaar experimenteel te verifiëren. Dit zou wel kunnen gebeuren met behulp van gemeten produkties, maar dit houdt zeer veel werk in en is in het kader van de hier geschetste methodiek niet haalbaar. Vandaar de door De Laat en Awater gekozen procedure waarbij verificatie plaatsvindt met behulp van gemeten grondwaterstanden en de te berekenen verdamping wordt

gebaseerd op de gegevens die tot de beste grondwaterstandssimulaties hebben geleid. De berekeningsprocedure voor de in de verschillende jaren optredende verdamping is toegelicht door De Laat en Awater (1979). Bij het berekenen van de equivalent hooiopbrengst (relevant voor de punten 70, 73 en 95 waarvoor grasland als gebruikswijze representatief was) werd hier de volgende benaderende relatie gebruikt, die door De Laat is afgeleid uit gegevens van Rijckema (1969b)

$$Y = 12000 x^2$$

waarbij Y = equivalent hooiopbrengst met vochtgehalte 14% (kg/ha) en x = relatieve verdamping (E/E_0) waarin E en E_0 de over het groeiseizoen gesommeerde werkelijke, respectievelijk potentiële gewasverdamping is. Daarbij is rekening gehouden met 25% verliezen. Voor de knooppunten 98 en 112 was het bodemgebruik naaldbos en bouwland (maïs). Voor maïs werd de volgende relatie aangenomen (De Laat, persoonlijke mededeling).

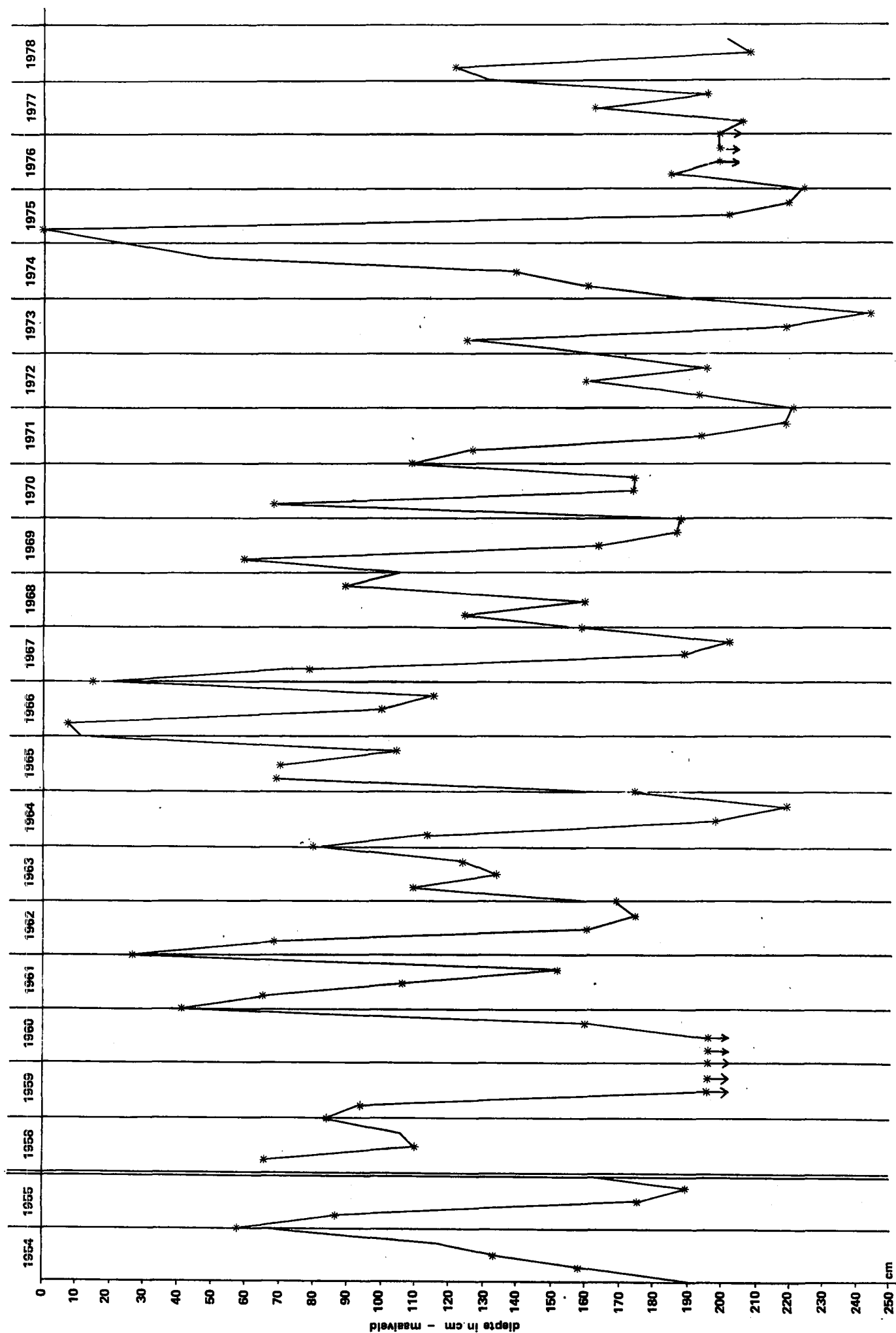
$$Y = 1000 (71,4x - 8,9)$$

waarbij Y = produktie met vochtgehalte 72%. Er is rekening gehouden met een verlies van 2½ ton d.s./ha. De resultaten van de berekende verdamping in de groeiseizoenen 1973 en 1974 staan voor de vijf gekozen punten weergegeven in afb. 16 t/m 20. Zoals gesteld, worden de resultaten voor de fasen I, Is en IIs weergegeven in relatie tot de resultaten voor fase IV (= IIIs) die, bij gebrek aan absolute meetgegevens als referentie is aangenomen. De afwijkingen ten opzichte van de referentie kunnen zowel positief als negatief zijn per groeiseizoen (zie afb. 16-20). In tabel 2 staan de totaalwaarden voor de verschillende fasen weergegeven.

Tabel 2. De werkelijke verdamping in mm per groeiseizoen van 150 dagen (15 april - 15 sept.) in 1973 en 1974 voor een viertal fasen, en waarden voor de potentiële verdamping (E_{pot}).

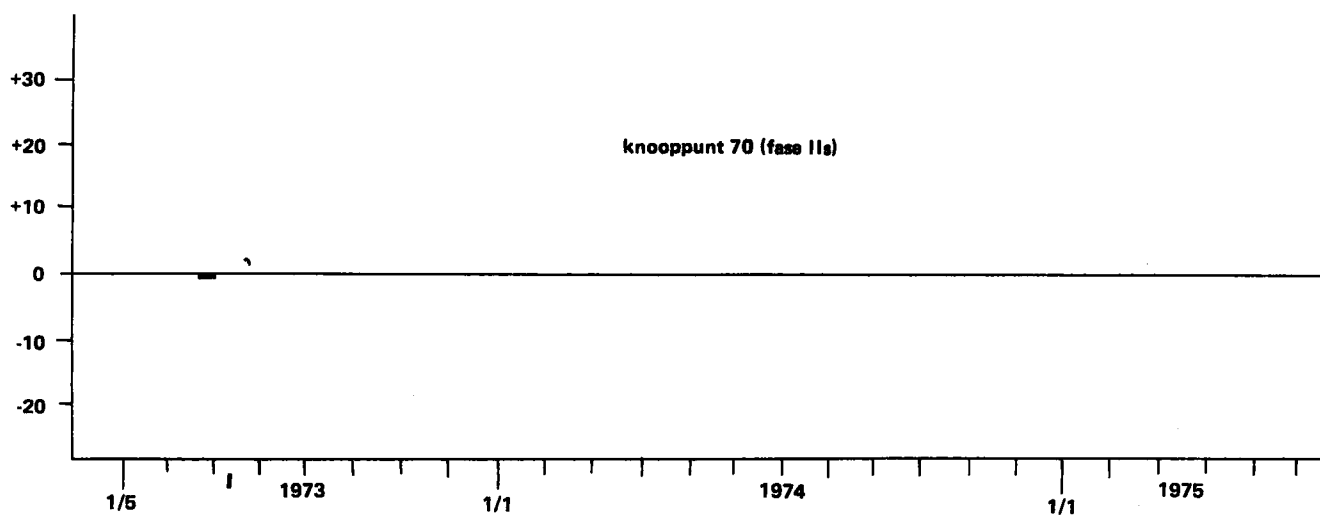
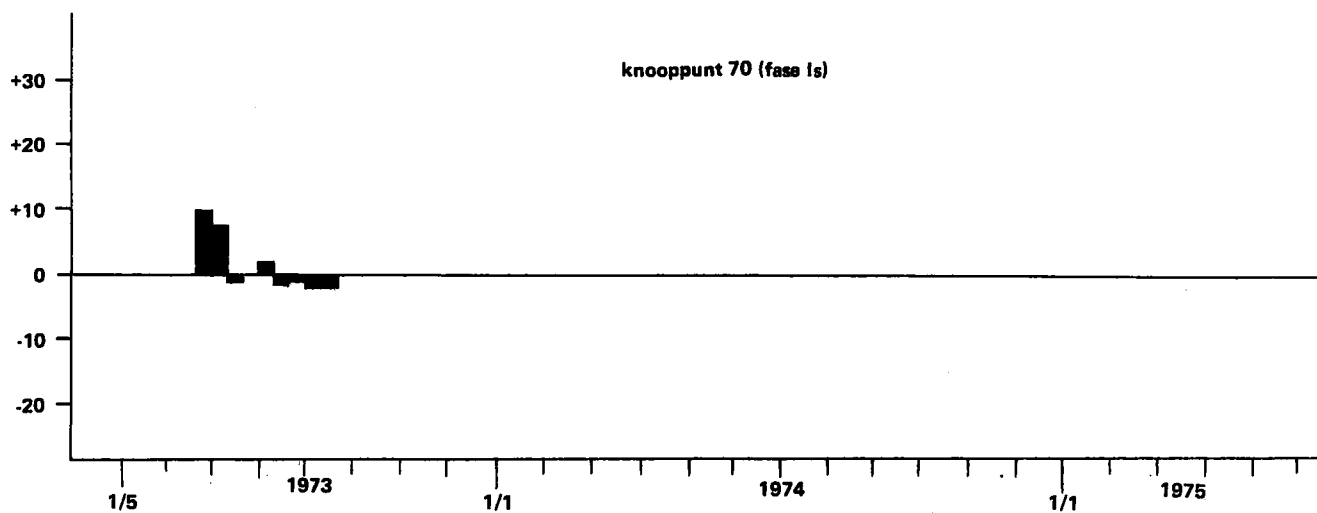
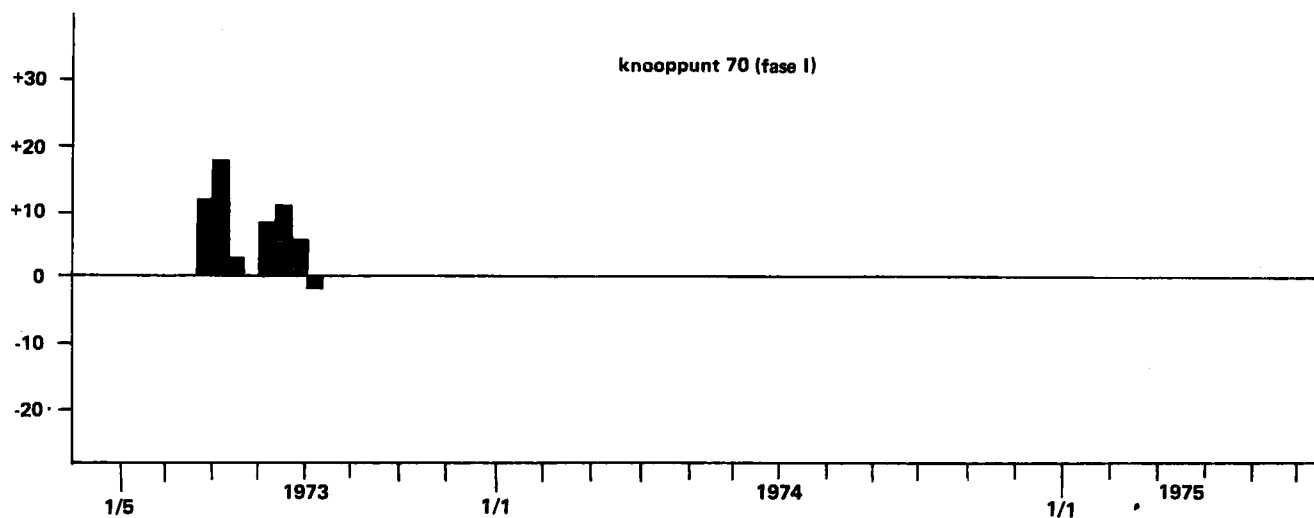
Fase	1973						1974					
	I	Is	Ist	IIs	IV	E_{pot}	I	Is	Ist	IIs	IV	E_{pot}
nr. knooppunt												
70	440	395		380	380	500	430	430		430	430	430
73	285	300	385	420	375	500	370	380	430	430	430	430
95	410	380	290	370	275	500	430	430	380	430	365	430
98	300	305		255	235	515	370	385		335	315	455
112	285	290		285	285	550	385	390		390	390	430

In alle gevallen zijn de verschillen ten opzichte van fase IV het kleinst voor fase IIs, waarbij van de bodemkaart afgeleide gegevens zijn gebruikt. Hoewel het dus voor het simuleren van de grondwaterstand in feite niet nodig leek de bodemkaart te gebruiken is dat voor het schatten van de verdamping duidelijk wel relevant. Voor de knooppunten 70, 98 en 112 liggen de volgens fase IIs berekende gegevens dicht bij die van fase IV. Voor de knooppunten 73 en 95 zijn de verschillen echter aanzienlijk. Dit komt duidelijk tot uiting wanneer de berekende equivalent produkties worden vergeleken voor de verschillende fasen (tabel 3). Overigens worden deze produkties alleen vermeld om de reeds genoemde verdamping en enigszins te concretiseren. Bij het trekken van de conclusies spelen ze verder geen rol.



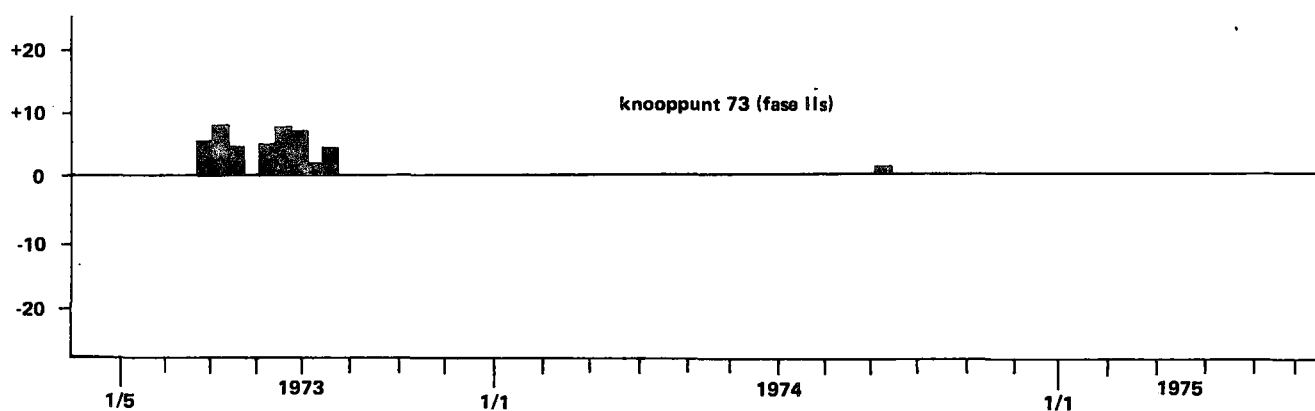
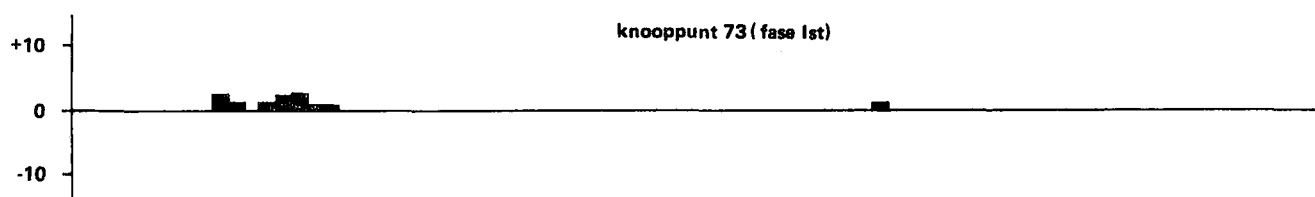
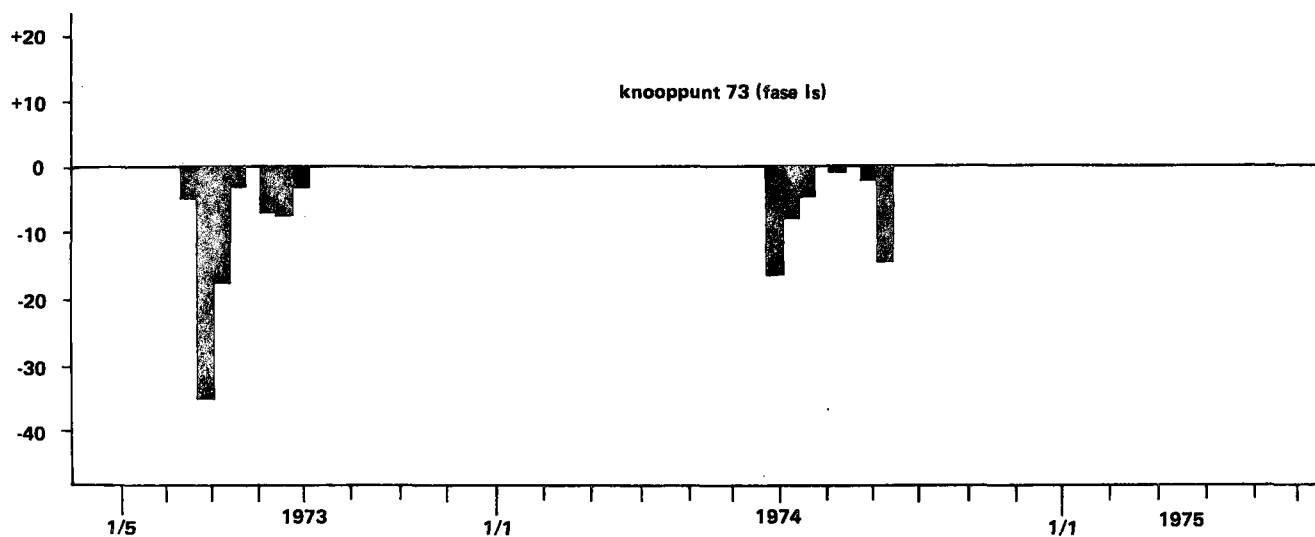
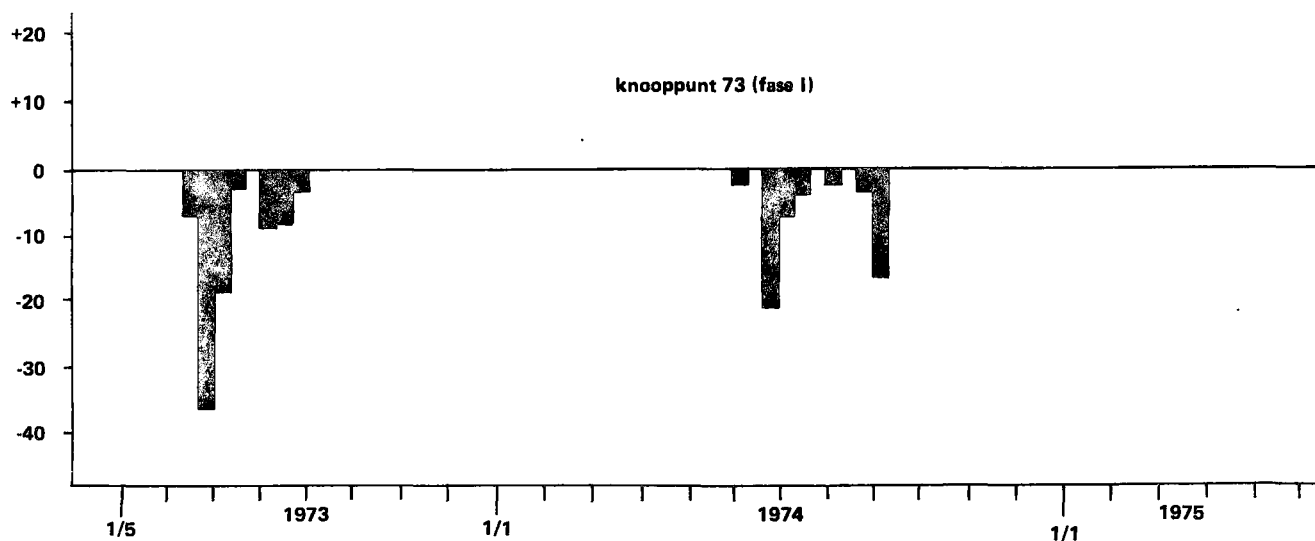
Afb. 15 Grondwaterstandsverlopen gemeten over een 24 jarige periode in stambuis 41A/1 buiten de onttrekkingsfeer van het pompstation.

verschil in E_w
t.o.v. fase IV
(in mm/10 dagen)



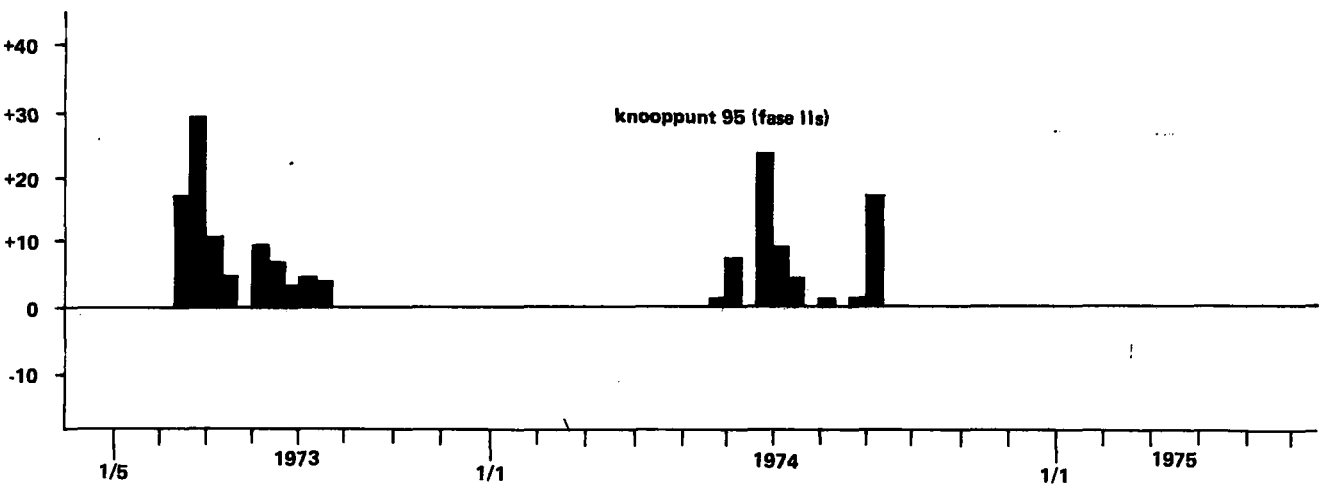
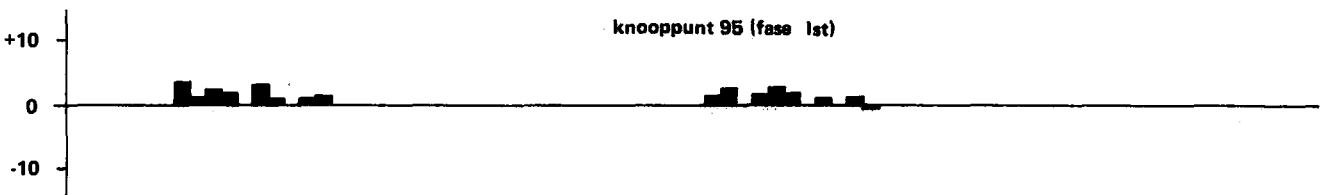
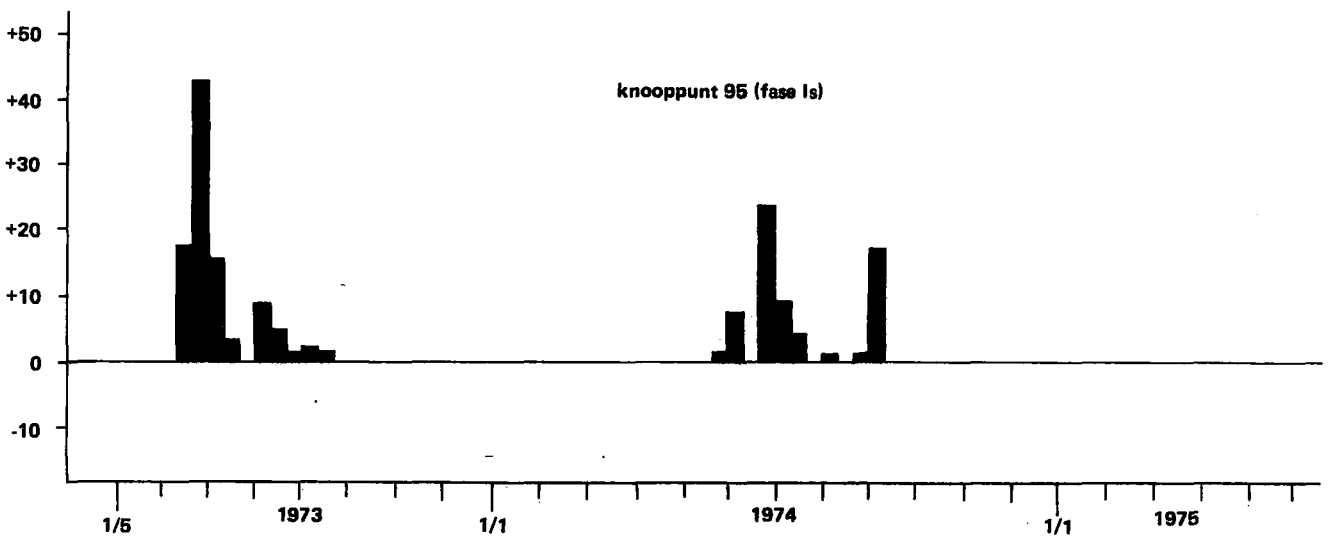
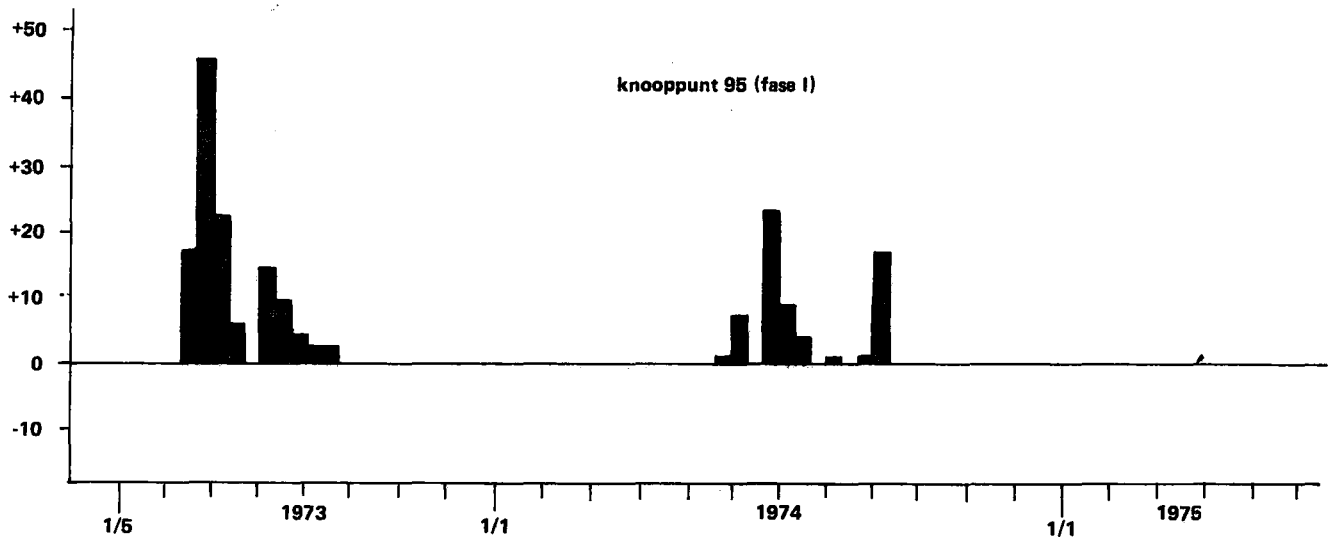
Afb. 16 Berekende verdampingen voor knooppunt 70 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van de gegevens uit fase IV.

verschil in E_w
t.o.v. fase IV
(in mm/10 dagen)



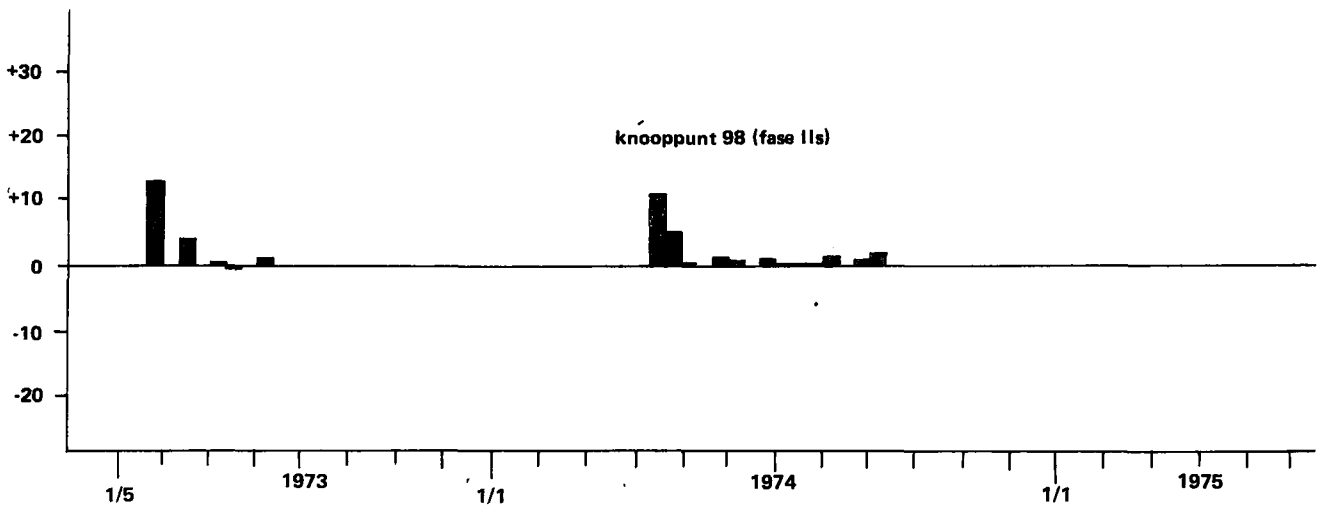
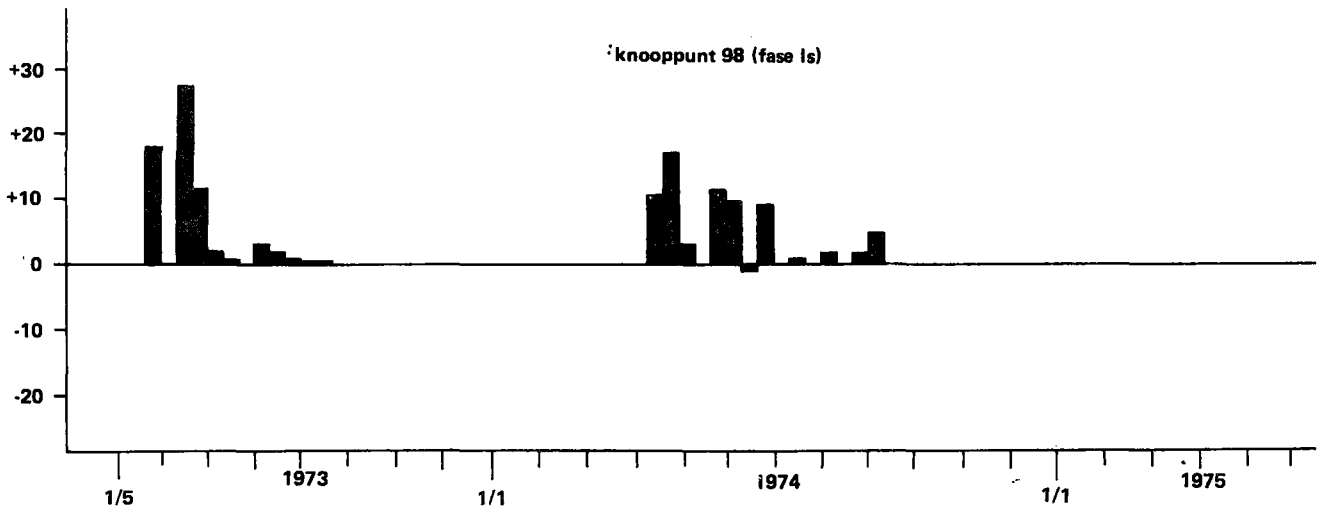
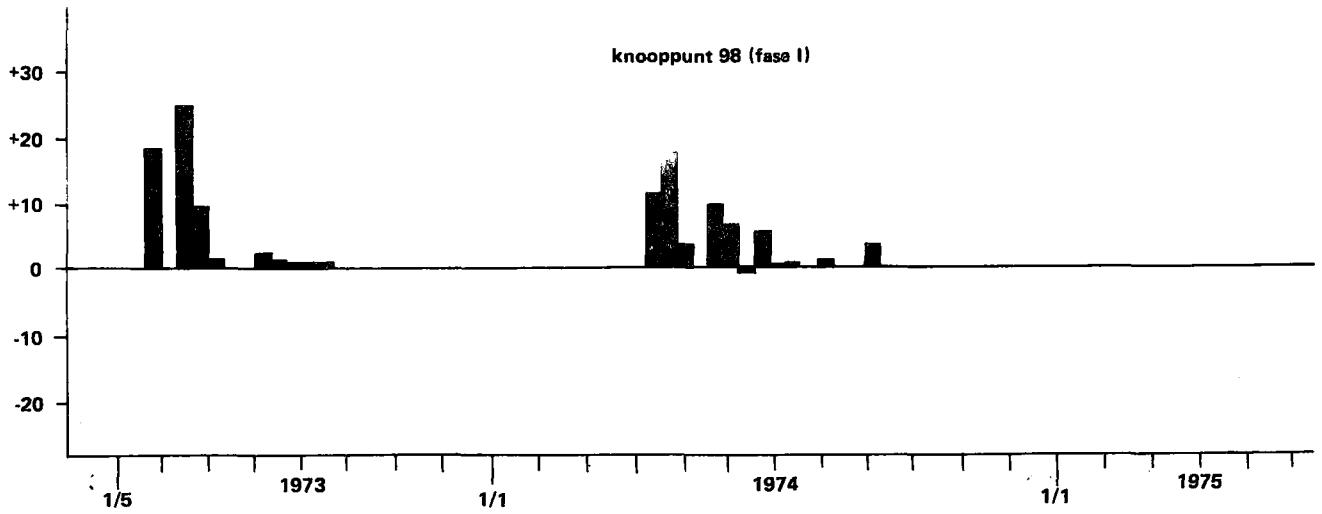
Afb. 17 Berekende verdampingen voor knooppunt 73 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van gegevens uit fase IV.

verschil in E_a
t.o.v. fase IV
(in mm/10 dagen)



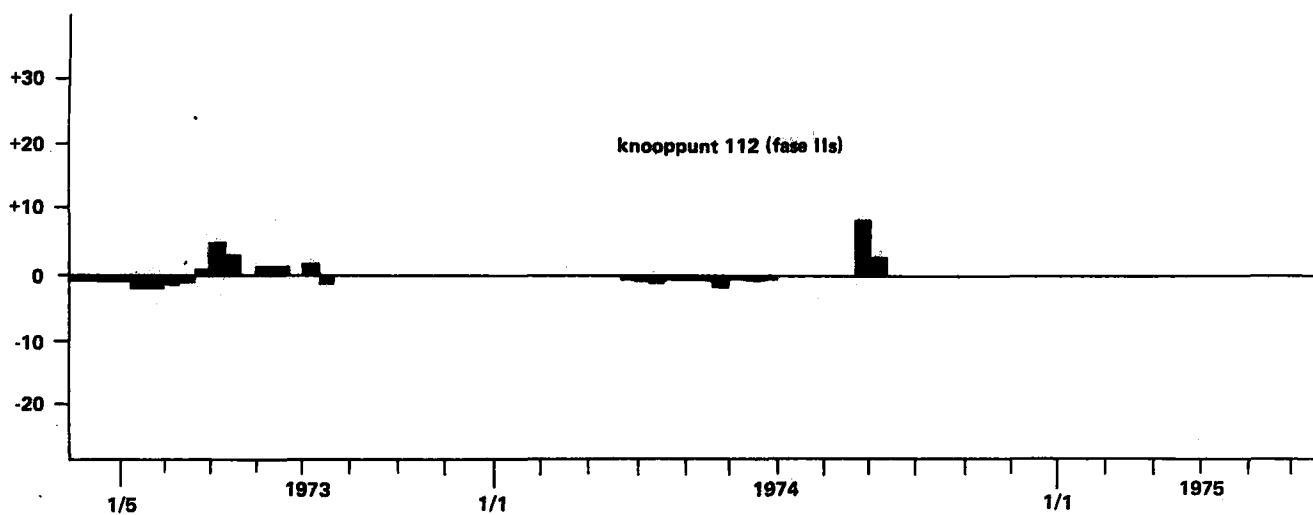
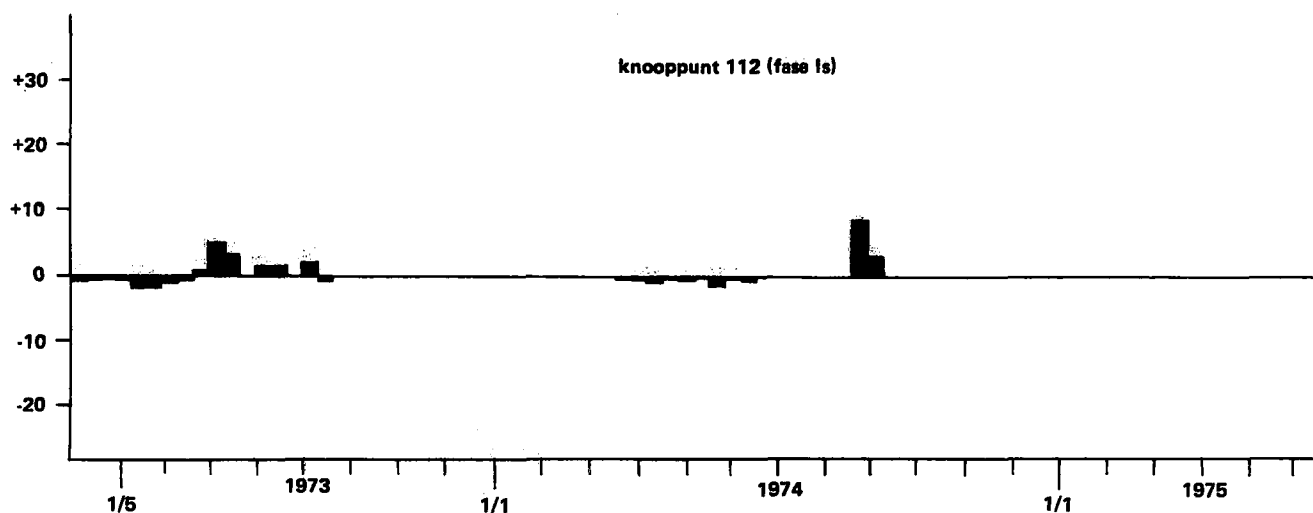
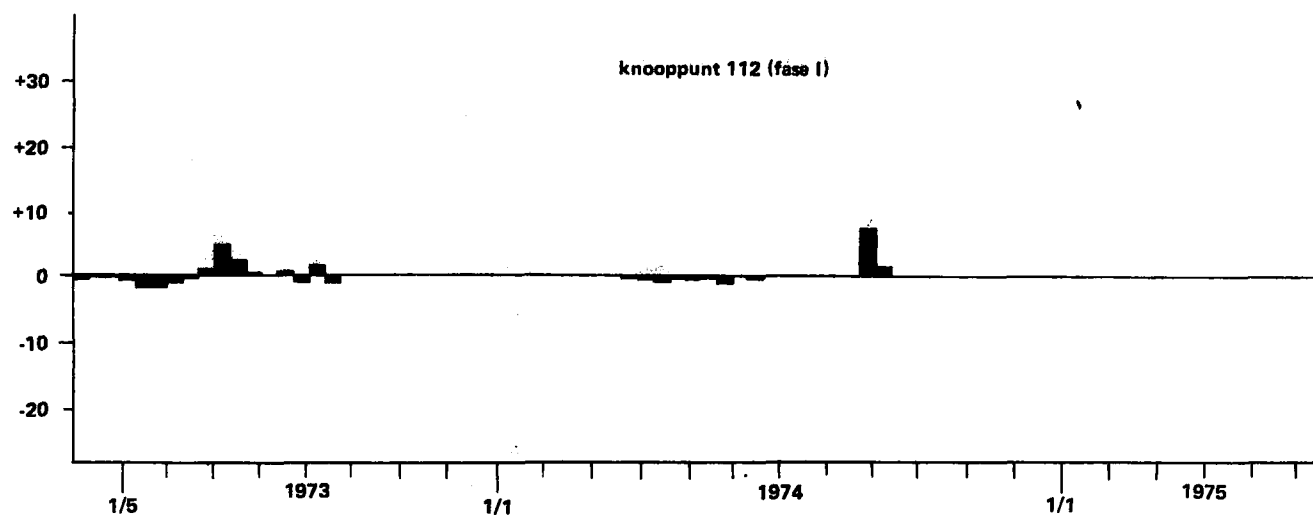
Afb. 18 Berekende verdampingen voor knooppunt 95 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van de gegevens uit fase IV.

verschil in E_w
t.o.v. fase IV
(in mm/10 dagen)



Afb. 19 Berekende verdampingen voor knooppunt 98 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van de gegevens uit fase IV.

verschil in E_w
t.o.v. fase IV
(in mm/10 dagen)



Afb. 20 Berekende verdampingen voor knooppunt 112 uitgedrukt ten opzichte van de resultaten bereikt met behulp van de gegevens uit fase IV.

Tabel 3. Equivalent-hooiopbrengst (kg/ha) per groeiseizoen van 150 dagen (15 april - 15 sept.) in 1973 en 1974 voor een viertal fasen

Fase	1973				1974			
	I	Is	IIs	IV (ref.)	I	Is	IIs	IV (ref.)
nr. knooppunt								
70	9300	7500	6950	6950	^x 12000	12000	12000	12000
73	3900	4300	8450	6750	8900	9300	12000	12000
95	8050	6950	6550	3650	12000	12000	12000	8650
98	-	-	-	-	-	-	-	- ⁺
112	28000	29000	28000	28000	55000	56000	56000	56000

x 12.000 kg/ha is de grasproduktie, waarbij de werkelijke verdamping gelijk is aan de potentiële.

+ de maximale maisopbrengst, waarbij de werkelijke verdamping gelijk is aan de potentiële is gesteld op 62500 kg/ha.

De resultaten voor knooppunt 95 zijn slecht, en een nadere analyse is temeer interessant omdat dezelfde bodemeenheid (tZg₄₅ - Beekeerdgronden) voorkomt op knooppunt 70. De aanzienlijke verschillen tussen deze twee knooppunten zijn te wijten aan de verschillende referentiewaarden berekend op basis van fase IV. Op grond van de waargenomen textuur van de ondergrond werd in fase IV voor knooppunt 95 een L2 curve toegekend als K- Ψ (zie tabel 1) die minder opstijging toeliet dan de L3 voor knooppunt 70 (voor fase IIs hadden beide een L3). Bovendien werd de dikte van de effectieve wortelzone in knooppunt 95 bepaald op 22 cm (afgerond op 20 cm) en in knooppunt 70 op 27 cm (afgerond op 30 cm). (Door de afronding wordt het waargenomen verschil dus verdubbeld). De afwijking tussen de knooppunten 70 en 95 wordt dus veroorzaakt door zowel een verschil in K- Ψ voor de ondergrond als een verschillende bewortelingsdiepte. Nu blijkt dat de bewortelingsdiepte in het algemeen een groot effect heeft op de waargenomen verschillen. Dit kan bijvoorbeeld worden geïllustreerd door voor knooppunt 95 de resultaten voor fase Is ook uit te rekenen op basis van een bewortelingsdiepte van 20 cm (als in fase IV) in plaats van 40 cm. Deze door De Laat en Awater berekende verdamping (Ist genoemd in tabel 1) bleek nog maar 15 mm af te wijken van de referentieverdamping (tabel 2 en afb. 18). Aangezien de pF-curven 4.4 en 10.1 enerzijds en 4.6 en 10.3 anderzijds niet al te veel van elkaar verschillen (hoofdstuk 5), kan worden geconcludeerd dat het waargenomen verschil tussen fasen Is (380 mm) en Ist (295 mm) primair te wijten is aan een verschil in bewortelingsdiepte van 20 cm. Per 10 cm is dit dus ongeveer 40 mm. De observatie dat een verschil van 10 cm in effectieve bewortelingsdiepte een zo groot effect heeft, moet aanleiding geven tot voorzichtigheid bij het interpreteren van de met de simulatie verkregen gegevens. Naast de dikte van de doorwortelde zone is echter ook de K- Ψ relatie belangrijk in grondwaterprofielen. Door De Laat zijn speciaal voor knooppunt 95 nog enkele extra berekeningen gemaakt die hier niet in detail zullen worden besproken, maar die aantoonen dat het genoemde verschil in millimeters tussen fasen IIs en IV voor de helft te wijten was aan het verschil in bewortelingsdiepte (10 cm) en voor de helft aan de toegekende K- Ψ (L3 t.o.v. L2). Het verschil in pF curve van de ondergrond (11,2 t.o.v. 10,3, zie tabel 1) speelde geen rol. Ook voor knooppunt 73 geldt dat verschillen tussen fase IIs en IV in bewortelingsdiepte (10 cm) en in K- Ψ relatie (L1 t.o.v. L2) resulteren in een verschil tussen berekende verdamping van 45 mm (tabel 2, zie ook afb. 17). Primair zal dit verschil een gevolg zijn van de dikkere bovengrond in fase IIs, juist ook omdat de capillaire opstijging in fase IIs (L1) kleiner is dan in fase IV (L2). Het verschil is nu waarschijnlijk minder groot dan het geweest zou zijn als in fase IV ook voor de ondergrond een K- Ψ relatie van het type L1 was toegekend. Een vergelijking van fase Is met Ist (tabel 1 en 2) toont een verschil van 85 mm bij een verschil in bewortelingsdiepte van 50 cm, terwijl de andere factoren constant zijn. Zonder nadere analyses kan niet precies worden vastgesteld waar het verschil van 45 mm tussen fasen

IIs en IV aan te wijten is. Gezien ook de diepe grondwaterstand (afb. 9) die in 1973 varieerde tussen 2,80 m - maaiveld en 4,20 m - maaiveld, moet primair worden gedacht aan de dikte van de wortelzone.

De invloed van de dikte van de bewortelde zone op de berekende verdamping berust op een drietal factoren:

- (1) Een dikkere bewortelde zone heeft een grotere vochtinhoud in het voorjaar; er is dus initieel meer beschikbaar.
- (2) Een dikkere zone resulteert in een geringere afstand van onderkant wortelzone tot het grondwater en dus een potentieel grotere mogelijkheid voor capillaire opstijging van water, en
- (3) Een dikkere wortelzone laat in tijdstappen met neerslagoverschot minder water door naar de ondergrond. De grotere hoeveelheid vastgehouden water is later weer voor de plant beschikbaar.

Tabel 5 Resultaten van boringen (1 per ha in vierkantsnet) en daaruit afgeleide pF en K-ψ gegevens die in april 1979 zijn verricht in de representatieve bodemeenheden binnen de vijf knooppuntsoppervlakten. Deze aanvullende waarnemingen hadden tot doel om de in eerste instantie op basis van één boring toegekende fysische gegevens in fase III, nader te toetsen ten opzichte van de in fase II toegekende gegevens. Gemiddelde waarden en het waargenomen traject zijn weergegeven.
De hier gegeven waarden kunnen worden vergeleken met de toegekende waarden in fasen II en III in tabel 1.

Aantal boringen	Wortelzone	Ondergrond						
		dikte (cm)	leem (%)	M cijfer	gem. pF-curve	leem (%)	M cijfer	gem. K-ψ
Knooppunt 70	19	28 (22-35)	24 (18-30)	145 (135-155)	10.1	25 (18-30)	140 (135-155)	L3
Knooppunt 73	8	84 (60-120)	14 (13-15)	155	7.1	9 (9-11)	155 (155-160)	L1
Knooppunt 95	11	27 (25-30)	25 (18-30)	145 (135-150)	10.1	25 (14-30)	150 (140-160)	L3
Knooppunt 98	9	19 (15-40)	9 (8-13)	145 (140-150)	100.1	9 (8-11) (los)	150 (145-155)	L1
Knooppunt 112	13	40 (30-50)	13 (8-15)	150 (145-155)	4.4	10 (8-12) (vast)	150 (145-160)	L2

baard
baard
baard
vaag
baard

4. EVALUATIE EN CONCLUSIES

Uit de tijdens dit onderzoek verkregen gegevens is, zoals te verwachten was, gebleken dat de bij het verzamelen van bodemkundige basisgegevens voor GELGAM te volgen procedures niet strict volgens één van de vier onderscheiden fasen kan plaatsvinden. De resultaten voor de berekende grondwaterstanden waren slecht in alle fasen wanneer de gemeten pF curven voor de diepere ondergrond niet werden gebruikt. Wordt dit wel gedaan, dan waren de resultaten al relatief goed wanneer voor alle knooppunten een zelfde bodemeenheid werd toegepast. (Overigens was dit wel de in het gebied meest voorkomende bodemeenheid). Dit resultaat is uiteraard niet zonder meer algemeen geldig en hangt samen met de specifieke hydrologie van gebied 't Klooster. Belangrijker is de berekening van de verdamping omdat deze nodig is voor het schatten van eventuele landbouwschade. Bij deze berekening is de aard van de bodemeenheid wel belangrijk, hetgeen bleek uit de relatief goede resultaten voor fase IIs, vergeleken met Is. Vergeleken met de referentiefase IV waren de resultaten van fase IIs voor drie knooppunten goed en voor twee knooppunten matig, resp. slecht; hetgeen vooral te wijten was aan kleine verschillen tussen de ingevoerde waarden voor diktes van beworteling en verschillen in K-Ψ. Dit gegeven heeft belangrijke praktische implicaties. In algemene zin kan worden gesteld dat relatief kleine verschillen in diktes van beworteling en K-Ψ een aanzienlijk effect hebben op berekende verdamping (zie ook Feddes en Van Bakel, 1979). Dit maant tot voorzichtigheid bij het interpreteren van verkregen gegevens. Verschillen tussen duidelijk afwijkende bodemeenheden (b.v. enkeerdgrond en vorstvaaggrond), komen echter hoe dan ook duidelijk naar voren. Binnen bepaalde bodemeenheden moet gezien de optredende variatie echter gewaakt worden voor het toekennen van teveel onderscheidingen, omdat er dan duidelijk sprake kan zijn van schijn-nauwkeurigheid. Centraal staat hier de relatie tussen gegevens ontleend aan punt-waarnemingen en gegevens die aan een kaartvlak worden toegekend. In het kader van GELGAM worden gegevenstoegerekend voor de bodemeenheid die binnen het knooppuntsoppervlak het grootste oppervlak inneemt. ("het representatief profiel"). Er is dus duidelijk sprake van gegevens die representatief moeten zijn voor een kaartvlak. De ene boring die in dit kaartvlak per element is verricht (fase III) is steeds als referentie beschouwd. Voor drie knooppunten kwamen de resultaten van die boring en de daarop gebaseerde berekeningen goed overeen met de beschrijving die van het kaartvlak werd gegeven in het bij de bodemkaart behorende rapport. Voor twee knooppunten waren de resultaten minder goed. Betekent dit nu dat de bodemkaart in die gevallen "slechte" gegevens heeft geleverd. Dit is niet noodzakelijkerwijze het geval. Immers, de referentie (fase III) is gebaseerd op slechts één boring en meerdere boringen in het kaartvlak zouden mogelijk een meer divers beeld kunnen opleveren. Daarbij moet worden opgemerkt dat de bodemkarteerder vele boringen maakt terwijl hij door het veld loopt en dat daarom de veronderstelling gerechtvaardigd lijkt dat zijn beschrijving van de bodemeenheid meer met de (variabele) werkelijkheid overeenkomt, dan de gegevens verkregen uit één enkele boring. Deze kan immers toevallig zijn gemaakt op een minder representatief punt. De hier geformuleerde probleemstelling is essentieel voor verder onderzoek ook in andere gebieden. Daarom werd in het voorjaar 1979 besloten om voor de vijf knooppunten alsnog in het representatieve kaartvlak een groot aantal boringen te verrichten. Het doel was hierbij om de éne boring van fase III te relativiseren die een te groot absoluut gewicht dreigde te krijgen. De verkregen gegevens zijn samengevat in tabel 5. Totaal zijn 60 boringen verricht in een vierkantsnet van 1 ha (at random waarnemingen). Er bleek, zoals verwacht, een aanzienlijke variatie te bestaan in de dikte van de wortelzone en in de waargenomen leemgehalten, die (zoals eerder beschreven) worden gebruikt bij het schatten van fysische gegevens. De volgende conclusies kunnen worden getrokken uit tabel 5, wanneer de gegevens worden vergeleken met die van tabel 1.

(1) De schatting van de pF-curve van alle bovengronden was goed op basis van de bodemkaart (fase II). De ene boring in fase III en de meerdere boringen nu gaven overeenkomstige resultaten. Dit is een zeer bemoedigend resultaat.

(2) De schatting van de dikte van de wortelzone op basis van de bodemkaart (fase II) is niet "slechter" dan die op basis van de ene boring in fase III, gezien de waargenomen variatie zoals weergegeven in tabel 5. De voor knooppunt 95 toegekende dikte van 30 cm (fase II, tabel 1), ligt dicht bij het waargenomen gemiddelde van 27 cm (tabel 5) dan de in fase III gevonden waarde van 20 cm. Voor knooppunt 73 blijft de conclusie dat de dikte van 95 cm (fase II) groter is dan het gemiddelde van 84 cm (tabel 5), dat ook werd toegekend in fase III. De belangrijkste conclusie moet zijn dat, gezien de waargenomen variatie, het schatten van de dikte van de wortelzone erg moeilijk is. De schatting op basis van de bodemkaart is zeker niet "slechter" dan die gebaseerd op een enkele boring. Gezien de optredende variatie moet het maken van één boring worden afgeraden. Immers, de ene boring kan juist gemaakt worden op een punt waar een uiterste waarde van het waargenomen traject voorkomt, en dit geeft een niet representatief resultaat.

(3) De schatting van het capillair geleidingsvermogen van de ondergrond op basis van de bodemkaart is beter dan die gebaseerd op een enkele boring. De op basis van de gemiddelde textuur toegekende K-Ψ relatie (tabel 5) komt in alle gevallen overeen met die van fase II, en wijkt af van fase III (tabel 1). Kennelijk is daar geboord op punten waar de textuur afweek (dit is mogelijk; zie de waargenomen trajecten in tabel 5).

Uit deze analyse moge blijken dat moet worden gewaakt voor het toekennen van een te groot absoluut gewicht aan de resultaten van één enkele boring per knooppunt. De kosten hiervan zijn hoog (afbeelding 6) en de verkregen gegevens zijn niet noodzakelijkerwijze representatief voor het oppervlak dat door het "representatief" profiel wordt ingenomen. Het is beter uit te gaan van de beschrijving behorend bij de bodemkaart waarin de aanwezige natuurlijke variatie beter is verwerkt. Wel moet extra aandacht worden geschonken aan die aspecten welke traditioneel minder zijn benadrukt in de bodemkartering zoals bewortelingsdiepte en eigenschappen van de (diepere) ondergrond.

Op grond van dit onderzoek, dat slechts een eerste inleiding kan zijn tot nadere studies ook in andere gebieden, kunnen de volgende suggesties worden geformuleerd voor de te volgen procedures in later onderzoek.

(1) Gebruik gedetailleerde bodemkaart voor het vaststellen van de grootste bodemeenheid per representatief oppervlak bij ieder knooppunt. Gelet moet ook worden op de andere eenheden. Immers, het onderscheid van bodemeenheden gebeurt op pedogenetische grondslagen. Mogelijk worden bodemeenheden die fysisch identiek zijn, bodemkundig verschillend genoemd, en omgekeerd. Eventueel meerdere bodemeenheden die fysisch "identiek" zijn, moeten samen qua oppervlak als representatieve eenheid voor het knooppunt worden beschouwd.

(2) Verricht onderzoek te velde door middel van boringen naar met name twee aspecten van de onderscheiden bodemeenheden: (a) diepte effectieve wortelzone, en (b) aard ondergrond. De andere gegevens kunnen van de bodemkaart worden afgeleid. Daarbij kunnen ook de oorspronkelijke gedetailleerde beschrijvingen van de karteerders een belangrijke rol spelen. Dit onderzoek hoeft niet noodzakelijkerwijs systematisch per knooppunt plaats te vinden, maar kan steekproefsgewijs verspreid over het hele gebied worden uitgevoerd.

(3) Beslis op grond van de boringen ad (2) of er aanvullende fysische metingen nodig zijn, uitgaande van de waargenomen texturen en de ervaring opgedaan met de bestaande standaardreeksen van pF en K-Ψ. Mogelijk verdient het aanbeveling in eerste instantie een proefrun met het model te verrichten en op basis daarvan te beslissen of andere metingen nodig zijn. (Deze procedure is ook gevolgd in 't Klooster).

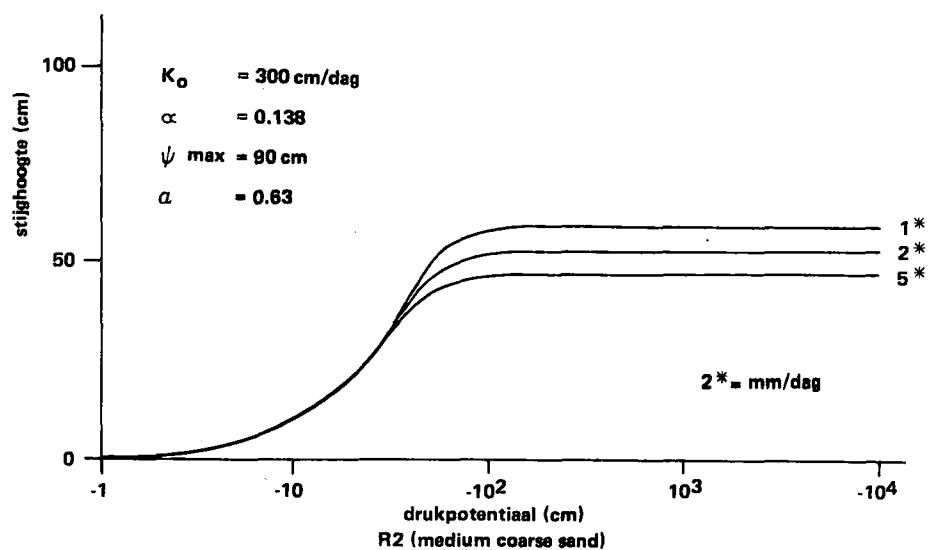
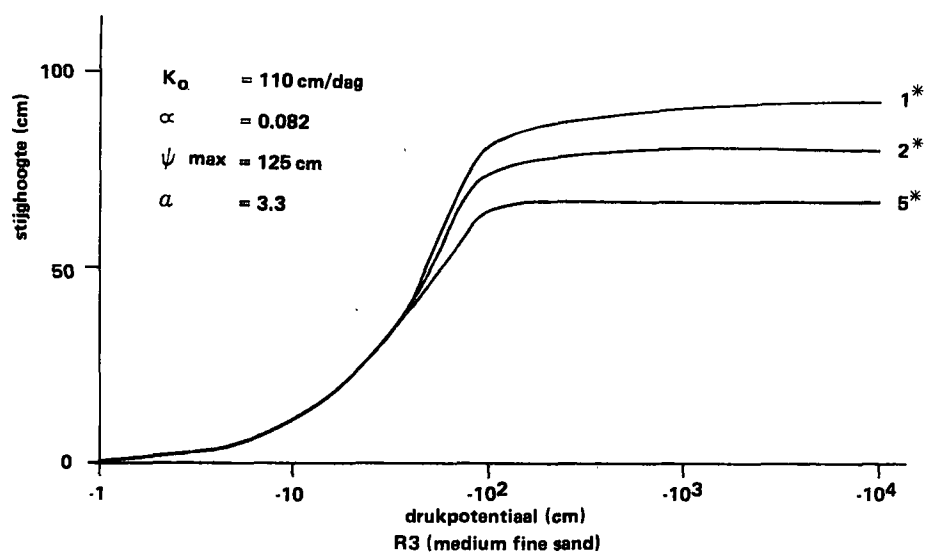
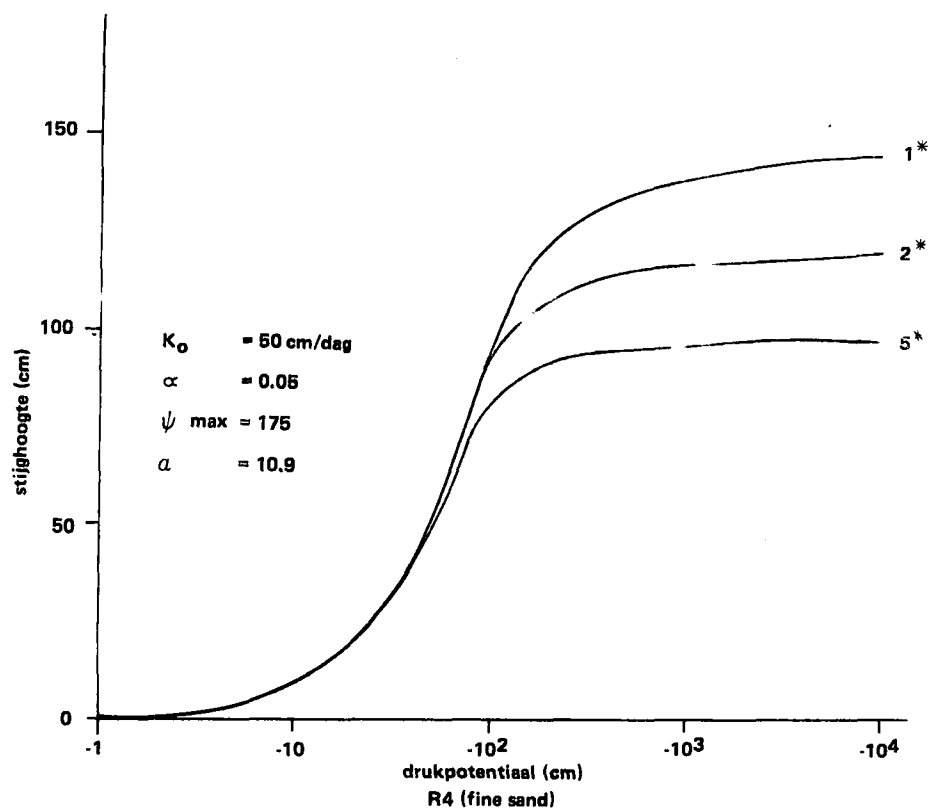
(4) Benadruk het verkrijgen van zoveel mogelijk verificatiemogelijkheden voor de berekende resultaten, met name voor verdamping. Verificatie door middel van gemeten grondwaterstanden blijkt niet altijd voldoende te zijn. Gedacht kan worden aan lokale opbrengstgegevens, praktische ervaring, af-

voergegevens etc. De hier gesuggereerde procedure houdt een grote besparing in vergeleken met die waarbij systematisch in een puntennet wordt geboord (fase III), en is duidelijk meer zinvol omdat een reëel gebruik wordt gemaakt van reeds beschikbare gegevens. Aannemend dat een aantal fysische metingen moet worden verricht en dat er ook veldwerk noodzakelijk is, zoals geschetst, kan genoemde besparing worden geschat op globaal 50% tot 60%.

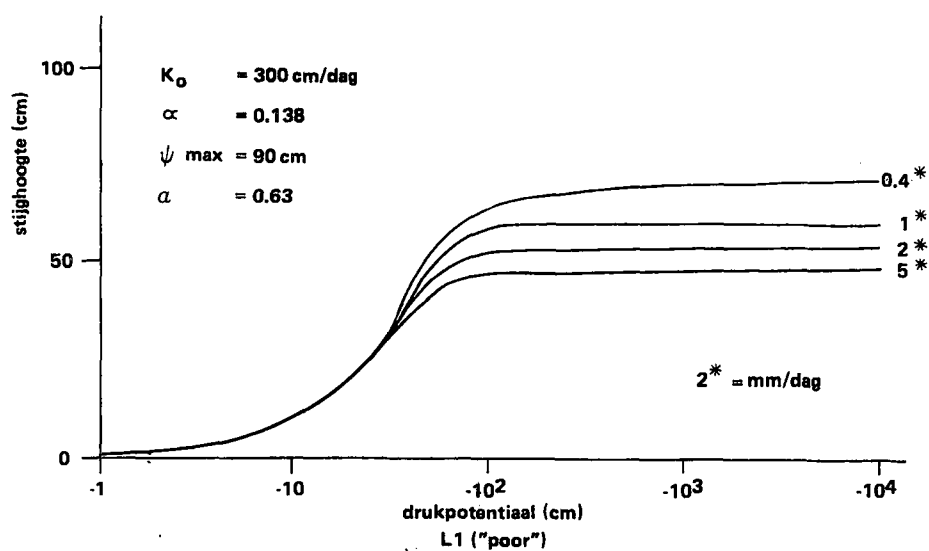
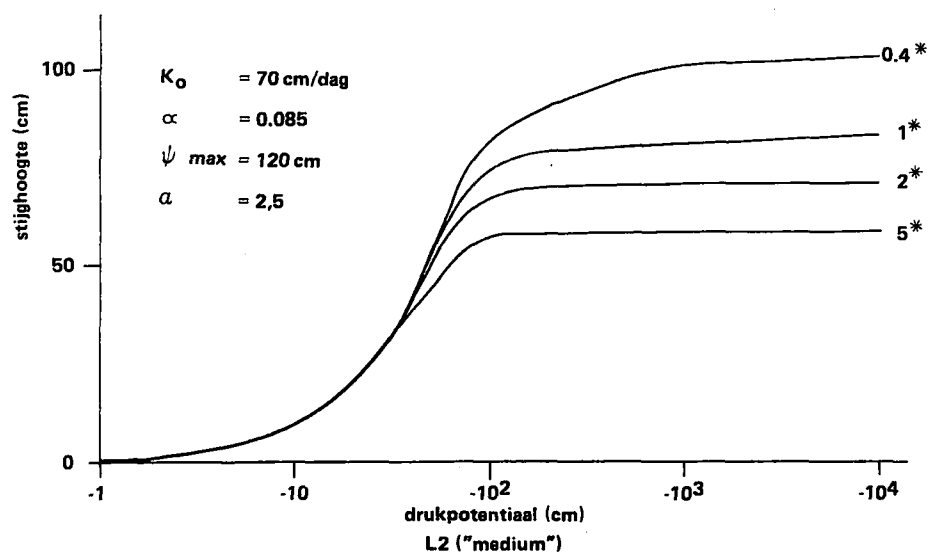
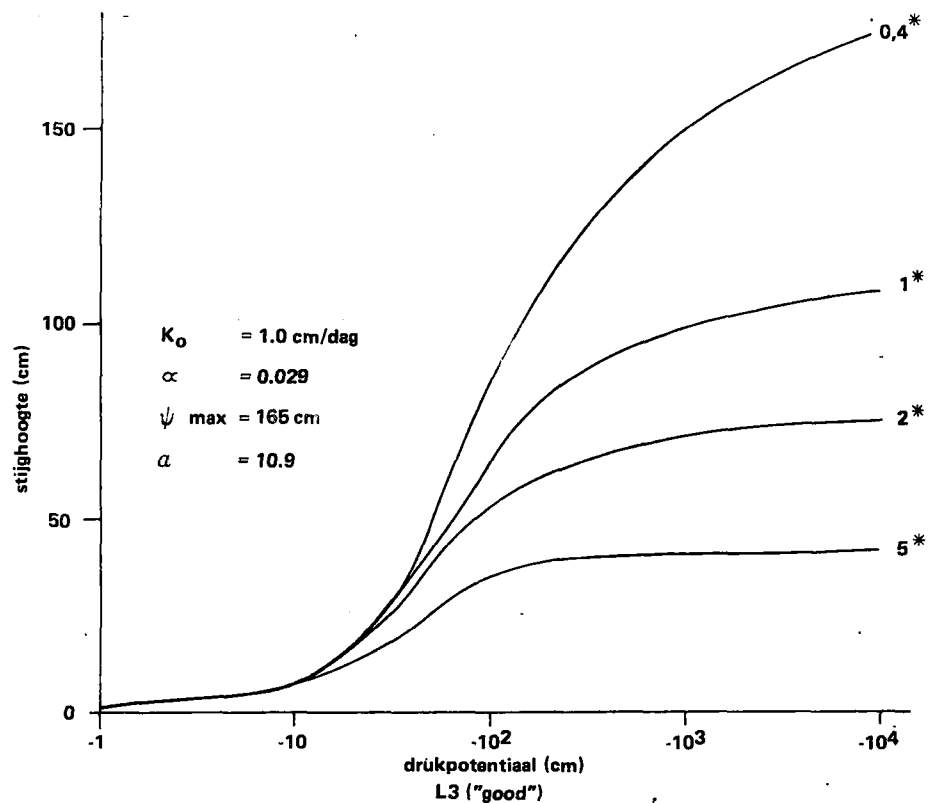
5. APPENDIX: GEBRUIKTE pF EN K- Ψ RELATIES, INCLUSIEF GEMETEN WAARDEN

De aan alle knooppunten toegekende pF en K- Ψ relaties in de fase II zullen hier niet alle worden weergegeven. De gegevens zijn bij Stiboka desgewenst ter inzage beschikbaar. De gegevens voor fase III zijn vermeld in Van Holst e.a. (1974). Aangezien de in dit rapport gegeven discussies betrekking hebben op de knooppunten 70, 73, 95, 98 en 112 worden alleen de bij deze knooppunten behorende gegevens vermeld voor de verschillende fasen, zoals schematisch weergegeven in tabel 1. In tabel 4 zijn de numerieke gegevens vermeld die behoren bij de 4 pF curven die voor de 5 knooppunten zijn toegekend aan de verschillende bovengronden, en de 8 pF curven die zijn toegekend aan de ondergronden. De gebruikte K- Ψ relaties zijn, "vertaald" in de vorm van stijgcurven in de afbeeldingen 21 en 22. Hoewel van de aan Rijtema (1969) ontleende curven slechts de R3 curve is gebruikt bij de 5 besproken knooppunten (fase I, tabel 1) worden toch de R1, R2 en R3 curven getoond in afb. 21. De drie door De Laat gebruikte curven L1, L2 en L3 (resp. "good", "medium" en "poor") staan weergegeven in afb. 22. De coëfficiënten die de K- Ψ relatie definiëren, zoals toegelicht door Rijtema (1969) staan ook in beide afbeeldingen weergegeven.

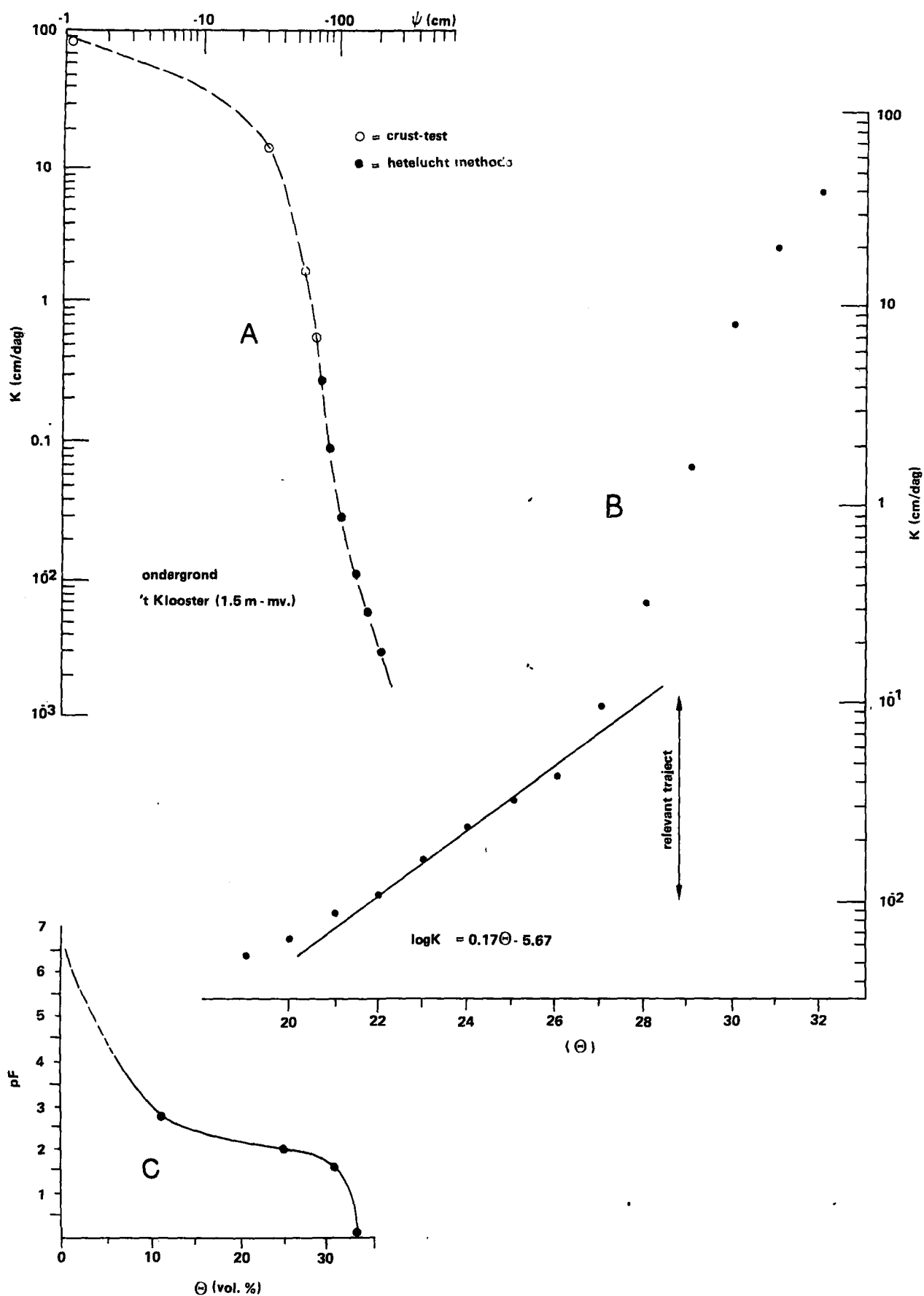
In het kader van fase IV zijn een tweetal metingen op Stiboka verricht, die nu afzonderlijk zullen worden besproken en waarvan de resultaten staan weergegeven in afb. 23. De eerste meting had betrekking op de K- Ψ en K- θ relatie van de diepere ondergrond, in het voorafgaande gedefinieerd als dieper dan $W + 50$ cm, waarbij W = diepte beworteling. Op een tweetal plaatsen in gebied 't Klooster zijn op een diepte van ongeveer 1,50 m - maaiveld monsters genomen. Met behulp van de heteluchtmethode is de D- θ en de daaruit afgeleide K- Ψ relatie bepaald. Een aantal punten in het "natte" traject zijn met de korstenmethode bepaald op het laboratorium van Van der Sluys. Voor een beschrijving van deze methode, zie Bouma, 1977. De heteluchtmethode is in een ander basisrapport uitgebreid beschreven (Stoffelsen en Bouma, 1979: Bodemkundige gegevens gebied Over Betuwe). De lezer wordt voor details betreffende de methode naar dit rapport verwezen. De in afb. 23 weergegeven K- θ relatie heeft betrekking op een beperkt K-traject, zoals toegelicht door De Laat en Awater (1979). De tweede meting had betrekking op de pF curve van genoemde diepere ondergrond. Daarbij is gebruik gemaakt van een speciale opstelling waarbij een relatief groot (350 cm^3), ongestoord monster in een buchner-trechter wordt geplaatst. In een gesloten systeem, waarin het bodemonster permanent aanwezig is en dat verdamping voorkomt, wordt de uitstroming van water als gevolg van successieve stapsgewijze verhogingen van de zuigspanning geregistreerd (afb. 24). Uitgaande van een bekend beginvochtgehalte kan zodoende een pF-curve worden bepaald omdat de uitgestroomde hoeveelheid water bij iedere aangebrachte zuigspanning bekend is, zonder dat het monster verwijderd wordt van de poreuze plaat. De methode is in detail toegelicht door Baker e.a. (1974) en Bouma (1977), en de lezer wordt voor verdere bijzonderheden betreffende de methode naar deze publikaties verwezen.



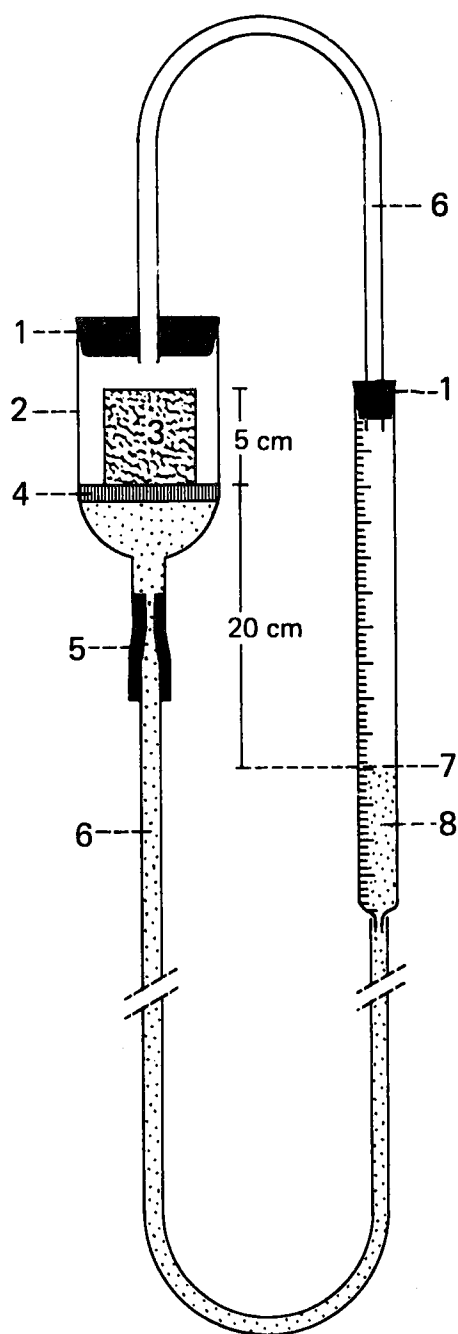
Afb. 21 Stijgcurven voor drie constante snelheden behorend bij drie K - ψ relaties. Ontleend aan Rijtema, 1969.



Afb. 22 Stijgcurven voor vier constante snelheden bij drie K - ψ relaties, zoals gedefinieerd door De Laat en afgeleid van op het ICW gemeten curven.



Afb. 23 Gemeten K - ψ (a) K - θ (b) relatie van de diepere ondergrond (heteluchtmethode) en bijbehorende gemeten pF -curven (c) (poreuze kop).



Afb. 24 Opstelling voor de meting van pF-curven zoals toegepast voor de diepere ondergrond (tot pF 2.0).

1. doorboorde rubberkurk; 2. glazen trechterwand; 3. bodemonster; 4. poreuze plaat ingegoten in de trechter; 5. afsluitend rubberbandje; 6. Tygon plastic buis; 7. constant waterniveau bij evenwicht bij een gegeven aangebrachte zuigspanning (hier -22,5 cm gemiddeld); 8. verticaal beweegbare buret met meetschaal.

Tabel 4. De in dit rapport gebruikte pF curven

Bovengronden

Nr.pF-curve*	Hori-zont	Bodem-eenheid	Volumepercentage water bij								
			por. vol.	pF 0,4	pF 1,0	pF 1,5	pF 2,0	pF 2,3	pF 2,7	pF 3,4	pF 4,2
4,4	Ap	Veldpodzol-grond	50,0	48,6	42,7	39,2	28,4	22,3	16,8	9,2	5,6
7,1	Aanlp	Enkeerd-grond	48,3	47,2	43,5	40,0	27,8	21,1	15,8	8,8	5,7
10,1	Apg	Beekeerd-grond	51,8	50,9	48,0	46,7	42,2	35,9	32,9	18,2	12,8
100,1	Al	Vorstvaag-grond	40,8	39,2	37,9	37,4	20,4	16,6	16,2	7,8	5,3

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Ondergronden

Nr.pF-curve*	Hori-zont	Bodem-eenheid	Volumepercentage water bij								
			por. vol.	pF 0,4	pF 1,0	pF 1,5	pF 2,0	pF 2,3	pF 2,7	pF 3,4	pF 4,2
3,6	C	Veldpodzol-grond	38,1	37,6	34,9	30,6	11,8	7,8	5,0	2,0	1,5
4,6	C	idem	39,3	38,4	35,2	32,8	20,8	12,7	9,4	3,7	2,4
6,5	C	Enkeerd-grond	38,1	37,6	34,9	30,6	11,8	7,8	5,0	2,0	1,5
7,5	C	idem	39,3	38,4	35,2	32,8	20,8	12,7	9,4	3,7	2,4
10,2	C	Beekeerd-grond	35,6	34,1	32,1	29,4	26,0	20,1	17,7	9,1	6,1
10,3	C	idem	36,4	35,4	33,1	31,9	24,8	18,9	15,4	6,8	4,1
11,2	C	idem	38,8	38,3	36,1	34,8	32,3	29,0	24,1	17,2	11,4
100,2	C	Vorstvaag-grond	41,8	40,8	31,9	16,3	5,9	4,1	3,5	1,5	1

* Nummering pF-curven is overeenkomstig Van Holst e.a., 1974.

6. LITERATUUR

- Baker, F.G., P.L.M. Veneman and J. Bouma, 1974: Limitations of the instantaneous profile methode for field measurement of unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. mer. Proc. 38:885-88.
- Bloemen, G.W., 1973: De berekening met een waterbalansmodel van de daling van freatisch grondwater als gevolg van grondwaterwinning. Nota ICW 758.
- Bouma, J. 1977: Soil survey and the study of water in unsaturated soil. Soil Survey Paper 13. Soil Survey Institute, Wageningen. 107 pp.
- Feddes, R.A. en P.J.T. van Bakel, 1979: Verdamping in relatie tot landbouwproductie. Basisrapport ten behoeve van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland.
- Holst, A.F. van, H.C. van Heesen en H. Makken, 1974: Waterwingebied 't Klooster. Toelichting op en verwerking van bodemkundige gegevens. Stiboka rapport no. 1109.
- Kleinsman, W.B., A. Scholten en G. Rutten, 1973: Ruilverkavelingsgebied Hengelo-Zelhem. Stiboka rapport no. 959.
- Krabbenborg, A.J., 1973: Standaard pF-curven van fijnzandige zandgronden. Int. Mededeling Stiboka no. 8.
- Laat, P.J.M. de en R.H.C.M. Awater, 1979: Groundwater Flow and Evapotranspiration. Asimulation model. Basisrapport Comm. Bestudering Waterhuishouding Gelderland.
- Rijtema, P.E., 1969a: Soil moisture forecasting. Nota 513 ICW. Wageningen.
- Rijtema, 1969b. On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. ICW Techn.Bulletin 58.
- Stoffelsen, G.H. en J. Bouma, 1979: Waterwingebied Over-Betuwe. Toelichting op en verwerking van bodemkundige gegevens. Basisrapport Comm. Best. Waterh. Gelderland. Stiboka rapport 1433.

Tabel 1 voor zowel pF als K-ψ karakteristieken worden gepresenteerd in hoofdstuk 5).

