

Statistische analyse van de werkelijke verdamping.

A.H. Ryhiner en P.E. Rijtema

1. Inleiding.

Bij de bepaling van de werkelijke verdamping van een gewas wordt gebruikgemaakt van de waterbalans:

$$E_w + A = N + I - \Delta v$$

Hierin is

 E_w = werkelijke verdamping A = afvoer N = neerslag I = infiltratie, ingelaten hoeveelheid Δv = verandering in vochtvoorraad in de grond

Met behulp van de weegbare lysimeters zijn alle termen van de vergelijking met uitzondering van de werkelijke verdamping direct meetbaar. Bij de niet weegbare lysimeters is naast de werkelijke verdamping ook dikwijls de verandering in de vochtvoorraad in de grond een onbekende grootheid. Bij toepassing van de waterbalansvergelijking op polders moet in veel gevallen de kwel of inzigging als derde onbekende grootheid worden ingevoerd. In het algemeen moet dus worden gesteld, dat in de waterbalansvergelijking enkele termen onbekend zijn. Het is daarom noodzakelijk langs andere weg een of meer van de onbekende termen te bepalen.

Bij een goede watervoorziening zal de gewasverdamping in hoofdzaak worden beheerst door klimatologische factoren. In de literatuur zijn verschillende methoden bekend om de verdamping van een kort, goed van water voorzien. gewas, dat de grond volledig bedekt, te berekenen met behulp van deze klimatologische factoren. Meestal zullen het gewas en de watervoorziening niet aan deze gestelde eisen voldoen, zodat een nadere analyse van de invloed van gewasfactoren en bodomfysische grootheden op de werkelijke verdamping noodzakelijk is.

Teneinde het inzicht in deze materie te verdiepen zijn op de gegevens van een van de weegbare lysimeters enkele analyses uitgevoerd, waarbij geen gebruikgemaakt werd van de verandering in voorraad in de grond.

2. Keuze van de variabelen.

Bij de keuze van de variabelen bij het statistisch onderzoek is gesteld, dat de werkelijke verdamping wordt beheerst door drie groepen van factoren:

a. Klimatologische factoren.

In het algemeen kan wel gesteld worden, dat de evapotranspiratie, evenals de open waterverdamping (E_o), wordt beheerst door de straling, temperatuur, relatieve vochtigheid en windsnelheid. De waarden van de open waterverdamping geven dus een quantitatieve maat voor de invloed van de verschillende klimatologische factoren op de verdamping van het gewas, dus

$$E_w = f(E_o) \quad (2)$$

Bij optredende reducties van de gewasverdamping zal de neerslag, door interceptie, een verdampend verhogend effect kunnen geven. Het is daarom noodzakelijk de neerslag (N) als onafhankelijke variabele in het onderzoek op te nemen.

b. Gewasfactoren.

Het gewas zal in afhankelijkheid van onder andere grondbedekking, worteling, gewashoogte en inwendige weerstanden voor vochttransport in de plant, de verdamping in mindere of meerdere mate beïnvloeden. Een lang gewas heeft een grotere ruwheidsoppervlak, wat een intenser turbulent waterdamptransport mogelijk maakt en de verdamping doet toenemen. Fysiologische reacties van de plant onder bepaalde omstandigheden daarentegen kan de verdamping doen afnemen.

De inwendige weerstanden voor vochttransport in de plant hangt zeer nauw samen met de wortelontwikkeling van het gewas. Doch daar dit onderzoek uitsluitend betrekking heeft op de verdamping van gras werd aangenomen dat het wortelstelsel van gras vrijwel constant is. Verder is aangenomen dat er een volledige grondbedekking is. Om deze reden kunnen deze factoren in dit onderzoek buiten beschouwing worden gelaten. Als ruwheidsparameter van het gewas is de - graslengte (L) - als enige belangrijke variabele in het onderzoek opgenomen.

c. Bodemfactoren

Bij limiterende watervoorziening zal de beschikbaarheid van het bodemvocht voor de planten, dat wil zeggen de vochtspanning in de wortelzone, bepalend zijn voor de werkelijk optredende verdamping en is dan bij voldoende energietoevoer voornamelijk afhankelijk van de verticale waterbeweging in de onverzadigde bodem en de grondwaterstand. Als maat voor de gemiddelde vochtspanning in de wortelzone en het capillair geleidingsvermogen werden respectievelijk de gesommeerde vochtonttrekking ($\sum \Delta v$) en de infiltratie min afvoer ($I - A$) in de vergelijking toegevoegd. De grondwaterstand van zandlysimeter 4, waaraan de gegevens voor dit onderzoek zijn ontleend, wordt - afgezien van zeer geringe fluctuaties - constant op 50 cm gehouden zodat ook deze term buiten beschouwing wordt gelaten.

Op grond van bovenstaande overwegingen werd nu de werkelijke verdamping beschouwd als een functie van de volgende variabelen:

$$E_w = f(E_0; L, \sum \Delta v, (I - A), N) \quad (3)$$

Met uitzondering van $\sum \Delta v$ werden de variabelen in mm/etmaal en werd de graslengte in cm omgerekend. De $\sum \Delta v$ geeft de vochtonttrekking aan in het midden van de balansperiode, uitgedrukt in mm water.

Teneinde een beter inzicht te verkrijgen over de uitdroging van het profiel beneden veldcapaciteit en het verloop van de werkelijke verdamping onder minimale vochtomstandigheden werd voor dit onderzoek, als eerste oriëntatie, de uitzonderlijke droge zomer van 1959 in beschouwing genomen. De beschouwde periode loopt van 1 april tot eind oktober; in totaal konden 49 balansperiodes van gemiddeld vier dagen in het onderzoek betrokken worden.

3. Bewerkingsmethoden en uitkomsten.

a. Rekenmodellen.

Bij dit onderzoek werd uitgegaan van de veronderstelling, dat de gevraagde functie in eerste benadering voorgesteld kan worden door een tweede graads polynomium en wel met behulp van de volgende regressievergelijking:

$$E_w = a + b_1 E_0 + b_2 N + b_3 L + b_4 (I-A) + b_5 \sum \Delta v + b_6 E_0^2 + \dots + b_{10} \sum \Delta v^2 + b_{11} E_0 \cdot N + \dots + b_{20} (I-A) \cdot \sum \Delta v \quad (4)$$

Gezien het flexibel karakter van dergelijke type functies werd de bewerking eveneens uitgevoerd met de reciproke waarden van de verklarende variabelen.

$$E_w = a + b_1 \frac{1}{E_0} + b_2 \frac{1}{N} + b_3 \frac{1}{L} + b_4 \frac{1}{(I-A)} + b_5 \frac{1}{\sum \Delta v} + b_6 \frac{1}{E_0^2} + \dots + b_{10} \frac{1}{\sum \Delta v^2} + b_{11} \frac{1}{E_0 \cdot N} + \dots + b_{20} \frac{1}{(I-A) \cdot \sum \Delta v} \quad (5)$$

Voor de bewerkingsmethode wordt korthedshalve verwezen naar nota 134 (Kamil).

De berekende meervoudige correlatie-coëfficiënten worden onderstaand weergegeven:

Tabel 1.

De uitkomsten van een tweede graads regressieberekening volgens model (4) en (5)

Model	Meervoudige correlatiecoef. r ²
"Lineair" polynomium (4)	92,3
"Reciprook" " (5)	79,0

Het is duidelijk dat het lineair polynomium de beste aanpassing geeft. Men kan zich nu evenwel afvragen welke van de in de bewerking opgenomen variabelen, tweede graads - en/of produkttermen overbodig zijn en of het wenselijk is de overbodige veranderlijken uit te schakelen.

Welke van hen het meest voor verwijdering in aanmerking komt hangt af van hun partiële dispersie. Hoewel in de literatuur verschillende middelen worden aangegeven om de keuze van de uitgeschakelde veranderlijken zo doeltreffend mogelijk te maken werd voorlopig de volgende selectiemethode toegepast.

Achtereenvolgens wordt y_0 (E_w) op elk der vectoren x_1 tot en met x_{21} geprojecteerd. Is x_k de vector, die de langste projectie levert, dan wordt y_0 geprojecteerd op de deelruimten, welke door de parenvectoren x_k en x_i ($i = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, 21$) wordt opgespannen. Zo voortgaande volgt een op eenvolging van de langste projectie op de deel-

ruimte R^m , opgespannen op een combinatie van m vectoren en de langste projectie op R^{m+1} , opgespannen op een combinatie van $(m+1)$ vectoren, dusdanig dat het kwadraat van de projectie op R^{m+1} minder verschilt van het kwadraat van de projectie op R^m dan de schatting van σ^2 .

Elke verbetering ligt dan binnen de grootte van het toeval. Van de vectoren, die niet in de combinatie van m voorkomen kan de werking niet meer van het toeval onderscheiden worden.

De resultaten van de selectie volgens deze methode zijn gegeven in tabel II in volgorde van de belangrijkheid van de factoren.

Tabel II.

De uitgeselecteerde variabelen van model (4), die in de volgorde waarin zij voorkomen, bepalend zijn voor de werkelijke verdamping

Variabele	regressie coëfficiënt b	standaard afwijking s_b	zekerheids coëfficiënt t	meervoudige correlatie coëfficiënt r^2	Toename
E_o	1.7594	0.376	4.68	0.5411	
$E_o \cdot \sum \Delta v$	0.0193	0.048	0.40	0.7245	0.1834
$E_o \cdot L$	0.0302	0.092	0.33	0.7632	0.0387
$E_o \cdot (I-A)$	-0.0597	0.092	0.65	0.8012	0.0380
$\sum \Delta v$	-0.0444	0.261	0.17	0.8534	0.0522
$N \cdot E_o$	0.0784	0.060	1.30	0.8687	0.0153
$N \cdot L$	-0.0466	0.024	1.98	0.8950	0.0263
$N \cdot \sum \Delta v$	-0.0095	0.013	0.74	0.9010	0.0060
$a (= \text{constant})$	-2,2648				
N	-0.3393	0.088	3.87		
L	0.0171	0.015	1.13		
$(I-A)$	-0.1613	0.141	1.14		

N.b. De drie laatste termen werden in de combinatie opgenomen, omdat zij als interactie voorkomen.

De berekende correlatie-coëfficiënt met geselecteerden bedraagt 0.95, terwijl de variantie van E_w zelf met dit model werd verlaagd tot 13,3% van zijn oorspronkelijke waarde. Uit de uitkomsten wordt wel heel sterk de indruk verkregen dat de open waterverdamping het grootste aandeel heeft in de beschrijving van de werkelijke verdamping en de andere factoren als aanvullende termen kunnen worden opgevat.

Verder kan uit tabel II de volgende vergelijking worden afgeleid.

$$E_w = (C + L + \sum \Delta v + (I-A)) \cdot E_o + \sum \Delta v + (E_o + L + \sum \Delta v) \cdot N \quad (6)$$

De gevonden verbanden zijn rechtlijnig, hetgeen moet worden toegeschreven aan het feit, dat bij selectie alle tweede - graads termen zijn weggevallen.

Een grafische voorstelling van de te bereiken aanpassing met deze variabelen wordt gegeven in figuur 1, waar de berekende en de gemeten verdamping tegen elkaar werden uitgezet. De standaard afwijking bedraagt 0,50 mm. Bovendien werd een aantal figuren samengesteld van de in het onderzoek betrokken variabelen, die steeds een bepaald facet van de samenhang tussen de gegevens weergeeft. In elke figuur werd de werkelijke verdamping tegen een onafhankelijk variabele uitgezet voor verschillende niveau's van een tweede onafhankelijke variabele. De op deze wijze verkregen figuur geldt voor één bepaalde waarde - in dit geval het gemiddelde - van de overige variabelen. De gemiddelden waarop de variabelen constant worden gehouden volgen hieronder:

onafhankelijke variabele	gemiddelde
E_o	3,7 mm
N	0,6 mm
(I-A)	1,8 mm
$\sum \Delta v$	-48,8 mm
L	6,1 cm

De figuren 1a tot en met 4d geven voorbeelden van deze wijze van voorstellen. Het is duidelijk dat elke figuur slechts een sterk geschema-

tiseerd beeld geeft van een wel zeer complexe samenhang. Deze regressiefuncties hebben derhalve, als zodanig fysisch weinig betekenis en dienen de conclusies met betrekking tot deze figuren met het nodige voorbehoud getrokken worden.

Volledigheidshalve worden bijgaand nog twee figuren (5a en b) gegeven van het "reciprook" polynoom.

b. Grafische analyse berging in perioden

Voor de winterperiode van 1959 werd een grafische analyse uitgevoerd, waarbij werd getracht een verband te leggen tussen de vochtverandering in het profiel (ΔV), de afvoer en de neerslag. Hierbij werd aangenomen, dat in de winter de verdamping vrijwel gelijk nul is en de waterbalans aldus kan worden geschreven:

$$N - A = \Delta V \quad (7)$$

De resultaten waren zodanig dat een lineaire vereffening mocht worden toegepast, waarbij een eerste-graads vergelijking optreedt die bovengenoemd verband aangeeft.

$$\Delta V = \alpha_1 \Delta N_1 + \alpha_2 \Delta N_2 + \alpha_3 \Delta N_3 \quad (8)$$

waarin:

ΔV = vochtverandering in het profiel

$$\alpha = \text{tg} \alpha e^{-\alpha(t+c)}$$

ΔN = het verschil van de neerslag aan het eind en juist

voor het begin van de balansperiode ($\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$)

Voor zandlysimeter 4 werden de volgende constanten gevonden:

$$\alpha_1 = 0,619 \pm 0,063$$

$$\alpha_2 = 0,388 \pm 0,082$$

$$\alpha_3 = 0,022 \pm 0,191$$

De berekende correlatie - coëfficiënt bedraagt 0,87. In figuur 8 werden de gemeten- en berekende vochtverandering in het profiel tegen elkaar uitgezet.

c. Grafische analyse van de werkelijke verdamping

Aan de hand van de langs rekenkundige weg verkregen resultaten werd voor de jaren 1959 en 1960 een grafische bewerking uitgevoerd. De uitkomsten van de rekenkundige bewerking wijzen erop, dat bij limiterende watervoorziening de open waterverdamping, dus de hoeveelheid energie, die voor de ver-

damping gebruikt kan worden afhankelijk is van de mate van beschikbaarheid van het bodemvocht. Onder deze omstandigheden is de vochttoestand van de bodem veel meer bepalend voor de werkelijk optredende verdamping dan het gewas. Op grond hiervan werd de grafische bewerking, in de eerste instantie, opgezet met het doel een inzicht te verkrijgen in de samenhang van E_w en E_o in afhankelijkheid van de vochtonttrekking. In formule uitgedrukt:

$$E_w = f(E_o, \sum \Delta V) \quad (9)$$

Aangezien deze termen niet additief zijn, maar als interactie voorkomen werd de grafische bewerking met de logaritmen van deze variabelen uitgevoerd. Verder werd, om van een goede samenhang tussen de termen verzekerd te zijn, de bewerking drie - dimensionaal uitgevoerd, waarbij voor gezorgd werd dat de beschrijvende lijnen van het meer - dimensionale vlak elkaar snijden en het vlak het gemiddelde in alle drie richtingen goed weergeeft.

Het resultaat van deze bewerking wordt weergegeven in figuur 6a en b, waar de werkelijke verdamping als functie van de open waterverdamping en de totale vochtonttrekking wordt voorgesteld, aldus $E_w = F(E_o)$ en $E_w = f(\sum \Delta V)$. Deze empirisch gevonden curven voldoen aan de volgende tweede - graads vergelijkingen:

$$E_w = aE_o^2 + bE_o + c \quad (10)$$

$$E_w = a\sum \Delta V^2 + b\sum \Delta V + c \quad (11)$$

In tabel 2 en 3 zijn de verschillende constanten van vergelijking (10) en (11) gegeven met respectievelijk $\sum \Delta V = +20, +10, 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70$ en -80 en $E_o = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ en 7 als parameters.

Tabel III

De constanten van vergelijking (10) voor verschillende waarden van $\Sigma \Delta V$

$\Sigma \Delta V$	a	b	c
+ 20	-0,0310	1,2554	-0,2566
+ 10	-0,0289	1,2252	-0,2028
0	-0,0309	1,2266	-0,2490
- 10	-0,0254	1,1625	-0,2397
- 20	-0,0247	1,1298	-0,2927
- 30	-0,0234	1,0889	-0,3450
- 40	-0,0255	1,0523	-0,3596
- 50	-0,0245	0,9944	-0,3563
- 60	-0,0199	0,9217	-0,3471
- 70	-0,0106	0,8228	-0,3384
- 80	-0,0008	0,7057	-0,2633

Tabel IV

De constanten van vergelijking (11) voor verschillende waarden van E_0

E_0	a	b	c	$\frac{c}{E_0}$
1,0	-0,00002	0,0045	0,8261	0,83
2,0	-0,00004	0,0088	2,0567	1,03
3,0	-0,00007	0,0116	3,1552	1,05
4,0	-0,00010	0,0124	4,1310	1,03
5,0	-0,00011	0,0129	5,0344	1,01
6,0	-0,00011	0,0168	5,9495	0,99
7,0	-0,00016	0,0190	6,8109	0,97

Uit figuur 6a en b blijkt, dat bij toenemende vochtonttrekking de werkelijke verdamping meer wordt gereduceerd naarmate de E_0 groter is. Bij optimale watervoorziening van de gewassen echter zal de werkelijke

verdamping bij bepaalde verdampingsintensiteiten de E_0 overtreffen. Als mogelijke oorzaken voor dit verschijnsel kunnen worden genoemd:

1. De grotere aerodynamische ruwheid van het grasoppervlak, waardoor de windsnelheid meer invloed kan uitoefenen op de turbulente damp- en warmte - uitwisseling. Met andere woorden de invloed van de windsnelheid komt bij de open waterverdamping niet voldoende tot uiting.
2. De warmteopslag in en tussen het gewas is niet groot en kan over een heel etmaal vaak worden verwaarloosd, terwijl die van water, vooral bij aanzienlijke temperatuursfluctuaties nog belangrijk is.

Uit de afname van potentiële evapotranspiratie bij geringe verdampingsintensiteiten ongeacht de vochttoestand van de bodem, zou volgen, dat gras met een kleinere opening van de huidmondjes zou reageren op omstandigheden van zware bewolking. Een afname van de potentiële verdamping bij zeer hoge verdampingsintensiteiten, zoals dit uit tabel III blijkt, waar de constante c equivalent is aan de potentiële verdamping, werd reeds door verschillende onderzoekers waargenomen. Blijkbaar is onder deze omstandigheden de transportsnelheid van water door de plant te gering; er treden dan verwelkingsverschijnselen op en de huidmondjes worden gesloten.

De verhouding $F_p/E_0 = f$ blijkt voor deze korte perioden niet constant te zijn en varieert van 0,83 tot 1,05. Wel moet worden opgemerkt, dat deze potentiële verdamping niet voldoet aan de eisen, welke algemeen aan de potentiële verdamping worden gesteld. De potentiële verdamping heeft hier betrekking op een actief groeiend gewas, dat om de maand werd gemaaid.

Met deze functies kan de werkelijke verdamping voor ruim 70% worden verklaard. De rest van de spreiding moet worden toegeschreven aan het gewas en de neerslag. Teneinde de invloed van het gewas beter te leren kennen werd de rest - spreiding gerangschikt naar verschillende klassen van graslengte en de gemiddelden tegen elkaar uitgezet. Door eliminatie van de factor gewas werd de variantie minder zodat de invloed van de neerslag duidelijker naar voren kwam. Nadat de neerslag - die op vier waarden constant werd gehouden - in de bewerking was verdisconteerd, werd nagegaan in hoeverre de vorm van de gewascurve onder invloed hiervan veranderde en werden de nodige correcties toegepast.

Deze reïteratieve bewerking werd net zolang voortgezet totdat er geen significante verbetering meer optrad. De invloed van het gewas op de verdamping wordt in een logaritmische schaal (figuur 7) weergegeven, zulks

in tegenstelling tot figuur 6a en b, die in een lineaire schaal werden teruggerekend. Uit figuur 7 blijkt duidelijk dat na het maaien de verdamping geleidelijk afneemt. Dit is heel aannemelijk vooral wanneer men aanneemt, dat na het maaien het verdampend oppervlak sterk wordt gereduceerd en de bodem niet meer volledig is bedekt waardoor meer energie voor de verwarming van de bodem en de lucht gebruikt kan worden. Pas bij een graslengte van ± 6 cm schijnt de bodem weer volledig bedekt te zijn en zal de verdamping met toenemende graslengte tot een zekere grenswaarde geleidelijk toenemen. Geringe neerslagen (< 1 mm) heeft als gevolg van interceptie een verdampend verhogend effect.

Vergelijkt men de berekende met de gemeten verdamping (figuur 9) dan blijkt de overeenstemming redelijk te zijn. De berekende correlatiecoëfficiënt bedraagt $0,86^6$. Dit betekent dat 74% van de waarnemingen door berekening met dit model kan worden verklaard.

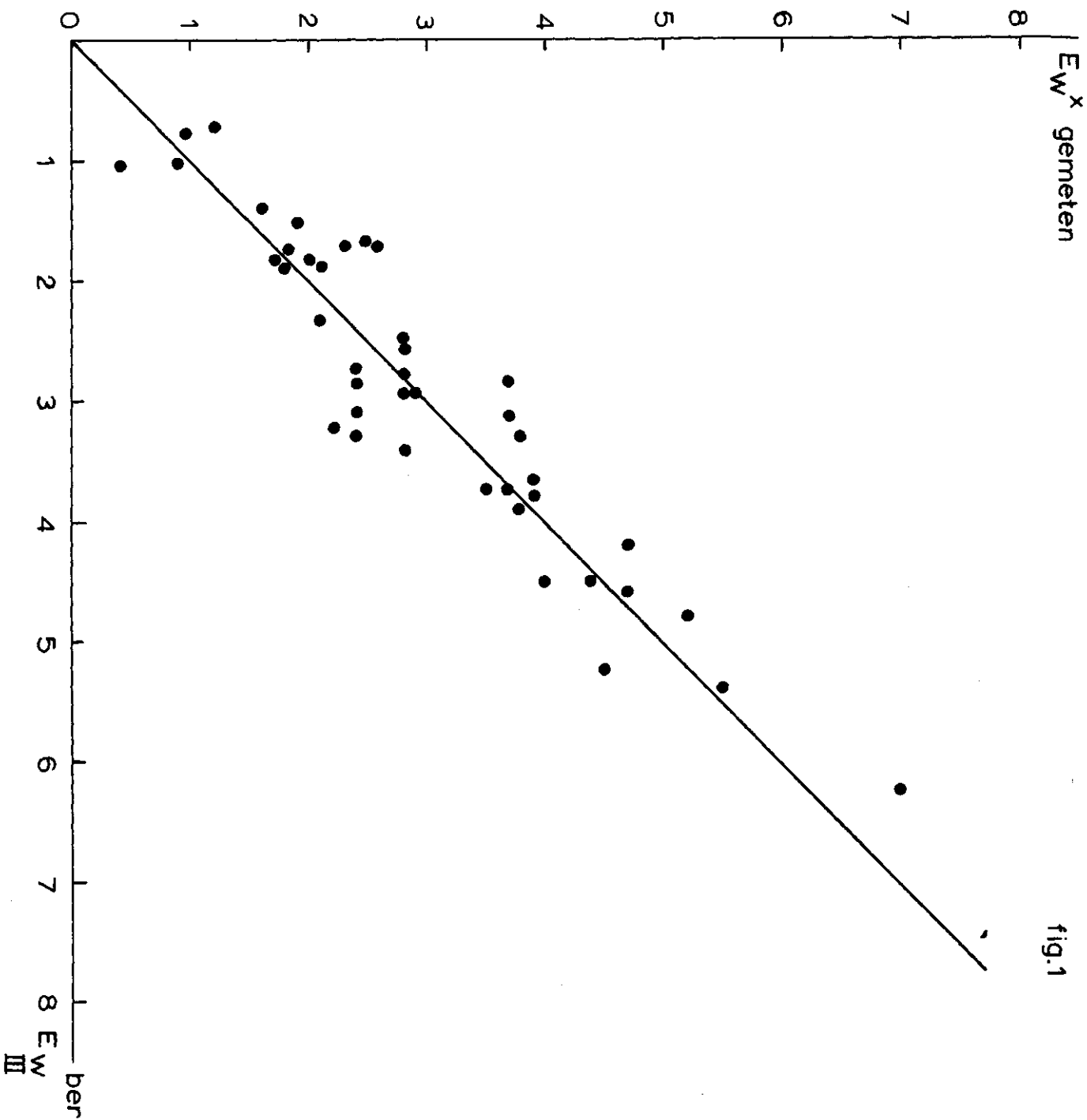
4. Samenvatting

Met het oog op de overdraagbaarheid van weegbare lysimetergegevens naar de niet - weegbare lysimeter- en polderbalansen is het gewenst de werkelijke verdamping af te leiden uit de neerslagcijfers, afvoergegevens en open waterverdampingen. Het vinden van een functie die het verband legt tussen de verdamping enerzijds en het gewas, de bodemvochtigheid en het klimaat anderzijds is een eerste vereiste. Voor een empirische benadering werd uitgaande van de waterbalansvergelijking $E_w + A = N + I - \Delta V$, met de meetbare grootheden uit deze vergelijking een statistische analyse uitgevoerd.

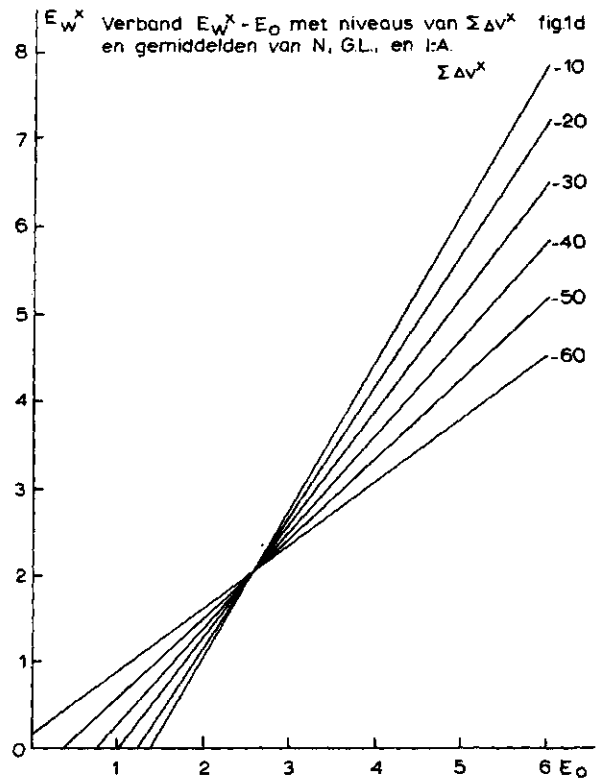
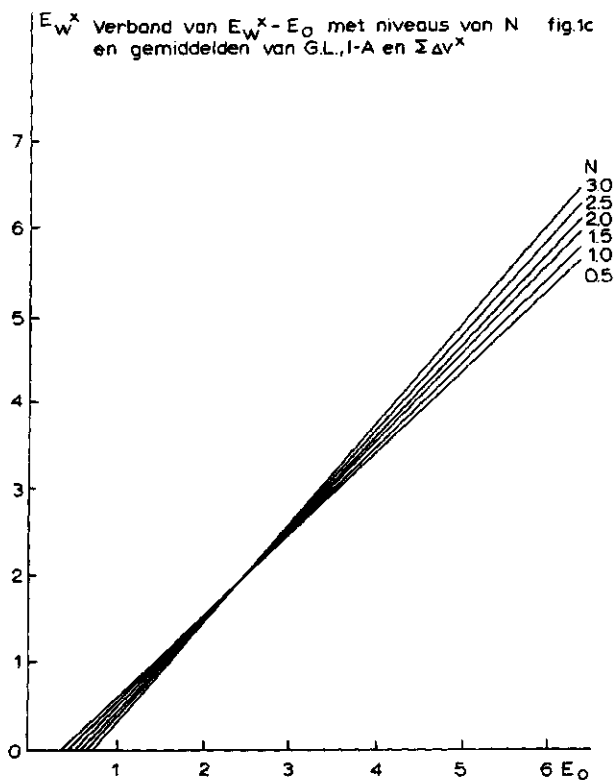
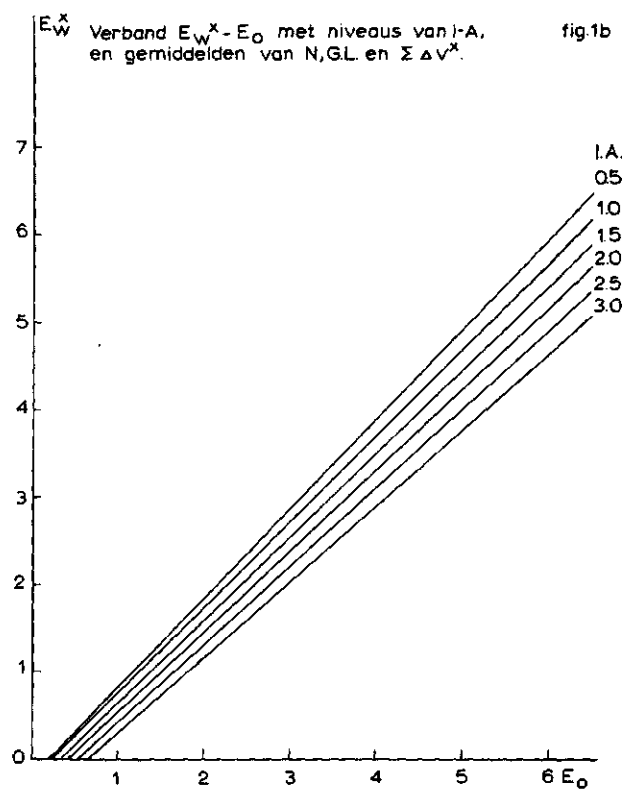
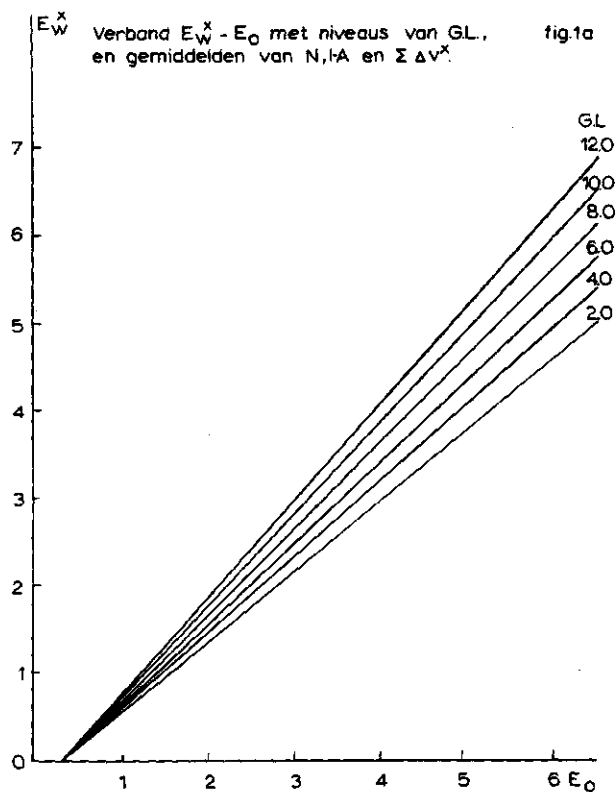
Bij dit onderzoek werd aangenomen dat de gevraagde functie, $E_w = \phi$ (verklarende variabelen), benaderd kan worden door een tweede- graads polynoom. De uit dit onderzoek verkregen resultaten werden aan een beschouwing onderworpen.

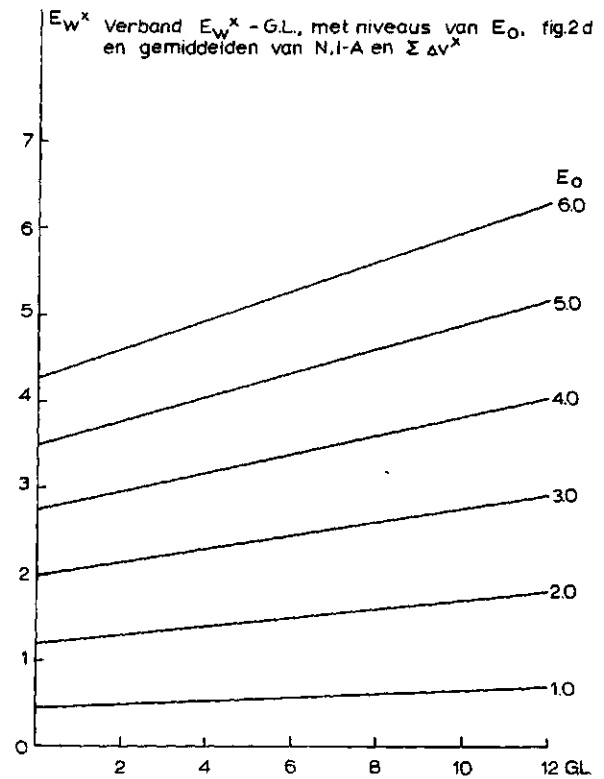
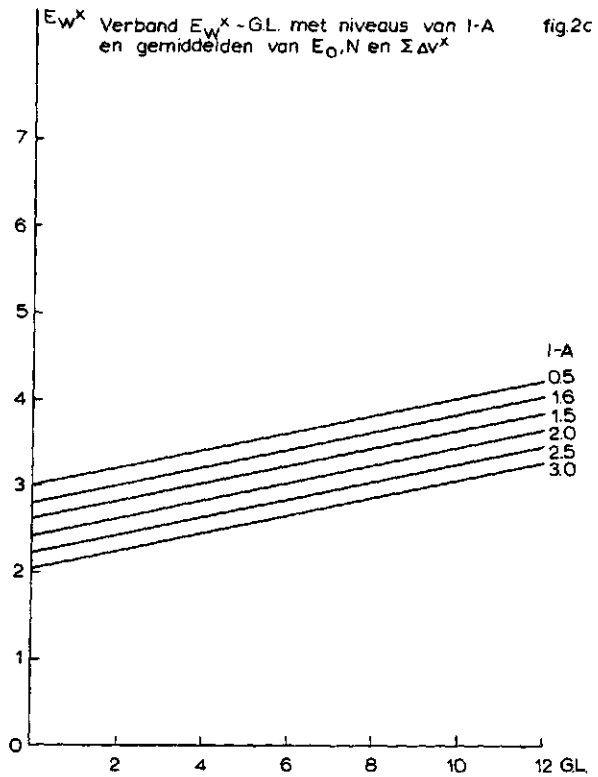
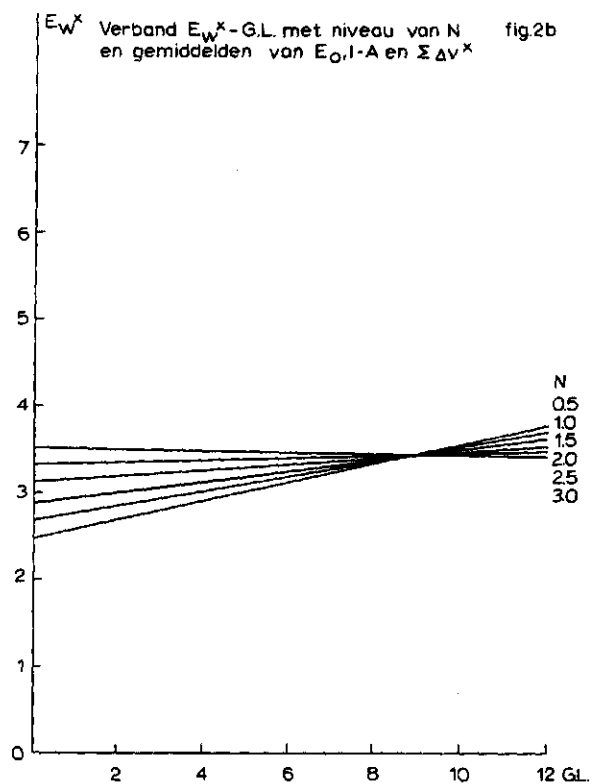
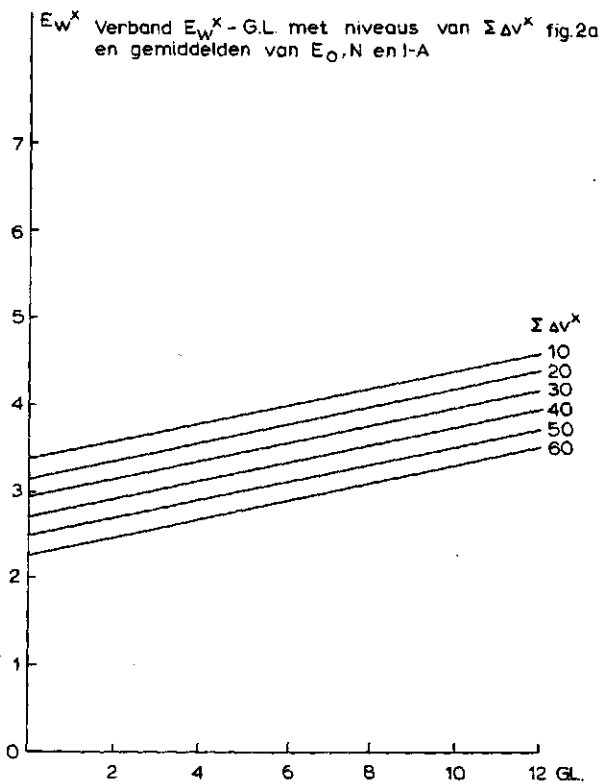
E_w^x gemeten

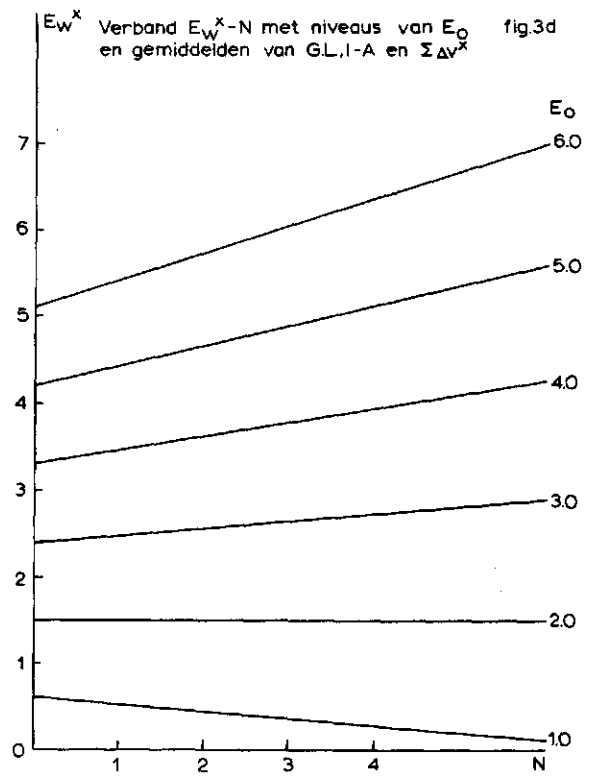
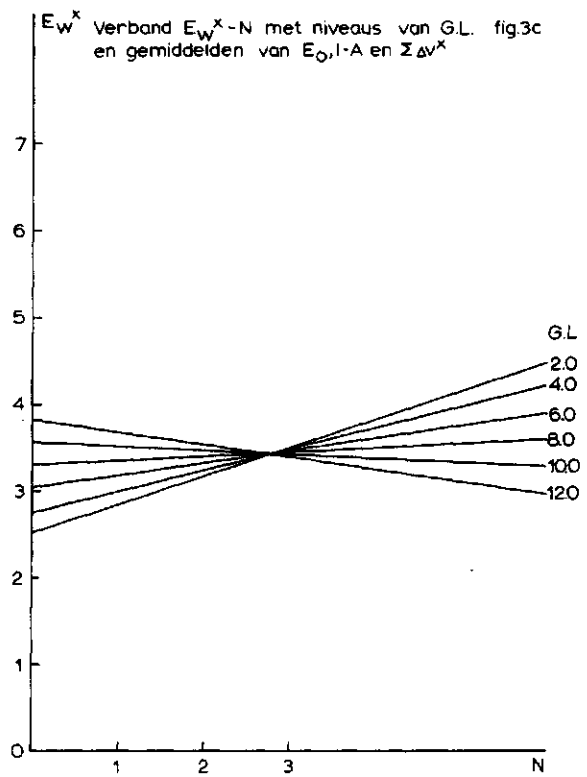
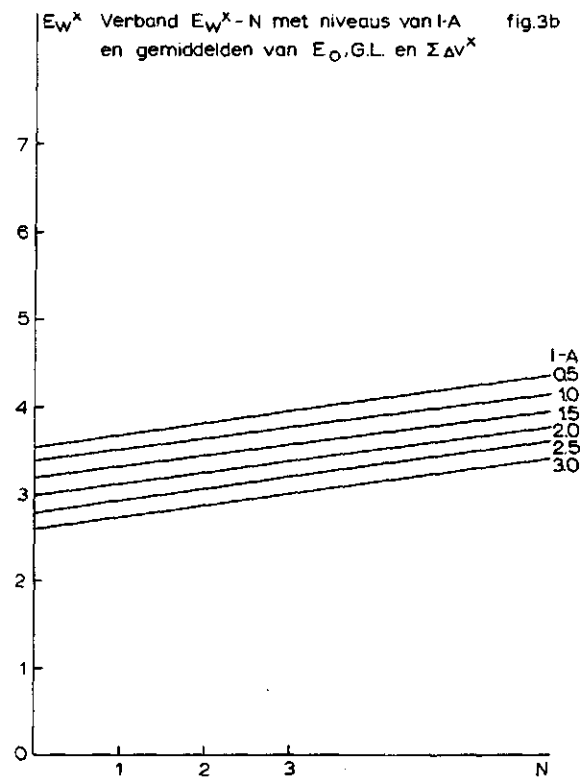
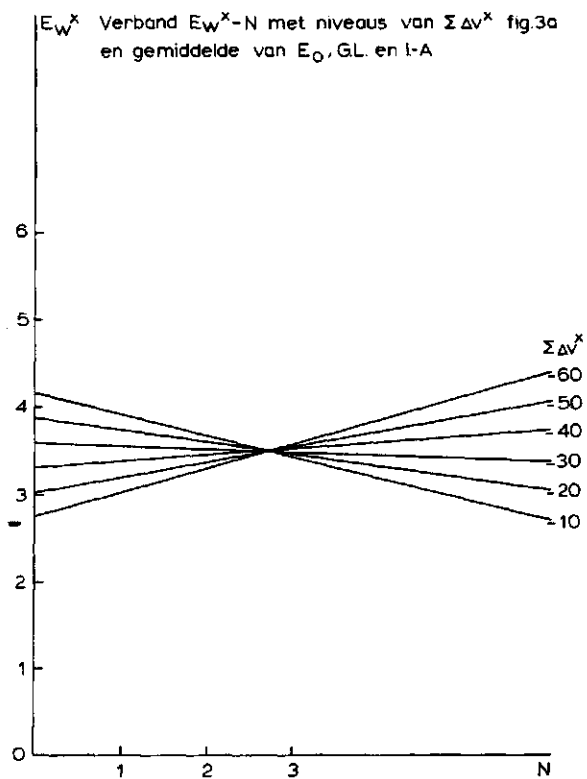
fig.1



E_w^x ber

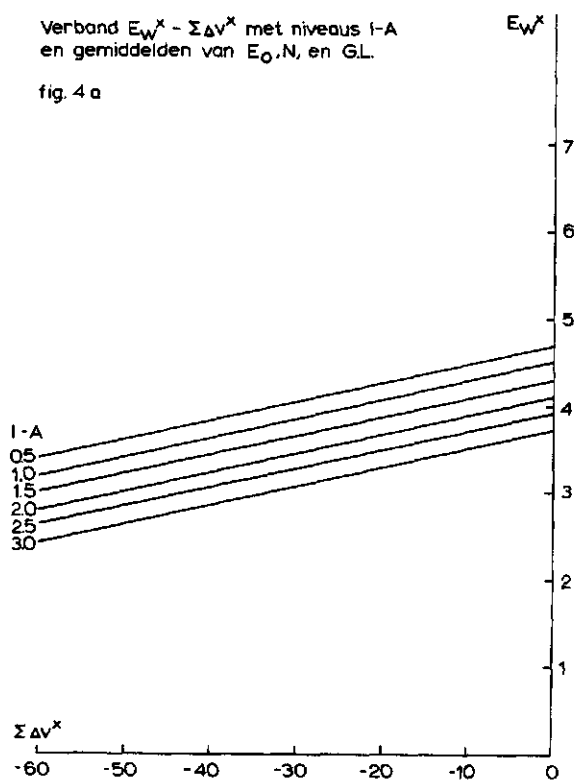






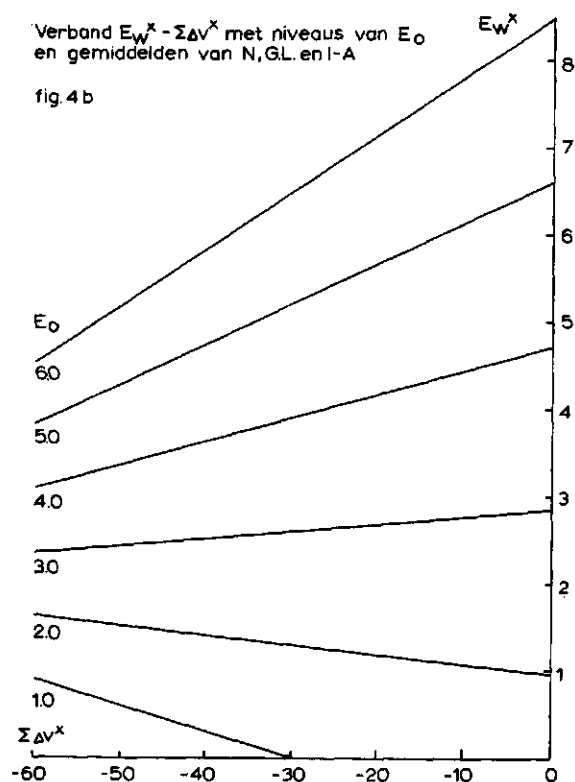
Verband $E_W^x - \Sigma \Delta v^x$ met niveaus I-A
en gemiddelden van E_0 , N, en GL.

fig. 4 a



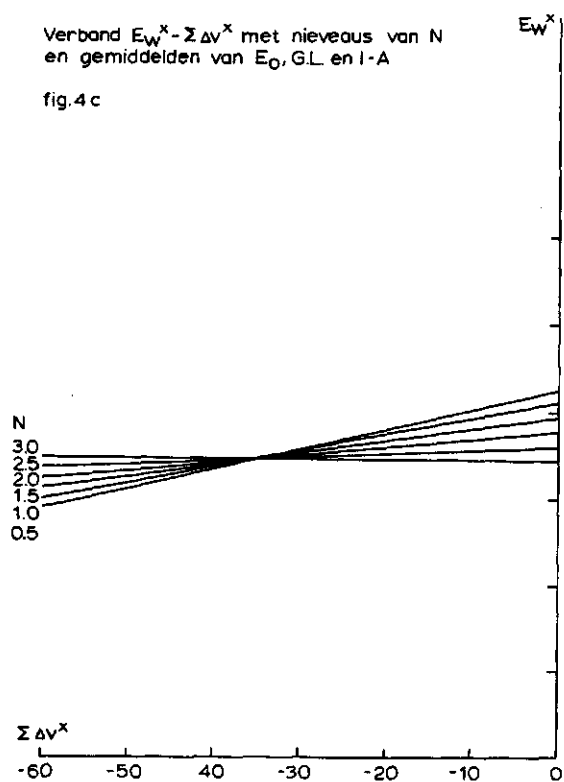
Verband $E_W^x - \Sigma \Delta v^x$ met niveaus van E_0
en gemiddelden van N, GL, en I-A

fig. 4 b



Verband $E_W^x - \Sigma \Delta v^x$ met niveaus van N
en gemiddelden van E_0 , GL, en I-A

fig. 4 c



Verband $E_W^x - \Sigma \Delta v^x$ met niveaus van GL
en gemiddelden van E_0 , N, en I-A

fig. 4 d

