

HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

R.G.V.A. Verkooijen
J.H. Hoogendoorn
P. Grootjans

Dienst Waterbeheer, provincie Gelderland
Arnhem

Dienst Grondwaterverkenning, TNO
Oosterwolde / Delft

December 1985

22/12/80

796A80
BIBLIOTHEEK
STADSGEOLOGIE

HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

R.G.V.A. Verkooijen
J.H. Hoogendoorn
P. Grootjans

Dienst Waterbeheer, provincie Gelderland
Arnhem

Dienst Grondwaterverkenning, TNO
Oosterwolde / Delft

December 1985

3 JUL 1991

Inhoudsopgave

	Lijst van figuren	3
	lijst van bijlagen	4
	Samenvatting	5
1	Inleiding	6
2	De geohydrologie van de provincie Gelderland	8
2.1	De geologische geschiedenis van Gelderland	8
2.2	De Achterhoek	9
2.3	De IJssel Vallei	10
2.4	De Veluwe	10
2.5	De Gelderse Vallei	11
2.6	Het Rivierengebied	12
2.6.1	Het Rivierengebied ten westen van Tiel	12
2.6.2	Het Rivierengebied ten oosten van Tiel	12
2.6.3	De omgeving van Nijmegen	13
2.7	De grondwaterstroming in het eerste watervoerend pakket	13
3	Enkele theoretische achtergronden van de hydrochemie	15
3.1	De analyse-eenheden	15
3.2	Chemische evenwichten in water	16
3.3	Presentatievormen voor wateranalyses	19
3.4	Chemische eigenschappen van de gekozen parameters	22
4	De totstandkoming van de hydrochemische kaarten en figuren	28
5	De bespreking van de resultaten	31
5.1	De statistische bewerkingen	31
5.1.1	De tienjaargemiddelden	31
5.1.2	De histogrammen	35
5.2	De Piperdiagrammen	41
5.3	De hydrochemische kaarten	43
5.4	Vergelijking met eerder verricht onderzoek	50
6	Conclusies en aanbevelingen	53
7	Literatuurlijst	55

LIJST VAN FIGUREN

	Figuur
Tabel van boven-tertiaire en kwartaire formaties	1
Schoellerdiagram voor grondwatermonsters	2
Diagram volgens Piper voor de monsters water uit boring 40B245	3
Piperdiagram met toevoeging van Fe^{2+} en NO_3^-	4
pE-pH diagram voor nitraat, ijzer en water	5
Verband tussen EC en TDS	6
Tienjaargemiddelden voor Rivierengebied en IJssel Vallei	7
Tienjaargemiddelden voor infiltratiegebieden	8
Tienjaargemiddelden voor Gelderse Vallei	9
Tienjaargemiddelden voor Achterhoek	10
Tienjaargemiddelden voor stedelijke gebieden	11
Histogram van sulfaat	12
Histogram van totale hardheid	13
Histogram van chloride	14
Histogram van nitraat	15
Histogram van ijzer	16
Histogram van elektrische conductiviteit	17
Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket (C1<20, Hardheid <1)	18
Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket (C1<20, Hardheid >1)	19
Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket (C1>20, Hardheid <1)	20
Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket (C1>20, Hardheid >1)	21
Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket (C1<20, Hardheid <1)	22
Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket (C1<20, Hardheid >1)	23
Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket (C1>20, Hardheid <1)	24
Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket (C1>20, Hardheid >1)	25
Isohyphenkaart eerste watervoerend pakket d.d. 28.4.1975	26
Kaart met geografische aanduidingen	27

LIJST VAN BIJLAGEN

	Bijlage
Lokatiekaart	1
het eerste watervoerend pakket	1
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	2
Gebiedskaart	3
EC kaart	4
het eerste watervoerend pakket	4
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	5
Piperwatertypekaart	6
het eerste watervoerend pakket	6
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	7
Chloridekaart	8
het eerste watervoerend pakket	8
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	9
Nitraatkaart	10
het eerste watervoerend pakket	10
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	11
Sulfaatkaart	12
het eerste watervoerend pakket	12
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	13
IJzerkaart	14
het eerste watervoerend pakket	14
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	15
Totale Hardheidkaart	16
het eerste watervoerend pakket	16
het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag	17
Regionale indeling in watervoerende pakketten	18

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de resultaten van het hydrochemisch onderzoek van het grondwater in het ondiepe en diepe watervoerend pakket voor de provincie Gelderland. Als eerste wordt hiertoe een samenvatting van de geohydrologie van de provincie gegeven. Dit is gedaan op basis van een indeling van Gelderland in 5 deelgebieden: de Achterhoek, de IJssel Vallei, de Veluwe, de Gelderse Vallei en het Rivierengebied. De geohydrologie blijkt inmiddels goed bekend te zijn. Ook het regionale grondwaterstromingsbeeld blijkt over het algemeen weinig problemen te geven.

In dit rapport wordt ook kort ingegaan op enkele hydrochemische achtergronden, zoals analyse-eenheden, chemische evenwichten, presentatievormen voor chemische analyses en de hydrochemische betekenis van de gekozen karteringsparameters. De gekozen parameters zijn de elektrische conductiviteit, Piperwatertype, chloridegehalte, nitraatgehalte, sulfaatgehalte, ijzergehalte en de totale hardheid.

Daar de in dit rapport gepresenteerde resultaten door middel van computerbewerking tot stand zijn gekomen wordt hiertoe een korte toelichting gegeven over de gevolgde werkwijze en zijn beperkingen.

De hydrochemische gesteldheid van het Gelderse grondwater wordt besproken aan de hand van tienjaargemiddelden, frequentieverdelingen, Piperdiagrammen en hydrochemische kaarten. Daar bij dit onderzoek de gegevens per geohydrologisch deelgebied zijn uitgewerkt komen de hydrochemische verschillen goed tot uiting. Vooral het oplossend vermogen van de gemiddelde waarden en de histogrammen blijkt hierdoor beduidend beter te worden.

Vergelijking met eerder verricht onderzoek levert het volgende op. Het hier gepresenteerde onderzoek blijkt een goede betrouwbaarheid te bezitten in de weergave van de horizontale verschillen, zoals de ligging van vervuilde gebieden. De weergave in de verticaal blijkt voor dit onderzoek duidelijk veel minder te zijn. Dit komt door beperkingen bij het tekenen met behulp van de computer. Het blijkt echter een aanvaardbaar compromis te zijn.

Het relatief wijdmazige gegevensnet is verantwoordelijk voor het feit dat dit onderzoek slechts een sterk regionaal beeld geeft. Lokale verschijnselen en kwaliteitsproblemen komen meestal niet tot uiting.

1 INLEIDING

Dit rapport behandelt de resultaten van de hydrogeochemische inventarisatie voor het grondwater van de provincie Gelderland en is verricht in het kader van het door de provincie op te stellen grondwaterplan. Door de relatief beperkte middelen werd gekozen voor een doelmatige aanpak met behulp van de computer. Dit hield in dat een regionale aanpak werd gevolgd waarbij verschillen in de verticaal werden ingevangen door de meest ongunstige waarneming op de kaart te laten tekenen. Met deze optie werd een geautomatiseerde verwerking mogelijk.

Het onderzoek werd begin 1983 opgestart door P. Grootjans in het kader van zijn vervangende dienstplicht bij de dienst Waterbeheer (WB). Dit geschiedde in samenwerking met drs. J.H. Hoogendoorn van de dienst Grondwaterverkenning TNO (DGV-TNO) en onder leiding van ing. F.G. Aelmans van DGV-TNO. Hun deel omvatte invoer, selectie (zoals indeling in watervoerend pakket, type parameter), controle van de ingevoerde gegevens en de geautomatiseerde uitvoer van de verzamelde en bewerkte gegevens. De uiteindelijke interpretatie en rapportage was in handen van drs. R.G.V.A. Verkooijen (WB).

De opzet van dit onderzoek is afgeleid van het DGV-TNO onderzoek: "Hydrochemie Oost-Nederland" door drs. J.H. Hoogendoorn (1983A) met dien verstande dat het statistische gedeelte beperkt is gebleven. Voor dit onderzoek omvat het statistische deel slechts de vervaardiging van frequentie curven en tienjaargemiddelden.

De voor dit onderzoek gebruikte gegevens zijn afkomstig uit het DGV-TNO archief, hetgeen een schaduwarchief is van het archief van het toenmalige Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening (RID, thans Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek van het RIVM).

Het onderzoek draagt een sterk regionaal karakter: op lokale problematiek als bijvoorbeeld bodemverontreiniging wordt niet ingegaan. Voor het ondiepe (= eerste) watervoerend pakket is gewerkt op een schaal van 1 : 100.000, voor het daar onderliggende watervoerend pakket is gewerkt op een schaal van 1 : 250.000. Door de kleine schaal zijn lokale gegevens vaak niet meegenomen in het regionale patroon, evenzo komen verschillen in de verticaal binnen één watervoerend pakket niet goed tot uiting.

In dit rapport komen vervolgens aan de orde: een samenvatting van de geohydrologie, enkele theoretische hydrochemische achtergronden, informatie over de totstandkoming van de hydrochemische kaarten, bespreking van de onderzoeksresultaten en conclusies met aanbevelingen.

Chronostratigrafie			Afzettingen in verband met landijs		Afzettingen van lokale herkomst		Afzettingen van grote rivieren		Afzettingen in zee en bij de kust	
			N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
KWARTAIR	PLEISTOCEEN	HOLOCEEN			Formatie van Kootwijk E Formatie van Singraven B Formatie van Griendtsveen V		Betuwe Formatie R + M		Westland Formatie	
		Boven	Weichselien*		Formatie van Twente E + V + P + B		Formatie van Krettenheye R + M			
			Eemien		Formatie van Asten V				Eem Formatie	
		Midden	Saalien*	F v Drente						
			Holsteinien		Formatie van Eindhoven E + P B + V		Formatie van Urk R	Formatie van Veghel M	...	
			Elsterien*	F v Peelo					...	
			Cromerien complex**							
			Menapien*							
		Onder	Waalien		Form van Kedichem (ten dele) B + P + V		Formatie van Enschede O	Formatie van Sterksel R + M		
			Eburonien*				Formatie van Kedichem R + M			
			Tiglien				Harderwijk O			
			Praetiglien*				Formatie van Tegelen R + M		Formatie van Maassluis	
TERTIAIR	PLIOCEEN	Boven (Reuverien)					Form van Scheemda O	Kiezel-ooliet Form R + M	Formatie van Oosterhout	
		Onder (Brunssumien)								
	MIOCEEN	Boven								
		Midden								
		Onder				Form van Heksenberg			Formatie van Breda (ten dele)	

E = eolische afzettingen
P = periglaciaie afzettingen
B = beekafzettingen
V = veen

R = Rijn
M = Maas
O = oostelijke noordduitse rivieren en voorlopers

*koude tijd
**complexe eenheid bestaande uit tenminste 4 warme en 3 koude tijden
***nog onbenoemd, voorlopig bij Formatie van Urk

Tabel van de boven-tertiaire en kwartaire formaties, gerangschikt naar ouderdom en genese

Figuur 1

2 DE GEOHYDROLOGIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de geohydrologie van de provincie Gelderland. Het is een samenvatting van het rapport "De geohydrologische beschrijving van de provincie Gelderland" (Grootjans, 1984). Voor dit doel is de provincie onderverdeeld in 5 gebieden: de Achterhoek, IJssel Vallei, Veluwe, Gelderse Vallei en het Rivierengebied.

Voor de juiste ligging van de in dit verslag gebruikte geografische (plaats)namen wordt verwezen naar figuur 27.

De hierna tussen haakjes in de tekst vermelde cijfers hebben betrekking op de regionale nummering van watervoerende pakketten voor de provincie Gelderland, zoals is aangegeven in bijlage 18.

2.1 Geohydrologische geschiedenis van Gelderland

Een overzicht van de plaatsing in de tijd van de hierna te bespreken geologische informatie en hun afzettingsmilieu wordt gegeven in figuur 1.

Een ruimtelijk overzicht van de formaties die de belangrijkste scheidende lagen vormen wordt gegeven door bijlage 18.

Het pleistocene bekken van Nederland wordt aan de onderzijde begrensd door de tertiaire, schelp- en glauconiethoudende, kleien en zandige kleien van de Formaties van Oosterhout en Breda. In de Achterhoek komen echter ook mesozoïsche, is ouder dan Tertiair, sedimenten voor.

De eerste pleistocene formatie is de Formatie van Maassluis, die ook van mariene oorsprong is. De lithologie bestaat uit grove en fijne zanden met ingeschakelde zandige kleilagen.

Hierna trad een regressie in en geleidelijk aan werd de mariene sedimentatie verdrongen door een fluviatiele sedimentatie. De Formatie van Tegelen is de eerste fluviatiele afzetting en bestaat uit kleiige en fijnzandige afzettingen met kleilenzen. Soms zijn er grofzandige inschakelingen. Na de Formatie van Tegelen werd de Formatie van Kedichem afgezet en wel alleen in het Rivierengebied. Deze Formatie bestaat uit fijne zanden en kleien met in het basale gedeelte grofzandige inschakelingen.

De Formatie van Harderwijk wordt opgevat als de noordelijke equivalent van de Formatie van Kedichem en gedeeltelijk van de Formatie van Tegelen. Ook deze formatie is van fluviatiele herkomst en bestaat uit grove zanden met doorlopende kleilagen aan de onderzijde. Eveneens van fluviatiele herkomst zijn de Formaties van Sterksel, Enschede en Urk.

Het Pleistoceen kenmerkt zich door het optreden van ijstijden. De Saale-ijstijd is de enige ijstijd waarin de gletsjers Nederland bereikt hebben en hiervan duidelijke sporen hebben achtergelaten. Gelderland is rijk bedeed met sporen in de vorm van stuwwallen en opgevulde gletsjerdalen. De stuwwallen bestaan grotendeels uit verschubde en geplooid sedimenten van oudere formaties, soms tot en met een gedeelte van de Formatie van Tegelen. Tijdens deze Saale-ijstijd werd de Formatie van Drente afgezet en bestaat uit fijne en grove grindhoudende zanden en uit klei en leem.

Na deze koude periode volgde een interglaciaal waarin het ijs smolt en de zeespiegel steeg. In deze periode werd de Eem Formatie gevormd bestaande uit venen, zanden en kleien.

De Weichsel-ijstijd volgde de warme periode op. Het landijs bereikte Gelderland niet, maar het gebied kwam onder invloed te staan van arctische omstandigheden. Nu werd de Formatie van Twente afgezet door de wind in de vorm van een laag dekzand. Ook grove smeltwaterafzetting behoren tot de Formatie van Twente. In het Rivierengebied en het IJsseldal werd gelijktijdig de Formatie van Kreftenheye door de daar stromende rivieren afgezet. De sedimenten bestaan uit grove grindhoudende zanden met plaatselijk klei of veen.

In het Holoceen werden de Betuwe Formatie en de Westland Formatie gevormd. Hun lithologie bestaat uit zand of kleiig zand (stroomgordelafzettingen) en kleiige sedimenten (komklei).

Overzicht van de geohydrologie per gebied:

2.2 De Achterhoek

Onder de Achterhoek wordt hier globaal verstaan het deel van Gelderland ten oosten van de lijn Lobith-Doetinchem-Vorden.

Hydrologisch bestaat de Achterhoek uit één (1+2+3) watervoerend pakket gevormd door de zanden van de Formaties van Urk, Twente en Kreftenheye. De dikte van dit pakket varieert van 60 meter in het westen tot enkele meters in het oosten.

De slecht doorlatende hydrologische basis wordt gevormd door de kleien van de Formatie van Oosterhout in het westen, de kleien van de Formatie van Breda in het oosten en door afzettingen van mesozoïsche ouderdom in het uiterste oosten. De hydrologische basis vertoont in de omgeving van Dinxperlo, Aalten en Winterswijk een geulvormige structuur, zodat hier het watervoerend pakket dikker is.

In het noordelijk deel van de Achterhoek, de omgeving van Borculo, komt in het watervoerend pakket een scheidende laag voor van enkele meters dikte behorend tot de Eem Formatie. Deze scheidende laag vertoont vele onderbrekingen.

In het zuidwesten van de Achterhoek bevindt zich het hoge Montferland. Dit bestaat uit, tijdens de Saale-ijstijd, door het landijs opgestuwde midden- en onder-pleistocene en pliocene formaties.

2.3 De IJssel Vallei

Onder de IJssel Vallei wordt hier verstaan het gebied globaal ingesloten door de lijn Lobith-Doetinchem-Vorden-Deventer-Zwolle, het Veluwemassief en de Rijn.

In dit gebied worden twee belangrijke watervoerende pakketten aangetroffen. Het eerste (= bovenste) watervoerend pakket wordt gevormd door de zandige Formatie van Kreftenheye, de zandige delen van de Formatie van Drente en de Eem Formatie. Dit watervoerende pakket heeft een dikte van 30 tot 60 meter. Lokaal wordt dit pakket opgedeeld in twee watervoerende pakketten (1A en 1B) door kleien en venen van de Eem Formatie met een dikte tot circa 10 meter. De bovenkant van dit slecht doorlatend geheel bevindt zich op 8 tot 14 meter min maaiveld. De top van het eerste watervoerend pakket wordt plaatselijk gevormd door de slecht doorlatende Betuwe Formatie met een dikte tot enkele meters.

De scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerend pakket wordt gevormd door de klei van de Formatie van Drente, gesedimenteerd tijdens het afsmelten van het landijs. De dikte varieert van 5 tot 100 meter.

Het tweede (2 + 3) watervoerend pakket wordt gevormd door de zanden van de Formaties van Maassluis en Urk en de zandige top van de Formatie van Oosterhout. De dikte van dit watervoerend pakket bedraagt circa 130 meter.

De hydrologische basis wordt gevormd door de kleien en de lemige zanden van de Formaties van Oosterhout en Breda. De diepte van deze basis varieert van 110 tot 260 meter min NAP.

2.4 De Veluwe

Het gebied de Veluwe bestaat voor dit rapport uit het Hoge Veluwe massief plus de strook langs de randmeren vanaf Harderwijk tot de noordelijke provinciegrens.

In dit deelgebied worden twee watervoerende pakketten onderscheiden. Het eerste (1 + 2) watervoerend pakket wordt in de hoge delen van het gebied gevormd door de tijdens de Saale-ijstijd gestuwde Formaties van Enschede, Harderwijk en Sterksel. In de lage delen van het gebied horen ook de Formaties van Twente, Kootwijk en Urk plus de zandige delen van de Formatie van Drente tot het eerste watervoerend pakket. De dikte van het eerste watervoerend pakket varieert van 120 tot 210 meter. In het noorden langs de randmeren in de omgeving van Elburg komt in het watervoerend pakket lokaal een enkele meters dikke kleilaag voor op een diepte van ongeveer 12 meter. Deze kleilaag hoort tot de Eem Formatie. In de hoge delen komen lokaal kleilagen voor waarop het infiltrerende water stagneert: schijngrondwaterspiegels. De grootste schijnspiegel is die van het Hierdense Beek gebied; de klei behoort hier tot de Formatie van Drente. Een ander belangrijk gebied met schijngrondwaterspiegels is de Zuidelijke Veluwezoom. Hier worden de schijnspiegels gevormd op de gestuwde kleien van de Formatie van Kedichem.

De scheidende laag tussen het eerste (1 + 2) en tweede (3) watervoerend pakket wordt in dit gebied gevormd door het complex van kleilagen behorend tot de Formatie van Tegelen en Maassluis. Dit complex kan zo'n 40 meter dik zijn. In het oosten sluit deze scheidende laag aan bij de scheidende laag van de Formatie van Drente. Deze aansluiting is niet over het hele contact even volledig, zodat plaatselijk een uitwisseling tussen de watervoerende pakketten mogelijk is.

Het tweede (3) watervoerend pakket wordt gevormd door de zanden van de Formaties van Maassluis en Oosterhout. De dikte van dit watervoerend pakket bedraagt ongeveer 100 meter.

De hydrologische basis wordt gevormd door de kleien van de Formaties van Oosterhout en Breda. De diepteligging van de basis varieert van 200 tot 300 meter min NAP.

2.5 De Gelderse Vallei

Onder de Gelderse Vallei wordt in dit rapport verstaan het gebied in het noorden begrensd door de randmeren, in het oosten door het Veluwe massief, in het zuiden door de Rijn en in het westen door de provinciegrens.

In de Gelderse Vallei worden over het algemeen vier watervoerende pakketten aangetroffen. Het eerste (1A) watervoerend pakket wordt gevormd door de Formatie van Twente en heeft een geringe dikte van circa 15 meter.

De eerste scheidende laag wordt hier gevormd door de klei en het veen van de Eem Formatie, welke in dit gebied zeer goed scheidend is. De dikte varieert tussen circa 2 meter in het zuiden van het gebied tot circa 50 meter onder de randmeren en Zuidelijk Flevoland.

Het tweede (1B) watervoerend pakket wordt gevormd door de zandige delen van de Eem Formatie en van de Formatie van Drente. Dit watervoerend pakket is ongeveer 20 tot 30 meter dik.

De tweede scheidende laag wordt gevormd door de kleien van de Formatie van Drente in het noordelijk deel en de kleien van de Formaties van Drente en Kedichem in het zuidelijk deel van dit gebied. De dikte varieert van circa 5 meter tot 30 meter. In het centrale deel van het gebied ontbreken deze kleien, zodat hier het tweede (1B) en derde (2) watervoerend pakket één geheel vormen. In het noorden van de Gelderse Vallei wigt het tweede watervoerend pakket uit; hier komen de eerste en tweede scheidende laag op elkaar te liggen met een totale dikte tot 80 meter.

Het derde (2) watervoerend pakket wordt gevormd door de Formaties van Sterksel, Enschede, Harderwijk en Urk. De dikte van dit pakket varieert van 70 tot 100 meter.

De derde scheidende laag wordt gevormd door het complex van kleilagen van de Formaties van Tegelen en Maassluis. De dikte van dit complex bedraagt circa 40 meter.

Het vierde (3) watervoerend pakket wordt gevormd door de zandige delen van de Formaties van Maassluis en Oosterhout. De dikte bedraagt 50 tot 75 meter.

De hydrologische basis wordt gevormd door de lemige zanden van de Formaties van Oosterhout en Breda en bevindt zich op een diepte van ongeveer 200 tot 250 meter min NAP.

2.6 Het Rivierengebied

Onder het Rivierengebied wordt voor dit onderzoek verstaan het deel van Gelderland ingesloten door de rivieren de Rijn en de Maas. Voor de geohydrologische beschrijving wordt het Rivierengebied in 3 delen gesplitst:

2.6.1 Het Rivierengebied ten westen van Tiel

Het eerste (1) watervoerend pakket wordt gevormd door de Formaties van Kreftenheye, Urk en Sterksel. De dikte van dit pakket varieert van 20 tot 70 meter. Dit eerste watervoerend pakket wordt afgedekt door een slechtdoorlatende deklaag van enkele meters dikte, welke behoort tot de holocene Westland Formatie ten westen van Geldermalsen en tot de Betuwe Formatie oostelijk hiervan.

De eerste scheidende laag wordt gevormd door de kleien van de Formatie van Kedichem. De dikte van dit kleipakket varieert van 5 tot 40 meter.

Het tweede (2) watervoerend pakket wordt gevormd door de zanden van de Formaties van Kedichem en Harderwijk, de dikte hiervan varieert van 20 tot 40 meter. Bij Leerdam is dit pakket afwezig.

De tweede scheidende laag wordt gevormd door het complex van kleilagen van de Formaties van Tegelen en Maassluis. De dikte varieert van 10 tot 30 meter. Bij Leerdam liggen eerst en tweede scheidende laag op elkaar.

Het derde (3) watervoerend pakket wordt gevormd door de zandige delen van de Formaties van Tegelen, Maassluis en Oosterhout. De dikte hiervan varieert van 20 tot 40 meter.

De hydrologische basis is in dit deelgebied moeilijk aan te geven: in het noorden wordt de basis gevormd door de lemige zanden van de Formaties van Oosterhout en Breda, terwijl in het zuiden (omgeving Velddriel) de Formatie van Oosterhout de derde scheidende laag levert. Samen met de zanden van de Formatie van Breda wordt hier een vierde (4) watervoerend pakket gevormd. De basis wordt nu gevormd door de kleien van de Formatie van Breda.

In het Rivierengebied wordt de voortzetting aangetroffen van het breukencomplex van de Centrale Slenk. Deze breuken hebben vooral verzet in de Formaties ouder dan de Formatie van Kedichem, zodat de tweede scheidende laag plaatselijk onderbroken is.

2.6.2 Het Rivierengebied ten oosten van Tiel

Het eerste (1) watervoerend pakket wordt in het westelijk deel van dit deelgebied gevormd door de Formaties van Kreftenheye, Urk en Sterksel.

In het oostelijk deel omvat het eerste (1) watervoerend pakket de Formaties van Kreftenheye en Twente en het zandige deel van de Formatie van Drente. De dikte van dit watervoerend pakket varieert van 10 tot 30 meter. Het eerste watervoerend pakket wordt afgedekt door de slechtdoorlatende holocene Betuwe Formatie met een dikte van enkele meters.

De eerste scheidende laag wordt in het westelijke deel gevormd door de klei van de Formatie van Kedichem en in het oostelijk deel door de klei van de Formatie van Drente. Lokaal ontbreekt deze scheidende laag, zodat eerste en tweede watervoerend pakket één geheel vormen. De dikte van deze laag loopt uiteen van 0 tot 25 meter.

Het tweede (2) watervoerend pakket wordt in het westelijk deel gevormd door de Formatie van Harderwijk plus de zandige delen van de Formatie van Kedichem. In het oostelijk deel is het tweede (2) watervoerend pakket opgebouwd uit de Formaties van Urk, Sterksel, Harderwijk en de zanden van de Formatie van Kedichem. De dikte van dit watervoerend pakket is ongeveer 30 meter.

De tweede scheidende laag wordt ook hier gevormd door het complex van kleilagen van de Formaties van Tegelen en Maassluis. De dikte bedraagt ongeveer 20 meter. In het zuid-oostelijk deel van het gebied ontbreekt dit complex, zodat tweede en derde watervoerende pakket één geheel vormen.

Het derde (3) watervoerend pakket wordt gevormd door de zandige delen van de Formaties van Tegelen, Maassluis en Oosterhout. De dikte is ongeveer 50 meter.

De hydrologische basis wordt gevormd door de lemige zanden van de Formaties Oosterhout en Breda en bevindt zich op een diepte van ongeveer 150 tot 300 meter min NAP.

2.6.3 De omgeving van Nijmegen

In Nijmegen en omgeving worden, met uitzondering van het bekken van Groesbeek, geen regionaal scheidende lagen aangetroffen. Hier is dus sprake van één (1+2+3) watervoerend pakket, dat bestaat uit de gestuwde Formaties van Urk, Sterksel en Tegelen en uit de fluviatiele afzettingen van formaties uit het Boven- en Midden-Pliocene. Incidenteel bevatten deze formaties ingeschaalde kleilagen. Het niet gestuwde deel wordt bepaald door de zandige delen van de Formatie van Drente. De klei van de Formatie van Tegelen vormt in het bekken van Groesbeek de eerste scheidende laag tussen eerste (1) en tweede (2+3) watervoerende pakket.

De hydrologische basis wordt gevormd door de lemige zanden van de Formaties van Breda en Oosterhout en ligt op ongeveer 150 meter min NAP.

2.7 De grondwaterstroming in het eerste watervoerend pakket

Een isohypsenkaart voor het eerste watervoerend pakket is te zien op figuur 26. Gekozen is voor de datum 28 april 1975 daar dit een goede gemiddelde situatie voor Gelderland blijkt te zijn. De isohypsenkaart toont duidelijk de hoge grondwaterbult van de Veluwe. Hiervan stroomt het grondwater in alle richtingen af. Een dergelijke situatie doet zich, zij het in een veel mindere mate, ook voor bij de stuwwal van Nijmegen en Montferland. Oost Gelderland en het gebied van de grote rivieren blijken een overwegend naar het westen gerichte grondwaterstroming te bezitten. Lokaal blijkt hierin de invloed van de rivieren, zoals de Rijn, Waal, Linge, Maas en Oude IJssel.

De IJssel Vallei blijkt het gebied te zijn waar de grondwaterstroming van de Veluwe en de grondwaterstroming vanaf Oost Gelderland elkaar ontmoeten. Beide grondwaterstromingen voeden de rivier de IJssel.

Tot slot moet opgemerkt worden dat deze kaart een regionaal beeld aangeeft, zodat lokale hydrologische systemen niet naar voren komen.

3 ENKELE THEORETISCHE ACHTERGRONDEN VAN DE HYDROCHEMIE

In dit hoofdstuk worden enkele van de in de hydrogeochemie meest voorkomende begrippen toegelicht. Aan de orde komen: analyse eenheden, chemische evenwichten en presentatievormen voor kwaliteitsgegevens. Tot slot wordt in dit hoofdstuk een opsomming gegeven van de bij dit onderzoek gebruikte parameters samen met hun betekenis voor de grondwaterkwaliteit.

3.1 De analyse eenheden

In de (hydro)chemie worden verschillende eenheden gebruikt voor de weergave van het gehalte aan bepaalde stof, of voor de weergave van een fysische vloeistofeigenschap. Zo kan een watermonster geanalyseerd worden op onder andere opgeloste stoffen, zuurgraad, soortelijke geleiding, dichtheid en hoeveelheid van een opgelost gas.

Hieronder worden de meest gebruikte eenheden kort besproken.

- a Als eerste wordt hier de in Nederland meest gangbare eenheid genoemd: de milligram per liter (mg/l), ofwel hoeveelheid van een opgeloste stof in milligrammen per liter oplossing.
- b Een ander veel gebruikte eenheid is de dimensieloze "parts per million" (p.p.m.). Hieronder wordt verstaan de hoeveelheid opgeloste stof in gewichtsdelen per miljoen gewichtsdelen oplossing (bijvoorbeeld mg/kg). Naast de p.p.m. is ook nog de 1000 maal kleinere p.p.b. (parts per billion) in gebruik. Wanneer een watermonster in totaal niet meer dan ca. 7000 mg/l opgeloste stof bevat, dan geldt binnen redelijke nauwkeurigheid: 1 liter = 1 kilogram, ofwel 1 mg/liter = 1 p.p.m.
- c In de chemie wordt voor het aantal deeltjes (molekulen, atomen, ionen) het begrip mol gebruikt. Eén mol is $6,022 \cdot 10^{23}$ deeltjes. Hierbij geldt nu dat atoommassa * aantal molen = aantal gram(atomen).
- d Voor de hoeveelheid lading wordt de equivalent gebruikt: één equivalent is één mol eenheidslading, ofwel: equivalent = mol * ionlading (t.o.v. waterstof). De eenheid equivalent wordt o.a. gebruikt bij het opstellen van ladingsbalansen en bij de verderop in dit hoofdstuk te bespreken Piperdiagrammen.
- e De zuurgraad van een oplossing wordt weergegeven door de pH in zogenaamde pH-eenheden. De pH is gedefinieerd als de negatieve logaritmie van de waterstofactiviteit:
 $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. Neutraal water heeft een pH = 7, zuur water een pH kleiner dan 7 en basisch water een pH groter dan 7. Natuurlijk grondwater heeft een pH die varieert tussen ongeveer 6 en ongeveer 8,5. Uitzondering hierop vormen bijvoorbeeld thermale bronnen.
- f Zoals de zuurgraad van een oplossing wordt weergegeven door de pH, zo wordt de oxidatiegraad weergegeven door de pE. De pE is gedefinieerd als de negatieve logaritmie van de (hypotetische) elektronenactiviteit: $\text{pE} = -\log [\text{e}^-]$.

Voor grondwater varieert de pE van ongeveer -1 (gereduceerd milieu) tot + 12 (geoxideerd milieu). Naast de pE is ook de (oudere) E_H in gebruik. De E_H is de redoxpotentiaal gemeten in Volt t.o.v. de referentie waterstofelectrode. Bij 25°C en 1 atmosfeer geldt: $E_H = 0,0592 \cdot pE$.

g De elektrische conductiviteit (= soortelijke geleiding), E.C. of E.G., van een oplossing wordt bepaald door de totale hoeveelheid ionen in de oplossing. De E.C. wordt opgegeven in milli-Siemens per meter (mS/m) of in micromho's per centimeter ($\mu mho/cm$): $1 \text{ mS/m} = 10 \mu mho/cm$. Natuurlijk zoet grondwater varieert globaal tussen 4 en 300 mS/m; zout grondwater heeft een E.C. tot 5000 mS/m.

h De temperatuur wordt normaliter opgegeven in graden Celcius (°C). Naast deze eenheid is ook de graad Kelvin (°K) in gebruik: $^{\circ}K = ^{\circ}C + 273$.

Grondwater heeft in Nederland een temperatuur van rond de 10°C; in geologisch actieve gebieden kunnen veel hogere waarden voorkomen. De grondwatertemperatuur neemt met de diepte toe.

3.2 Chemische evenwichten in grondwater

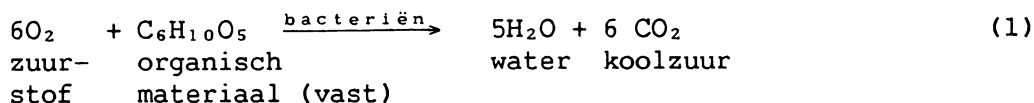
De chemische samenstelling van het grondwater is in eerste instantie afhankelijk van de kwaliteit van het infiltrerende water. Dit infiltrerende water kan zijn: neerslag, rivierwater of zeewater. Voor Gelderland is vooral de kwaliteit van de neerslag van belang voor de grondwaterkwaliteit, de rivierwaterkwaliteit speelt vooral een grote rol in de nabijheid van de grote rivieren. Zeewaterinfiltratie komt in Gelderland niet (meer) voor.

Het neerslagwater wordt door verdamping "ingedikt" met een factor van ongeveer 2,2 (Meinardi, 1974). Meinardi geeft de volgende samenstelling voor het infiltrerende neerslagwater (na verdamping):

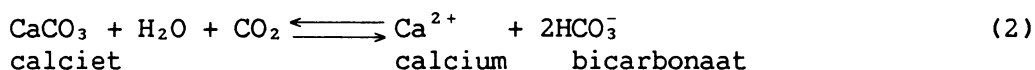
Chloride	(Cl^-)	: 9 mg/l	Natrium	(Na^+)	: 7 mg/l
Sulfaat	(SO_4^{2-})	: 10 mg/l	Magnesium	(Mg^{2+})	: 2,5 mg/l
Bicarbonaat	(HCO_3^-)	: 6 mg/l	Calcium	(Ca^{2+})	: 3,5 mg/l
Nitraat	(NO_3^-)	: <1 mg/l	Ammonium	(NH_4^+)	: 1 mg/l

Na infiltratie van dit water beïnvloeden talloze andere processen de samenstelling van het nieuwe grondwater. Te noemen zijn: biologische, fysische en chemische processen. De biologische processen vinden plaats onder invloed van bacteriën en hogere planten. Als fysische processen kunnen genoemd worden menging, diffusie en dispersie. Chemische processen gaan gepaard met oplossen, neerslaan, adsorptie aan/of omzetting van mineralen.

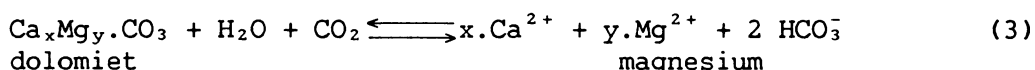
De biologische activiteit van bacteriën vindt voornamelijk plaats in de bodem; de bacteriën voeden zich met het zich hier bevindende organische materiaal. In (sterk vereenvoudigde) formule ziet dit proces er als volgt uit:



Het bij deze reactie (1) vrijkomende CO_2 lost op in het passerende water, waardoor dit een agressief karakter krijgt. Agressief wil zeggen dat het water in staat is om stoffen (mineralen) aan te tasten en op te lossen. Dit proces heet chemische verweering. Voor het in de Nederlandse ondergrond veelvuldige voorkomende mineraal calciet ("kalk") ziet dit er als volgt uit:

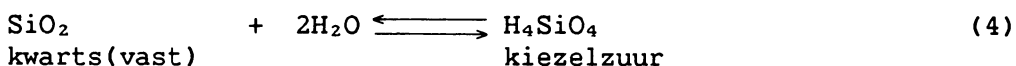


en voor het mineraal dolomiet:



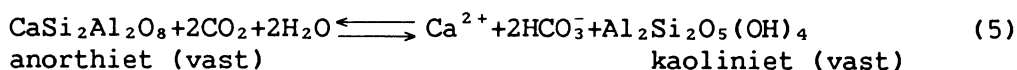
In Nederland geldt dat x veel groter is dan y ($x + y = 1$). Bij deze laatste reactie (3) komt naast het calcium en bicarbonaat magnesium in oplossing. Naarmate het grondwater beter en langer met de ondergrond in aanraking komt zal het meer calcium, magnesium en bicarbonaat met zich meevoeren: het water "rijpt". Dit laatste mag niet gezien worden als directe indicatie voor de leeftijd van het grondwater daar ook andere factoren naast tijd een niet onbelangrijke rol spelen. Zo zijn o.a. ook van belang mate van agressiviteit van het infiltrerende grondwater, de aanwezigheid van CaCO_3 , temperatuur en stroomsnelheid. Bovengenoemde reacties (2) en (3) zijn zogenaamde evenwichtsreacties; het evenwicht kan aan de linker- of rechterkant van de vergelijking liggen. Het mineraal slaat neer of lost op. Dit is onder meer afhankelijk van de hoeveelheid aanwezige stof, temperatuur en druk.

Andere voorbeelden van verweringsreacties zijn:

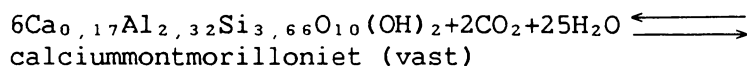


Kwarts is het hoofdbestanddeel van zand en is zeer resistent tegen verweering, ofwel deze reactie vindt slechts in beperkte mate plaats.

Een mineraal kan bij verweering omgezet worden in een ander mineraal, zoals bijvoorbeeld bij verweering van anorthiet:



Kaoliniet kan ook ontstaan bij verweering van calciummontmorilloniet:



3.3 Presentatievormen voor wateranalyses

Voor hydrochemisch onderzoek is het belangrijk om de vaak talrijke analysegegevens eenvoudig te kunnen vergelijken. Een aantal bekende presentatievormen worden hier aangegeven.

Watermonsters zijn pas goed met elkaar te vergelijken als alle hoofdelementen zijn bepaald. Een "volledige" analyse omvat de volgende hoofdelementen.

De kationen: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ en K^+ (Na^+ en K^+ worden vaak gecombineerd bepaald) en de anionen: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- (en eventueel NO_2^-) en HCO_3^- (en eventueel CO_3^{2-}).

Deze elementen vormen samen vrijwel geheel de ionenbalans waarbij de som van de anionen uitgedrukt in equivalenten per liter gelijk moet zijn aan de som van de kationen. Andere ionen komen in grondwater zelden in zodanige concentraties voor dat de ionenbalans hierdoor beïnvloed wordt. Een sluitende ionenbalans is een waarborg voor een correct uitgevoerde analyse.

Chemische analyses van grondwater kunnen op verschillende wijzen onderling worden vergeleken. Dit is mogelijk door vergelijking van absolute hoeveelheden (in mg/l, mol/l of equivalenten/l) of door vergelijking van de onderlinge verhoudingen van ionen. Vergelijking geschiedt vrijwel altijd op grafische wijze.

Afgelopen jaren zijn er vele presentatievormen van analyseresultaten bekend geworden. Genoemd kunnen worden de Collinsdiagrammen, de Stiffdiagrammen, de Schoellerdiagrammen en de Piperdiagrammen. In Nederland zijn de Schoeller- en Piperdiagrammen het meest in gebruik.

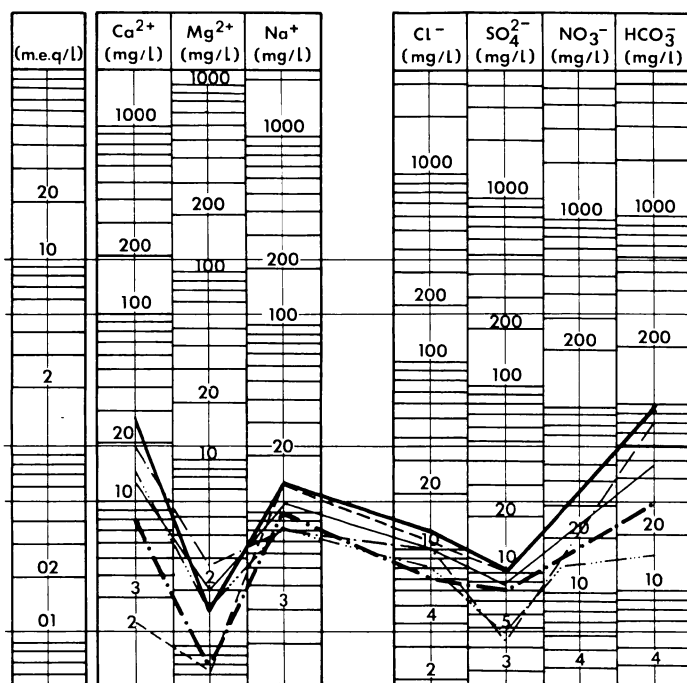
Het Schoellerdiagram is net als het Stiff- en Collinsdiagram een presentatievorm voor absolute ionenconcentraties. Het Schoellerdiagram heeft echter een semi-logaritmische schaalverdeling. In één Schoellerdiagram kan een vrij beperkt aantal (± 5) analyses direkt vergeleken worden.

Een voorbeeld hiervan is de volgende figuur 2, uit het onderzoek naar grondwaterkwaliteiten van de Veluwe door Meinardi (1974).

Het Piperdiagram is een presentatievorm van ionenverhoudingen in equivalenten per liter. De basisvorm bestaat uit twee driehoeken: de anionendriehoek (voor $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, Cl^- , SO_4^{2-}) en de kationendriehoek (voor $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+}).

Zo wordt in de anionendriehoek het percentage equivalenten uitgezet van één anion (of anionenpaar) t.o.v. de totale hoeveelheid equivalenten aan anionen. De anionen- en kationen driehoeken bepalen samen de Piperruit, zoals in volgende figuur 3 is aangegeven met de pijlen.

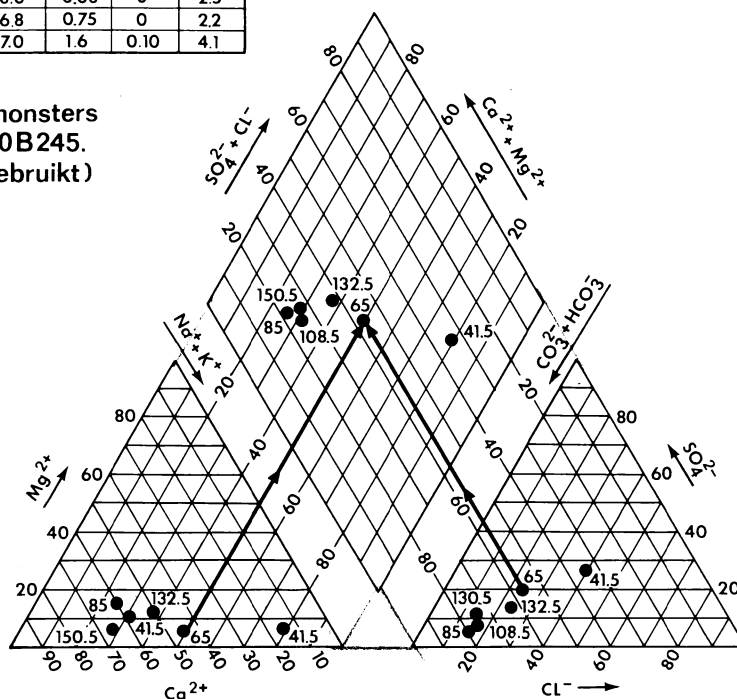
In dit voorbeeld staan dezelfde watermonsters uitgezet als in figuur 2. Uit deze figuur valt voor monster 65 af te lezen dat de kationen bestaan uit 45% Ca^{2+} , 48% $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ en 7% Mg^{2+} en de anionen uit 23% Cl^- , 20% SO_4^{2-} en 57% $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$.



Datum monster-name	Nummer van de boring	Plaats onderk. filter	Aan-duiding	pH	Geleid. vermo-gen uS	SiO ₂ (mg/L)	IJzer (mg/L)	Man-gaan (mg/L)	Hard-heid in °D
12-11-63	40B245	41.5	---	6.5	58	10.0	0.07	spoor	0.5
15-11-63	40B245	65	---	7.6	66	4.8	0.07	spoor	1.3
21-11-63	40B245	65	---	7.5	130	12.8	1.4	0.17	3.5
6-12-63	40B245	108	---	6.9	99	18.0	0.08	0	2.5
13-12-63	40B245	127-132.5	---	7.0	111	16.8	0.75	0	2.2
28-01-64	40B245	150	---	8.1	150	17.0	1.6	0.10	4.1

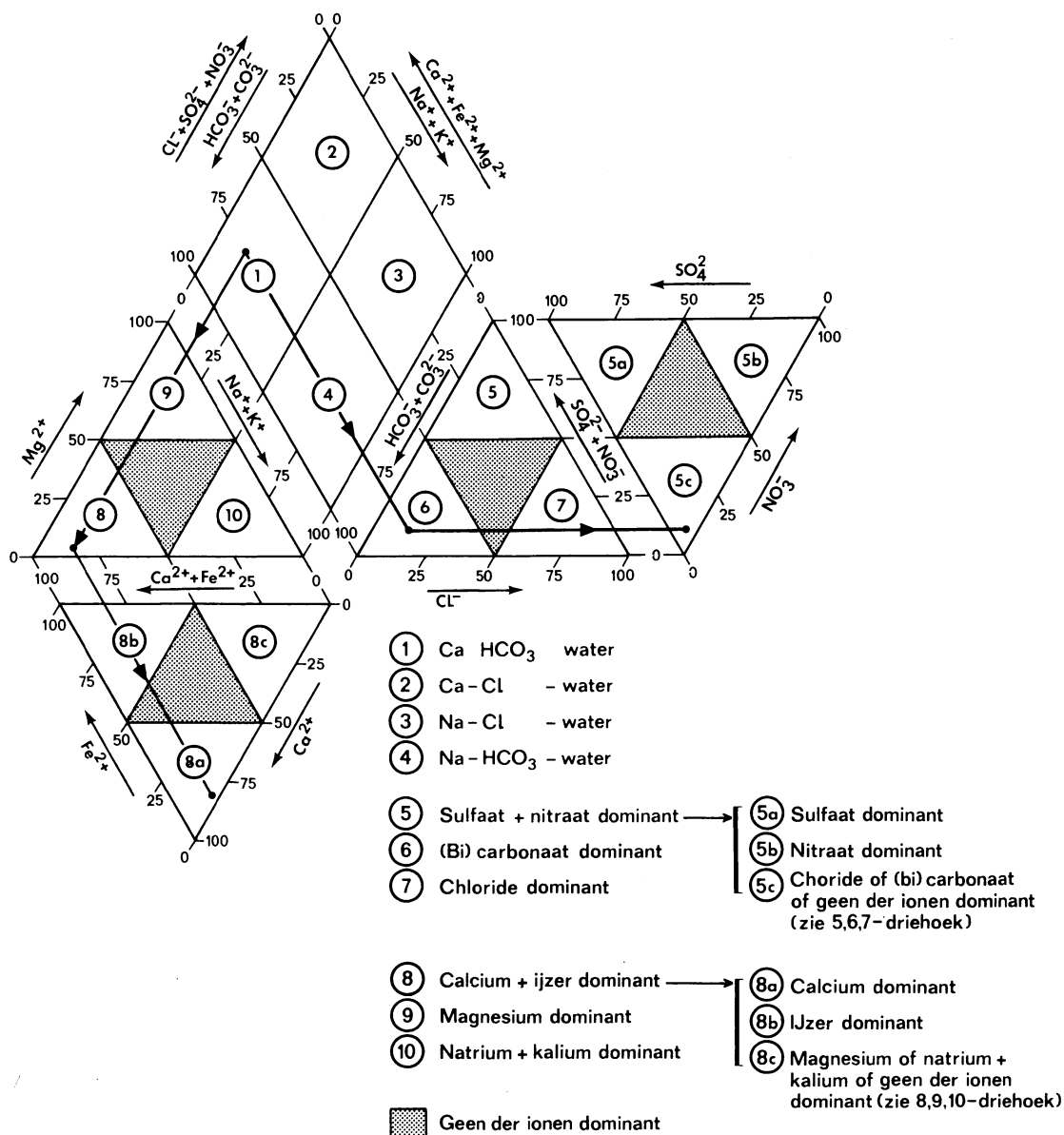
L in m - M.V.

Figuur 2. Schoellerdiagram voor monsters grondwater uit boring 40B245. (de NO₃ kolom is niet gebruikt)



Figuur 3. Diagram volgens Piper voor de monsters water uit boring 40B245. (bijgeschreven is de diepte van de waarnemingsfilters)

Het Piperdiagram is voor dit onderzoek uitgebreid met nog 2 driehoeken waarin respectievelijk Fe^{2+} en NO_3^- zijn opgenomen, zoals aangegeven in figuur 4. Tevens is in deze figuur aangegeven in welk deel van de ruit een bepaald type water dominant is. In de bijbehorende driehoeken worden de 4 hoofdtypen van de hoofdruut verder opgesplitst, zoals voor één geval door middel van pijlen is aangegeven. De resultaten van één wateranalyse worden dus altijd in alle 5 de figuren geplot. Het voorbeeldmonster is dus van het CaHCO_3 -type, waarvan het kationen-deel voornamelijk (= 75%) uit Ca^{2+} bestaat. Het anionendeel bestaat voornamelijk (= 80%) uit HCO_3^- en CO_3^{2-} .



Figuur 4. Piperdiagram met toevoeging van Fe^{2+} en NO_3^-

Het Piperdiagram geeft dus geen informatie over de absolute hoeveelheid van de aanwezige stoffen. Wel biedt het Piperdiagram de mogelijkheid om meerdere (tot vele tientallen) analyses gelijktijdig weer te geven. Het is dan wel aan te raden om de gegevens eerst in te delen naar bijvoorbeeld gebied, watervoerend pakket, hoeveelheid totaal opgeloste stof, hardheid enzovoorts. Deze onderverdeling maakt een makkelijkere en juistere interpretatie mogelijk; er wordt zo voorkomen dat niet vergelijkbare monsters vergeleken worden.

3.4 Chemische eigenschappen van de gekozen parameters

Deze paragraaf geeft een lijst van de door dit onderzoek gekozen chemische parameters met hun betekenis voor het grondwater.

- Chloride (Cl^-)

Het chemisch gedrag van chloride is erg rustig: chloride is weinig reactief ten opzichte van andere in het water voorkomende ionen. Chlorideionen dragen niet significant bij aan oxidatie/reductiereacties, vormen geen belangrijke complexen met andere ionen, vormen geen slecht oplosbare zouten, worden niet noemenswaardig gebonden aan (klei-)mineraaloppervlakten en spelen nageenog geen rol in biochemische reacties. Het transport van chloride door de hydrologische kringloop wordt voornamelijk bepaald door fysische processen. Het chlorideion is dus zeer geschikt voor gebruik als natuurlijke "tracer". Echter door de relatief grote afmetingen van het chlorideion kan dit gedrag verstoord worden in kleien en schalies, waar het ion achter kan blijven in de nauwe kristalholten.

De belangrijkste bron van chloride voor natuurlijk grondwater is de neerslag; de chlorideconcentratie in de neerslag is afhankelijk van de afstand tot de kust. Een andere natuurlijke bron van chloride is zout (grond-)water. Gesteenten blijken over het algemeen maar weinig chloride te bevatten en dit chloride kan door verwerking niet tot nauwelijks vrij gemaakt worden. Uitzondering hierop vormen de steenzout (evaporiet) afzettingen. Water in contact met een steenzoutafzetting kan een gigantische hoeveelheid chloride bevatten (tot ongeveer 80.000 mg/liter).

Daar de menselijke beschaving zich al eeuwen kenmerkt door het huishoudelijk gebruik van zout (NaCl) is een relatief hoog chloridegehalte een indicatie voor vervuiling als ten minste zeewaterinvloeden met zekerheid uitgesloten kunnen worden, wat voor Gelderland (bijna altijd) geldig is. Het gebruik van wegzout is tegenwoordig één van de belangrijkste niet-natuurlijke bronnen van chloride voor grondwater.

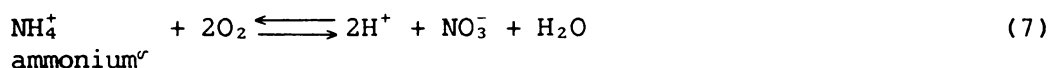
Voor Gelderland zijn vooral de neerslag, zout grondwater en vervuiling de belangrijkste (al dan niet natuurlijke) bronnen voor het chloride in grondwater. Natuurlijk schoon grondwater van de hoge delen van Gelderland bevat ca. 15 mg/l chloride (Meinardi, 1974).

- Nitraat (NO_3^-)

Voor nitraat bestaat in Nederland vrijwel geen minerale oorsprong; nitraat komt echter wel in verhoogde concentraties voor in de bodem en organisch materiaal. Het opgeloste nitraat is een van de belangrijkste voedingsstoffen voor de vegetatie en is van essentieel belang voor elk plantenleven. Bepaalde soorten bacteriën, levend op de wortels van planten, zijn in staat om het vrije stikstof uit de lucht om te zetten in nitraat. Dit nitraat wordt door de planten opgenomen en kan gedeeltelijk in de bodem terugkeren bij het afsterven van de plant. Het nitraat in de bodem wordt door de mens kunstmatig verhoogd bij het gebruik van (kunst)mest; dierlijke mest bevat meestal erg grote hoeveelheden nitraat.

Nitraat kan direct afkomstig zijn uit de neerslag, of indirect uit ammoniumhoudende neerslag of uit ammonium dat vrijkomt bij afbraak van organisch materiaal.

Dit ammonium wordt door oxidatie omgezet in nitraat volgens:

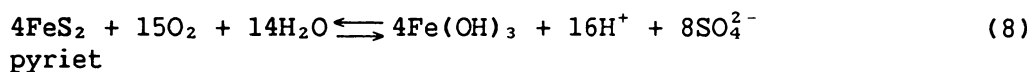


Het nitraat is dus een parameter voor de bepaling van (meestal organische) vervuiling van het grondwater, waarbij opgemerkt dient te worden dat nitraat door reductie kan verdwijnen.

Tevens dient de aanwezigheid van nitraat op oxiderende omstandigheden, zoals verderop blijkt bij de bespreking van ijzer.

- Sulfaat (SO_4^{2-})

Sulfaat kan op verschillende manieren in het grondwater terecht komen: via de neerslag, zeewaterinvloed, vervuiling of door vertering. De hoeveelheid sulfaat in grondwater wordt in eerste instantie bepaald door de neerslag. De concentratie hierin kan verschillen naar gelang de afstand tot de zee en de toevoeging door vervuiling. Deze vervuiling komt vooral voort uit de verbranding van fossiele brandstoffen. Het grondwater kan ook direct met sulfaat worden vervuild door industrie, huishoudelijk afval of door mineralisatie van dierlijke mest of kunstmest. Als minerale herkomst kan genoemd worden de plaatselijk voorkomende oxidatie (vertering) van pyriet. De reactie hiervoor is:



Deze reactie kan bijvoorbeeld optreden bij verlaging van de grondwaterstand in pyriethoudende bodems. Dit kan plaatsvinden na uitvoering van cultuurtechnische werken in landbouwgebieden. Een andere minerale herkomst van sulfaat is het oplossen van gips of anhydriet uit de ondergrond. Dit is voor Gelderland niet van belang. Samenvattend kan gesteld worden dat verhoogde sulfaatconcentratie van het grondwater voornamelijk bepaald wordt door vervuiling. Tot circa 20 mg/l sulfaat is door de neerslag samenstelling en indamping te verklaren.

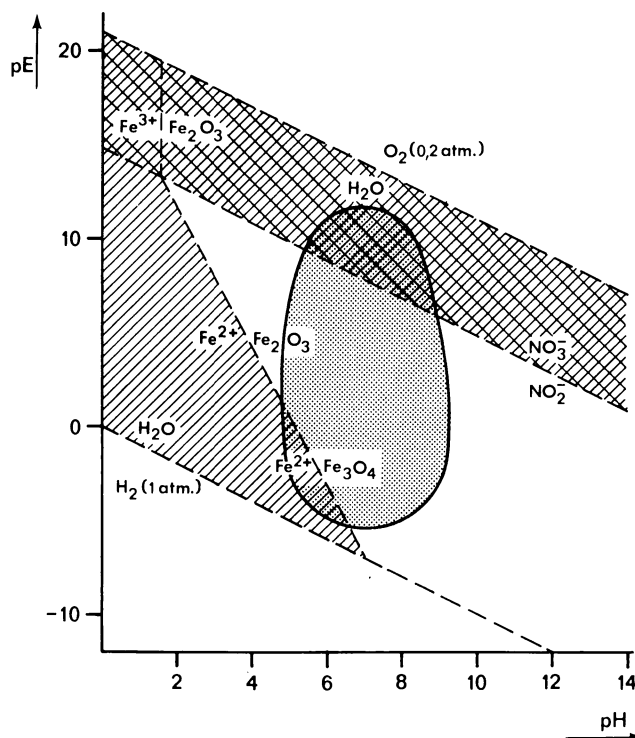
Als verwijderingsmechanisme voor sulfaat kan genoemd worden de sulfaatreductie. Hieronder vallen een aantal reacties onder invloed van bacteriën, waarbij het sulfaat wordt afgebroken tot sulfide.

- IJzer (Fe)

IJzer is in water onder normale omstandigheden slechts oplosbaar als Fe^{2+} ; het Fe^{3+} slaat vrijwel direct neer als $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (limoniet). Daar bij wateranalyses vrijwel altijd de totale hoeveelheid ijzer bepaald wordt, zodat dan niet bekend is in welke vorm het ijzer aanwezig is, wordt bij de ijzerkaart gesproken over Fe. In grondwater is Fe^{2+} wel de meest voorkomende vorm van ijzer.

Als minerale herkomst van ijzer kunnen genoemd worden de ijzer-oxiden en ijzersulfiden; silikaatmineralen dragen nauwelijks bij aan de hoeveelheid opgelost ijzer. Daar ijzer een belangrijk element is voor de stofwisseling van zowel plant als dier kan in organisch afval ijzer worden verwacht.

IJzer kan pas als Fe^{2+} in oplossing gaan onder (licht) reducerende omstandigheden (anaëroob). Dit wordt in figuur 5 aangegeven door het gearceerde gebied. Uit deze figuur blijkt tevens dat ijzer (Fe^{2+}) niet gelijktijdig met nitraat kan voorkomen. Het nitraat is alleen in het geruite deel van figuur 5 stabiel. Wanneer in een watermonster zowel ijzer als nitraat wordt aangetroffen dan kan geconcludeerd worden dat het water bij monstername verontreinigd moet zijn.



Figuur 5.

pE - pH diagram met reactielijnen van nitraat, ijzer en water.

De activiteit van het ijzer is 10^{-3} en voor NO_3^- en NO_2^- is een gelijke activiteit aangehouden.

 Veld waarbinnen "normaal" grondwater zich globaal bevindt.

Nu is duidelijk dat jong (= zuurstofrijk) infiltratiewater geen ijzer kan bevatten, zodat het ijzergehalte van grondwater gebruikt kan worden om onderscheid te maken tussen kwel- en infiltratiewater. Opgemerkt wordt dat dit alleen geldt voor regionale schaal; lokaal kunnen door bodemopbouw en bodemprocessen (sterke) afwijkingen optreden.

- Hardheid

Onder de hardheid van water wordt verstaan de totale hoeveelheid aan opgelost calcium en magnesium. De hardheid laat zich dus uitdrukken in mg/l of mol/l. Tegenwoordig is vooral de eenheid mol/m³ in gebruik. Vroeger werd in Nederland de hardheid uitgedrukt in °D, waarvoor geldt 1 mol/m³ = 5,6°D.

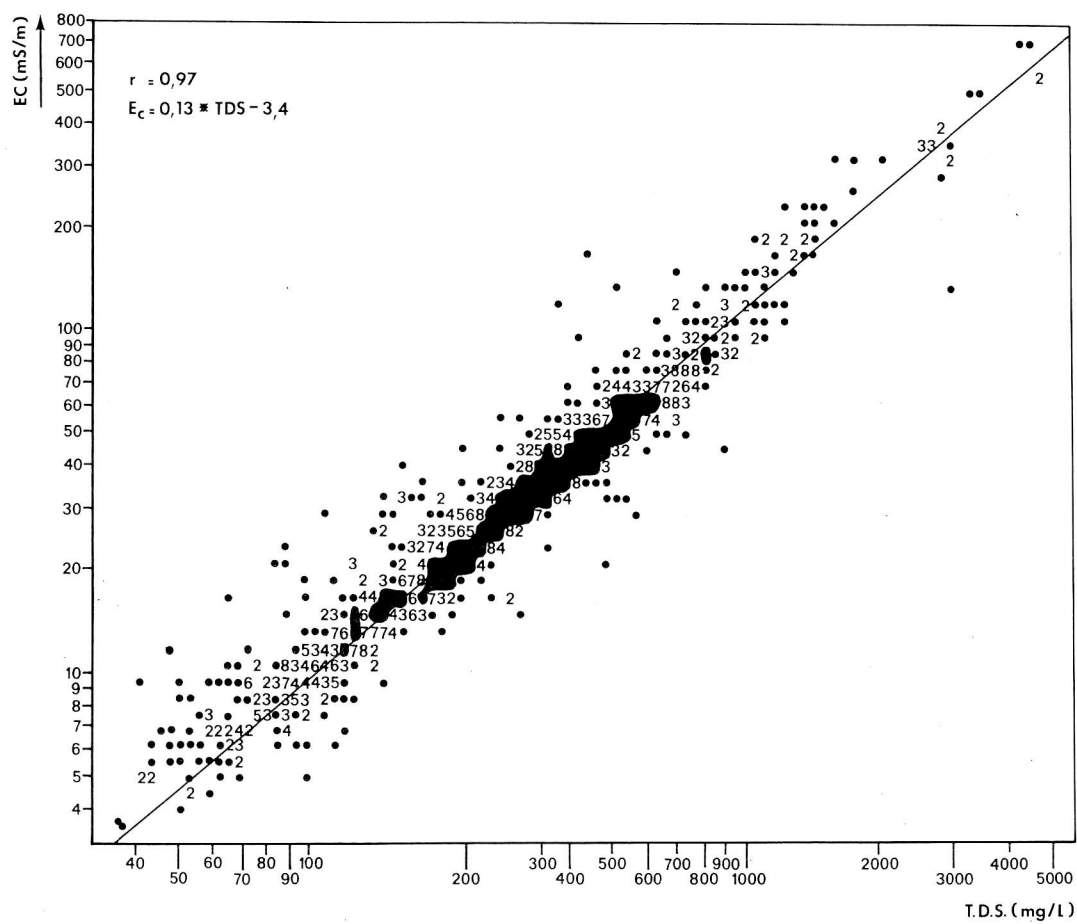
De hardheid bepaald door calcium en magnesium wordt ook de totale hardheid genoemd. Hier tegenover staat de tijdelijke hardheid, dit is de hardheid als bicarbonaat en carbonaat (CO₃²⁻).

De hardheid van grondwater varieert globaal tussen 0,2 mol/m³ (zacht water) tot 5 mol/m³ (hard water). Echter hogere waarden kunnen voorkomen.

In de vorige paragraaf werd al gesteld dat wanneer grondwater meer kalk oplost de calciumconcentratie zal stijgen. Dit "rijpen" van het grondwater komt natuurlijk direct tot uiting in een toename van de hardheid. Over het algemeen neemt de hardheid dus toe in de stromingsrichting van het grondwater. Echter kan het grondwater al in de bodem "rijpen" als de omstandigheden hier aanleiding voor geven. De grondwatersamenstelling wordt immers primair door de bodemprocessen en -condities bepaald.

- Elektrische conductiviteit (EC)

Aan het begin van dit hoofdstuk is al vermeld dat de elektrische conductiviteit toeneemt bij een toename van de hoeveelheid opgeloste ionen. Voor zoet water is dit verband nagenoeg lineair. Volgende figuur 6 (Hoogendoorn, 1983) toont duidelijk dit lineaire verband tussen EC en de totaal opgeloste stof (TDS).



Figuur 6. Verband tussen EC en TDS

De elektrische conductiviteit blijkt dus een "overall" parameter te zijn. Samen met het feit dat een EC bepaling snel en goedkoop is maakt het duidelijk dat een EC bepaling (bijna) altijd wordt uitgevoerd. De conductiviteit van het grondwater maakt vaak al een onderscheid tussen verschillende typen grondwater mogelijk.

- Piperwatertype

De methode om grondwatertypen chemisch in te delen volgens Piper is in de vorige paragraaf al aan de orde gekomen. Hier kan nu worden volstaan met een bespreking van de verschillende watertypen, zoals ze zijn aangegeven in figuur 4.

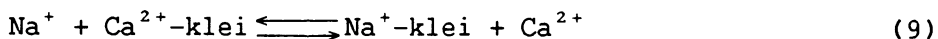
a Het Ca-HCO₃-type.

Dit calciumbicarbonaattype grondwater is het meest voorkomende type, het ontstaat door oplossing van kalk. Wanneer grondwater tot het calciumbicarbonaattype gerekend wordt wil dit nog niet zeggen dat calcium het dominante kation is. Voor het voorbeeld in figuur 4 blijkt juist magnesium dominante kation te zijn. Om nu een betere presentatie te maken van de pipertypen is voor, de later te bespreken, pipertypekaart verder onderscheid gemaakt omdat vier hoofdgroepen te weinig informatie geven.

b Het Ca-Cl-type.

Het calciumchloridetype grondwater komt weinig voor bij zoet grondwater; wanneer het toch voorkomt dan blijkt de totale hoeveelheid opgeloste stof erg laag te zijn. Zoet calciumchloride grondwater zal dus erg jong infiltratiewater zijn waarbij het chloride nog dominant is over het bicarbonaat, omdat oplossing van kalk nog niet heeft plaatsgevonden. Mogelijk is dit water ook verontreinigd met zout (NaCl).

Zout water van het calciumchloride type geeft aan dat er kationuitwisseling heeft plaatsgevonden. Kationuitwisseling is het fysisch-chemisch proces waarbij kationen, gebonden aan een (klei)mineraal of organische stof oppervlak, worden uitgewisseld tegen kationen uit het grondwater, volgens:



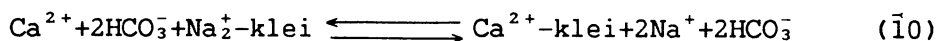
Dit treedt op wanneer NaCl-water (zout water) in contact komt met Ca²⁺-klei (=zoetwaterklei), zodat nu CaCl-water ontstaat.

c Het NaCl-type.

Het natriumchloridetype is water waarin natrium en chloride overheersen, hetgeen vaak betekent dat het zout water betreft. Zoet natriumchloride water blijkt ook voor te komen, iets wat op dezelfde wijze te verklaren valt als het zoete calciumchloride water: vers infiltratiewater met weinig opgeloste stoffen waarin natrium en chloride de dominante ionen zijn. Dit omdat nog geen kalk is opgelost en er verontreiniging heeft plaatsgevonden met bijvoorbeeld wegzout.

d Het Na-HCO₃-type.

Het natriumbicarbonaattype water ontstaat voornamelijk door kationuitwisseling: zoet calciumcarbonaat water komt in contact met mariene (= natriumhoudende) klei ofwel het omgekeerde van reactie (9) vindt plaats. Volledig ziet deze reactie er als volgt uit:



Hoewel dit watertype in Gelderland weinig voorkomt kan het aangetroffen worden daar waar zoet grondwater het oorspronkelijk zoute formatiewater uit de sedimenten verdringt.

4 DE TOTSTANDKOMING VAN DE HYDROCHEMISCHE KAARTEN EN FIGUREN

De voor dit onderzoek gevolgde methode voor het verzamelen en presenteren van hydrochemische parameters is grotendeels afkomstig van het onderzoek "Hydrochemie van Oost-Nederland" (Hoogendoorn, 1983A). Het statistische deel is echter beperkt gebleven. De analysegegevens zijn afkomstig uit het DGV-TNO archief; dit archief is een schaduwarchief van het RID archief. De analysegegevens, welke de periode 1889 tot en met 1982 beslaan, zijn aan de hand van de filterdiepte ingedeeld naar watervoerend pakket. Deze gegevens zijn samen met de coördinaten, informatie over de monsternamen, techniek en onderzoekslaboratorium ingevoerd in de computer. Alvorens met het nu ontstane bestand gewerkt kon worden is met behulp van diverse computerprogramma's naar fouten gezocht en werden, indien mogelijk, hiervoor correcties aangebracht. Van de volgende punten werden door de computer melding gemaakt in een tabellenboek (Hoogendoorn, 1983B).

Parameters	Minimum	Max (zoet water)	Max (zout water)	Eenheid
Het aantal pompuren	0.000	168.000	168.000	
De maaiveldhoogte	-2.000	100.000	100.000	meter
Onderkant filter	0.000	250.000	250.000	meter
Diepte boring	0.000	250.000	250.000	meter
Het KMNO_4 verbr.(ongef)	0.000	150.000	250.000	mg/l
De kleur v.h. water	0.000	250.000	500.000	mg Pt/l
De el.conductiviteit	4.000	125.000	4000.000	mS/m
De pH	5.000	8.500	8.800	
Het KMNO_4 -verbr.(gef)	0.000	100.000	150.000	mg/l
Het Cl-gehalte	4.000	150.000	19000.000	mg/l
Het NO_2 -gehalte	0.000	.800	.800	mg/l
Het NO_3 -gehalte	0.000	200.000	200.000	mg/l
Het SO_4 -gehalte	0.000	200.000	2750.000	mg/l
Het HCO_3 -gehalte	5.000	600.000	2000.000	mg/l
Het CO_2 -gehalte	0.000	150.000	150.000	mg/l
Het CO_3 -gehalte	0.000	10.000	10.000	mg/l
Het fosfaat-gehalte	0.000	5.000	20.000	mg/l
Het SiO_2 -gehalte	0.000	45.000	45.000	mg/l
Het H_2S -gehalte	0.000	2.000	2.000	mg/l
Het NH_4 -gehalte	0.000	9.000	50.000	mg/l
Het NH_4 -org.gehalte	0.000	1.000	1.000	mg/l
Het Fe-gehalte	0.000	30.000	100.000	mg/l
Het Mn-gehalte	0.000	4.000	4.000	mg/l
Het Ca-gehalte	1.000	175.000	1000.000	mg/l
Het Mg-gehalte	.200	40.000	1300.000	mg/l
Het Na-gehalte	3.000	125.000	10500.000	mg/l
Het K-gehalte	.500	55.000	400.000	mg/l
Het NaHCO_3 -gehalte	0.000	50.000	1500.000	mg/l
Het O_2 -gehalte	0.000	11.000	11.000	mg/l
De totale hardheid	.040	6.000	65.000	mol/m ³
De tijd. hardheid	.080	12.000	20.000	mol/m ³
De TDS/EC-verhouding	5.000	12.500	12.500	
De tot.HH/BICARB-verh.	.300	3.000	-999.000	
De Na/Cl-verhouding	.300	3.000	-999.000	

Na het uitvoeren van deze controles zal het bestand niet foutloos zijn; kleine afwijkingen, binnen de gestelde controle grenzen, blijven mogelijk.

Het totale aantal analyses voor Gelderland tot en met 1982 bedraagt 4081, afkomstig van 1948 verschillende lokaties en uit 3196 verschillende filters. Van 422 filters bestaan verschillende analyses en van 528 lokaties zijn op verschillende data analyses bepaald. Het totale overzicht van alle analysegegevens wordt gepresenteerd in "Hydrochemische gegevens van de provincie Gelderland over de periode 1889-1982" (Hoogendoorn, 1983B).

Na bovengenoemde voorbereidingen werd het mogelijk om het bestand geautomatiseerd te verwerken. Een gedetailleerde beschrijving van deze methode wordt gegeven door Hoogendoorn (1983C). Om deze bewerkingen goed uit te voeren is Gelderland in vijf regio's opgedeeld: Rivierengebied plus IJssel Vallei, Infiltratiegebieden, Gelderse Vallei, Achterhoek en Stedelijke Gebieden. De precieze grenzen van deze gebieden worden gegeven op bijlage 3. De volgende materialen werden door middel van de computer vervaardigd:

- 1 Tienjaargemiddelden per regio voor: sulfaat, chloride, nitraat, elektrische conductiviteit en filterdiepte.
- 2 Frequentie verdelingen per regio voor: sulfaat, hardheid, chloride, nitraat, ijzer en elektrische conductiviteit.
- 3 Piperdiagrammen van eerste en het watervoerendpakket onder de eerste scheidende laag ("tweede" watervoerend pakket) voor: chloride $<20\text{mg/l}$ en hardheid $<1\text{mol/m}^3$; chloride $<20\text{mg/l}$ en hardheid $>1\text{mol/m}^3$; chloride $>20\text{mg/l}$ en hardheid $<1\text{mol/m}^3$ en chloride $>20\text{mg/l}$ en hardheid $>1\text{mol/m}^3$.
- 4 Kaart met de vijf onderscheiden regio's.
- 5 Kaarten van het eerste watervoerend pakket voor: lokaties, gebiedsindeling, elektrische conductiviteit, Pipertype, chloride, nitraat, sulfaat, ijzer en hardheid (schaal 1 : 100.000).
- 6 Kaarten van het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag voor: lokaties, elektrische conductiviteit, Pipertype, chloride, nitraat, sulfaat, ijzer en hardheid (schaal 1 : 250.000).

Het geautomatiseerd tekenen van kaarten maakt maatregelen noodzakelijk om het over elkaar tekenen van de diverse kaartparameters te voorkomen. Ofwel uit een groep (= cluster) van waarnemingen moet één parameterwaarde gekozen worden die vervolgens op de kaart geplot kan worden. De keuze kan via één van de volgende opties gemaakt worden:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 0 maximale-ondiepste-recentste | 4 maximale-diepste-recentste |
| 1 maximale-recentste-ondiepste | 5 maximale-recentste-diepste |
| 2 ondiepste-recentste | 6 diepste-recentste |
| 3 recentste-ondiepste | 7 recentste-diepste |

Bijvoorbeeld: bij de keuze van optie 0 wordt eerste bepaald wat het maximale gehalte is binnen een cluster. Slaagt dit criterium niet dan wordt nagegaan wat de ondiepste is. Blijkt dit laatste ook niet te lukken dan wordt de meest recente waarneming geplot.

De volgende tabel geeft een overzicht van opties welke voor de betreffende kaarten gebruikt zijn:

Lokatiekaart	1°	watervoerend	pakket	optie	meeste-recentste
	2°	"	"	"	meeste-recentste
E.C. kaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0
Pipertypekaart	1°	"	"	"	2
	2°	"	"	"	6
Chloridekaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0
Nitraatkaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0
Sulfaatkaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0
IJzerkaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0
Hardheidkaart	1°	"	"	"	0
	2°	"	"	"	0

5 BESPREKING VAN DE RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de uitkomsten gegeven en besproken, zoals ze volgens de in hoofdstuk 4 vermelde methode van onderzoek zijn verkregen. Tevens worden deze uitkomsten getoetst aan de geohydrologische opbouw en aan de hydrochemische reactiemogelijkheden. Als eerste wordt ingegaan op de resultaten van de statistische bewerkingen, te weten de tienjaargemiddelden en de histogrammen, hierna worden de hydrochemische kaarten besproken en tot slot wordt een vergelijking gemaakt met eerder in Gelderland verricht hydrochemisch onderzoek.

5.1 De statistische bewerkingen

5.1.1 De tienjaargemiddelden

Bij de berekening van de tienjaargemiddelden is uitgegaan van de logaritmisch getransformeerde waarden, waarbij uitschieters zijn geëlimineerd. De tienjaargemiddelden hebben betrekking op het eerste watervoerend pakket en zijn weergegeven in de figuren 7 t/m 11. De resultaten worden per gebied besproken:

- Rivierengebied en IJssel Vallei (figuur 7).
Sulfaat: de tienjaargemiddelden hebben tot 1919 een relatief lage waarde van ongeveer 10 mg/l en van 1919 tot 1959 een relatief hoge waarde van ± 35 mg/l. Na 1959 neemt het tienjaargemiddelde vervolgens weer af tot ± 20 mg/l. Opgemerkt dient te worden dat alle tienjaargemiddelden van voor 1920 op relatief weinig (± 15) waarnemingen per periode zijn gebaseerd, zodat deze waarden minder betrouwbaar zijn. Bovendien betreft het hier vaak oude, onnauwkeurige, bepalingen. Voorzichtigheid is dus geboden.
Chloride: het tienjaargemiddelde stijgt tot 1939 van 15 tot 30 mg/l. Van 1939 tot 1959 daalt het tienjaargemiddelde, waarna deze een min of meer constante waarde van 25 mg/l heeft.
Nitraat: het verloop van het tienjaargemiddelde vertoont tot 1929 een stijging tot ongeveer 18 mg/l. Van 1929 tot 1939 bedraagt het tienjaargemiddelde ca. 10 mg/l en na 1939 daalt het tienjaargemiddelde tot nagenoeg 0 mg/l.
Elektrische conductiviteit (EC): de tienjaargemiddelden variëren tot 1979 slechts weinig rond de waarde van ca. 40 mS/m. Na 1979 is het tienjaargemiddelde ineens veel hoger namelijk 65 mS/m.
Filterdiepte: de tienjaargemiddelden hebben tot 1959 een vrij constante waarde van ca. 20 meter min maaiveld; na 1959 is deze waarde ca. 35 meter.

Voor het Rivierengebied en de IJssel Vallei blijkt dus dat na 1959 dieper werd gemonsterd hetgeen gepaard gaat met een daling van de tienjaargemiddelden van chloride, sulfaat en nitraat. De elektrische conductiviteit blijkt echter te stijgen na 1979, hetgeen niet in overeenstemming is met de voornoemde dalingen.

De stijging van de EC zal dan ook verklaard moeten worden door een toename van het gehalte aan andere stoffen, zoals natrium, calcium, magnesium en bicarbonaat. Uit gegevens hierover blijkt dat voor het bicarbonaat inderdaad een duidelijk hoger gehalte is gemeten. Voor de periode na 1979 is voor calcium is een iets hoger gehalte bekend, voor magnesium een gelijk en voor natrium een lager gehalte. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze periode na 1979 slechts 3 jaar bestrijkt, zodat maar een klein aantal waarnemingen is gebruikt. Vergelijk: na 1979 werden 15-20 waarnemingen gebruikt en voor de periode 1969-1979 200 tot 250 waarnemingen. De resultaten voor de periode na 1979 worden door dit feit minder representatief dan de resultaten van de periode voor 1979.

Het spreekt voor zich dat dit verschijnsel ook voor de andere gebieden geldig is, zodat de tienjaargemiddelden voor de periode na 1979 met de nodige voorzichtigheid gehanteerd dienen te worden.

- De infiltratiegebieden (figuur 8)

Sulfaat: het verloop in het tienjaargemiddelde toont tot 1939 een lichte stijging tot ongeveer 20 mg/l; het tienjaargemiddelde van de periode 1939-1949 heeft plotseling een veel lagere waarde: 10 mg/l. Na 1949 neemt het tienjaargemiddelde langzaam toe tot een waarde van ongeveer 15 mg/l voor de periode na 1979.

Chloride: het verloop van het tienjaargemiddelde is tot 1979 sterk wisselend en lichtstijgend tot ongeveer 25 mg/l. Na 1949 heeft het tienjaargemiddelde een min of meer constante waarde van ca. 15 mg/l.

Nitraat: het tienjaargemiddelde stijgt tot 1919 tot ongeveer 25 mg/l. In de periode 1919-1939 is het tienjaargemiddelde nagenoeg constant (ca. 25 mg/l); na 1939 daalt het tienjaargemiddelde tot een waarde van ca. 5 mg/l. Mogelijk stijgt het tienjaargemiddelde na 1979 tot een waarde van 10 mg/l. Dit laatste is echter niet met zekerheid vast te stellen door de korte waarnemingsreeks (1980 tot 1982), zoals bij het vorige deelgebied al aan de orde is geweest.

Elektrische conductiviteit (EC): de tienjaargemiddelden wisselen sterk voor de verschillende perioden en variëren globaal rond een waarde van 15 mS/m.

Filterdiepte: het tienjaargemiddelde neemt toe van ongeveer 15 meter min maaiveld rond 1900 tot een waarde van 60 meter min maaiveld in de periode 1959-1969. Na 1969 neemt de waarde van het tienjaargemiddelde weer af tot ongeveer 40 meter min maaiveld.

Voor de infiltratiegebieden verklaart de relatief hoge waarde van het tienjaargemiddelde voor de filterdiepte in de periode 1949-1979 goed de afname van het nitraatgehalte. Ook blijkt de stijging van het nitraatgehalte na 1979 overeen te komen met een afname van de filterdiepte. Het nitraatgehalte in de periode 1919-1939 laat zich niet verklaren uit het verloop van de filterdiepte. Mogelijk vindt dit zijn oorzaak in de oude nitraatbepalingsmethoden. Het constante chloridegehalte na 1949 past

niet aan de curve van de filterdiepte. Dit is te verklaren door het feit dat het chloridegehalte in de infiltratiegebieden vrij constant is tot op grote diepten.

- De Gelderse Vallei (figuur 9)

Voor de Gelderse Vallei zijn voor de periode 1980-1982 geen (voldoende) gegevens beschikbaar om de gemiddelde gehalten te berekenen.

Sulfaat: de waarde van het tienjaargemiddelde is vrij constant over de periode 1919-1979 en vertoont een kleine variatie rond ca. 20 mg/l.

Chloride: het tienjaargemiddelde heeft van 1909 tot 1959 een nagenoeg constante waarde van ongeveer 25 mg/l. Na 1959 daalt het tienjaargemiddelde tot een waarde van 10 mg/l.

Nitraat: de waarde van het tienjaargemiddelde vertoont na 1939 een dalende trend, van 20 mg/l naar nagenoeg 0 mg/l.

Elektrische conductiviteit (EC): de tienjaargemiddelde zijn nagenoeg gelijk en hebben een waarde van ca. 25 mS/m.

Filterdiepte: de waarden van het tienjaargemiddelde tonen over de periode tot 1969 een lichte stijging, van ca. 25 meter min maaiveld tot 35 meter. De vrij grote filterdiepten van 55 en 50 meter voor de perioden 1900-1909 respectievelijk 1939-1949 vormen hierop een uitzondering. De periode 1969-1979 vertoont een lichte afname van de filterdiepte en wel tot 30 meter min maaiveld.

Opvallend voor de Gelderse Vallei is de afname van het nitraatgehalte tot erg lage waarden; de filterdiepte vertoont een lichte stijging, maar voor de periode 1969-1979 blijkt de filterdiepte weer iets af te nemen hetgeen totaal niet naar voren komt in het nitraatgehalte. Verder is het opvallend dat in de periode 1969-1979, net als voor het Rivierengebied in de periode na 1979, de filterdiepte afneemt samen met de gehalten van nitraat, chloride en sulfaat. De EC blijkt nagenoeg gelijk te blijven, hetgeen hier verklaard wordt door de toename van bicarbonaat en magnesium.

Het grondwater van het eerste watervoerend pakket van de Gelderse Vallei lijkt volgens de hierboven gepresenteerde gegevens schoon en van goede kwaliteit. Bij dit onderzoek zijn echter de filters boven en onder de Eemklei (het 1A en 1B watervoerend pakket) gezamenlijk in de berekeningen opgenomen, zodat een gemiddeld beeld ontstaat. Het grondwater van het 1B watervoerend pakket is van duidelijk betere kwaliteit dan het grondwater van het 1A pakket. Volgens het filterdiepteverloop blijken de meeste monsters uit het 1B pakket te komen, zodat het grondwater van het eerste watervoerend pakket van goede kwaliteit lijkt te zijn. Lokaal wordt hier het watervoerend pakket boven de Eemklei het eerste watervoerend pakket genoemd en het pakket onder de Eemklei het tweede watervoerend pakket. Het pakket boven de Eemklei is echter veel kwetsbaarder en sterker verontreinigd, hetgeen uit de hier gepresenteerde gegevens niet blijkt. Deze samenvoeging van twee watervoerende pakketten zal dus ook zijn effecten hebben voor de verder in dit hoofdstuk te bespreken histogrammen en hydrochemische kaarten.

- De Achterhoek (figuur 10)

Voor het gebied van de Achterhoek zijn, evenals voor de Gelderse Vallei, de tienjaargemiddelden slechts berekend tot en met de periode 1969-1979; ook voor dit gebied waren voor de periode 1980-1982 niet voldoende gegevens beschikbaar.

Sulfaat: de waarden van de tienjaargemiddelden stijgen tot 1929 sterk, van 10 tot 50 mg/l. Van 1929 tot 1969 daalt de waarde van het tienjaargemiddelde tot 30 mg/l en voor de periode 1969-1979 stijgt deze plotseling tot bijna 60 mg/l.

Chloride: het tienjaargemiddelde is vrij constant voor de weergegeven perioden en varieert rond de waarde van ca. 40mg/l.

Nitraat: de waarden van de tienjaargemiddelden vertonen voor de periode 1900-1969 een schommelende dalende trend, van ongeveer 30 tot nagenoeg 0 mg/l. De waarden van het tienjaargemiddelde voor de periode 1969-1979 is weer duidelijk hoger en wel 15 mg/l.

Elektrische conductiviteit (EC): de waarden van de tienjaargemiddelden tonen een zekere variatie met lichte stijging van ca. 35 tot 55 mS/m.

Filterdiepte: de tienjaargemiddelden zijn vrij constant tot 1969 met een waarde van 20 meter min maaiveld. Voor de periode 1969-1979 neemt het tienjaargemiddelde af tot de waarde van ongeveer 15 meter min maaiveld.

Opvallend aan de tienjaargemiddelden van de Achterhoek is het hoge sulfaatgehalte, het relatief hoge nitraatgehalte, het iets verhoogde chloridegehalte en de hoge EC voor de periode 1969-1979. Dit is te verklaren door de lage gemiddelde filterdiepte voor deze periode. Algemeen blijkt het filterdiepteverloop voor de Achterhoek goed, dat wil zeggen omgekeerd, te passen op het verloop van het nitraatgehalte. In mindere mate geldt dit ook voor het verloop van de tienjaargemiddelden van chloride.

Het nitraatverontreinigingsprobleem van Oost Gelderland laat zich niet eenvoudig uit deze tienjaargemiddelden afleiden, deels doordat de gegevens maar tot en met 1979 beschikbaar waren en door hydrochemische eigenschappen van het grondwater. In hoofdstuk 3, onder 3.4, werd al vermeld dat grondwater onder natuurlijke omstandigheden theoretisch niet gelijktijdig ijzer en nitraat kan bevatten. Het grondwater in Oost Gelderland blijkt over het algemeen ijzerhoudend te zijn, zoals verder in dit hoofdstuk, onder 5.2 en de "ijzerkaart" (bijlage 14) zal blijken. Het grondwater is over het algemeen dus (licht) reducerend, zodat het nitraat gereduceerd wordt. De bovenste meters van het grondwater zijn nog wel oxiderend, zodat hier wel nitraat in aanwezig zal zijn. De infiltratiegebieden bevatten grondwater dat oxiderend is, zodat het nitraat stabiel is. Juist in deze gebieden zal het nitraatprobleem zich voordoen. Als voorbeeld kan het pompstation Dr. van Heek (Montferland) genoemd worden, zij het dat Montferland bij het chemisch deel van dit onderzoek niet tot de Achterhoek gerekend wordt. Dit drinkwaterpompstation kampt al jaren met nitraat in het opgepompte water. De nitraatkaart (bijlage 10) laat ook duidelijk zien waar de hoge nitraatgehalten in het grondwater zich bevinden.

- De stedelijke gebieden (figuur 11)

Ook voor deze gebieden geldt, net als voor de Gelderse Vallei en de Achterhoek, dat de tienjaargemiddelden maar tot en met 1979 berekend en getekend zijn, omdat ook voor deze gebieden over de periode 1980-1982 niet voldoende gegevens beschikbaar waren.

Sulfaat: over de hele periode tot en met 1979 stijgen de waarden van het tienjaargemiddelde van ongeveer 10 tot 25 mg/l. Een uitzondering hierop vormt de periode 1939-1949 met een opmerkelijk hoge waarde van 50 mg/l.

Chloride: de waarde van het tienjaargemiddelde stijgt over de hele periode tot en met 1979 van ongeveer 20 tot 30 mg/l, uitgezonderd de periode 1939-1949 met een relatief hoge waarde van 40 mg/l.

Nitraat: de waarden van het tienjaargemiddelde vertonen tot 1929 een stijgend verloop van 10 tot 35 mg/l, na 1929 daalt het tienjaargemiddelde plotseling tot een waarde van minder dan 10 mg/l en varieert tot en met de periode 1969-1979 rond deze waarde. Ook voor nitraat blijkt de periode 1939-1949 een afwijkend tienjaargemiddelde te hebben met een relatief hoge waarde van 50 mg/l.

Elektrische conductiviteit (EC): het verloop van het tienjaargemiddelde vertoont twee hoge pieken, één in de periode 1900-1909 en één in de periode 1939-1949 met waarden van respectievelijk 60 en 50 mS/m. De waarde van het tienjaargemiddelde van de periode 1969-1979 (30 mS/m) is enigszins verhoogd t.o.v. de voorgaande respectievelijk de erop volgende periode. Voor de overige perioden hebben de tienjaargemiddelden een waarde van ca. 25 mS/m.

Filterdiepte: het verloop van het tienjaargemiddelde met de tijd vertoont een geringe variatie rond de waarde van 45 meter min maaiveld. De periode 1939-1949 wordt gekenmerkt door een relatief lage waarde voor het tienjaargemiddelde van 25 meter min maaiveld.

Voor de stedelijke gebieden valt op dat de curve van het nitraatgehalte niet past op die van sulfaat, chloride, EC en filterdiepte. In de stedelijke gebieden blijkt dus het nitraat op een andere manier of via een ander mechanisme aan het grondwater te worden toegevoegd, bijvoorbeeld door de riolering. De curven van alle hier gepresenteerde tienjaargemiddelden blijken een piek te vertonen voor de periode 1939-1949. Dit komt overeen met de relatief kleine filterdiepte in deze periode. Het is niet bekend of er nog meerdere factoren zijn die tot het ontstaan van deze piek hebben geleid.

5.1.2 De histogrammen

De histogrammen zijn weergegeven in de figuren 12 tot en met 17 en hebben allen betrekking op het eerste watervoerend pakket. Een aantal populaties zijn globaal opgesplitst in meerdere subgroepen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit handmatig is gedaan en het heeft dus geen statistische grondslag. De opsplitsing in subgroepen is gedaan voor het verkrijgen van klassegrenzen, die gebruikt kunnen worden voor het contouren van de hydrochemische kaarten.

Boven de histogrammen is ook de samenstelling van zuiver infiltratiewater weergegeven. Onder zuiver infiltratiewater wordt regenwater verstaan dat na indamping door evapotranspiratie het grondwater aanvult. De gegevens hiervoor zijn afkomstig uit Hydrochemie Oost-Nederland (Hoogendoorn, 1983A).

De samenstelling van het zuivere infiltratiewater is in de histogrammen weergegeven als op hun kop staande driehoeken. De punt van de driehoek wijst naar het klasse-interval waar in de gemiddelde waarde van de betreffende parameter in het zuivere infiltratiewater ligt. De breedte van de basis van de driehoek geeft een indruk van de spreiding in het gehalte van die parameter in het zuivere infiltratiewater. Het valt op dat van de meeste driehoeken de linkerzijde langer is dan de rechterzijde. Dit komt waarschijnlijk, doordat de gehalten van de parameters in regenwater normaal verdeeld zijn; een normale verdeling opgenomen in een lognormaal verdeeld histogram heeft tot gevolg dat het gemiddelde (de punt van de driehoek) dichter bij het maximum komt te liggen (de rechterkant van de driehoek).

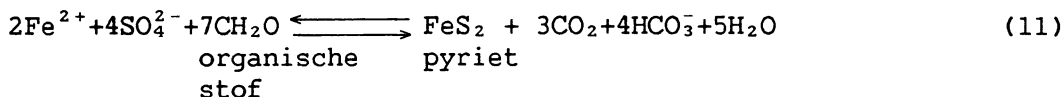
De chloride en sulfaatgehalten, zoals afgeleid in Hydrochemie Oost-Nederland, uit de waarden volgens Ridder (1978), passen redelijk in de driehoek die gebaseerd is op getallen van Leeflang (1938). Het nitraatgehalte is volgens de bevindingen van Ridder echter veel hoger dan dat volgens Leeflang. Het nitraatgehalte in het zuiver infiltratiewater berekend op basis van gegevens volgens Ridder, is in het histogram van nitraat weergegeven als een rechtop staande driehoek. Verder bestaat de indruk dat ook het sulfaatgehalte in 1978 hoger uitkomt dan in 1938.

In tegenstelling tot de tienjaargemiddelden worden de histogrammen per parameter besproken en niet per gebied. Dit om de verschillen per gebied duidelijker naar voren te laten komen.

- Sulfaat (figuur 12)

Opvallend voor het histogram van sulfaat is dat er in de populatie één subgroep samenvalt met de infiltratie watersamenstelling en dat er altijd minstens één subgroep met hogere concentraties aanwezig is. Dit houdt in dat in elk gebied een extra toevoeging van sulfaat aan het grondwater plaatsvindt. Voor de Gelderse Vallei is dit verschijnsel echter veel minder uitgesproken dan voor de rest van de deelgebieden. Dit kan mogelijk veroorzaakt worden door de samenvoeging van de watervoerende pakketten onder en boven de Eemklei (zie ook 5.1.1). Als bron van deze extra toevoeging kan de vervuiling door de mens worden genoemd (en in mindere mate ook oxidatie van sulfiden).

In het histogram van het Rivierengebied blijken ook subgroepen voor te komen welke een duidelijk lager sulfaatgehalte hebben dan het infiltrerende water. Hier is dus naast een verrijkingsmechanisme ook een verwijderingsmechanisme werkzaam: sulfaatreductie. Dit bijvoorbeeld volgens de volgende reactie:



Uit de vorm en ligging van de subgroepen binnen de sulfaatpopulatie en de samenstelling van het natuurlijke infiltratiewater zijn de volgende grenzen gekozen om de sulfaatkaart te contouren: 15 en 35 mg/l sulfaat. Tot 15 mg/l is namelijk sprake van een natuurlijke sulfaatconcentratie, van 15 tot 35 mg/l is sprake van licht beïnvloed grondwater en van meer dan 35 mg/l sulfaat is sprake van (sterk) beïnvloed grondwater.

- Totale hardheid (figuur 13)

Uit het histogram van de totale hardheid blijkt dat alleen de infiltratiegebieden een subgroep in de populatie hebben die door de hardheid van het zuivere infiltratiewater verklaard kan worden. Alle andere deelgebieden hebben een hardheid die duidelijk hoger is dan het infiltrerende water. Dit verschijnsel was te verwachten uit de hydrochemische oplossingsreacties (2, 3, 5 en 6), zoals die in hoofdstuk 3 (onder 3.2) reeds besproken zijn. Uit de verdeling van de subgroepen in het hardheidshistogram blijkt dat de oplossingsreacties al goed op gang beginnen te komen in de infiltratiegebieden (zoals voor de statistiek onderscheiden).

Uit de frequentie verdelingen en de natuurlijke samenstelling van het infiltratiewater zijn de volgende waarden gekozen voor de kaartcontouren: 1 en 2 mol/m³. De waarde kleiner dan 1 vertegenwoordigt infiltratiewater van de grote infiltratiegebieden, tussen 1 en 2 mol/m³ water net buiten deze gebieden met iets meer opgeloste "kalk" en boven de 2 mol/m³ water dat duidelijk gerijpt is en veel opgeloste stof bevat.

- Chloride (figuur 14)

De histogrammen van chloride geven duidelijk aan dat in alle deelgebieden één subgroep aanwezig is die door de samenstelling van infiltratiewater verklaard kan worden. Tevens blijkt er altijd wel een tweede subgroep aanwezig te zijn die een verrijking aan chloride aangeeft. Deze subgroep komt het duidelijkst naar voren in het Rivierengebied en de Achterhoek. Bij de stedelijke gebieden blijken zelfs twee subgroepen de aanrijking weer te geven. Mogelijk is hier naast de normale aanrijking door menselijke activiteit ook sprake van een extra chlorideverontreiniging door wegezout.

Uit de histogrammen en de samenstelling van natuurlijk infiltratiewater zijn de volgende twee waarden aangehouden voor de kaartcontouren: 15 en 30 mg/l. De waarde kleiner dan 15 mg/l geeft de onbeïnvloede gebieden aan, de waarde tussen 15 en 30 mg/l geeft de licht beïnvloede gebieden aan en de waarde groter dan 30 mg/l de sterk beïnvloede (= vervuilde) gebieden.

- Nitraat (figuur 15)

In de figuur van het histogram van nitraat zijn twee driehoeken aangegeven, welke de samenstelling voor natuurlijk infiltratiewater weergeven volgens de eerder genoemde verschillende bronnen. De nitraatpopulatie valt niet onder te verdelen in subgroepen. De grote aantallen in de klassen tot 0,005 mg/l vertegenwoordigen die watermonsters waarvan de nitraatgehalten onder de detectiegrenzen liggen.

Uit het histogram en de op de kaart weergegeven getallen zijn de volgende arbitraire grenzen gekozen 10, 30 en 60 mg/l. Dit daar de waarde beneden de 10 mg/l zowel volgens Leeflang als volgens Ridder natuurlijk infiltratiewater aan kan geven. De waarden tussen 10 en 30 mg/l blijken licht beïnvloede gebieden weer te geven, de waarden tussen 30 en 60 mg/l geven de duidelijk beïnvloede gebieden weer en de waarden boven de 60 mg/l geven de zwaar beïnvloede (= vervuilde) gebieden weer.

- IJzer (figuur 16)

De histogrammen van ijzer bevatten geen driehoek voor de natuurlijke infiltratiewatersamenstelling daar dit water nagenoeg geen ijzer kan bevatten door het chemisch gedrag van ijzer. IJzer is namelijk zeer slecht oplosbaar in zuurstofrijk (= oxiderend) water. Uit eerdere onderzoeken van Meinardi (1974) en Verkooijen (1981) blijkt de grens van 1 mg/l ijzer de grote infiltratiegebieden van de "kwelgebieden" te scheiden, zodat ook hier van de waarde van 1 mg/l uitgegaan wordt. Zo blijken voor het Rivierengebied en de Achterhoek de meeste monsters boven de 1 mg/l te liggen. Dit is niet vreemd daar in deze gebieden nauwelijks "vers" (= ondiep) infiltratiewater bemonsterd is en daar deze gebieden een grote bodemactiviteit hebben.

De grote infiltratiegebieden blijken dus grondwater te bevatten met minder dan 1 mg/l ijzer. De Gelderse Vallei en de stedelijke gebieden blijken een overgangspositie in te nemen. Voor de Gelderse Vallei is dit te verklaren doordat veel van de monsters uit het watervoerend pakket onder de Eemklei komen; dit pakket bevat zuurstofrijk water dat van de Veluwe afkomstig is. Voor de stedelijke gebieden is het te verklaren doordat de bij dit onderzoek onderscheide stedelijke gebieden voor een groot deel in de hoge infiltratiegebieden liggen, zoals blijkt uit bijlage 3. Voor de kaart zal nu enkel de 1 mg/l-contour gebruikt worden als afbakening van de grote infiltratiegebieden.

- De elektrische conductiviteit (EC, figuur 17)

Voor het natuurlijk infiltratiewater was geen waarde voor de EC beschikbaar, zodat de driehoeken in de histogrammen ontbreken.

Het valt op dat de EC-frequentie verdelingen voor de grote infiltratiegebieden en Gelderse Vallei globaal slechts één piek bevatten met de top rond de 12 respectievelijk 19 mS/m.

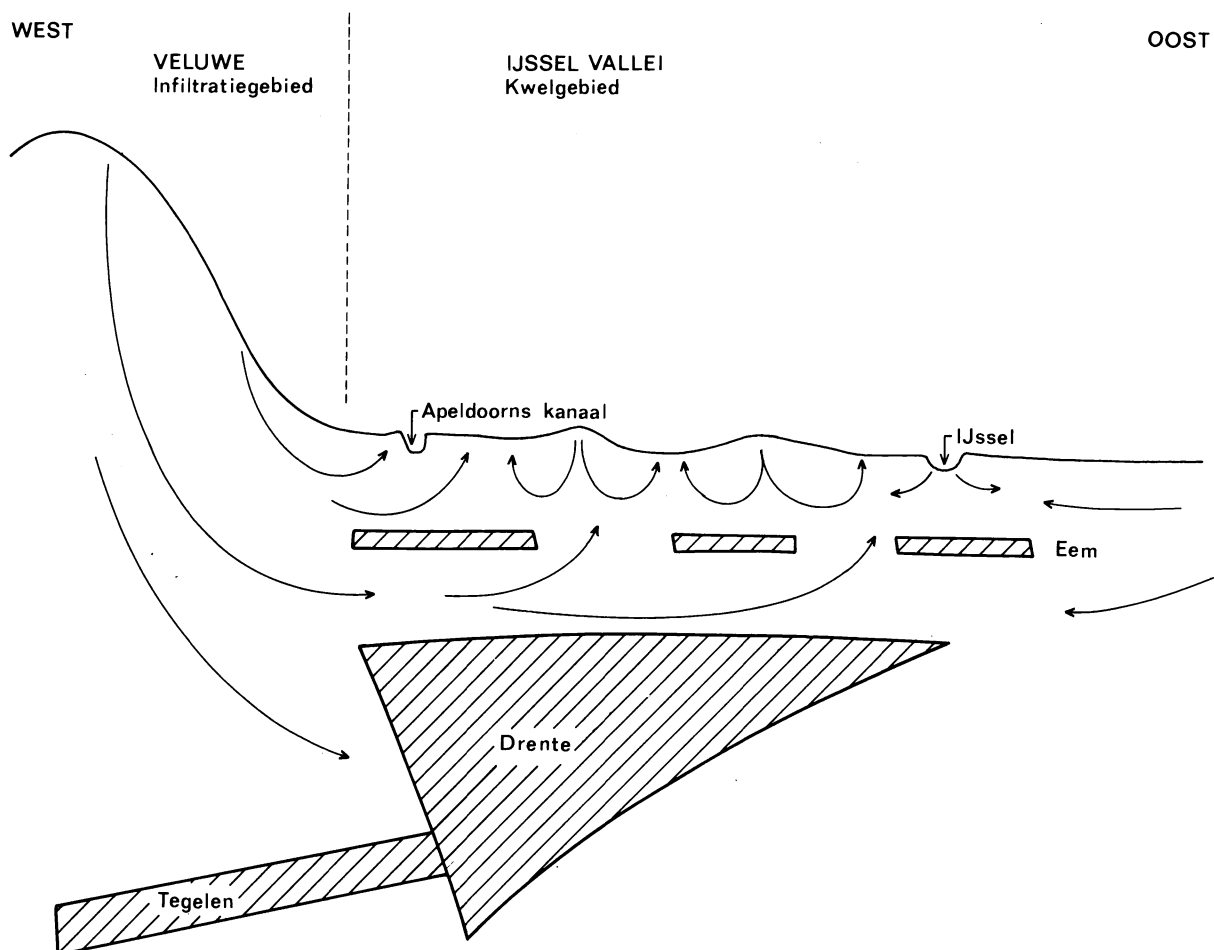
De samenstelling van het grondwater in de Gelderse Vallei blijkt weer veel op dat van de Veluwe te lijken. Het histogram van de Achterhoek heeft de piek rond de 40 mS/m en lijkt dus weinig infiltratiewater te bevatten. Het histogram van het Rivierengebied bevat twee pieken en wel bij 18 en 45 mS/m. Dit komt doordat het rivierengebied, vooral tussen Tiel en Arnhem en de IJssel Vallei, veel grondwater bevat wat van de Veluwe afkomstig is, hetgeen door de piek van 18 mS/m wordt aangegeven. De stedelijke gebieden blijken 3 pieken te vertonen in de frequentieverdeling: bij 14, 30 en 60 mS/m. Ook hiervoor is de ligging van de stedelijke gebieden verantwoordelijk (zie bijlage 3). De piek van 14 mS/m wordt door het infiltratiewater veroorzaakt; de piek van 30 mS/m door mengwater en de piek van 70 mS/m door vuil grondwater.

Uit deze histogrammen zijn de kaartcontouren 20 en 40 mS/m afgeleid. Grondwater met een EC kleiner dan 20 mS/m is (schoon) infiltratiewater; water met een EC tussen 20 en 40 mS/m is licht beïnvloed en grondwater met een EC groter dan 40 mS/m is duidelijk beïnvloed grondwater.

De specifieke concentratie grenzen zoals ze bij dit hydrogeochemisch onderzoek bepaald zijn voor Gelderland wordt onderstaande tabel samengevat. Tevens is in deze tabel de EEG-norm voor drinkwater weergegeven als richtniveau (RN) en maximaal toelaatbare concentratie (MTC). Voor de hardheid is alleen een minimale waarde gegeven.

Parameter	Natuurlijk infiltratie water	Exfiltratie water	Sterk beïnvloed water	EEG-drinkwaternorm	
				RN	MTC
EC (mS/m)	< 20		> 40	40	125
Chloride (mg/l)	< 15		> 30	25	200
Nitraat (mg/l)	< 10		> 30	25	50
Sulfaat (mg/l)	< 15		> 35	25	250
IJzer (mg/l)	< 1	> 1		0,05	0,2
Hardheid (mol/m ³)	< 1	> 2		minimaal 1,5	

Bovenstaande tabel vraagt om een nadere toelichting wat betreft infiltratiewater en exfiltratiewater en ook wat betreft de positie van kwelwater in dit geheel. Als voorbeeld hiertoe dient het schematische oost-westprofiel van de Veluwe en IJssel Vallei:



Het profiel geeft het hoge deel van de Veluwe weer als infiltratiegebied en de IJssel Vallei als kwelgebied. Echter de lokale hoge delen van de IJssel Vallei fungeren ook als infiltratiegebieden, zoals in het profiel blijkt uit de stroombanen van het grondwater. Het in deze lokale infiltratiegebieden infiltrerend water kwelt op een relatief kleine afstand. Kwalitatief is het lokaal infiltrerende water sneller "gerijpt" door de hogere bodemactiviteit ten opzichte van het water uit de grote infiltratiegebieden. Deze laatste zijn immers voornamelijk bosgebieden en woeste gronden. Dit houdt in dat de laterale grondwatersamenstelling verschillen in de kwelgebieden aanzienlijk kunnen zijn en afhankelijk zijn van de plaats en diepte waarop gemonsterd is. Uit het profiel blijkt dat op één plaats op verschillende diepten in verschillende hydrologische systemen bemonsterd wordt, of kan worden. Tevens is het vaak moeilijk zo niet onmogelijk om lokaal (gerijpt) infiltrerend grondwater te onderscheiden van (gerijpt) opkwellend grondwater van de Veluwe.

Het geheel houdt in dat in de kwelgebieden, zoals aangegeven op de hiervoor besproken kaarten, niet alleen kwelwater uit de grote infiltratiegebieden bevat, maar ook grondwater van de lokale systemen.

Het in vorenstaande tabel genoemde exfiltratiewater is voor dit onderzoek het grondwater buiten de grote infiltratiegebieden, zonder dat er op ingegaan wordt of het lokaal infiltratie- of kwelwater of kwelwater afkomstig van de grote infiltratiegebieden is.

5.2 De Piperdiagrammen

De Piperdiagrammen geven enkel die analyses weer waarvan alle hoofdcomponenten bepaald zijn. Het zal dus maar om een relatief klein aantal analyses uit het totale bestand gaan. Voor een toelichting op de interpretatiewijze wordt naar het hoofdstuk Theorie verwezen onder 3.3.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het eerste watervoerend pakket met een chloridegehalte kleiner dan 20 mg/l en een hardheid kleiner dan 1 mol/m³ (figuur 18)

Dit grondwater blijkt vooral van het calciumbicarbonaat en het calciumchloridetype te zijn. In de vorige paragraaf is al gebleken dat het hier handelt om "jong" infiltratiewater met een lage hoeveelheid opgeloste stof, zodat chloride en sulfaat snel dominerend kunnen worden. Dit laatste kan door vervuilingbronnen veroorzaakt worden.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het eerste watervoerend pakket met een chloridegehalte kleiner dan 20 mg/l en een hardheid groter dan 1 mol/m³ (figuur 19)

Dit grondwater blijkt alleen van het calciumbicarbonaattype te zijn; er komt relatief weinig magnesium en ijzer in voor en blijkt ook nagenoeg geen sulfaat en nitraat te bevatten. Het gaat hier dus om een zuiver, iets gerijpt, infiltratiewater waarin calcium en bicarbonaat de dominerende stoffen zijn. De vervuilinginvloed, indien aanwezig, is relatief erg klein geworden.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het eerste watervoerend pakket met een chloridegehalte groter dan 20 mg/l en een hardheid kleiner dan 1 mol/m³ (figuur 20)

Dit grondwater is voornamelijk van het calciumchloridetype. Het blijkt grondwater te zijn met relatief veel sulfaat en nitraat en weinig ijzer. Dit moet dus ook relatief jong grondwater zijn in vervuilde gebieden, hetgeen ook nog blijkt uit het relatief hoge natriumgehalte.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het eerste watervoerend pakket met een chloridegehalte groter dan 20 mg/l en een hardheid groter dan 1 mol/m³ (figuur 21)

Dit grondwater zal een redelijke hoeveelheid opgeloste stof hebben. Het blijkt voornamelijk uit twee types te bestaan: ten eerste het calciumbicarbonaattype en ten tweede het calciumchloridetype. Het eerste type bevat relatief veel bicarbonaat en relatief weinig sulfaat en nitraat; het tweede type bevat relatief weinig bicarbonaat en relatief veel sulfaat en nitraat.

- Het Piperdiagram voor grondwater van het "tweede" watervoerend pakket met een chloridegehalte kleiner dan 20 mg/l en een hardheid kleiner dan 1 mol/m³ (figuur 22)

Dit grondwater blijkt van het calciumbicarbonaattype te zijn, ofwel normaal grondwater. Dit grondwater blijkt ook geen nitraat te bevatten, maar wel een kleine hoeveelheid sulfaat, hetgeen waarschijnlijk van natuurlijke oorsprong is.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het "tweede" watervoerend pakket met een chloridegehalte kleiner dan 20 mg/l en een hardheid groter dan 1 mol/m³ (figuur 23)

Dit grondwater is net als het vorige type alleen van het calciumbicarbonaattype. Het type blijkt voor dit water nog eenduidiger te zijn.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het "tweede" watervoerend pakket met een chloridegehalte groter dan 20 mg/l en een hardheid kleiner dan 1 mol/m³ (figuur 24)

Dit grondwater bevat weinig analysegegevens. De bekende watermonsters laten zich niet in één hoofdgroep samenbrengen: ze komen verdeeld in de Piperruit voor. Dit wordt veroorzaakt door verschillende vervuilinginvloeden op grondwater met (zeer waarschijnlijk) een lage hoeveelheid opgeloste stof. Uit het feit dat slechts enkele watermonsters met een Cl $\gg$ 20 mg/l een lage hardheid hebben kan tevens geconcludeerd worden dat vervuiling (met chloride) enigszins gepaard gaat met een verhoging van de hardheid (c.q. het calcium- en magnesiumgehalte). Vergelijk bijvoorbeeld ook het relatief gering aantal monsters uit het eerste watervoerend pakket met Cl $\gg$ 20 mg/l en hardheid $<$ 1 mol/m³. Eventueel kan het hier ook water betreffen dat ionwisseling heeft ondergaan.

- Het Piperdiagram voor het grondwater van het "tweede" watervoerend pakket met een chloridegehalte groter dan 20 mg/l en een hardheid groter dan 1 mol/m³ (figuur 25)

Dit grondwater blijkt ook verdeeld over de Piperruit voor te komen. Ook hier blijkt geen nitraat voor te komen maar wel een kleine hoeveelheid sulfaat van natuurlijke oorsprong. Dit grondwater blijkt ook monsters van natriumchloridetype te bevatten, ofwel zout grondwater.

5.3 De hydrochemische kaarten (bijlage 1 t/m 17)

Onder een hydrochemische kaart wordt hier verstaan, een presentatievorm voor de ruimtelijke verdeling van een hydrochemische parameter over de provincie Gelderland. De kaarten zijn vervaardigd voor het eerste watervoerend pakket en voor het watervoerend pakket onder de eerste regionaal scheidende laag. Deze laatste kaart geeft dus informatie van het lokale tweede watervoerend pakket; regionaal betreft het vaak een ander watervoerend pakketnummer. Hiertoe zijn op deze kaart de regionale pakketnummers aangebracht waarop de chemische parameters betrekking hebben. Dit geschiedde met behulp van de pakketindeling volgens bijlage 18. Voor de volgende parameters werden kaarten vervaardigd: lokatie, gebiedstype, elektrische conductiviteit, Piperwartertype, chloride, nitraat, sulfaat, ijzer en hardheid. De kaarten worden hieronder toegelicht.

- De lokatiekaarten voor het eerste watervoerend pakket en het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlagen 1 en 2)

De op de kaart aangebrachte nummers, zijn de nummers per kaartblad volgens RGD/TNO. Op plaatsen waar zich meerdere lokaties bevinden (clusters) en deze bij het tekenen over elkaar zouden vallen is slechts die lokatie getekend die de meeste waarnemingen of recentste waarneming bevat.

Opvallend aan de kaart is dat de waarnemingslokaties vrij egaal verspreid liggen over de provincie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de clusters reeds uitgedund zijn bij het tekenen. Deze clusters zijn nog te herkennen aan een ander lokatiesymbool. De kaart voor het diepere watervoerend pakket laat een duidelijk minder dicht waarnemingsnet zien.

- De gebiedskaart (bijlage 3)

Deze gebiedskaart geeft de ligging aan van de voor de statistische bewerkingen onderscheide gebieden. Ingedeeld zijn 5 gebieden volgens simpele geometrische vormen; uitzondering hierop vormen de infiltratiegebieden. Deze laatsten worden begrensd door de 20 meter hoogtelijn.

Het Hierdense Beekgebied is met de Gelderse Vallei samengetrokken. Dit is gedaan omdat de problematiek van het Hierdense Beekgebied en de Gelderse Vallei van dezelfde aard is (intensieve landbouw en veeteelt). Het gedeelte van de Betuwe dat tussen Arnhem en Nijmegen ligt is bij het stedelijk gebied getrokken. De reden hiervan is dat in dit, weliswaar landelijk gebied, de meeste wateranalyses afkomstig zijn van lokaties in en rondom woonkernen.

- De EC-kaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 4)

Op kaart zijn naast de door de computer geplaatste gegevens nog enkele getallen en symbolen handmatig aangebracht. Daar de computer bij clusters de maximale waarde heeft gekozen is voor al deze gevallen, aan de hand van de originele gegevens, een typische waarde geselecteerd.

Onder een typische waarde wordt hier verstaan de waarde die voor het grootste deel van het watervoerende pakket aangetroffen wordt; het is dus een soort gewogen gemiddelde. Tevens zijn in deze gevallen symbolen aangebracht om aan te geven of de oorspronkelijk getekende waarde van een ondiep, diep of onbekend filter afkomstig is. Verder zijn op deze kaart de uitkomsten weergegeven van het grondwaterkwaliteitsmeetnet van het (voormalige) RID.

Opvallend aan het kaartbeeld zijn de volgende punten:

- 1 De lage EC-waarden (kleiner dan 20 mS/m) voor de hoge delen van Gelderland. Het betreft de infiltratiegebieden, zoals al onder 5.1.2 is gebleken. Het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei blijkt ook binnen de 20 mS/m contour te vallen. Dit wordt mogelijk ook veroorzaakt door het samenvoegen van de watervoerende pakketten onder en boven de Eemklei, zie ook onder 5.1.2
 - 2 De ligging van de zone's met een EC-waarde van tussen de 20 en 40 mS/m rondom de hoge stuwwallen (de infiltratiegebieden). Dit lijkt te komen door de toename van de opgeloste stoffen in de richting van de grondwaterstroming. Zie ook onder 5.1.2. Opmerkelijk is dat bijna de hele IJssel Vallei in deze zone valt, maar ook hier moet rekening gehouden worden met het verschijnsel van samenvoegen van de watervoerende pakketten onder en boven de Eemklei. De EC-waarden tussen 20 en 40 mS/m komen ook voor als eilanden in Oost-Gelderland; het betreft hier de hogere delen: de omgeving Zelhem, Eibergen e.d.
 - 3 Op de Veluwe komen ook eilanden met hoge EC-waarden voor. Het betreft hier de sterk beïnvloede gebieden, zoals het Hierdense Beekgebied en het militair terrein nabij 't Harde.
 - 4 De typische inbocht van de 20 mS/m-contour nabij Otterlo tussen de Veluwe en de Gelderse Vallei vindt zijn oorzaak in de geohydrologische opbouw (zie bijlage 18) en het hieruit voortvloeiend bodemgebruik.
- De EC-kaart van het watervoerend pakket onder de eerste regionaal scheidende laag (bijlage 5)
Voor deze kaart valt op dat de waarden over het algemeen lager liggen dan voor het eerste watervoerend pakket. Uitzondering hierop vormen enkele lokaties welke een vrij hoge waarde (tot ± 10.000 mS/m) hebben; deze monsters zijn afkomstig uit zout grondwater.
- De Piperwatertypenkaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 6)

Deze kaart is met een andere optie getekend dan de andere hydrochemische kaarten en wel met optie 2. Dit houdt in dat in clusters gekozen is in de volgorde: ondiepste-recentste. Tevens zijn voor deze kaart de monsters ingedeeld naar hardheid en chloridegehalte, zoals ook bij de Piperdiagrammen is gebeurd (5.2). Opvallend aan de kaart zijn de volgende punten:

- 1 De hoge delen (infiltratiegebieden) bevatten grondwater van het type 0 (= infiltratiewater met hardheid kleiner dan 1 mol/m^3 en chloridegehalte kleiner dan 20 mg/l). Rond deze komt lokaal grondwater voor van het type 1 (dit is type 0 met grotere hardheid). Buiten deze beide gebieden komt alleen grondwater van het type 6 (bicarbonaattype met Cl groter dan 20 mg/l en hardheid groter dan 1 mol/m^3), dit is te verklaren door de grondwaterstroming en de oplossing van kalk (zie onder 3.4). In de Randmeerzone (Noord West-Veluwe) wordt incidenteel naast type 6 ook type 1 aangetroffen. Dit komt mogelijk door lokaal grotere filterdiepte.
 - 2 In Oost-Gelderland blijken ook zone's voor te komen met grondwater van het type 1; dit zijn de topografische hogere delen.
 - 3 Binnen de infiltratiegebieden wordt ook grondwater van het type 5 aangetroffen. Dit is grondwater met hardheid kleiner dan 1 mol/m^3 en een chloridegehalte groter dan 20 mg/l , ofwel dit is infiltratiewater (type 0) verrijkt met chloride door menselijke activiteit (strooizout, mest e.d.). Dit doet zich voor in de omgeving van Uddel-Elspeet en bij enkele incidentele lokaties, zoals bij Apeldoorn en Ede.
 - 4 Bij Wijchen, in het Land van Maas en Waal, wordt grondwater van het type 7 (calcium-chloridetype met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride groter dan 20 mg/l) aangetroffen. Dit is grondwater van het type 6 verrijkt met chloride. Dit type 7 wordt aangetroffen in Nijmegen, Arnhem e.d.; hier wordt het waarschijnlijk door strooizout veroorzaakt.
 - 5 De grondwatertypen 2 (Ca-Cl-type met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride kleiner dan 20 mg/l), 3 (Na-Cl-type met hardheid groter dan 1 mol^3 en chloride kleiner dan 20 mg/l), 4 (Na-HCO₃-type met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride kleiner dan 20 mg/l) en 9 (Na-HCO₃-type met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride kleiner dan 20 mg/l) komen niet op de kaarten voor. Dit is in overeenstemming met de theoretische achtergronden, zoals die onder 3.4 besproken zijn. Het watertype 8 (Na-Cl-type met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride groter dan 20 mg/l) komt incidenteel en alleen langs de randmeren voor; dit stamt nog uit de tijd van de Zuiderzee.
- De Piperwatertypekaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 7)
- Deze kaart is ook met een afwijkende optie vervaardigd: optie 6 (diepste-recentste). Opvallend is het volgende:
- 1 In deze watervoerende pakketten worden over het algemeen de normale grondwatertypen 0, 1 en 6 aangetroffen.
 - 2 Incidenteel wordt zout grondwater aangetroffen: type 8. Dit in de omgeving van Zevenaar en Velddriel. Ook wordt één keer het type 9 (Na-HCO₃ met hardheid groter dan 1 mol/m^3 en chloride groter dan 20 mg/l) aangetroffen, dit duidt op mogelijke ionwisseling (zie ook onder 3.4).

- De chloridekaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 8)

Ook op deze kaart zijn enkele symbolen toegevoegd voor de filterdiepte. Voor de clusters is een typische waarde toegevoegd. Tevens is op deze kaart een minimumwaarde aangegeven voor de clusters die daar aanleiding voor gaven door de grote spreiding van analysewaarden. Opvallend aan het kaartbeeld zijn de volgende punten:

- 1 Op deze kaart vallen de hoge delen op door hun lage chloridegehalte. Deze gebieden zijn: De Veluwe, Montferland en de stuwwal bij Nijmegen. Het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei blijkt weer bij de Veluwe te horen qua chloridegehalte. Het Veluwe-massief zelf bevat enkele enclaves met hogere chloridegehaltes (tussen 15 en 30 mg/l), zoals bijvoorbeeld het Hierdense Beekgebied, Nunspeet en het militair oefenterrein nabij 't Harde.
- 2 De rest van Gelderland bevat voornamelijk grondwater met een chloridegehalte tussen de 15 en 30 mg/l. Hierin liggen de diverse gebieden met een chloridegehalte van groter dan 30 mg/l, te weten de steden, grote delen van Oost-Gelderland en de intensieve agrarische gebieden nabij Elspeet en nabij Wijchen-Overasselt.
- 3 De invloed van het Waalwater is in de omgeving van Tiel duidelijk te herkennen aan de verhoogde chloridegehaltes. Dit blijkt ook voor de IJssel tussen Zutphen en Zwolle en voor het Twentekanaal. Deze grondwaterbeïnvloeding blijkt goed overeen te stemmen met het isohypsenbeeld (zie bijlage 19).
- 4 De strook langs de randmeren blijkt ook nog grondwater te bevatten met hoge chloridegehaltes.

- Chloridekaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 9)

Ook op deze kaart zijn handmatig typische chloridegehaltes aangegeven bij clusters. Tevens is, wanneer er voor de typische waarde geen eenduidige keuze mogelijk was, een waarde gegeven welke door middel van een V met de door de computer getekende waarde is verbonden. Wanneer tevens een andere waarde mogelijk leek te zijn is deze waarde aangebracht en met het $\wedge$ -teken aangegeven. (Bijvoorbeeld bij twee verschillende waarden voor één filter). Deze kaart toont het volgende opmerkelijke punt:

- 1 Het grondwater in deze watervoerende pakketten bevat over het algemeen lage hoeveelheden chloride (minder dan 20 mg/l), behalve daar waar (erg) diep is bemonsterd. Op deze plaatsen is het zoute grondwater bemonsterd, zodat chloridegehaltes van veel meer dan 500 mg/l worden aangetroffen.

- De nitraatkaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 10)

Ook op deze kaart zijn, zoals hiervoor al is besproken, extra symbolen en getallen toegevoegd met betrekking tot filterdiepte, minimumwaarde en typische waarde.

Deze kaart toont de volgende opmerkelijke punten:

- 1 Over het algemeen blijkt het nitraatgehalte van het grondwater 0 mg/l (= niet aantoonbaar) te zijn.
- 2 Eilanden van grondwater met hoge nitraatgehalten komen voor bij:
 - a De grote steden: tot meer dan 60 mg/l.
 - b Agrarische gebieden bijvoorbeeld: het Hierdense Beekgebied, bij Wijchen-Bergharen en bij Nederasselt-Overasselt.
 - c Het bekken van Groesbeek.
 - d De omgeving van Zeddam-'s Heerenberg.
 - e De omgeving van Otterlo.
 - f De omgeving van Barchem-Lochem.
- 3 Het grondwater van Oost-Gelderland lijkt volgens deze kaart over het algemeen weinig nitraat te bevatten, maar de toegevoegde gegevens van de ondiepe ($\pm$ 8 m) filters van het RID-grondwaterkwaliteitsmeetnet geven vrij hoge waarden aan, bijvoorbeeld bij Dinxperlo (75 mg/l nitraat), ten noorden van Halle (148 mg/l) en Didam (160 mg/l). De lage gehalten voor het grondwater van Oost-Gelderland zijn goed in overeenstemming met een lage redox potentiaal: geen nitraat maar wel ijzer. De hoge gehalten van het RID moeten verklaard worden met de ligging in "probleemgebieden", of door water dat vrij recent geïnfiltreerd is en nog op weg is naar grotere diepte. Dit laatste lijkt helaas het geval te zijn.

- De nitraatkaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 11)

Deze kaart laat voor dit grondwater overal de waarde 0 mg/l zien, behalve bij Harderwijk.

- De sulfaatkaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 12)

Ook op deze kaart zijn, zoals hiervoor al is besproken, extra symbolen en getallen toegevoegd met betrekking tot filterdiepte, minimumwaarde en typische waarde. Opmerkelijke feiten zijn:

- 1 de topografisch hoge delen van Gelderland bevatten minder dan 15 mg/l sulfaat. Dit zijn:
 - a De Veluwe tot de randmeren en tot vlak bij de IJssel en de Rijn.
 - b De Stuwwal bij Nijmegen.
 - c Montferland.
 - d Het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei blijkt ook nu weer tot de Veluwe te behoren qua sulfaatgehalte.
- 2 In de hoge, schone delen bevinden zich enclaves van grondwater met hoge sulfaatgehalten, bekend zijn: het Hierdense Beekgebied, de omgeving van Otterlo en het militair oefenterrein nabij 't Harde.
- 3 Rond de topografisch hoge gebieden bevindt zich een zone van grondwater met een sulfaatgehalte tussen de 15 en 35 mg/l. Ook in deze zone bevinden zich enclaves van grondwater met een hoog sulfaatgehalte (meer dan 35 mg/l). Bijvoorbeeld bij Doesburg en Doetinchem-Zelhem.

- 4 Het grondwater in het gebied van de grote rivieren bevat over het algemeen meer dan 35 mg/l sulfaat. Uitzondering hierop vormen de gebieden ten noorden van Tiel, bij Geldermalsen en tussen Zaltbommel en Velddriel.

- Sulfaatkaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 13)

Deze kaart toont redelijk grote variaties voor het sulfaatgehalte, maar over het algemeen bevatten de monsters minder dan 15 mg/l. Enkele monsters bevatten duidelijk meer sulfaat, het gaat hier meestal om monsters uit het zoute grondwater.

- IJzerkaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 14)
- In de theorie (onder 3.4) werd reeds vermeld dat het ijzergehalte bruikbaar is om de grote infiltratiegebieden te onderscheiden. Hiertoe wordt de grens van 1 mg/l ijzer gebruikt en worden de volgende grotere gebieden onderscheiden:

- 1 De Veluwe, globaal begrensd door het Apeldoorns kanaal in het oosten en de Rijn in het zuiden. In het noord-westen ligt de begrenzing vlakbij de randmeren. In het westen ligt de grens tegen de Gelderse Vallei, ook nu blijkt het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei bij de Veluwe te behoren.
- 2 De stuwwal bij Nijmegen samen met de rug Wijchen-Bergharen. Hier valt op dat het topografisch hoge deel van de rug niet helemaal samenvalt met de 1 mg/l ijzergrens. Een reden hiervoor is niet eenvoudig aan te geven.
- 3 De stuwwal van Montferland.
- 4 De omgeving van Elst (in de Betuwe).
- 5 Enkele hogere delen in Oost-Gelderland, zoals bij Groenlo, Zelhem, Aalten enzovoorts.

Deze kaart geeft kleinschalige infiltratiegebieden niet aan, wel toont de kaart lokaal waarnemingen van grondwater met een ijzergehalte kleiner dan 1 mg/l ijzer.

- De ijzerkaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 15)

Deze kaart geeft aan dat er in dit watervoerend pakket ook nog ijzergehalten kleiner dan 1 mg/l voorkomen. De Veluwe, zoals die door de vorige ijzerkaart aangegeven werd voor het eerste watervoerend pakket, valt nu ook op deze kaart op. Ook de stuwwal van Nijmegen en de omgeving hiervan is op deze kaart te herkennen.

- De totale hardheidkaart voor het eerste watervoerend pakket (bijlage 16)

Op deze kaart zijn de volgende punten waar te nemen:

- 1 De kaart toont een lage hardheid voor de reeds bekende grote infiltratiegebieden en een hoge hardheid in de "kwelgebieden".
- 2 De lage hardheidgebieden (kleiner dan 1 mol/m³) zijn de Veluwe (ook hier valt het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei onder de Veluwe), Montferland, Nijmegen en de rug van Wijchen.

De rug van Wijchen komt op deze hardheidkaart goed in overeenstemming met de topografie naar voren. Ook dient opgemerkt te worden dat de infiltratiegebieden vaak al uitgelopen zijn, zodat de hardheid hier niet meer toe kan nemen totdat het grondwater het uitlogingsfront passeert.

- 3 Rond deze lage hardheidsgebieden liggen de zones met iets grotere hardheid, namelijk tussen 1 en 2 mol/m³. Dit geheel volgens de theorie.
- 4 Het overige deel van Gelderland heeft grondwater met een hardheid groter dan 2 mol/m³. Hiervan uitgezonderd zijn enkele enclaves met grondwater met een hardheid tussen 1 en 2 mol/m³; deze enclaves liggen in Oost-Gelderland en omvatten de hogere delen zoals de Lochemmer Berg.
- 5 Binnen de Veluwe valt de omgeving van de Hierdense Beek op; dit gebied blijkt grondwater met een hogere hardheid te hebben (tussen de 1 en 2 mol/m³) door het intensieve bodemgebruik.

- De totale hardheidkaart voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag (bijlage 17)

Ook op deze kaart valt het zachte water van de Veluwe op met hier omheen het hardere grondwater van de Gelderse Vallei, het Rivierengebied en de IJssel Vallei. Voor deze laatste gebieden kan de hardheid oplopen tot 3 mol/m³.

- Vergelijking van de hydrochemische kaarten onderling

De kaarten voor het eerste watervoerend pakket.

Vergelijking van deze kaarten levert een aantal overeenkomsten op. Als eerste valt op dat de hoge infiltratiegebieden bij elke kaart duidelijk naar voren komen. Evenzo valt op dat het zuidelijk deel van de Gelderse Vallei bij de Veluwe lijkt te horen. De rug van Wijchen komt ook op elke kaart naar voren, opvallend is echter dat de hardheidskaart als enige de ligging van deze rug overeenkomstig met de topografie weergeeft. Grote vervuilde gebieden, zoals het Hierdense Beekgebied en grote steden komen ook op alle kaarten naar voren. De invloed van de grote rivieren komt niet op alle kaarten duidelijk tot uiting.

Verdere vergelijking leert dat alle grote gebieden met hun specifieke hydrochemisch gedrag op elke kaart naar voren komen; maar de grenzen verschillen nogal qua ligging. Ook de kleine deelgebieden verschillen qua ligging sterk op de diverse kaarten, zodat hieruit blijkt dat er wel min of meer een gemeenschappelijke trend in de verschillende chemische componenten in grondwater zit, maar dat tevens op deze gemeenschappelijke trend een grillig chemisch gedrag is gesuperponeerd. Hierdoor komen de grenzen van de verschillende gebieden voor de diverse componenten uiteindelijk niet (geheel) overeen. Bovendien kunnen de chemische processen, waarin de afzonderlijke componenten van belang zijn, op verschillende momenten een rol gaan spelen.

De nitraat-, sulfaat- en chloridekaart blijken de beste resultaten te geven bij het aangeven van de probleemgebieden. De andere parameterkaarten zijn hiervoor duidelijk minder geschikt.

De kaarten voor het watervoerend pakket onder de eerste scheidende laag.

Vergelijking van al deze kaarten leert dat alle parameters hetzelfde beeld voor heel Gelderland opleveren: het weinig dichte meetnet geeft geen nauwkeurige begrenzing en het grondwater van al deze watervoerende pakketten is nog onbeïnvloed.

5.4 Vergelijking met eerder verricht onderzoek

GEIRNAERT (1974): Dit onderzoek beslaat van Gelderland het gebied der Grote Rivieren.

Het door Geirnaert geschetste hydrochemische beeld komt zeer goed overeen met het hier gepresenteerde onderzoek. Dit onderzoek geeft de verschijnselen per chemische parameter weer terwijl Geirnaert een totaalbeeld presenteert.

De goed overeenkomende structuren zijn: de rug van Wijchen, de omgeving van Elst en Nijmegen en de invloed van de Veluwe en van de grote rivieren.

HOOGENDOORN (1983A): Dit onderzoek beslaat het deel van de provincie Gelderland ten oosten van de lijn Nunspeet-Wijchen, ofwel een deel van de Veluwe en het Riverengebied, de gehele IJssel Vallei en de Achterhoek.

Vergelijking van het onderzoek van Hoogendoorn met het hier gepresenteerde onderzoek wordt bemoeilijkt doordat Hoogendoorn zijn onderzoekgebied opgedeeld heeft in horizontale plakken welke niet overeen komen met watervoerende pakketten. Hiermee is bij de vergelijking rekening gehouden, voor zover mogelijk.

De vergelijking leert het volgende: de frequentieverdelingen komen overeen met de frequentieverdelingen van de Achterhoek. Dit is ook volgens de verwachting daar het Oost-Nederland-onderzoek voor het grootste deel een gebied beslaat als de Achterhoek. De Piperdiagrammen van Hoogendoorn zijn alle tesamen gebracht in één figuur; er heeft geen voorselectie plaatsgevonden. Vergelijking is nu niet meer mogelijk.

De nitraatkaart komt goed overeen met de kaarten zoals die door Hoogendoorn worden gepresenteerd voor de verschillende horizontale plakken. Hetzelfde geldt voor de chloride- en de sulfaatkaart. De hardheidkaart blijkt goed overeen te komen met de kalkfactorkaart, evenzo blijkt de ijzerkaart goed overeen te komen met de redoxfactorkaart.

MEINARDI (1972): Dit onderzoek beslaat de oostelijke Betuwe.

Vergelijking van deze onderzoeksresultaten met het hier gepresenteerde onderzoek geeft goede overeenkomsten aan. Meinardi geeft dezelfde vervuilde gebieden weer. Meinardi geeft ook beter de invloed van de Rijn weer; iets wat in het hier gepresenteerde onderzoek minder duidelijk tot uiting komt.

MEINARDI (1974): Dit onderzoek beslaat de Veluwe en een smalle zone hierom heen.

Vergelijking van de onderzoeksresultaten leert dat de 1 mg/l ijzergrens goed overeenkomt, met dien verstande dat de grens van Meinardi minder gedetailleerd is. Ten zuiden van Eerbeek treedt een klein verschil op.

De door Meinardi aangegeven vervuilingsgebieden komen ook goed overeen, echter het hier gepresenteerde onderzoek geeft meer details aan. Dit geldt met name in de omgeving van de Hierdense Beek, bij 't Harde en bij Otterlo.

VERKOOIJEN (1981): Dit onderzoek (althans het hydrochemische deel) beslaat het rivierengebied ten oosten van Tiel.

Vergelijking van de resultaten geeft aan dat de nitraatkaarten prima overeen stemmen, echter in de omgeving van Nijmegen is één contour op verschillende wijze geïnterpreteerd. Ook blijkt dat in dit gebied de oude waarnemingen (van voor 1940) niet storend werken op het totaalbeeld.

De resultaten van de ijzerkaart blijken ook uitstekend overeen te komen.

De grondwaterstroming zoals die uit de hardheidskaart en Piper-watertypekaart voortvloeien passen goed in het door Verkooijen geschetste stromingsbeeld. Deze laatste echter geeft een meer gedetailleerd beeld.

VAN DUIJVENBOODEN (1985), Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit: dit landelijk meetnet is opgezet om de beïnvloeding te bepalen van verzuring, vermesting en verdroging op de grondwaterkwaliteit. Hierbij werd meegenomen de grondsoort, bodemgebruik, de ouderdom van het grondwater en de geohydrologische gesteldheid. Hiertoe werden waarnemingsfilters van twee meter lengte geplaatst op circa 10 en 25 meter min maaiveld met hiertussen op circa 15 meter een reservefilter.

Het onderzoek komt tot o.a. de volgende conclusies:

- 1 Intensief bodemgebruik resulteert in hoge concentraties in grondwater.
- 2 De kleigronden herbergen relatief beter grondwater.
- 3 Het beschermend vermogen van kleilagen blijkt minder goed dan tot nu toe werd aangenomen.
- 4 Tot 25 meter min maaiveld blijkt nagenoeg geen natuurlijk grondwater meer voor te komen; zelfs in natuurgebieden blijkt dit te gelden.
- 5 Voor het grondwater op 10 meter min maaiveld blijkt al een duidelijke verslechtering in de tijd waarneembaar te zijn. Dit uit zich in: dalende pH en toename van kalium, nitraat, sulfaat en zware metalen. Dit is incidenteel ook al waarneembaar op 25 meter diepte. Meer specifiek:
 - Nitraat: bij agrarisch gebruik van zandgronden blijkt het gemiddelde nitraatgehalte van het grondwater in 3 jaar te zijn toegenomen van 84 mg/l tot 102 mg/l. Voor grasland blijkt dit te zijn van 7,5 tot 17 mg/l.
 - Kalium: in 25% van de 10 meter diepe filters wordt grondwater aangetroffen dat de drinkwaternorm voor kalium overschrijdt. De stijging in drie jaar blijkt van 13 tot 16 mg/l te zijn.

- Zuurgraad (pH): in 4 jaar tijd is een daling van de pH geconstateerd in combinatie van een nitraatstijging. Hetgeen waarschijnlijk niet alleen zijn oorzaak vindt in de zure regen; het blijkt niet alleen onder natuurgebieden maar ook onder bouw- en grasland op te treden. Mogelijk treedt ook verzuring op door grondwaterstands daling (zie theorie) of door hoge mestdosering.
- De pH-daling heeft ook een sterke toename van het aluminiumgehalte tot gevolg: tot vele mg/l.
- Voor Gelderland blijkt dat in de Achterhoek in het ondiepe grondwater hoge tot extreem hoge nitraatgehalten worden aangetroffen. Deze concentraties nemen met de diepte weer af. Dit laatste kan komen doordat het nitraat nog niet zo diep is doorgedrongen door stromingscondities, of er treedt nitraatreductie op (zoals in de theorie is vermeld). Op de Veluwe blijkt het nitraat al tot op grote diepten in hoge concentratie voor te kunnen komen, hetgeen niet vreemd is daar nitraat onder oxiderende omstandigheden zeer mobiel is. Ook is opgemerkt dat de intensivering van de landbouw op de Veluwe op een veel eerder tijdstip plaatsvond.

Dit meetnet voor grondwaterkwaliteit blijkt gegevens op te leveren die over het geheel goed in het totale beeld passen met dien verstande dat het hier over het algemeen jong (= ondiep) grondwater betreft. Dit kan betekenen dat de grondwaterkwaliteit in de tijd (en in de diepte) nog zal verbeteren of dat er een grote grondwaterverontreiniging aan staat te komen.

Resumerend kan gesteld worden dat de voor het hier gepresenteerde onderzoek gevolgde werkmethode in het algemeen gunstig afsteekt bij de reeds verrichte onderzoeken. Echter het beeld in de verticaal komt veel minder tot uiting door het ontbreken van profielen, hetgeen bij de hier gevolgde werkwijze niet goed mogelijk is. Op dit punt steken de resultaten van Geirnaert (1974), Hoogendoorn (1983A) en Verkooijen (1981) duidelijk beter af. Het landelijk meetnet met grondwaterkwaliteit blijkt ondiep en recent veel informatie te bevatten maar blijkt slechts representatief te zijn voor lokale situaties, zodat op provinciaal niveau dit meetnet alleen onvoldoende zal kunnen zijn (afhankelijk van de probleemstelling).

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het onderzoek kan hier afgesloten worden met de volgende conclusies:

- 1 De geohydrologie is voldoende nauwkeurig bekend voor een juiste interpretatie van een hydrochemisch onderzoek op een schaal van 1:100.000.
- 2 Het hier gepresenteerde onderzoek geeft een sterk regionaal beeld. Hierin komen lokaal uitschieters voor door verschil in tijd, plaats en diepte.
- 3 Lokale kwaliteitsproblemen, zoals bodemsaneringsgevallen, komen niet naar voren door de grootschaligheid van dit onderzoek en de parameterkeuze.
- 4 Kwaliteitsvariaties in de verticaal komen slechts incidenteel tot uiting.
- 5 De voor dit onderzoek gekozen parameters geven allen een verschillend kaartbeeld. De grote lijnen blijken goed overeen te komen.
- 6 Voor een hydrochemische kartering blijkt geen universele parameter te bestaan. Ofwel: hydrochemische invloeden komen alleen naar voren uit een goede combinatie van verschillende chemische parameters.
- 7 De nitraat, sulfaat en chloridekaart blijken zeer geschikt te zijn als vervuilingsindicatie. De andere gekozen parameters blijken hiervoor minder geschikt.
- 8 Vergelijking van de diverse parameters onderling kan inconsequenties opleveren; op één lokatie lijkt zo bijvoorbeeld ijzer en nitraat samen voor te komen. Dit soort fouten kan alleen voorkomen worden door vergelijking van volledige analyses.
- 9 De nitraat problematiek komt alleen naar voren in enkele kleine gebieden, zoals Montferland. Dit wordt veroorzaakt door de algemeen wat oudere gegevens en de relatief diepe monsternamen (onder de vervuilde grondwaterlaag). Uitzondering hierop vormen de uitkomsten uit het meetnet grondwaterkwaliteit. Dit onderzoek betreft ondiepe recente waarnemingen welke vaak in probleemgebieden blijken hebben plaatsgevonden.
- 10 Het hier gepresenteerde onderzoek blijkt in vergelijking met eerder verricht onderzoek een betrouwbaar beeld te geven. Echter variaties in de verticaal komen nauwelijks tot uiting.

Na voorgaande conclusies blijven nog enkele wensen c.q. aanbevelingen over:

- 1 De noodzaak van mogelijkheden om met behulp van de computer profielen te tekenen zodat verticale variaties tot uiting komen. Hiervoor zijn echter ook veel analyse gegevens nodig.
- 2 Interpretatie mogelijkheden om met behulp van de computer volledige analyses statisch te vergelijken om zo tot een nauwkeuriger hydrochemisch beeld te komen.
- 3 Het vervaardigen van kaarten voor perioden van bijvoorbeeld 10 of 20 jaar om op deze wijze de kwaliteitsverandering te kunnen volgen. Hiervoor zijn zeer veel analyse gegevens nodig; bij voorkeur van steeds dezelfde lokaties.

- 4 Voor het aangeven van vervuilingsgebieden lijkt het wenselijk om "combinatiekaarten" te maken, daar enkelvoudige parameters geen volledig beeld geven (een nitraat-chloride combinatie kan goede diensten bewijzen). Statistische analyse kan hiertoe een hulpmiddel zijn.

7 LITERATUURLIJST

Duijvenbooden, W van, e.a. (1985), Landelijk meetnet met grondwaterkwaliteit: eindrapport van de inrichtingsfase. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne.

Garrels, R.M. & F.T. MacKenzie (1967): Origin of the chemical composition of some springs and lakes. Adv. Chem. Ser. 67, p.222-254.

Geirnaert, W. (1974), The hydrology and hydrochemistry of the lower Rhine fluvial plain, Leidse geologische mededelingen, deel 49, afl. 1, P.59-84.

Grootjans, P. (1984), De geohydrologische beschrijving van de provincie Gelderland, DGV-TNO, dienst Waterbeheer, provincie Gelderland.

Hem, J.D. (1970), Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, Geological water-supply paper 1473.

Hoogendoorn, J.H. (1983A), Hydrochemie Oost-Nederland, DGV-TNO.

Hoogendoorn, J.H. (1983B), Hydrochemische gegevens van de provincie Gelderland over de periode 1889-1982, DGV-TNO.

Hoogendoorn, J.H. (1983C), Opslag en verwerking van geohydrochemische gegevens bij de DGV-TNO, DGV-TNO.

Leeflang, K.W.H. (1938), De chemische samenstelling van den neerslag in Nederland, Chemisch weekblad (35), 1938, P.658-664.

Meinardi, C.R. (1972), Nota inzake de chemische samenstelling van het grondwater van de Oostelijke Betuwe, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, 's-Gravenhage.

Meinardi, C.R. (1974), RID mededeling 74-4, de chemische samenstelling van het grondwater van de Veluwe, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, 's-Gravenhage..

Piper, A.M. (1944), A Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, Am. Geophys. Union Trans, V.25, P.914-923.

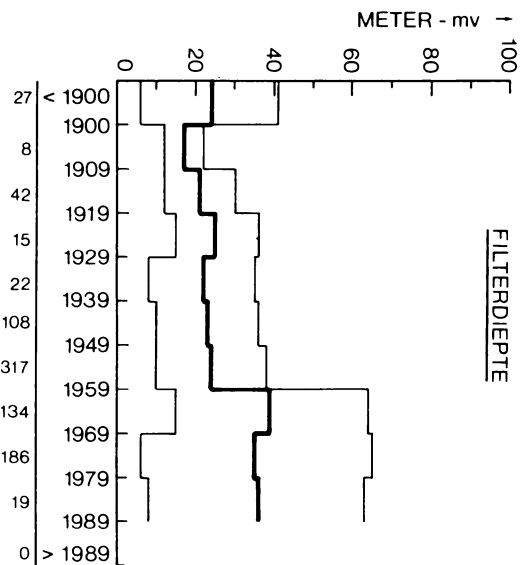
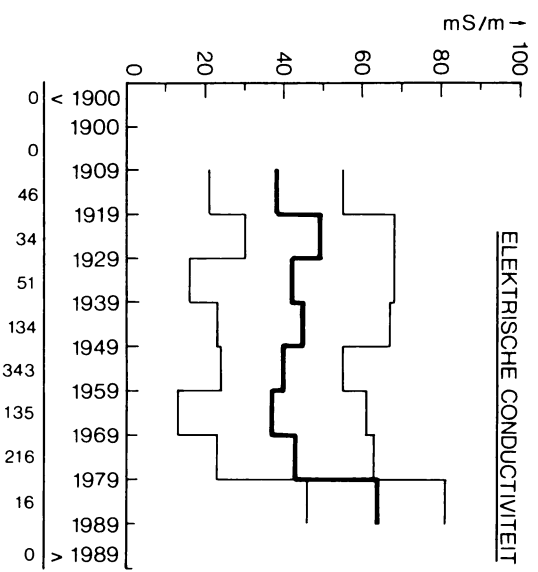
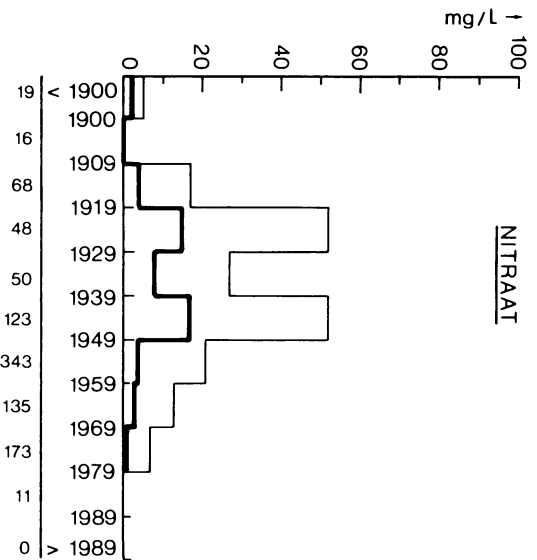
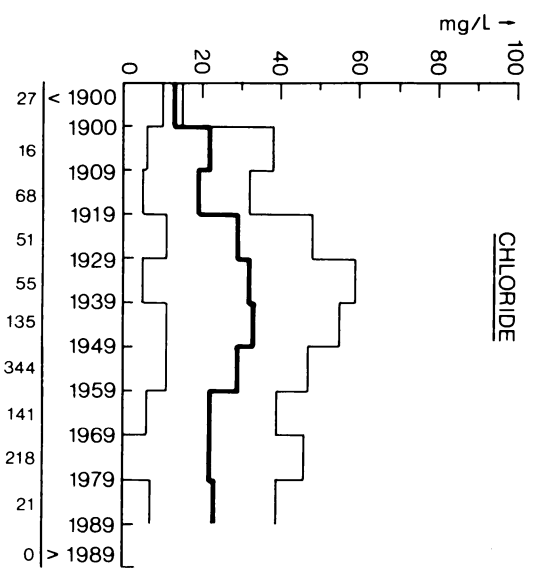
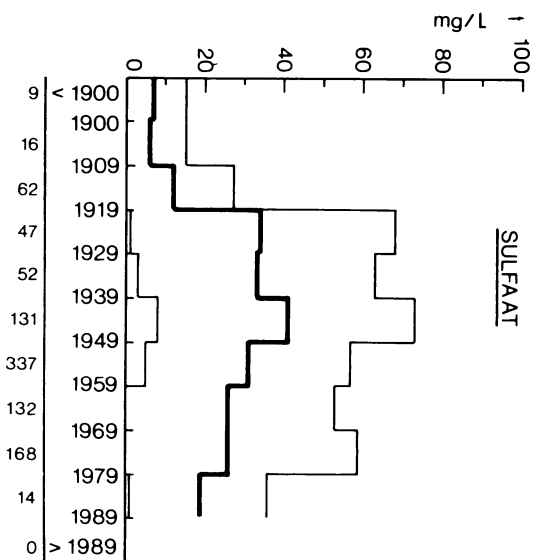
Ridder, T.B. (1978), Over de chemie van de neerslag, Uitgave, KNMI, wetenschappelijk rapport 78-4.

Rijks Geologische Dienst (1975), Geologische overzichtskaarten van Nederland, kaarten, profielen en toelichting. RGD Haarlem.

Stumm, W. & J.J. Morgan (1981), Aquatic Chemistry, John Wiley & Sons New York.

Verkooijen, R.G.V.A. (1981), Een hydro-geologische inventarisatie voor het Gelderse Rivierengebied en een regionaal hydrologische systeembenadering voor het rivierengebied ten oosten van Tiel, dienst Waterbeheer, provincie Gelderland.

Figuur 7 t/m 17



HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND Provincie Gelderland/TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

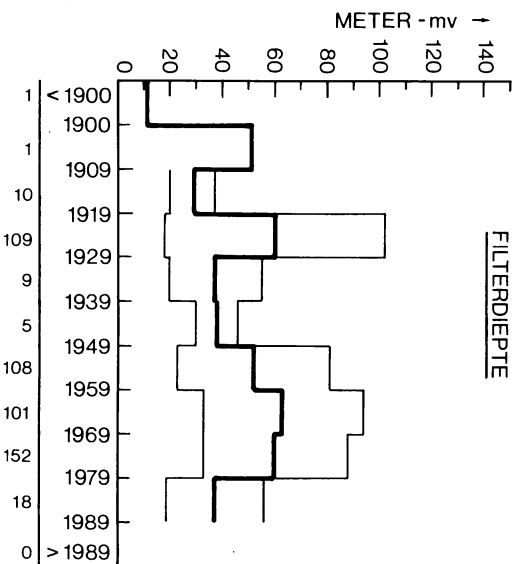
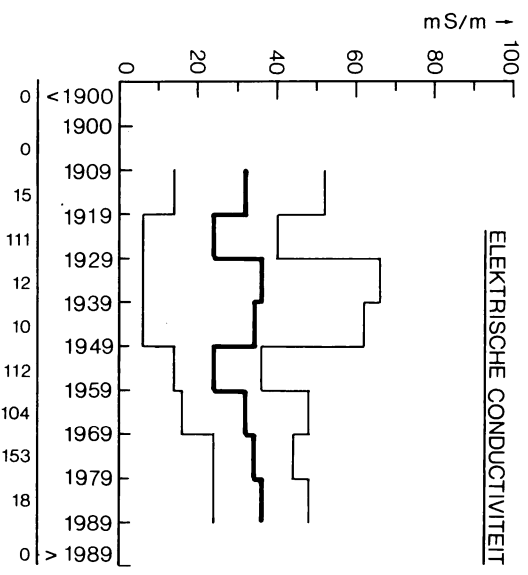
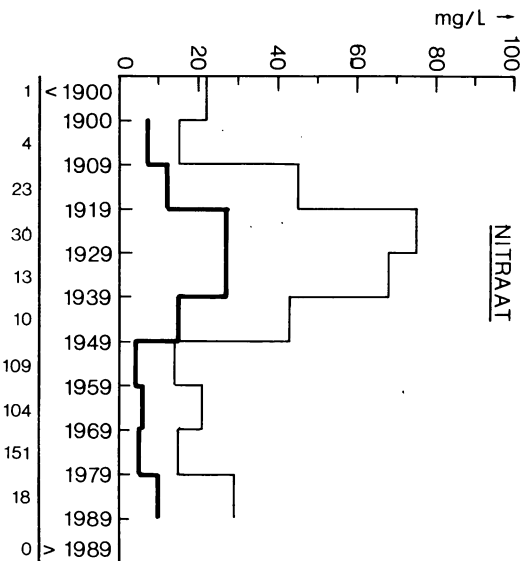
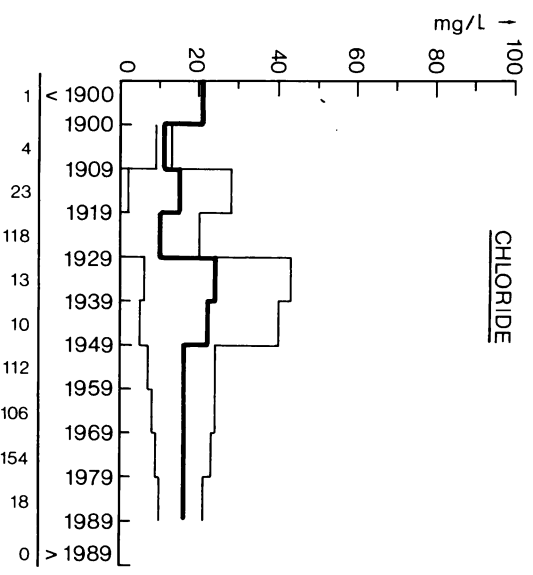
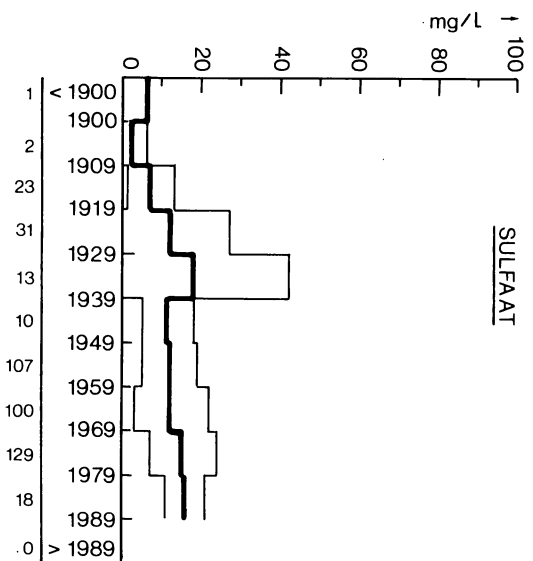
Legenda:

— Gemiddeld + standaard deviatie
— Gemiddeld
— Gemiddeld - standaard deviatie

1900 Jaren
1909 Aantal waarnemingen

10-Jaarsgemiddelden voor Rivierenland
en IJssel Vallei.

Figuur 7



HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND Provincie Gelderland/TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:

— Gemiddeld + standaard deviatie

— Gemiddeld

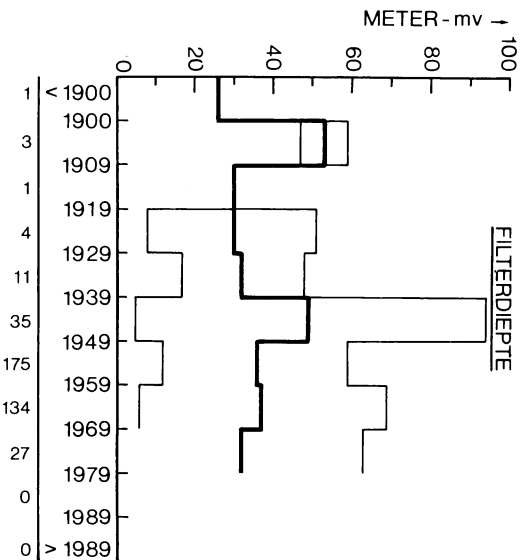
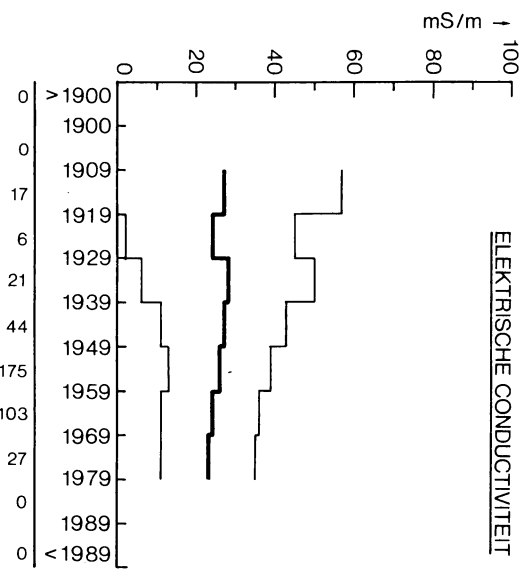
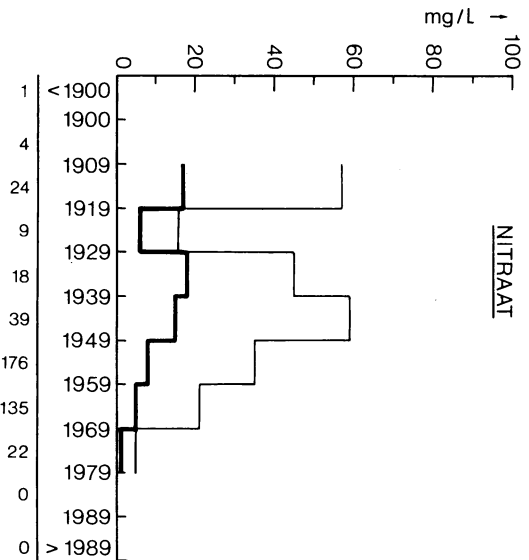
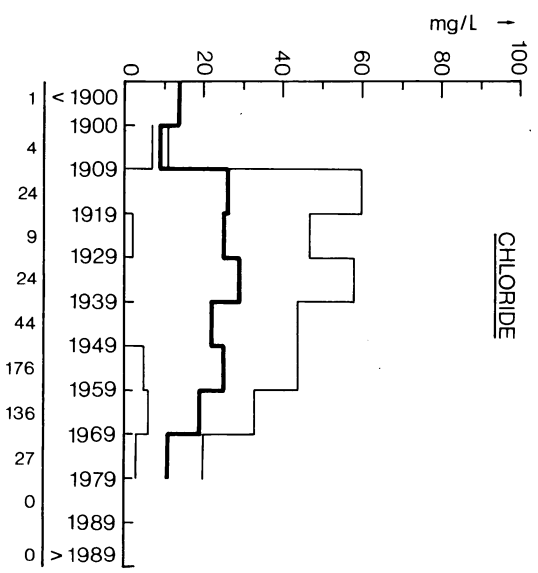
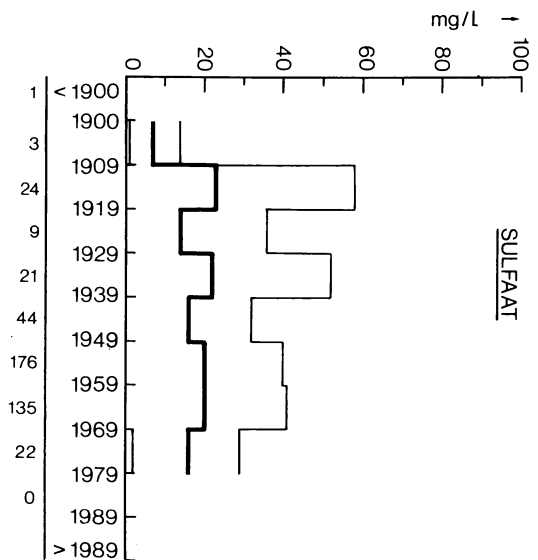
— Gemiddeld - standaard deviatie

Jaren

Aantal waarnemingen

10-Jaargemiddelden voor infiltratiegebieden

Figuur 8

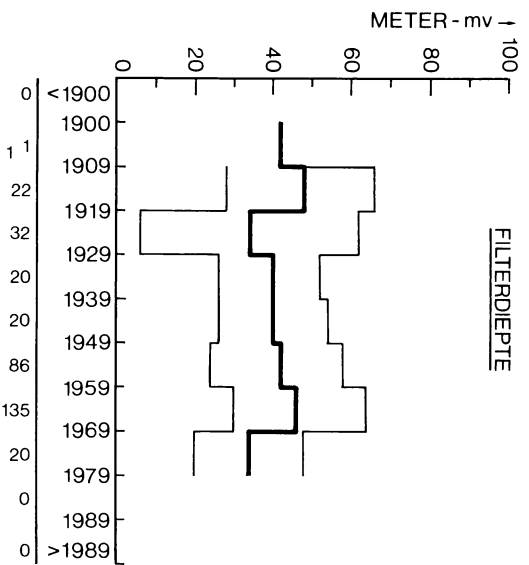
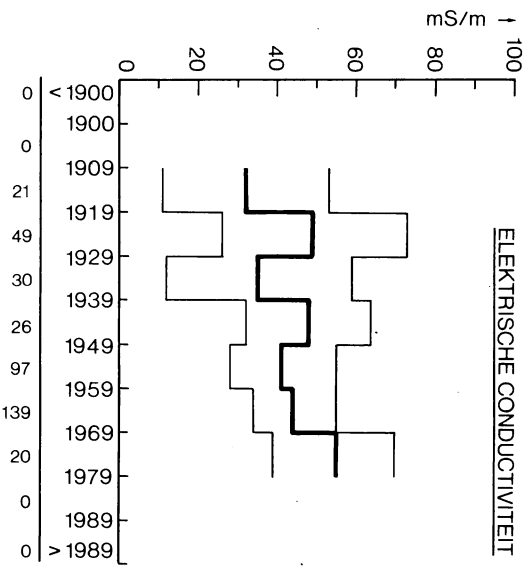
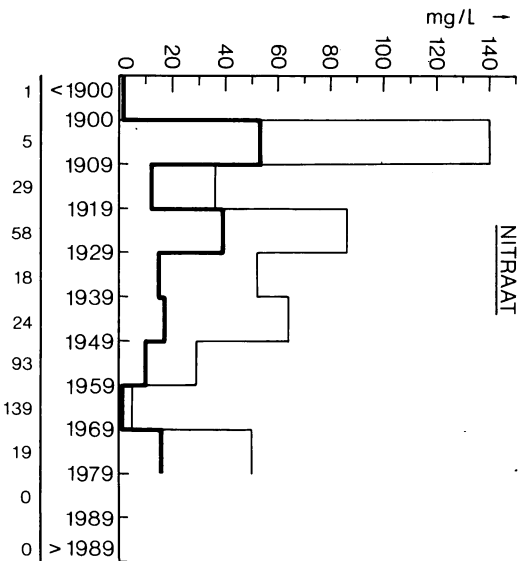
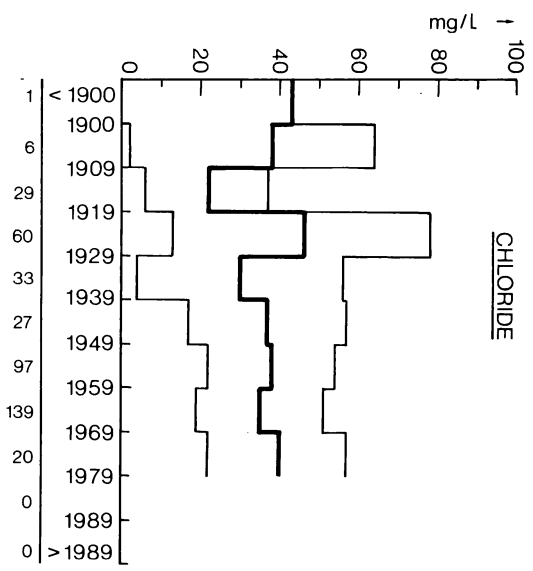
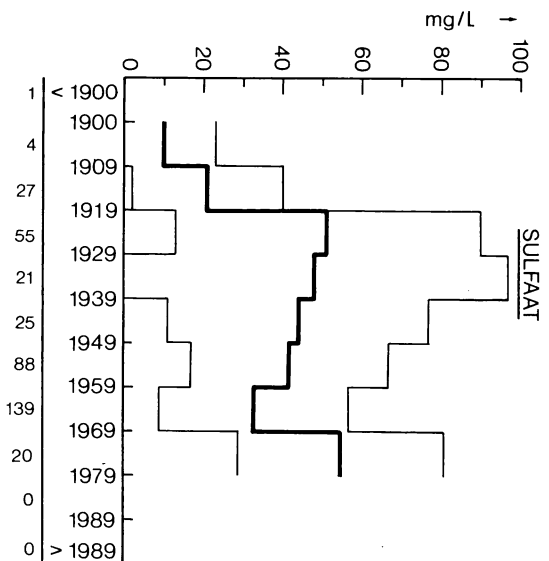


HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:

- Gemiddeld + standaard deviatie
- Gemiddeld
- Gemiddeld - standaard deviatie
- Jaren
- Aantal waarnemingen

10-Jaargemiddelden voor Gelderse Vallei
Figuur 9



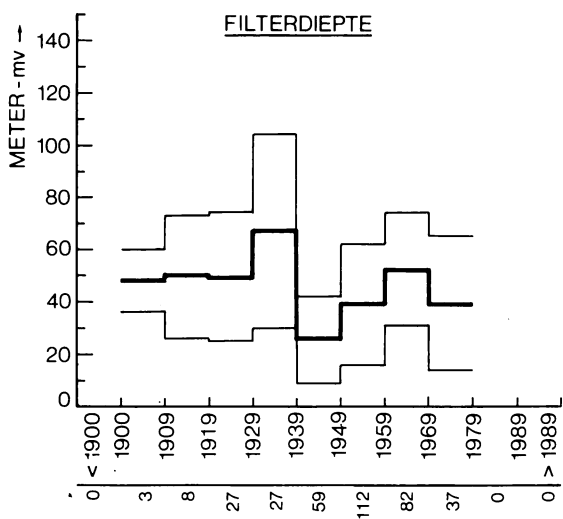
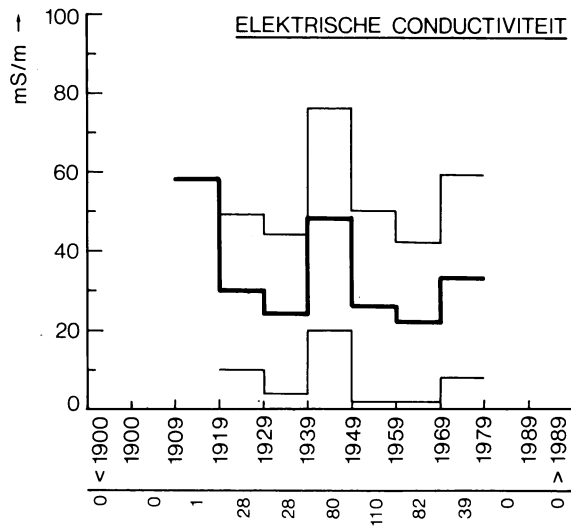
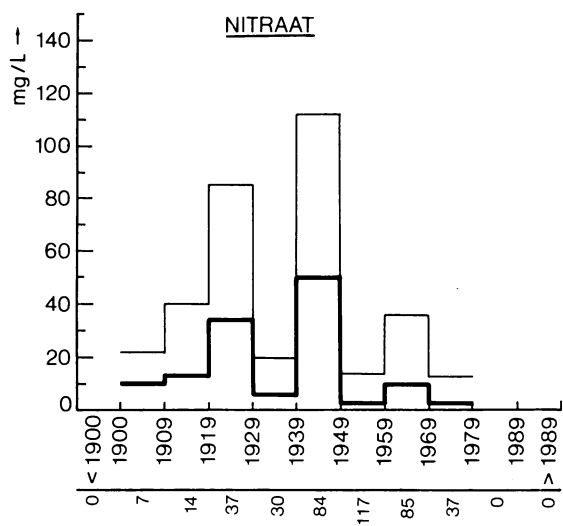
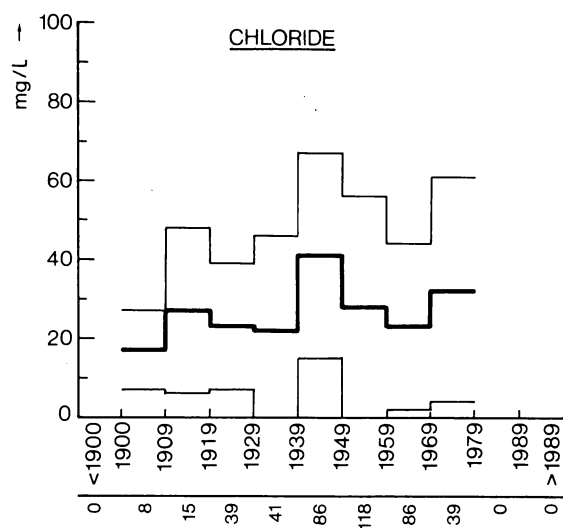
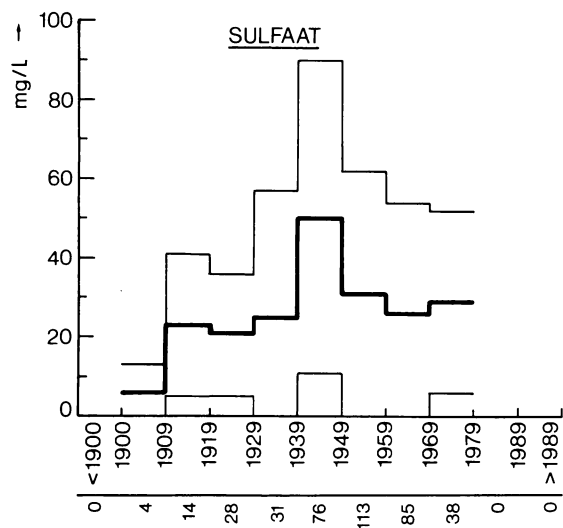
HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer / dienst Grondwaterverkenning

Legenda:

- Gemiddeld + standaard deviatie
- Gemiddeld
- Gemiddeld - standaard deviatie
- Jaren
- Aantal waarnemingen

10 - Jaargemiddelden voor Achterhoek

Figuur 10



HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO
dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:

- Gemiddeld + standaard deviatie
- Gemiddeld
- Gemiddeld - standaard deviatie

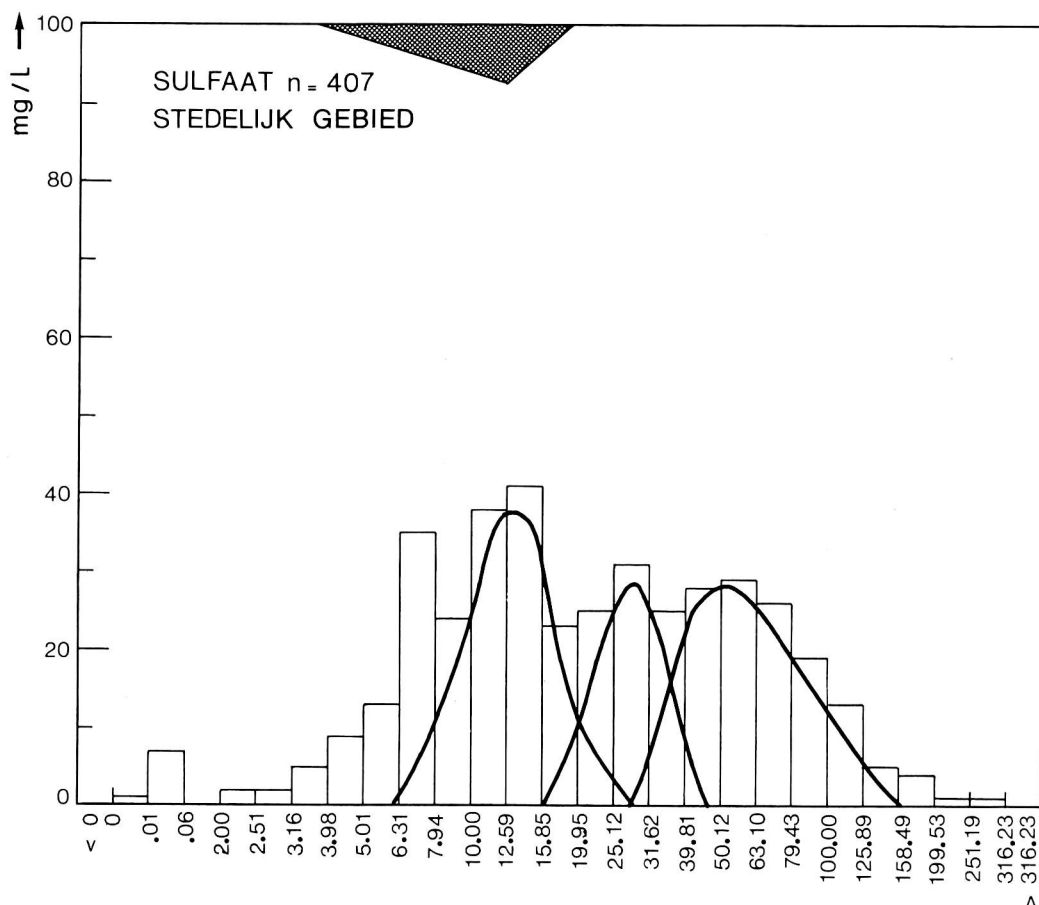
1900 1909

Jaren

Aantal waarnemingen

10-Jaargemiddelden voor stedelijke gebieden

Figuur 11



HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



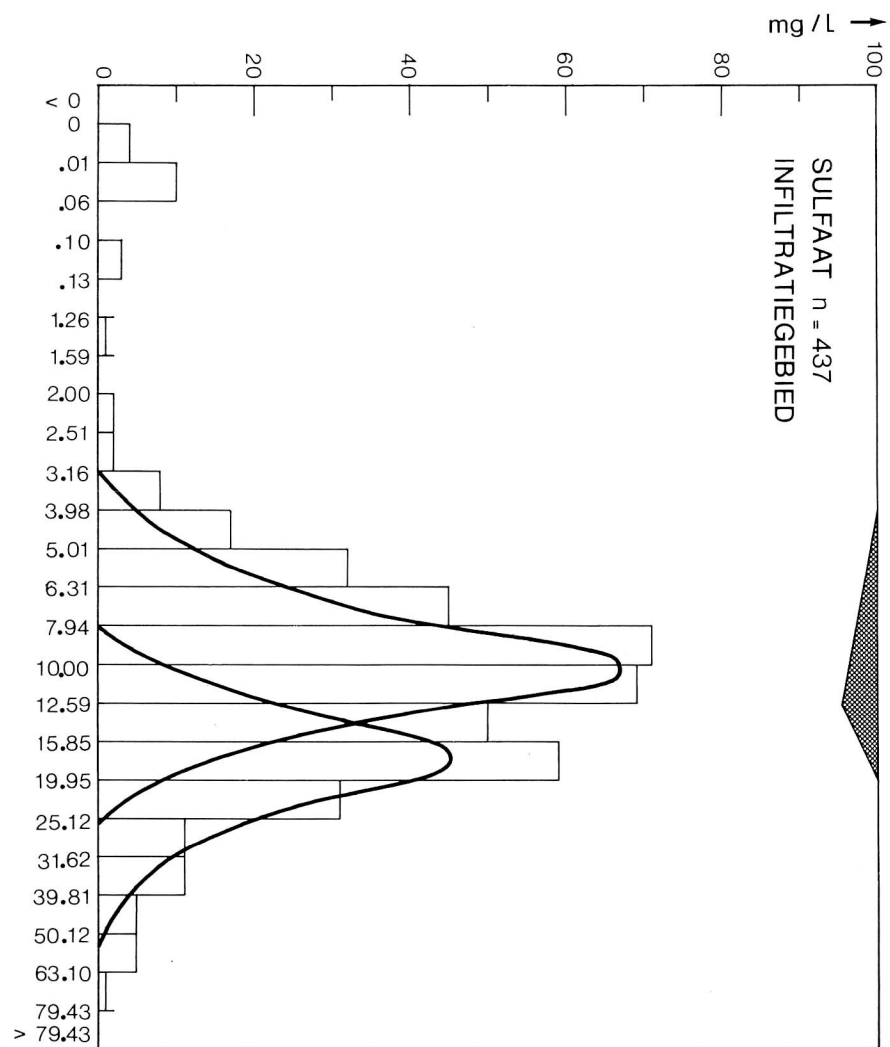
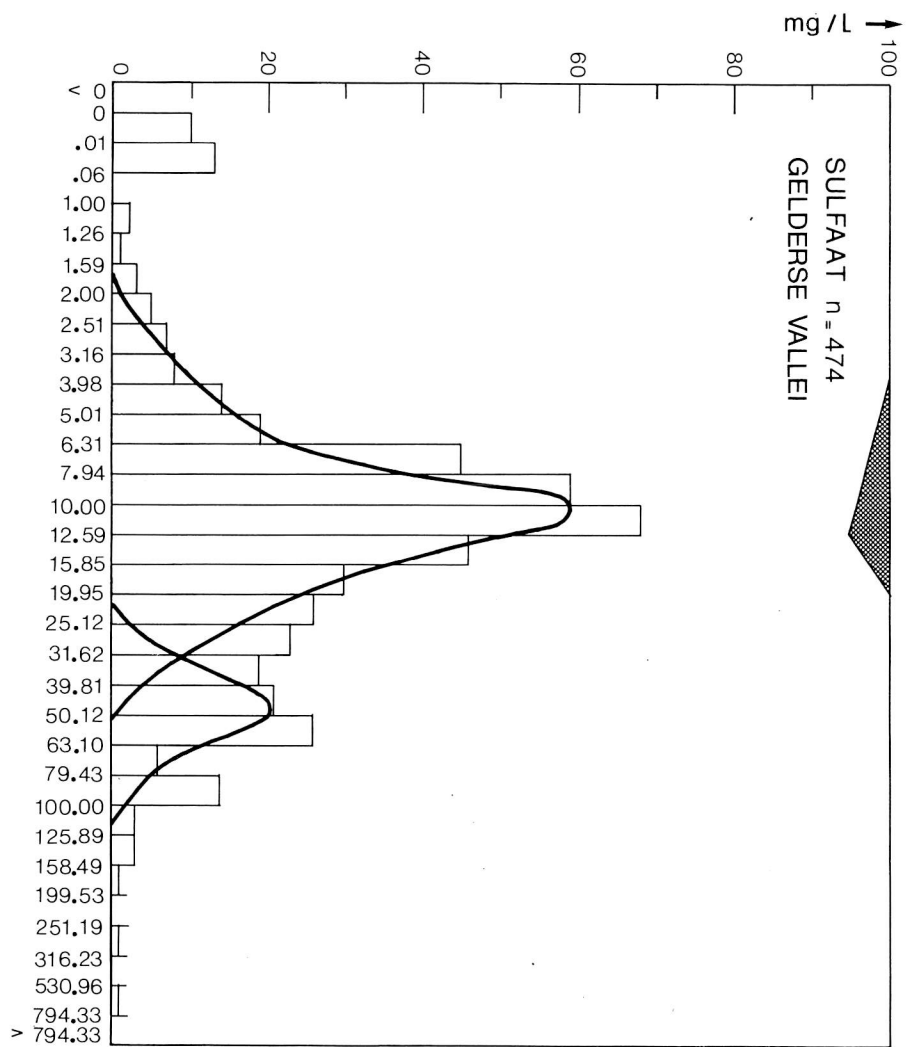
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeftang (1938)

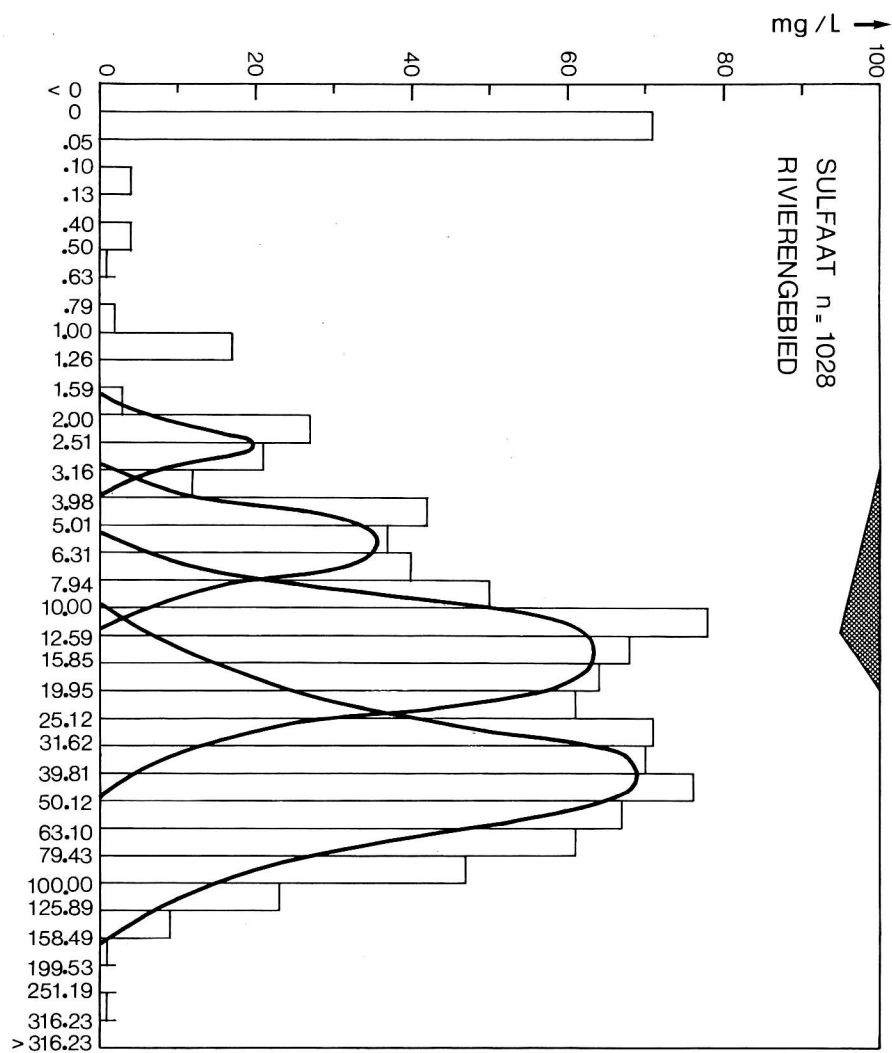
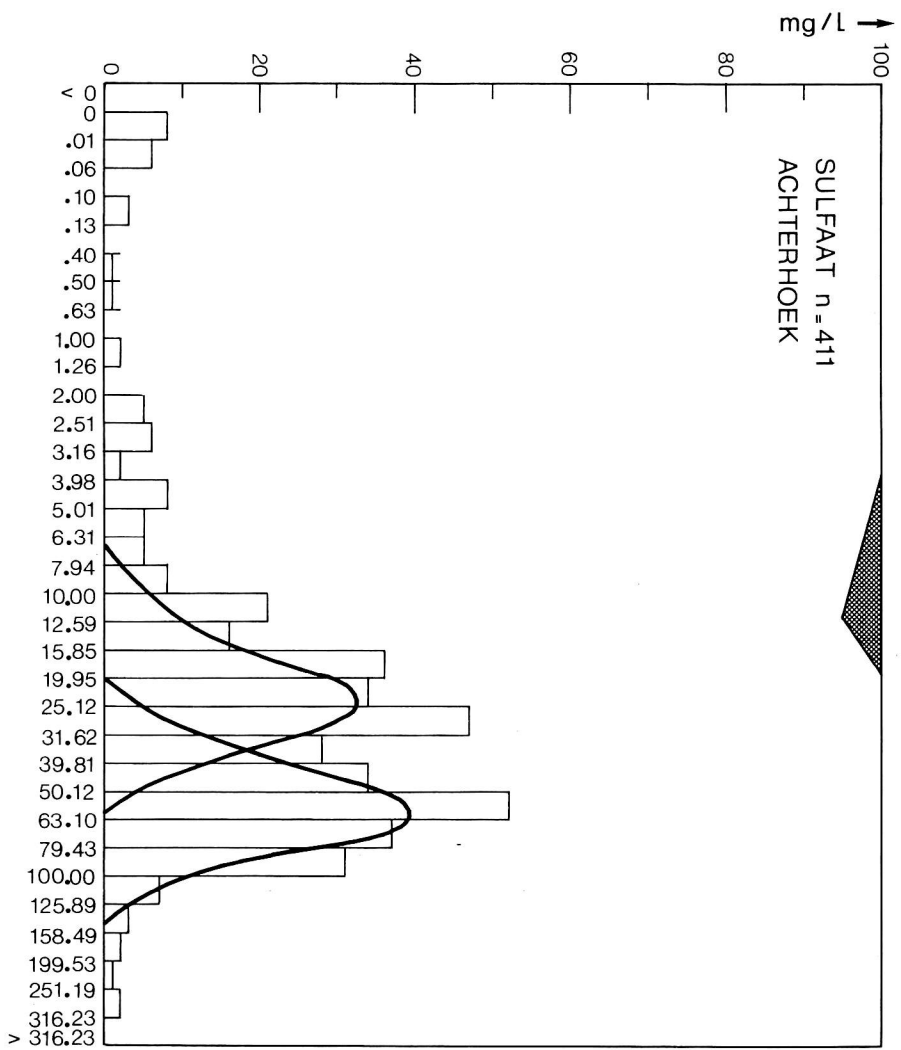


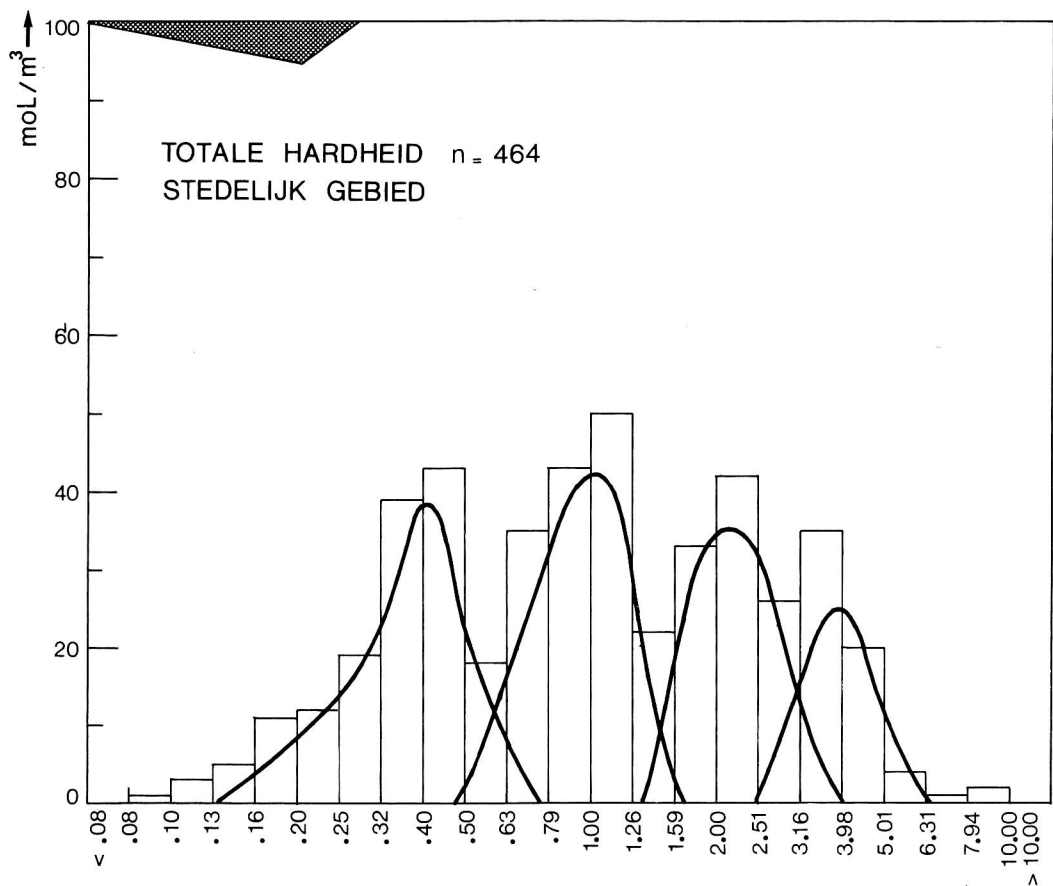
Geschatte subgroep

n = 612

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is







HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



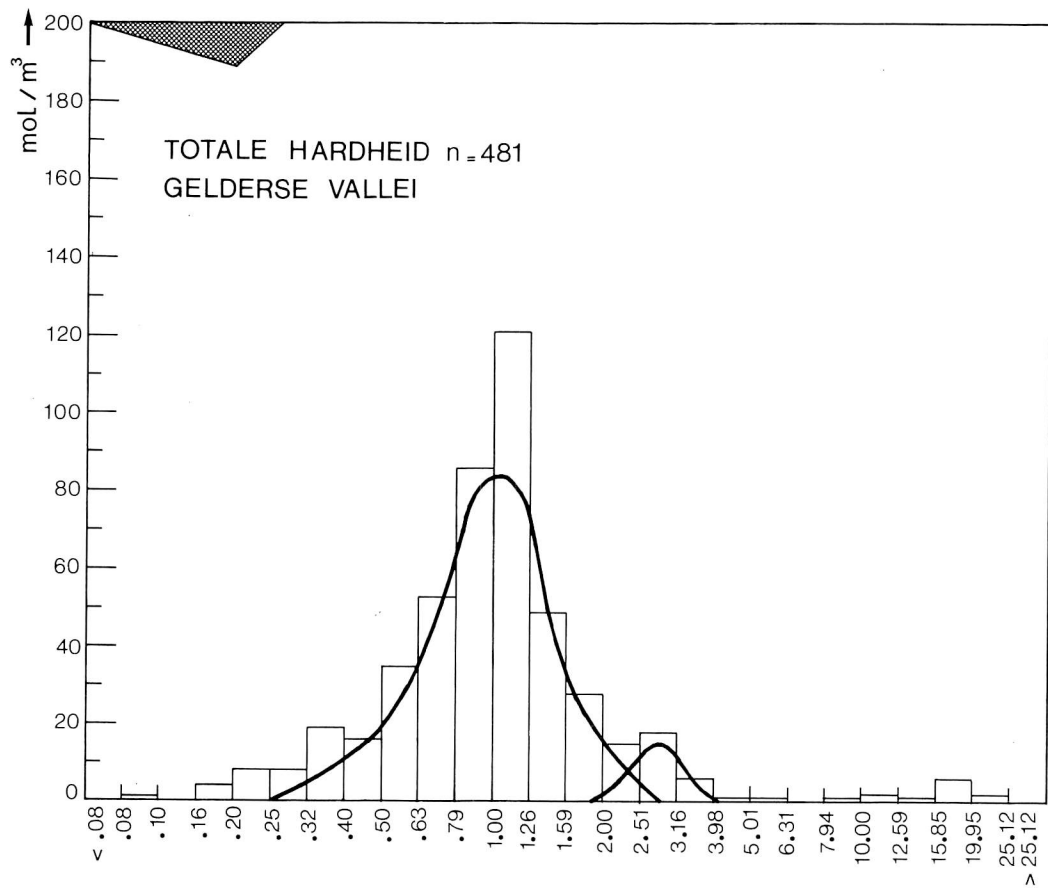
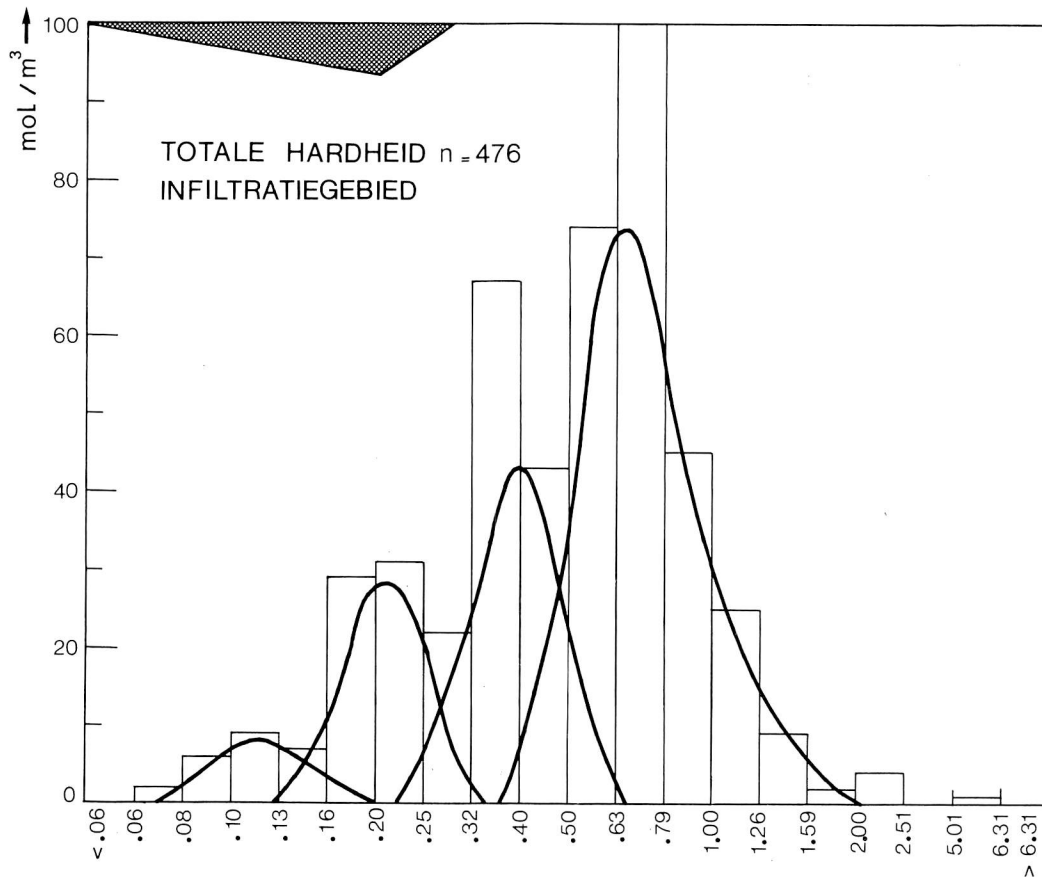
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeftang (1938)

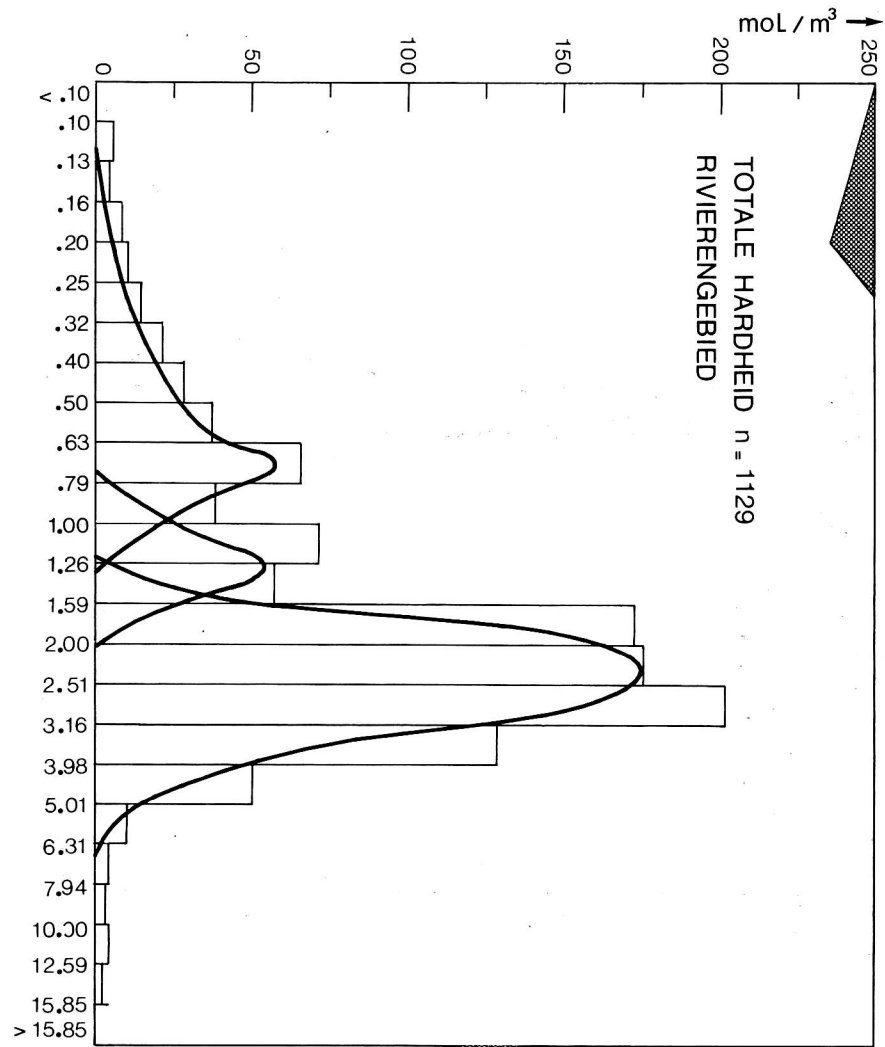
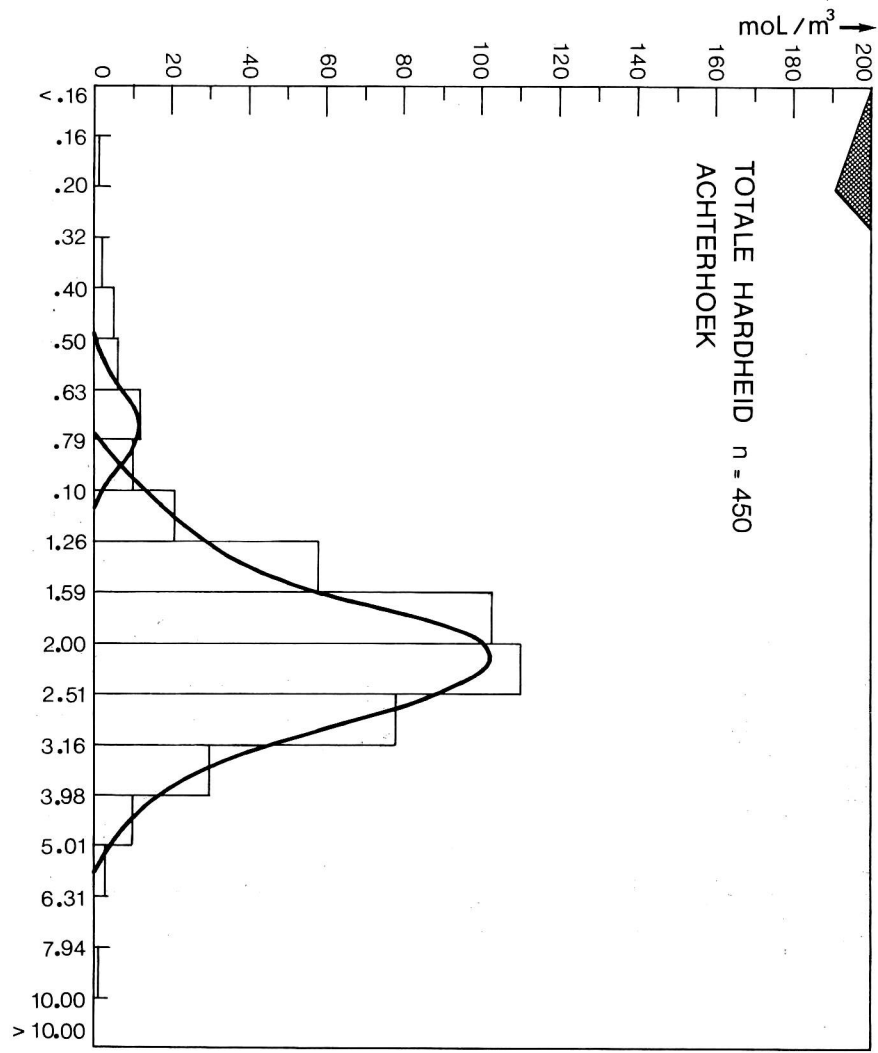


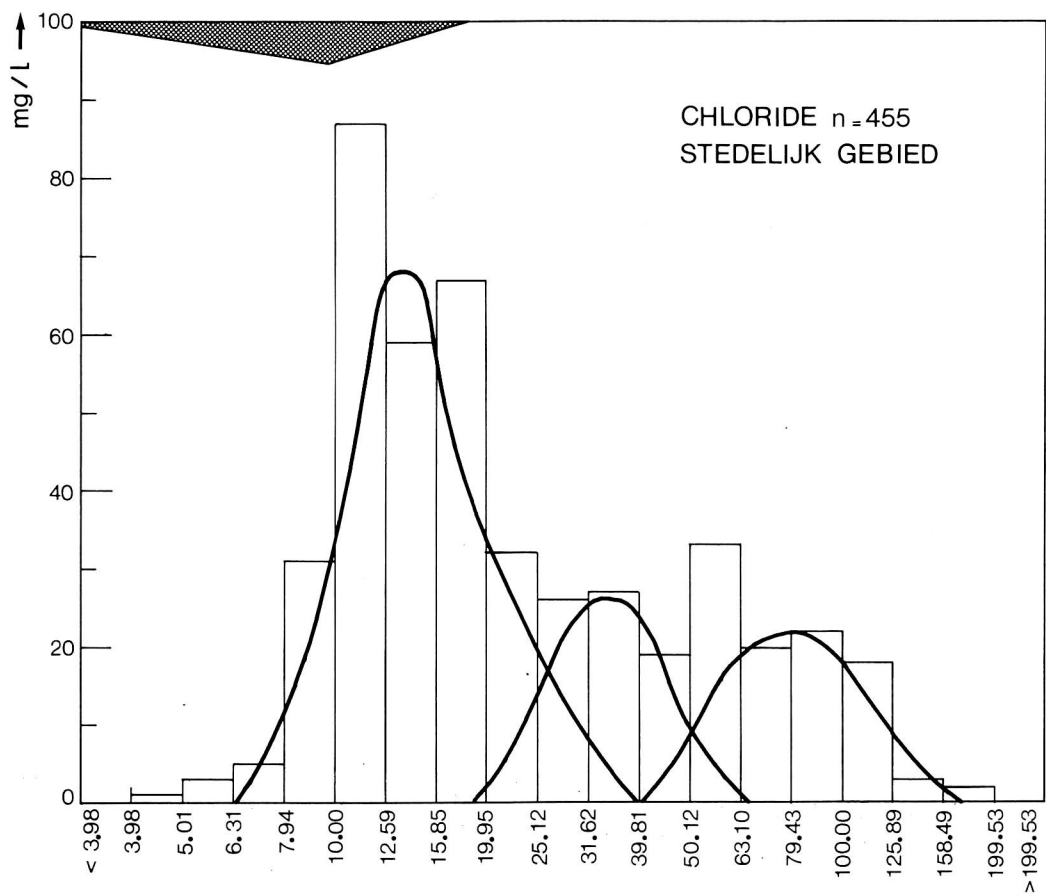
Geschatte subgroep

$n = 612$

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is







HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



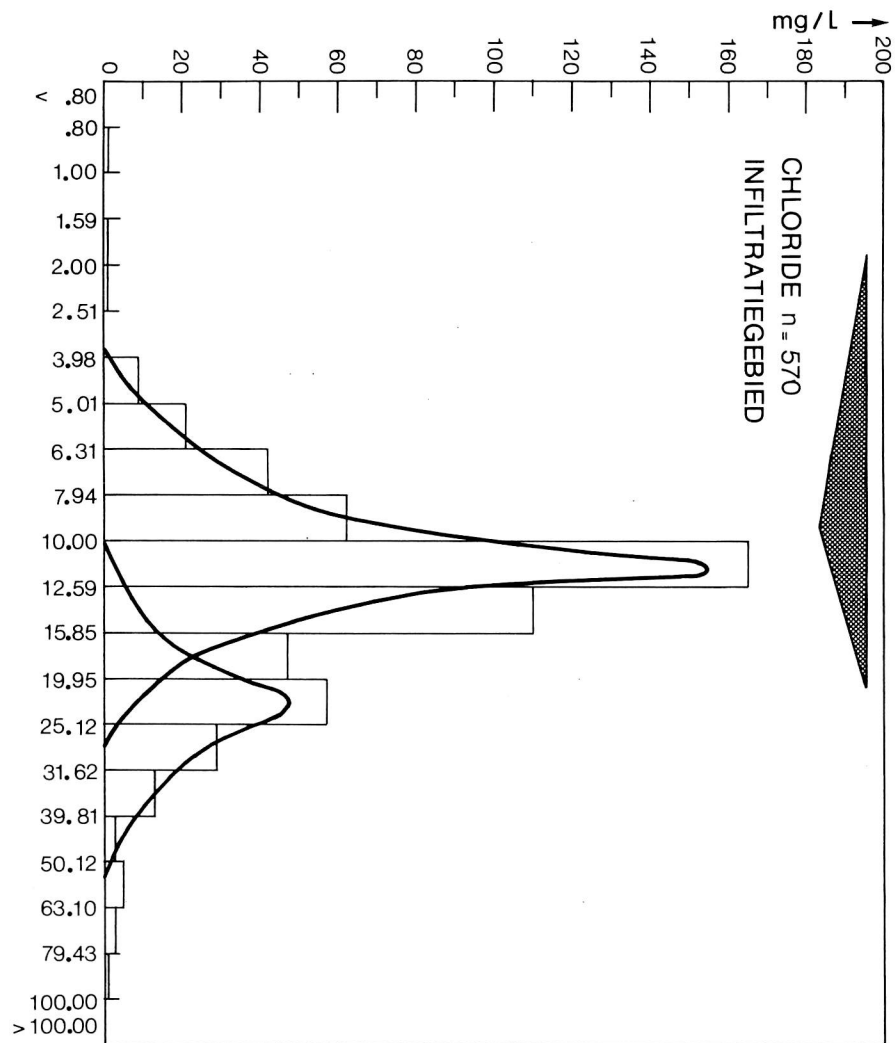
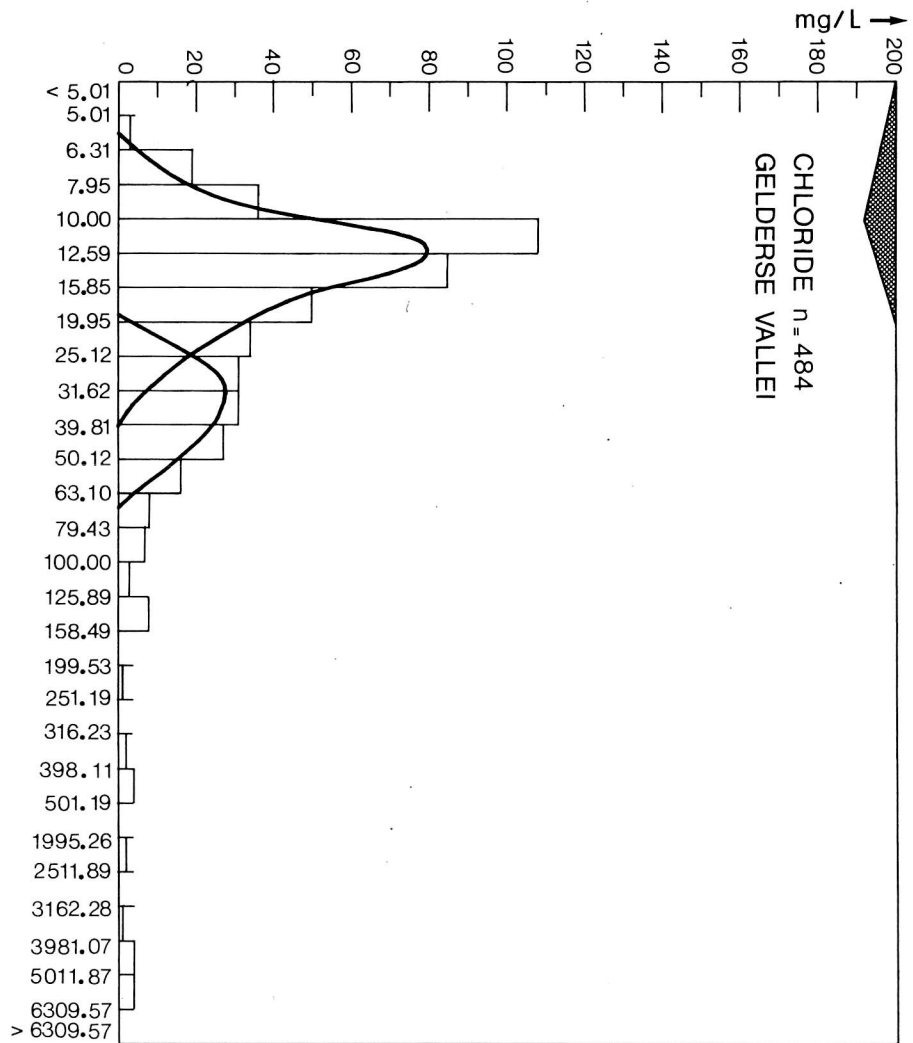
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeftang (1938)

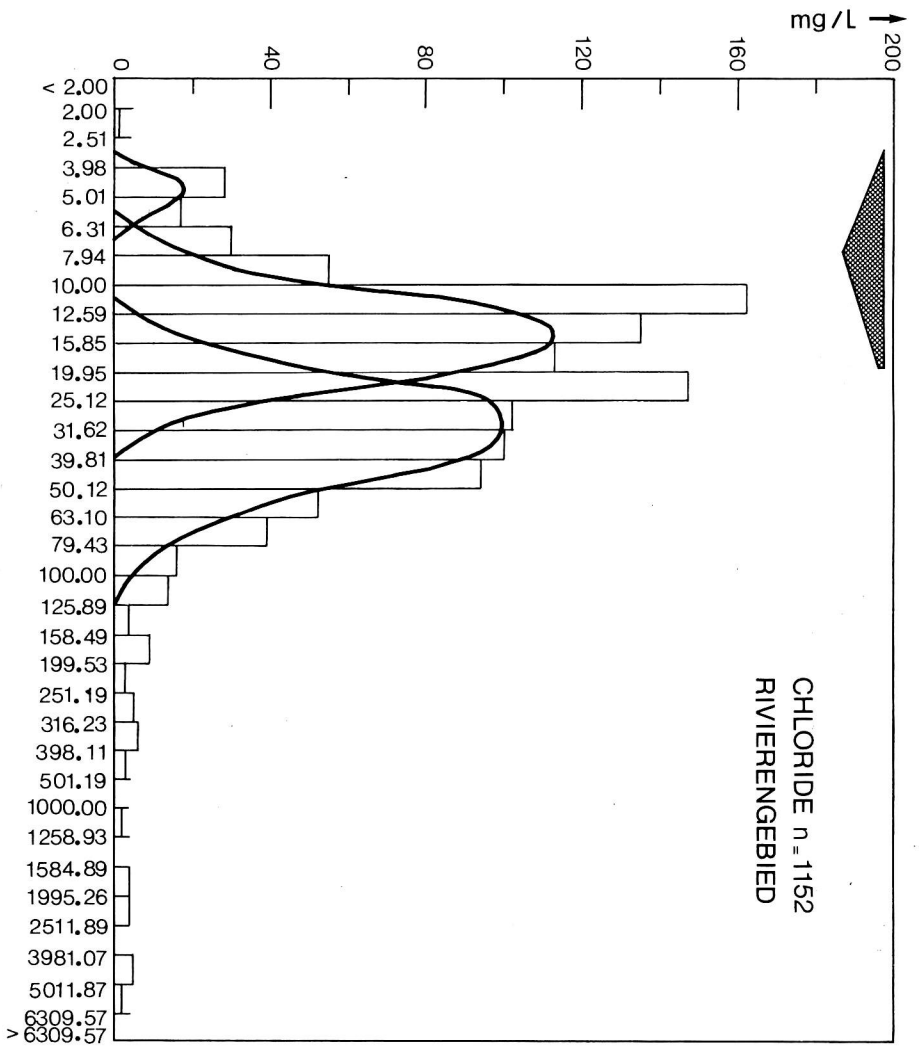
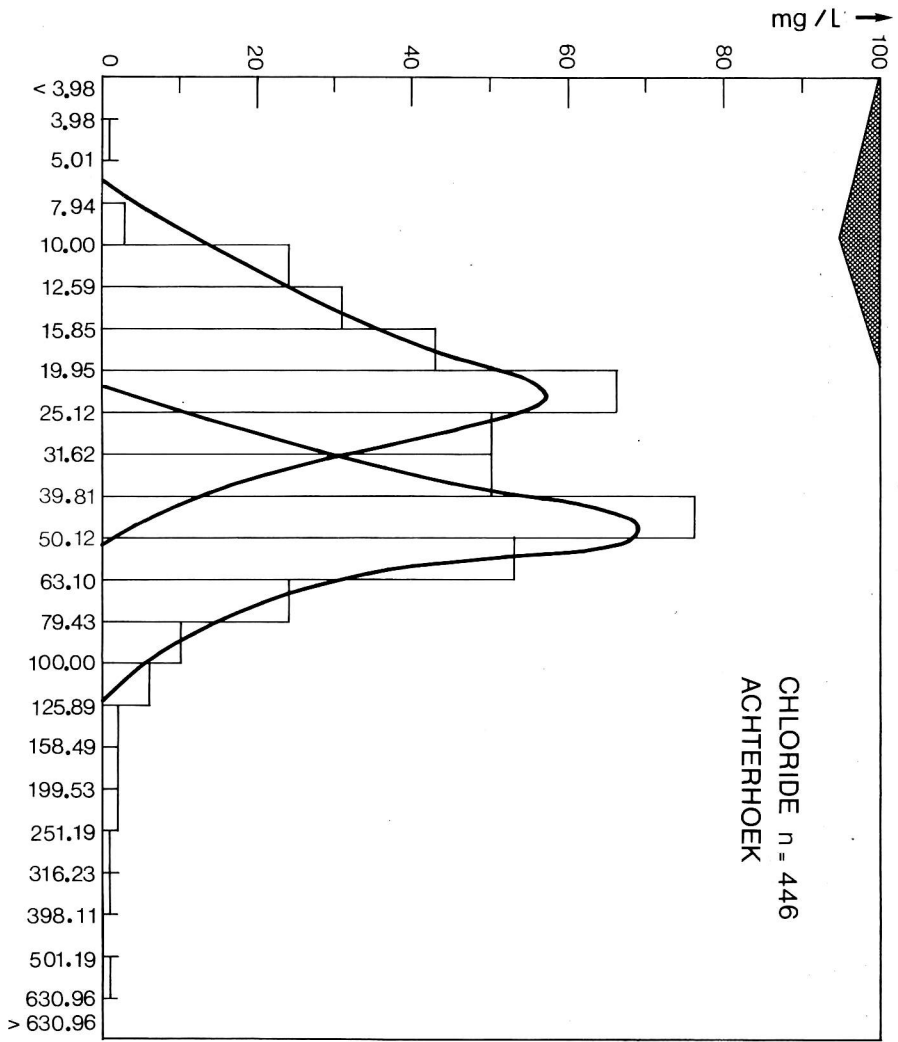


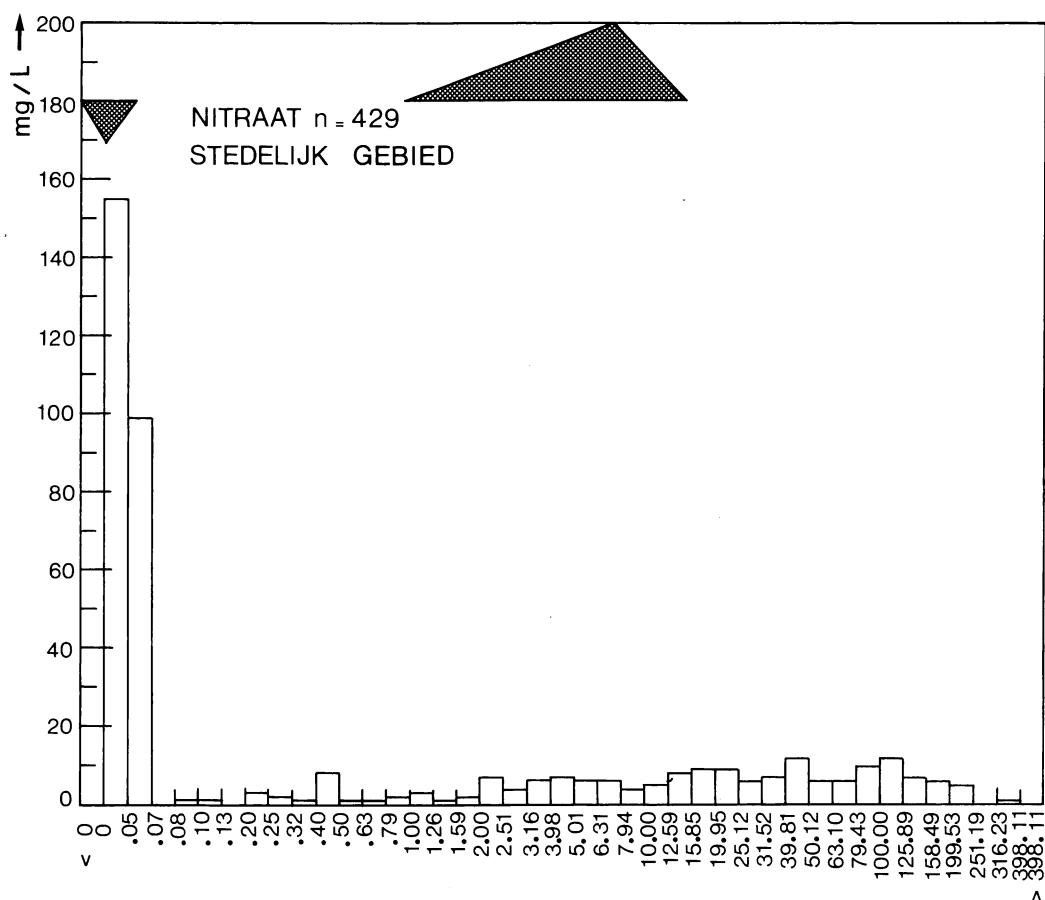
Geschatte subgroep

n = 612

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is







HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

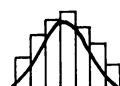
Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



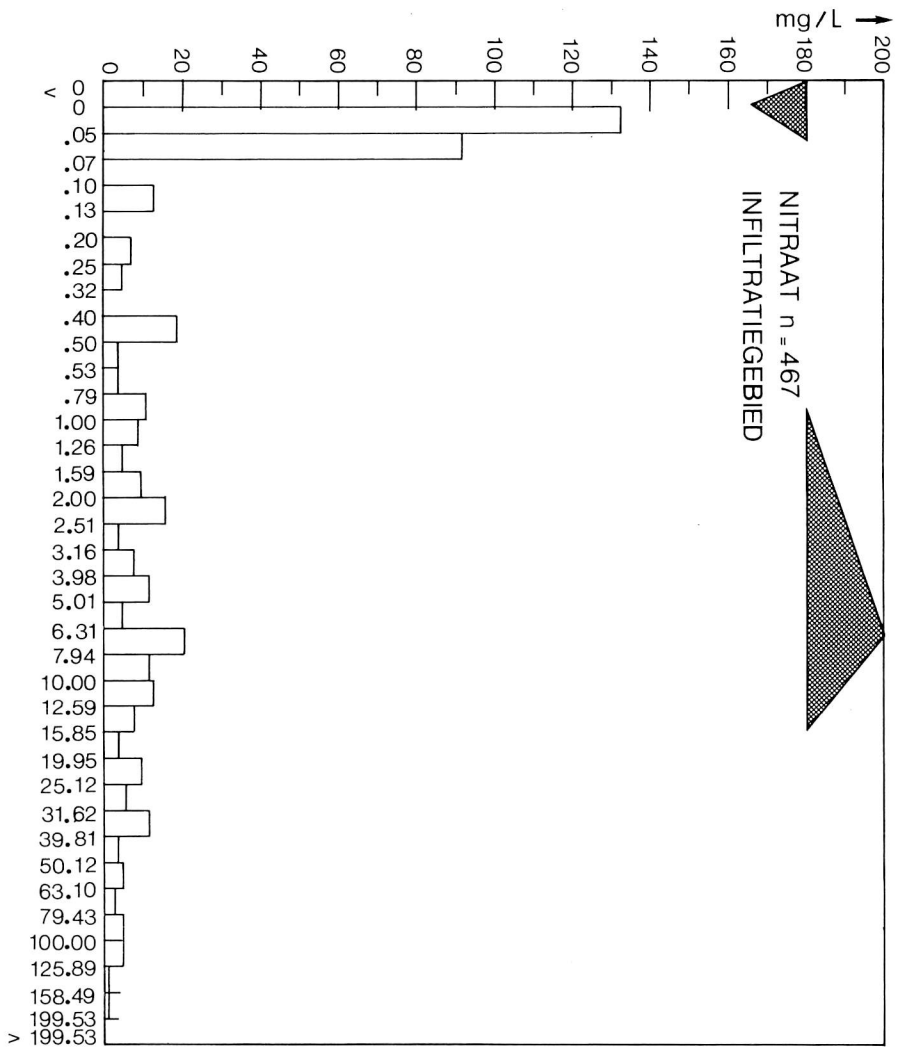
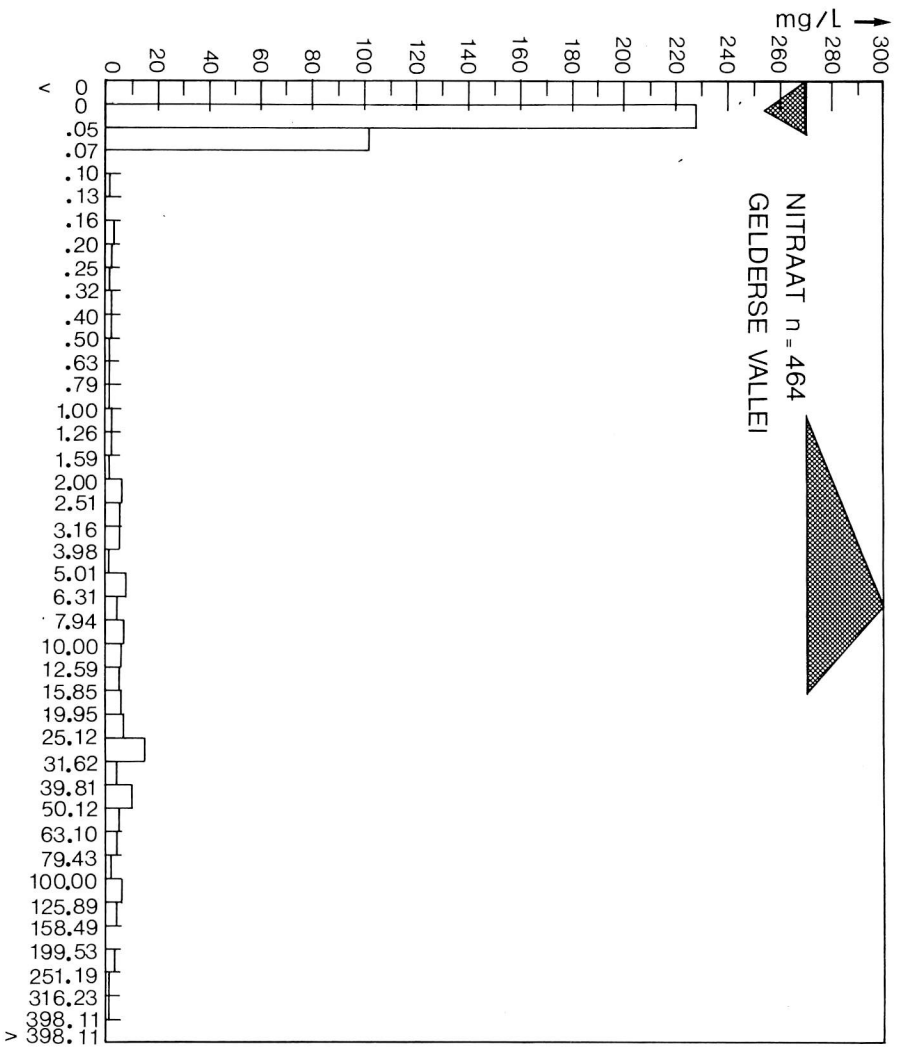
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeflang (1938)

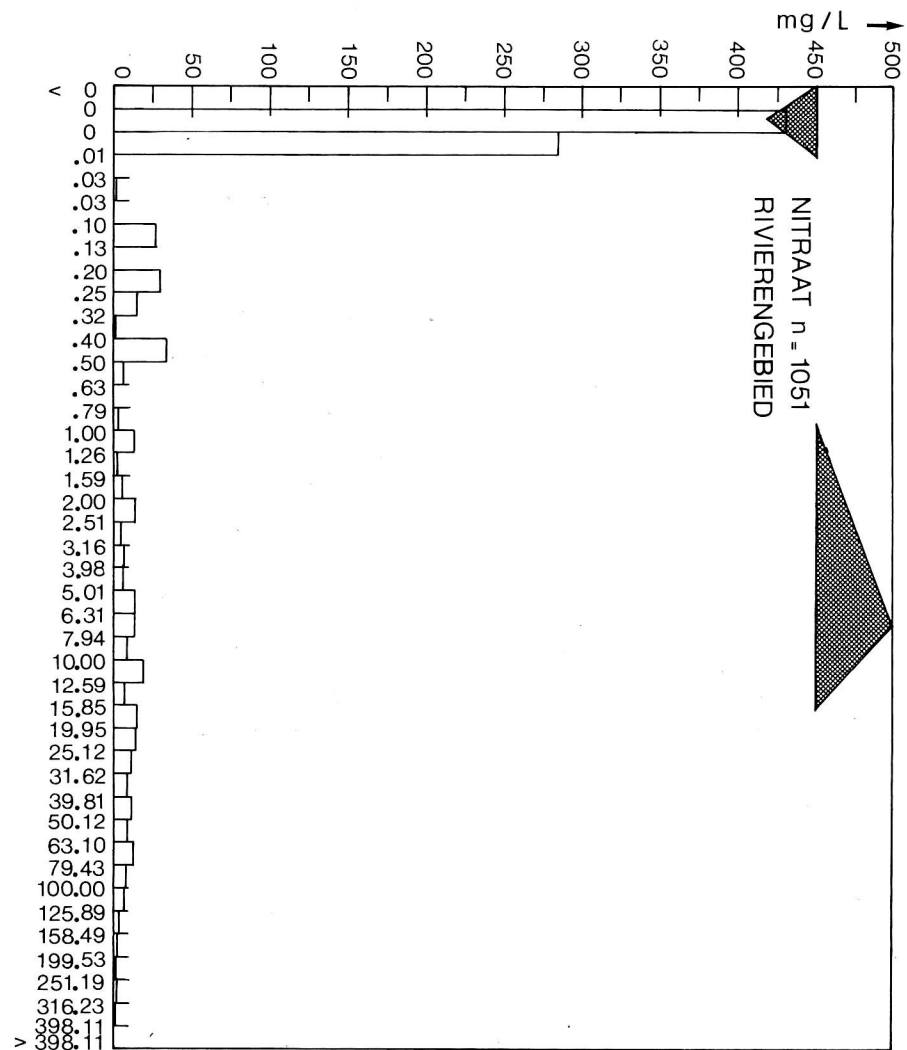
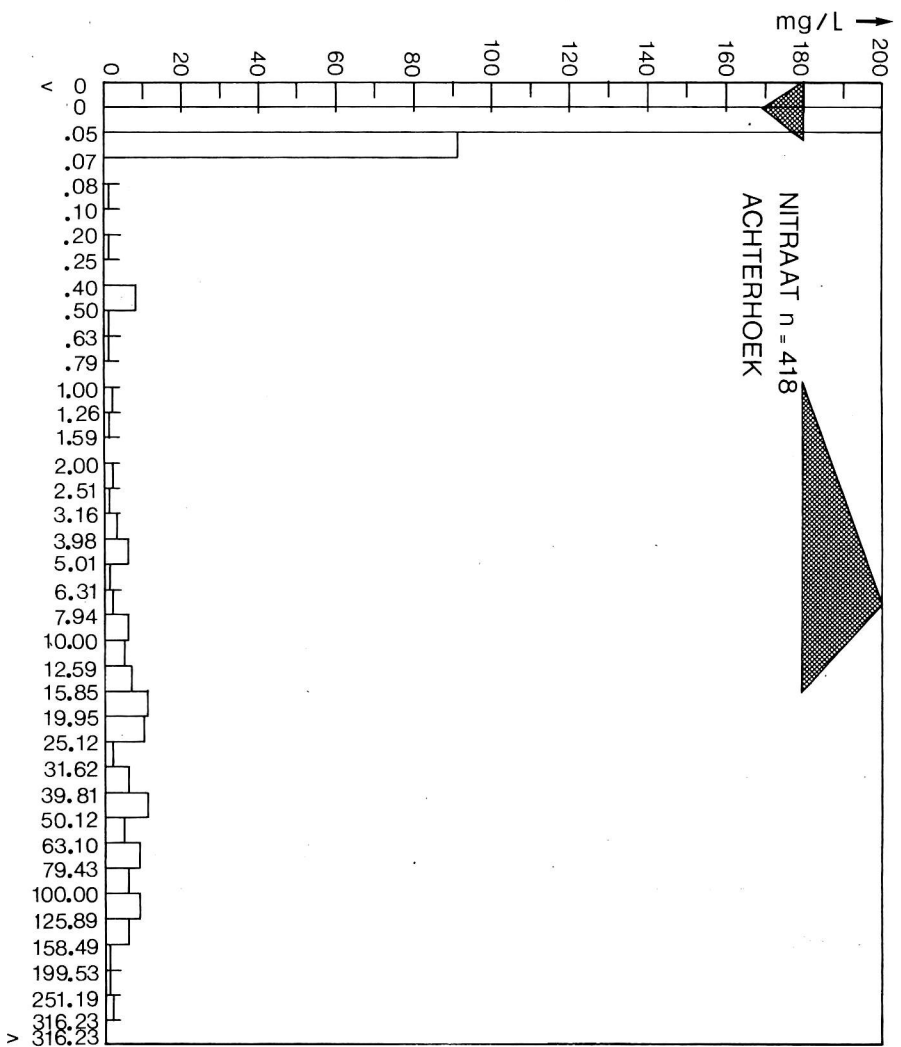


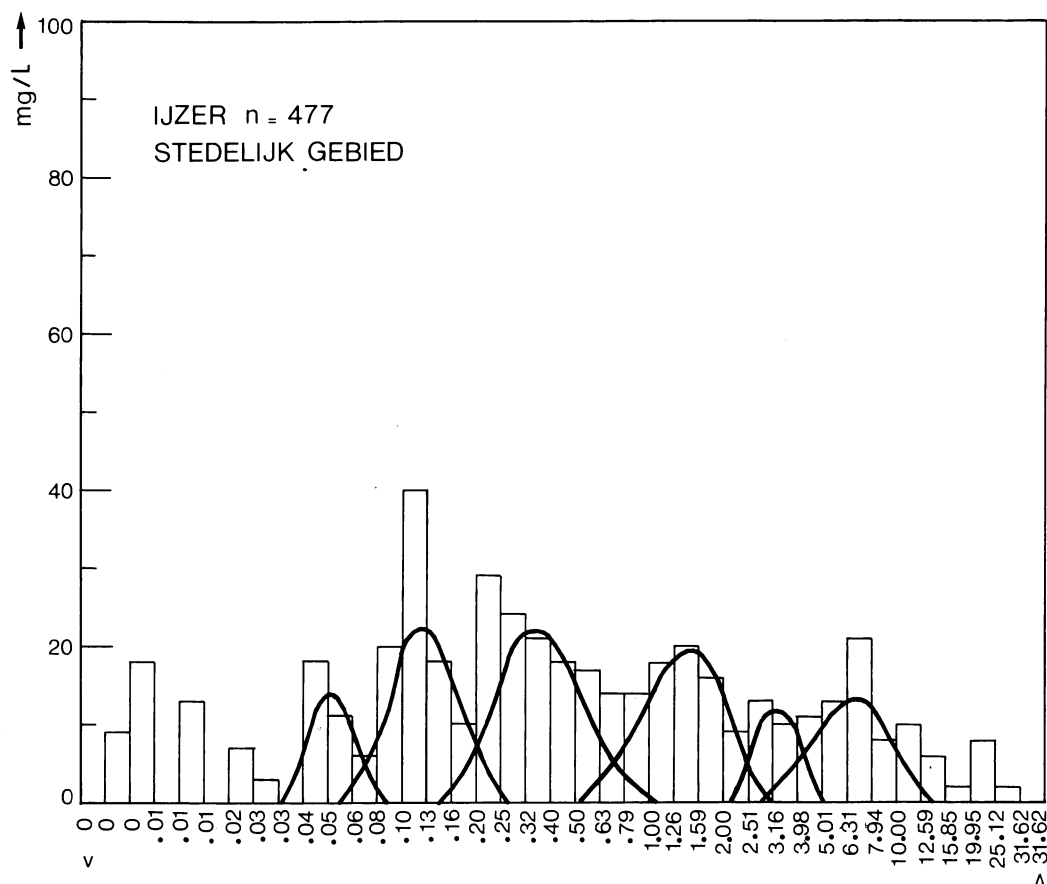
Geschatte subgroep

n = 612

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is







HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

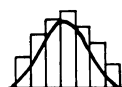
Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



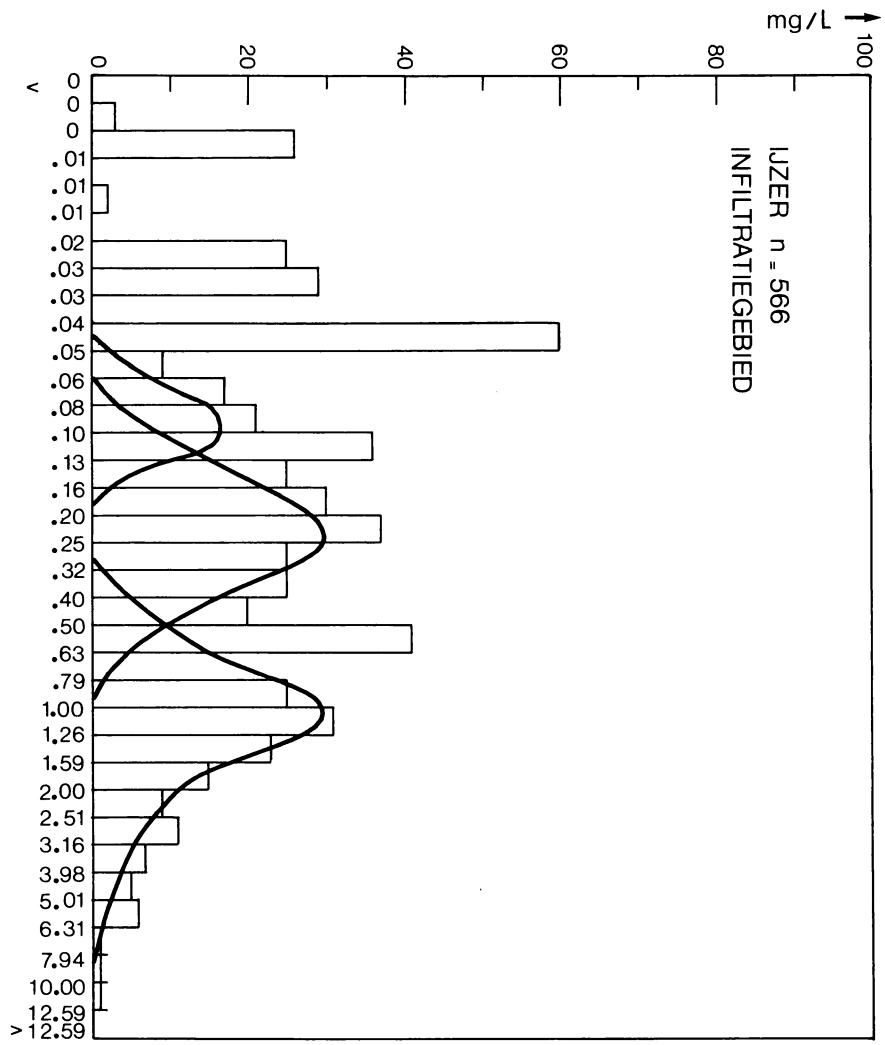
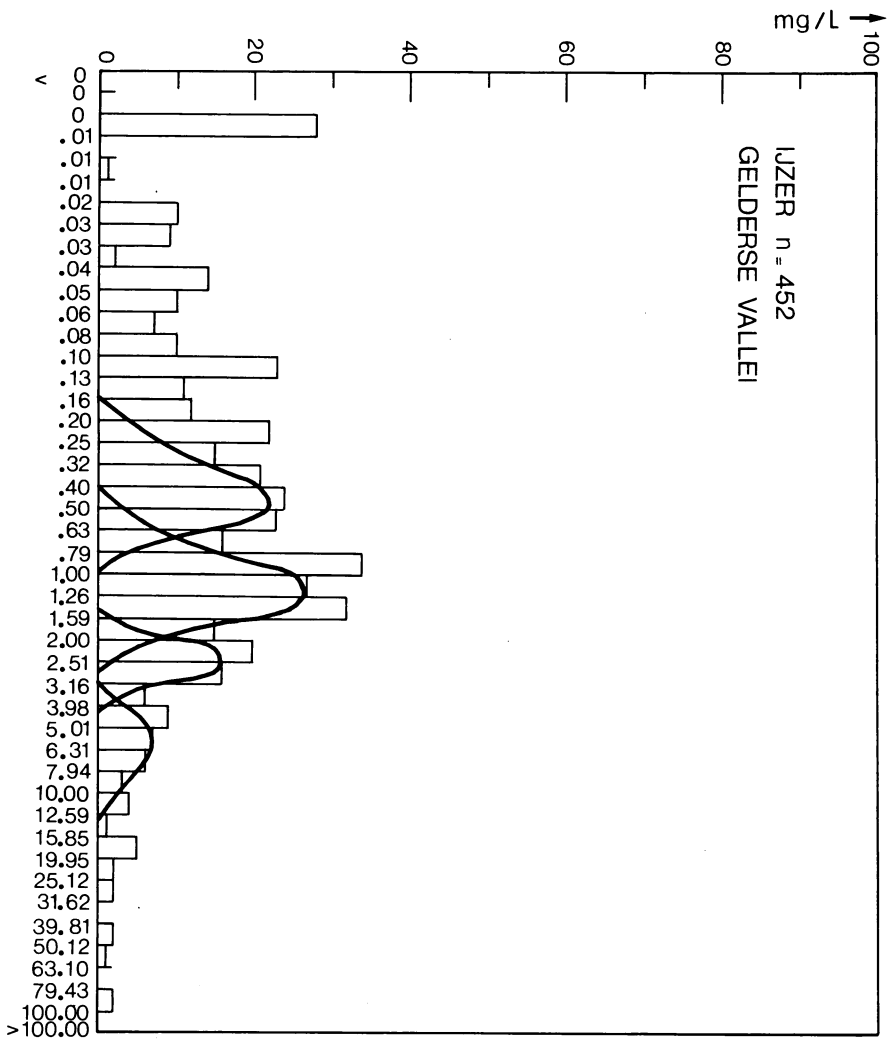
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeflang (1938)

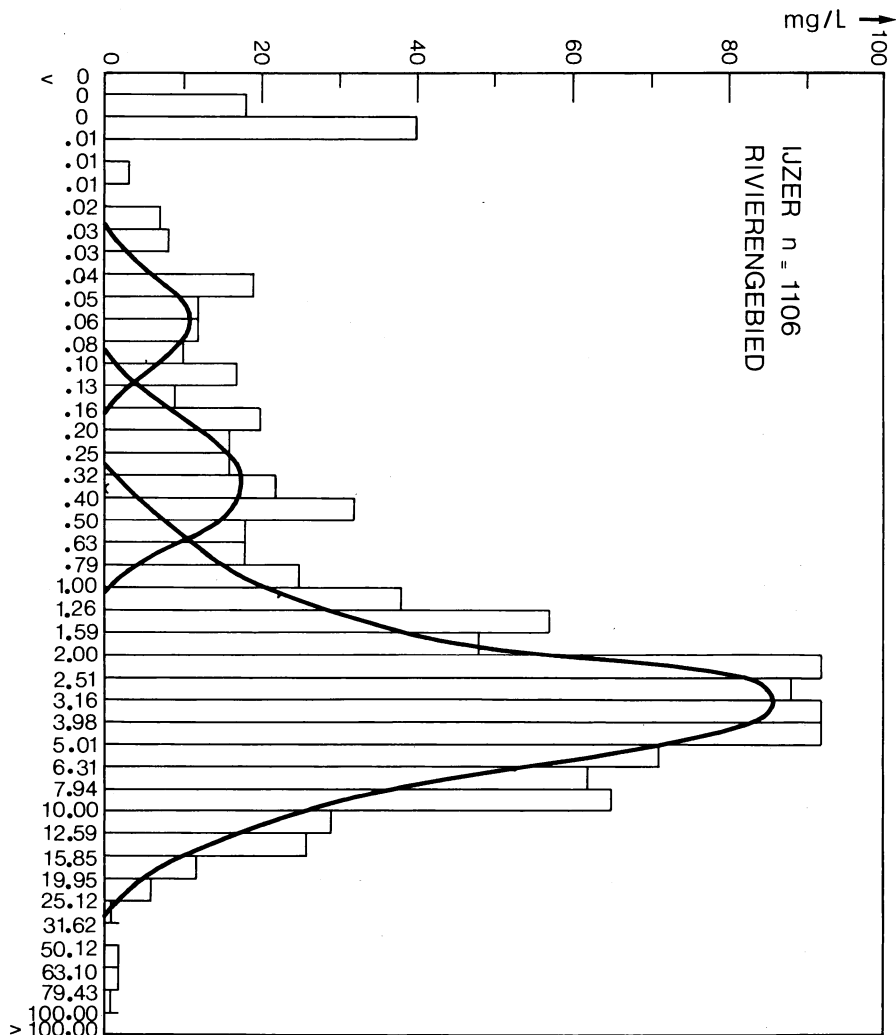
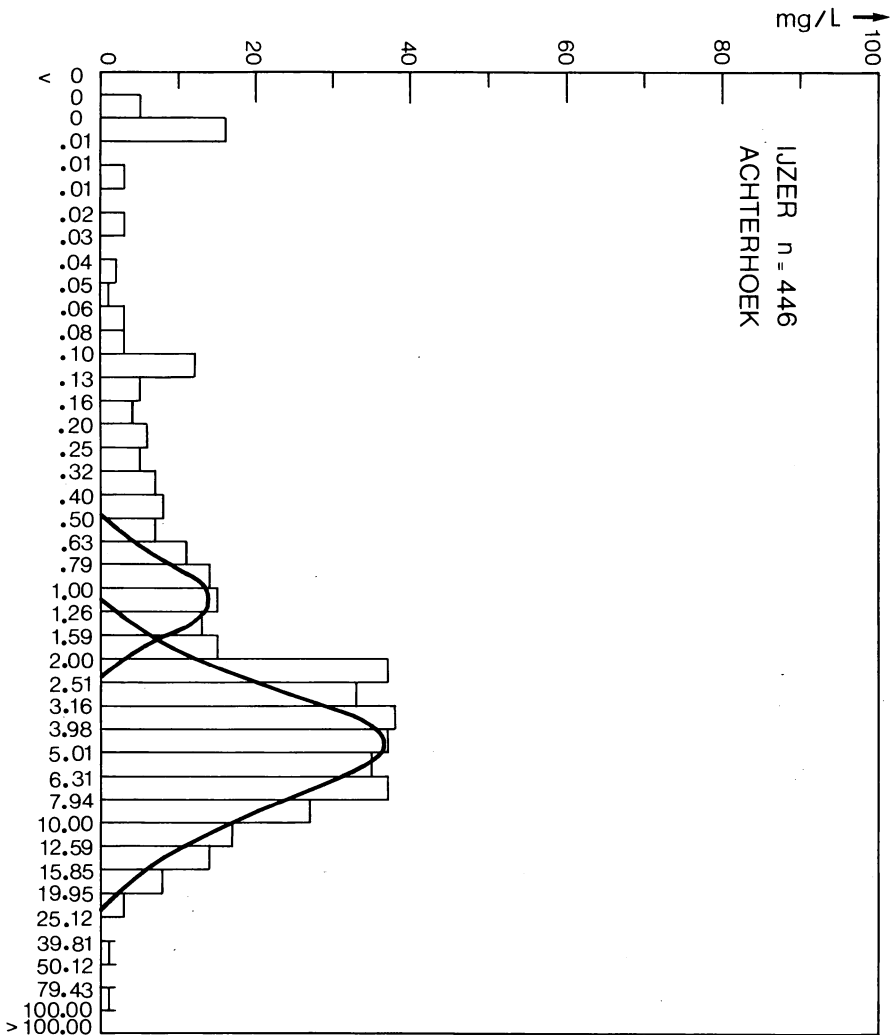


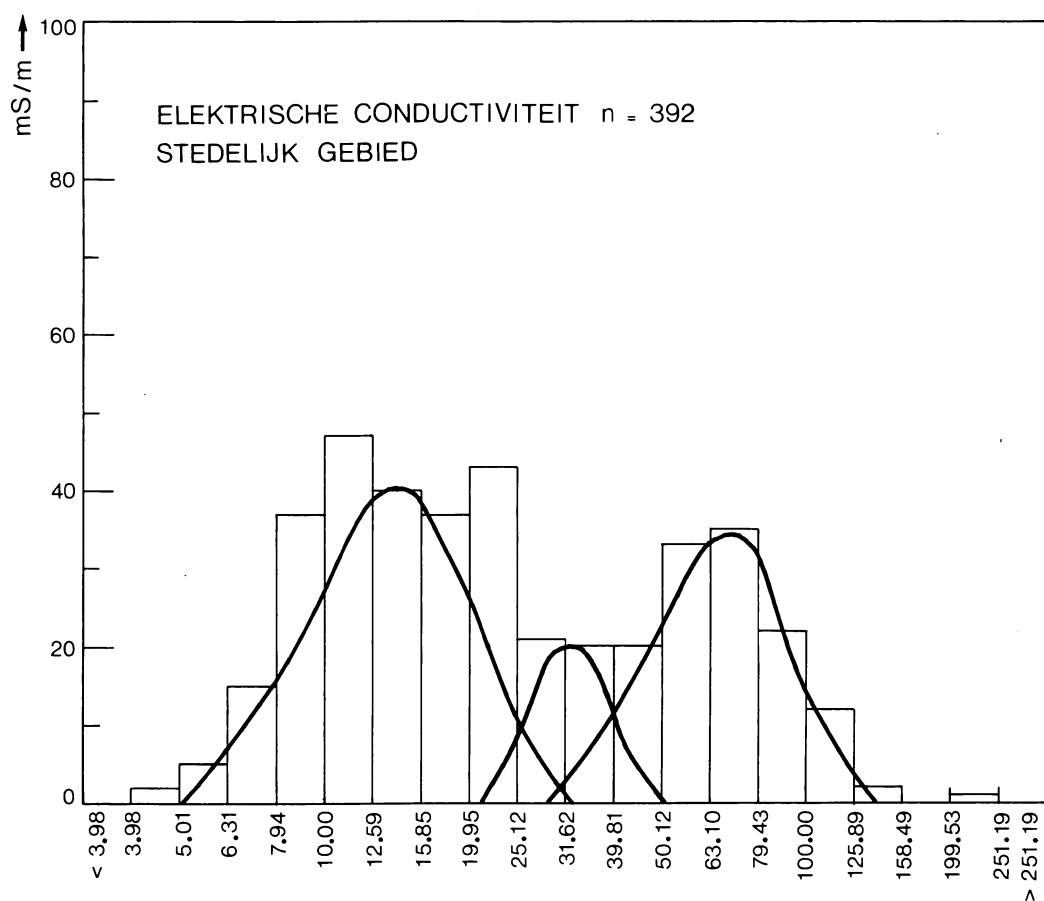
Geschatte subgroep

n = 612

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is







HYDROGEOCHEMIE VAN DE PROVINCIE GELDERLAND

Provincie Gelderland / TNO dienst Waterbeheer/dienst Grondwaterverkenning

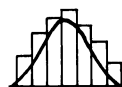
Legenda:



Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Ridder (1978)



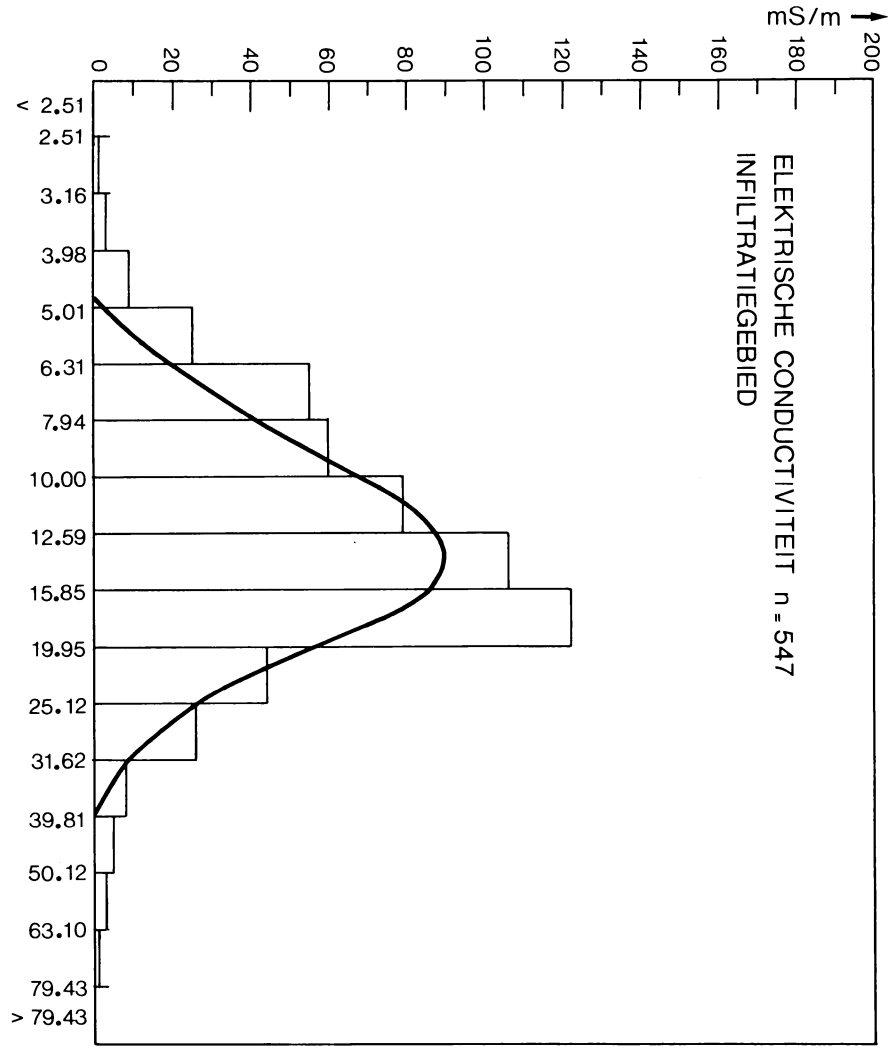
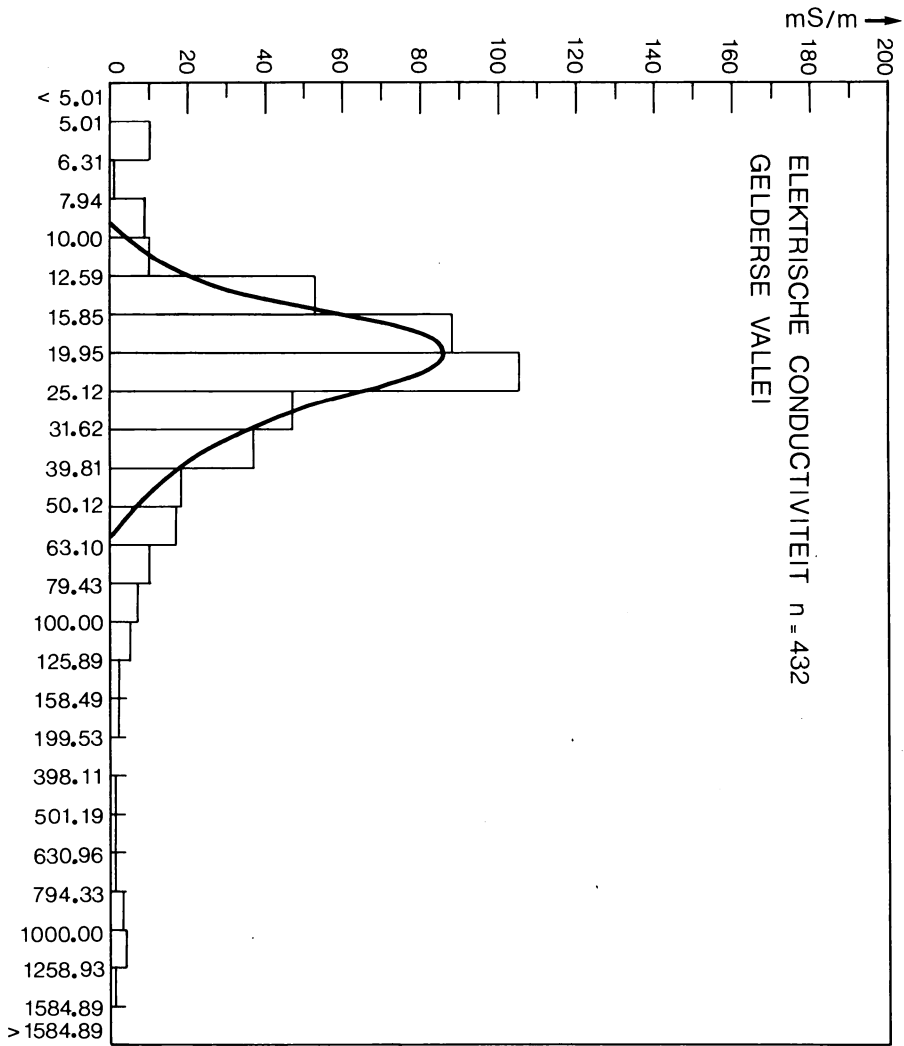
Ingedampte neerslagsamenstelling volgens Leeftang (1938)

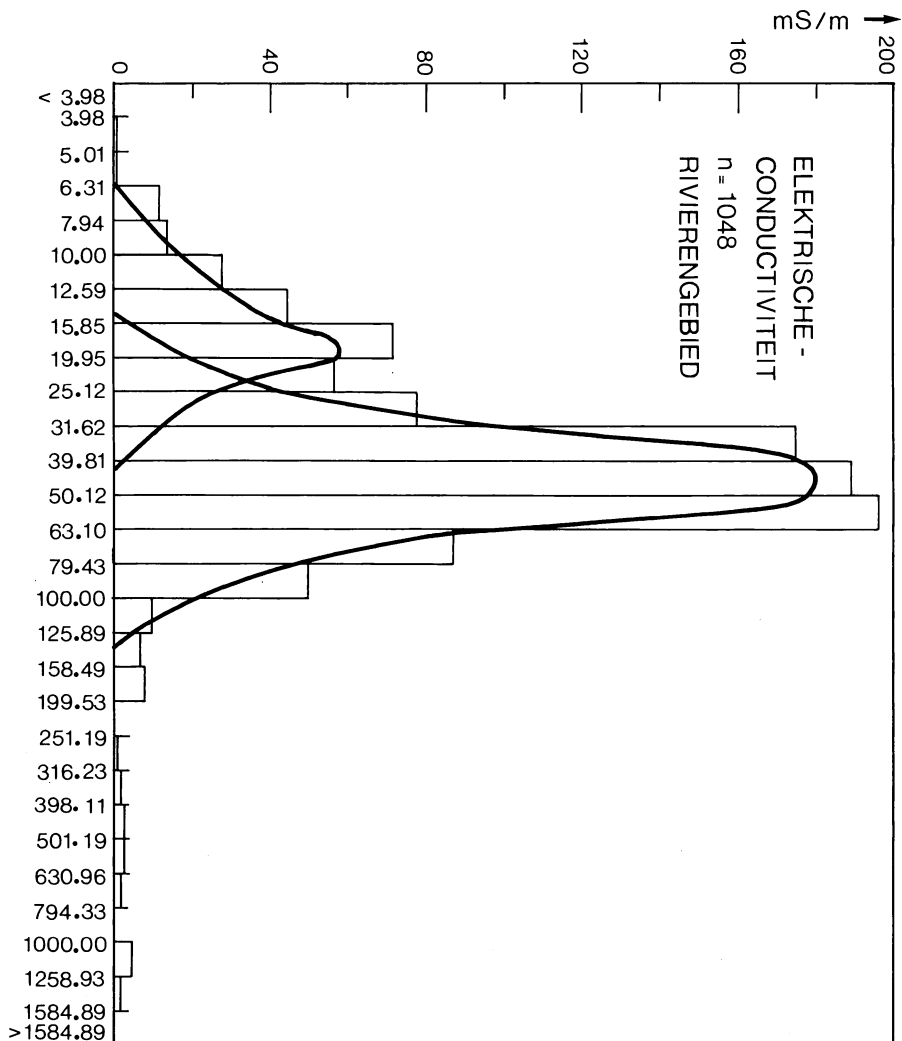
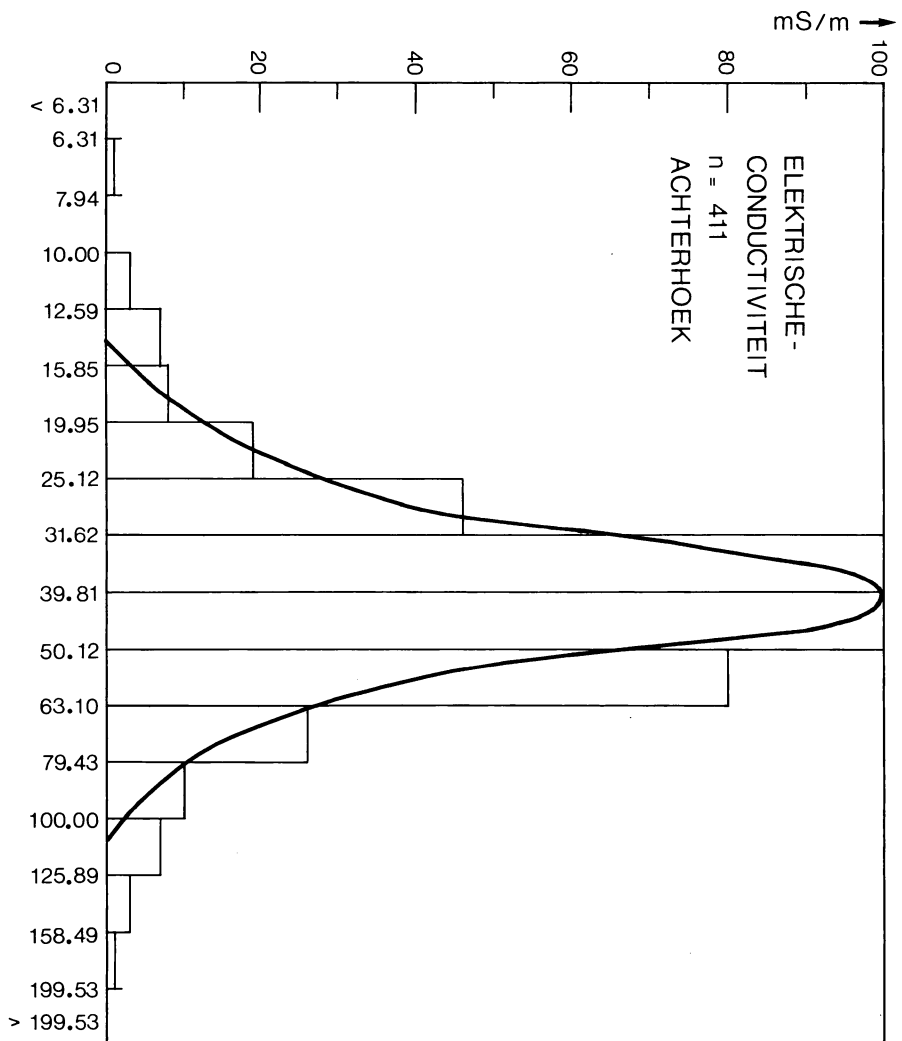


Geschatte subgroep

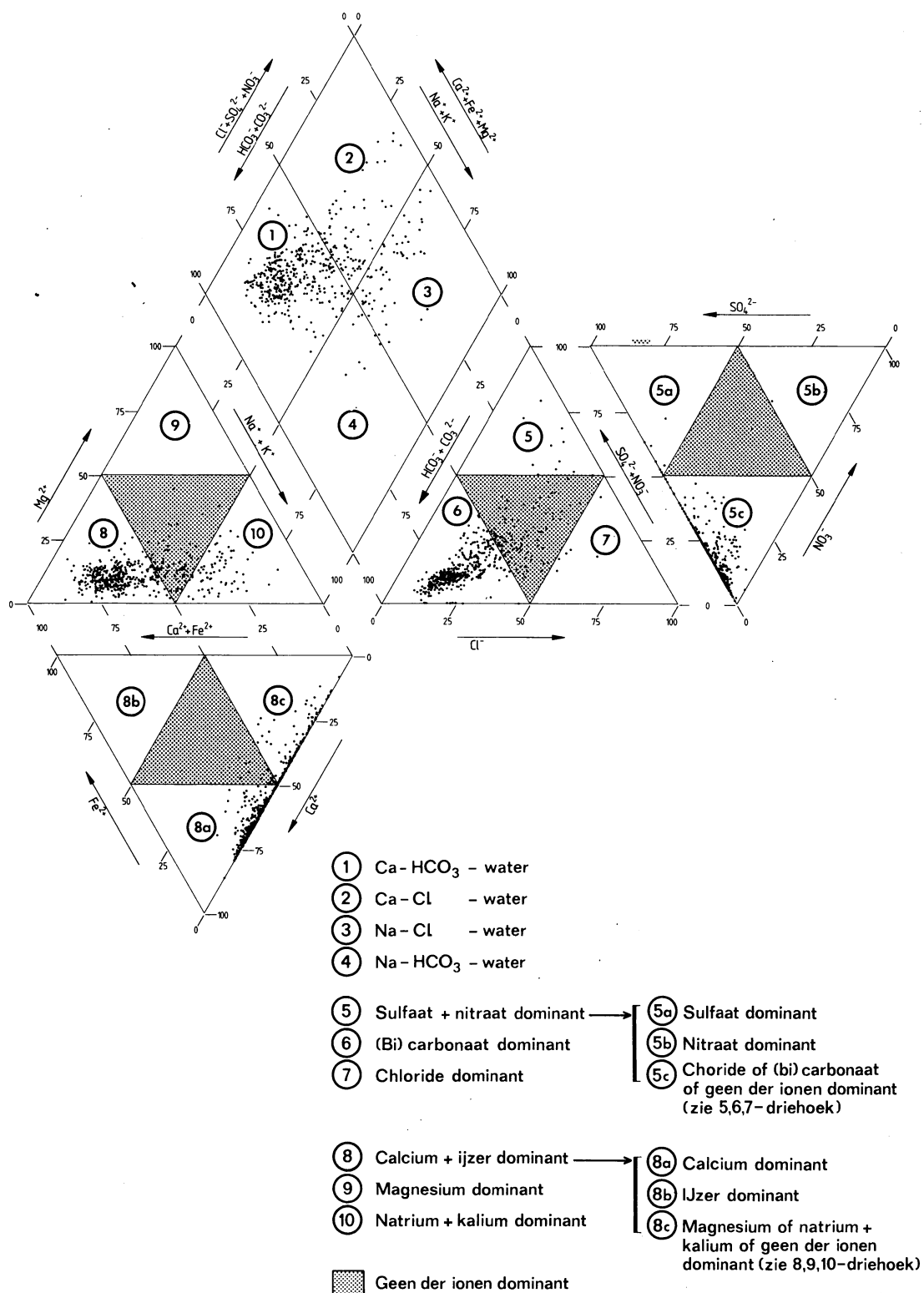
n = 612

Totaal aantal waarnemingen waar histogram op gebaseerd is

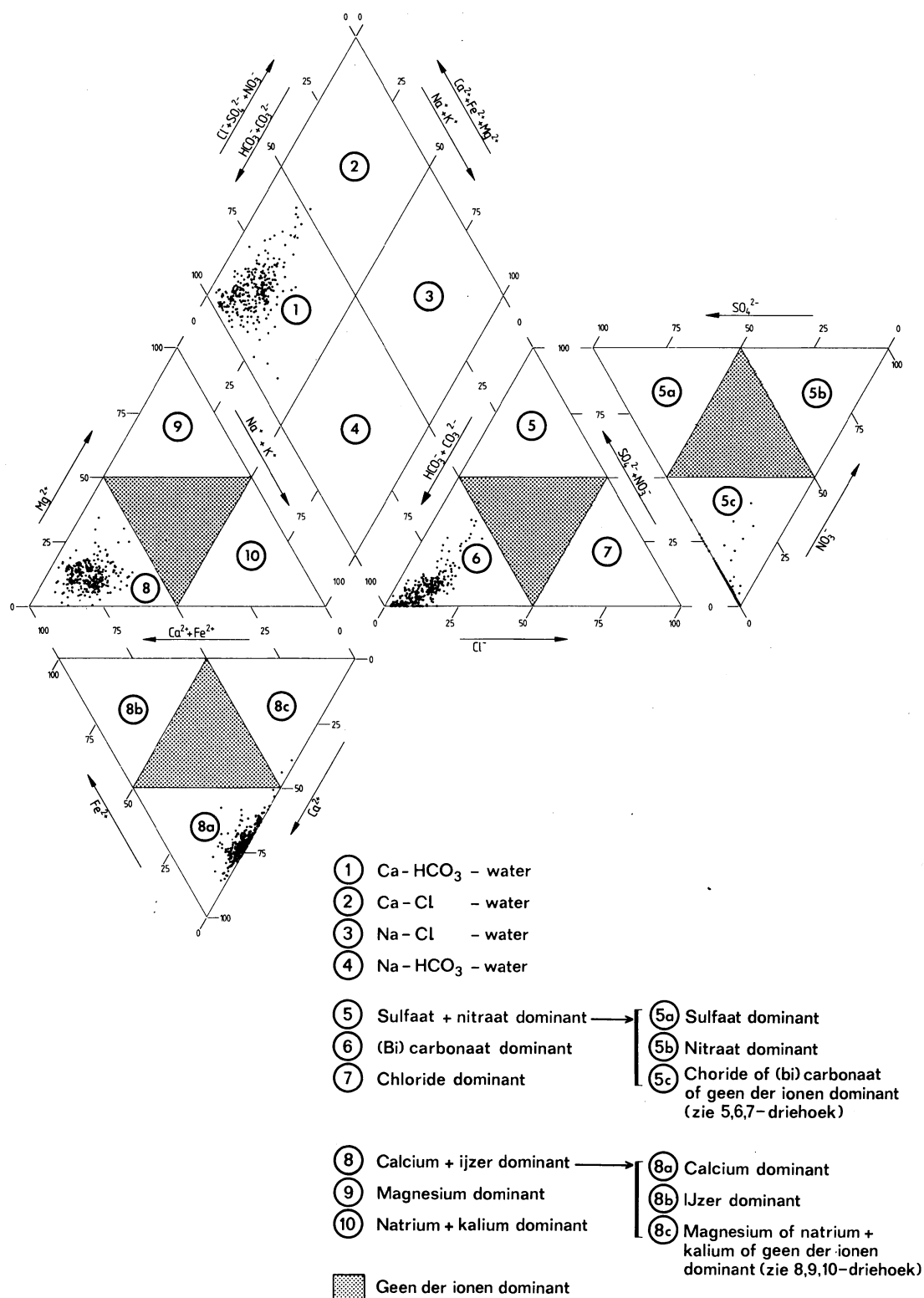




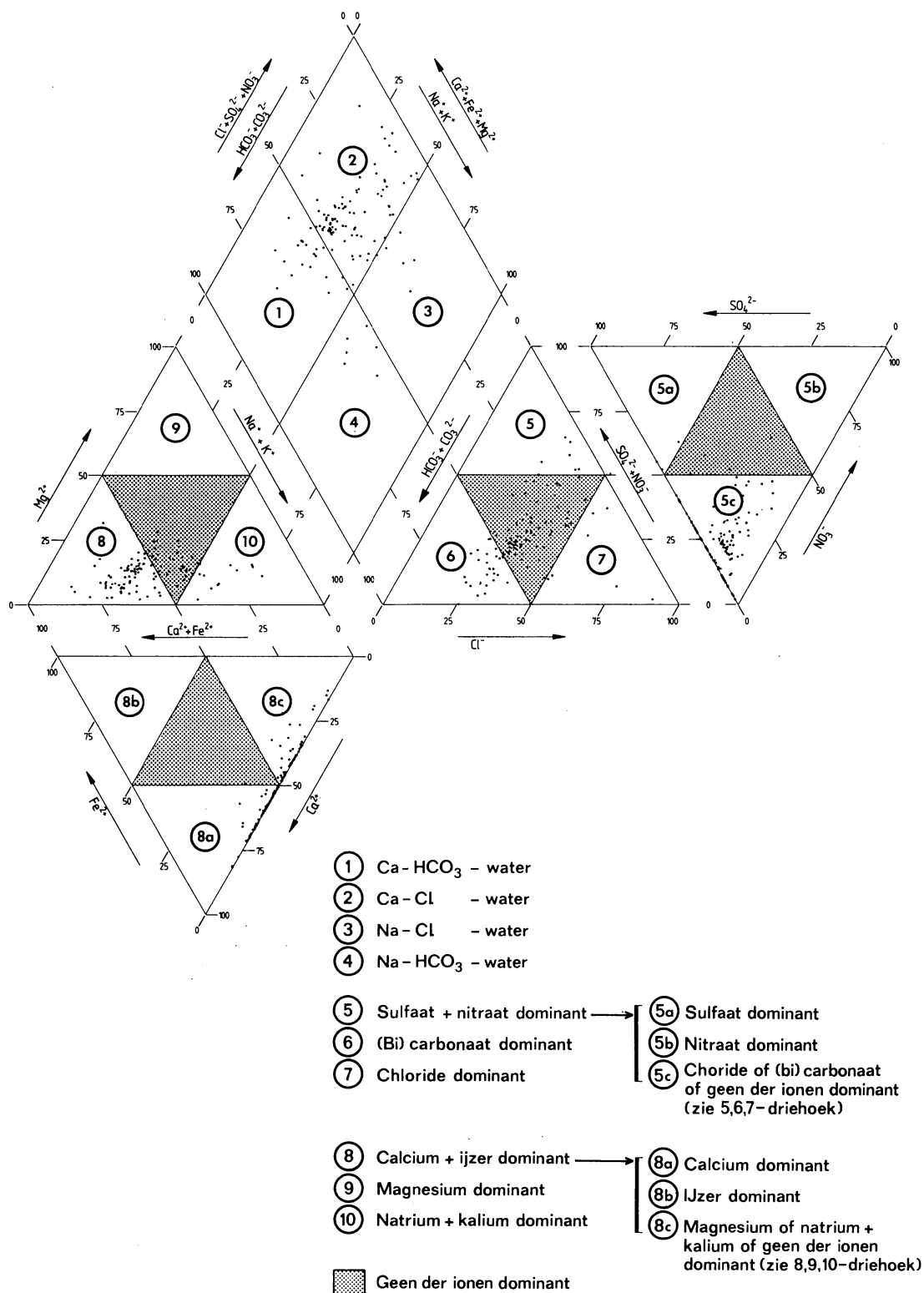
Figuur 18 t/m 25



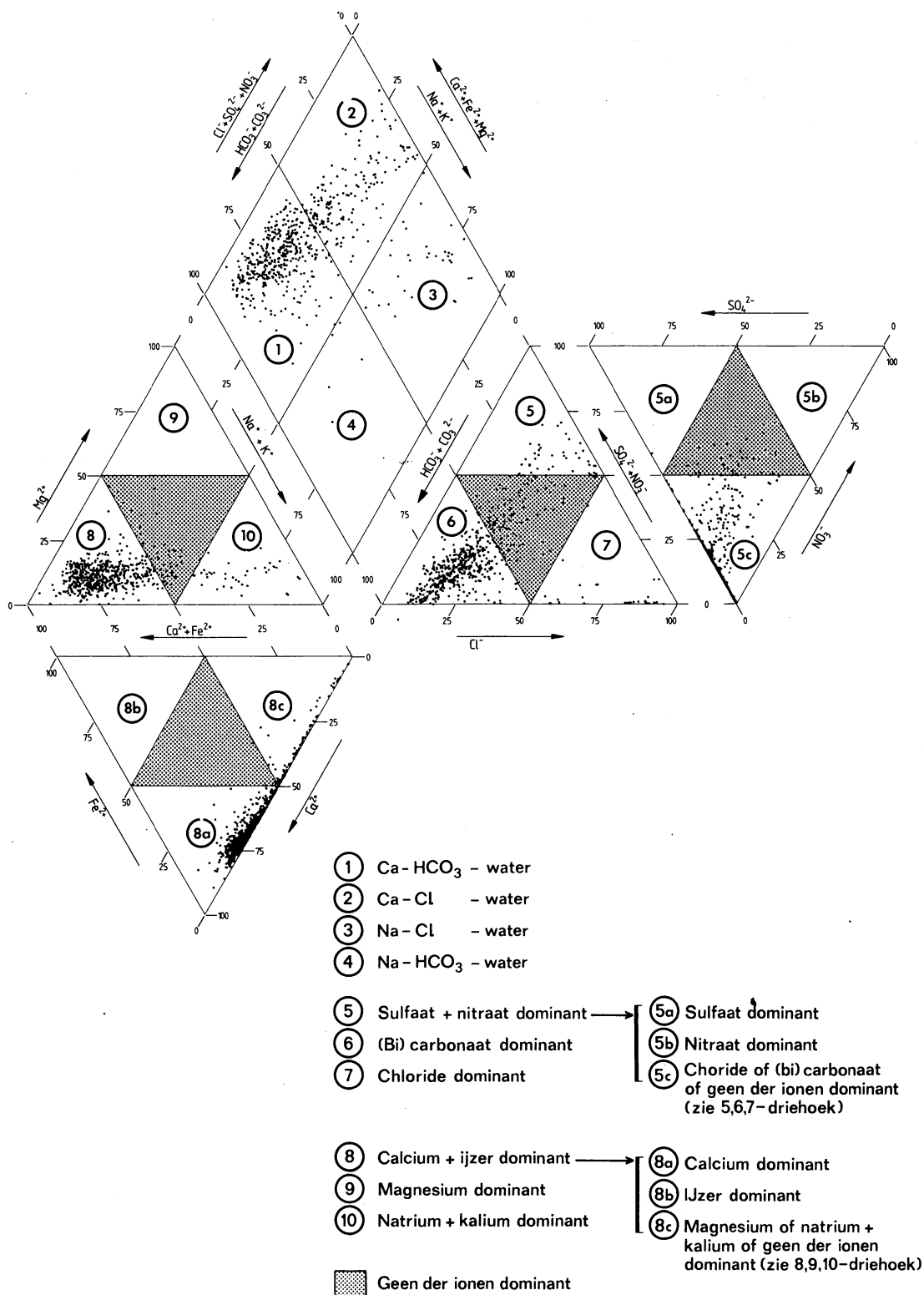
Figuur 18. Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket ($\text{Cl}^- < 20$, Hardheid < 1)



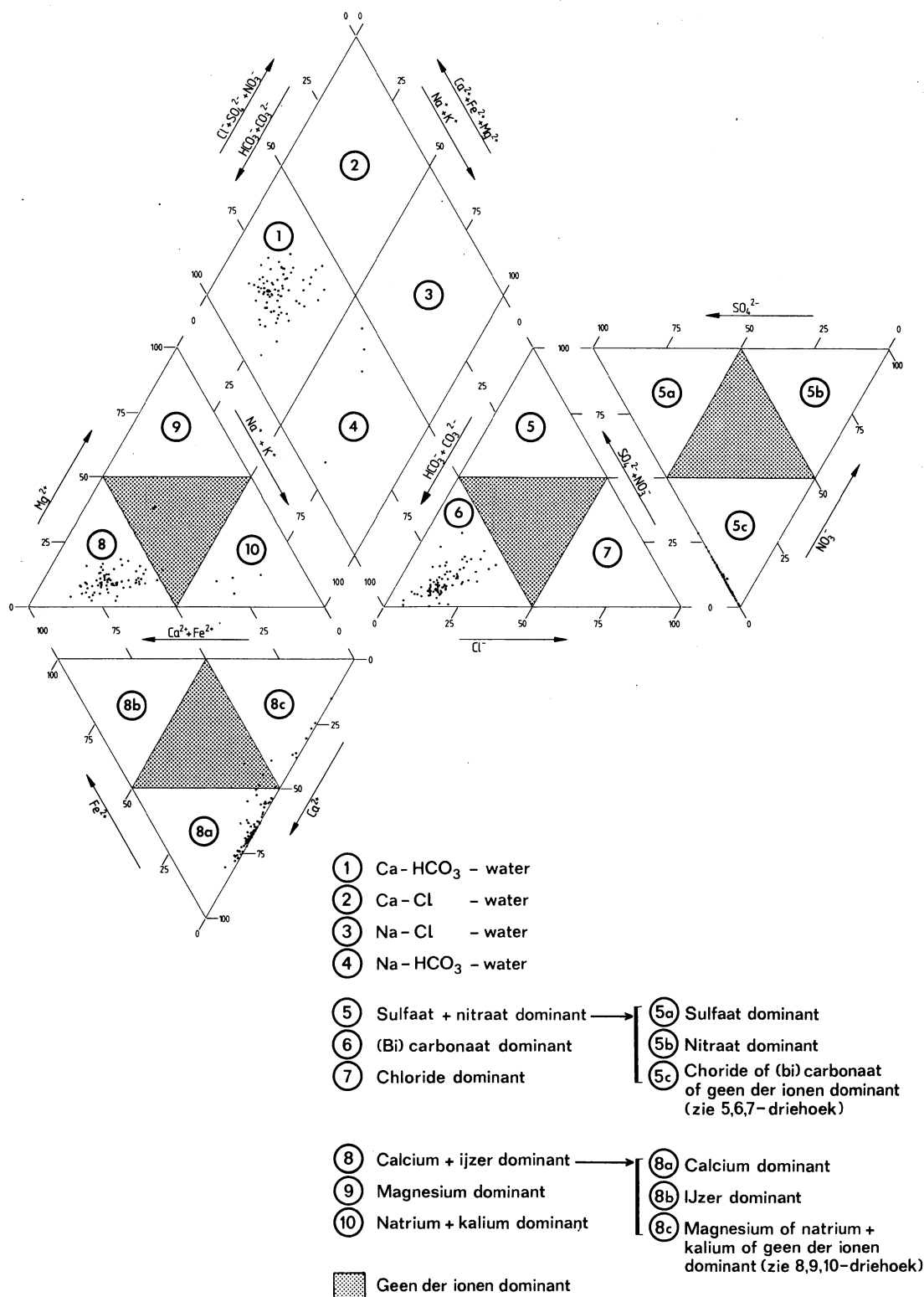
Figuur 19. Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket ($\text{Cl}^- < 20$, Hardheid ≥ 1)



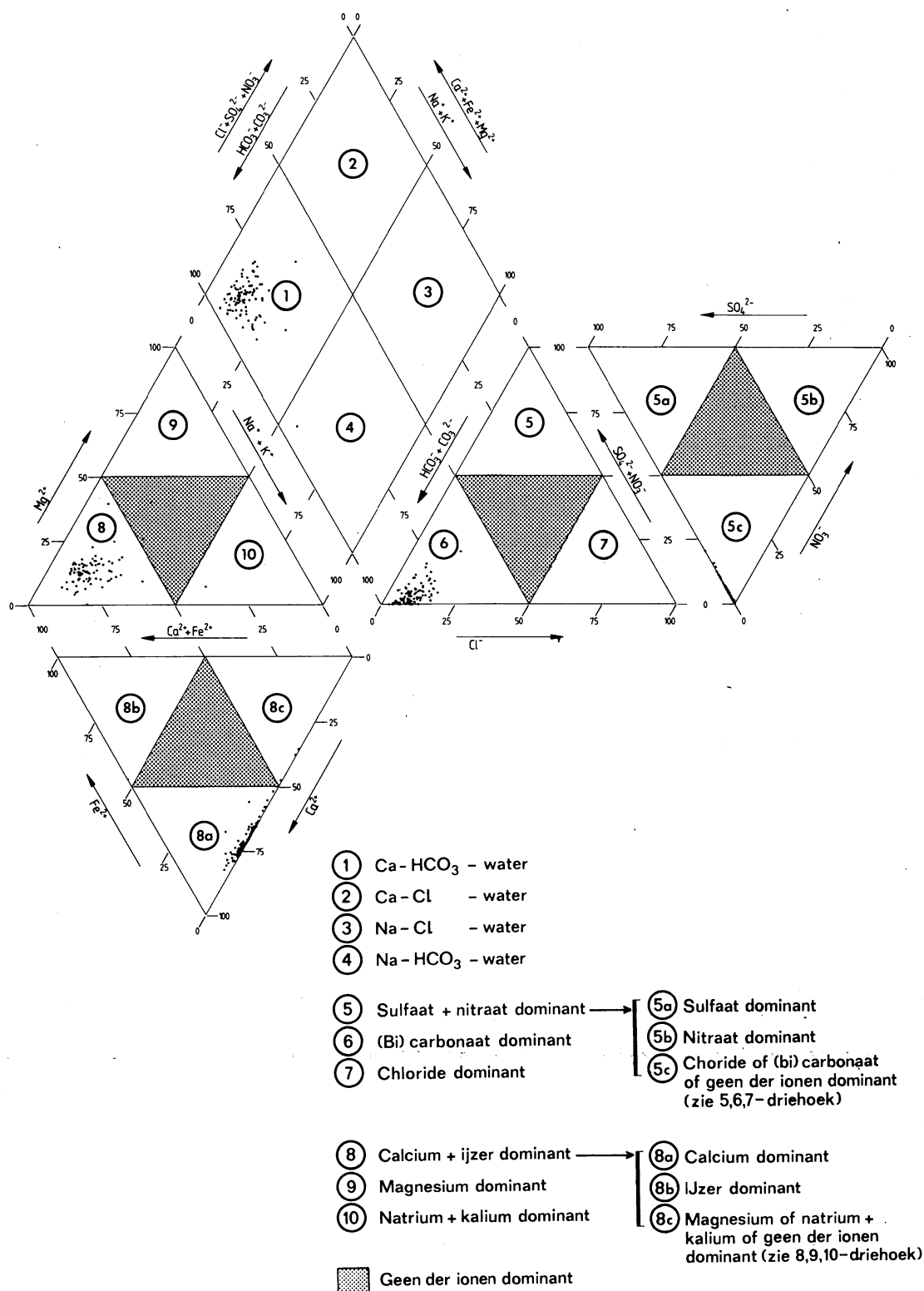
Figuur 20. Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket ($\text{Cl}^- \geq 20$, Hardheid < 1)



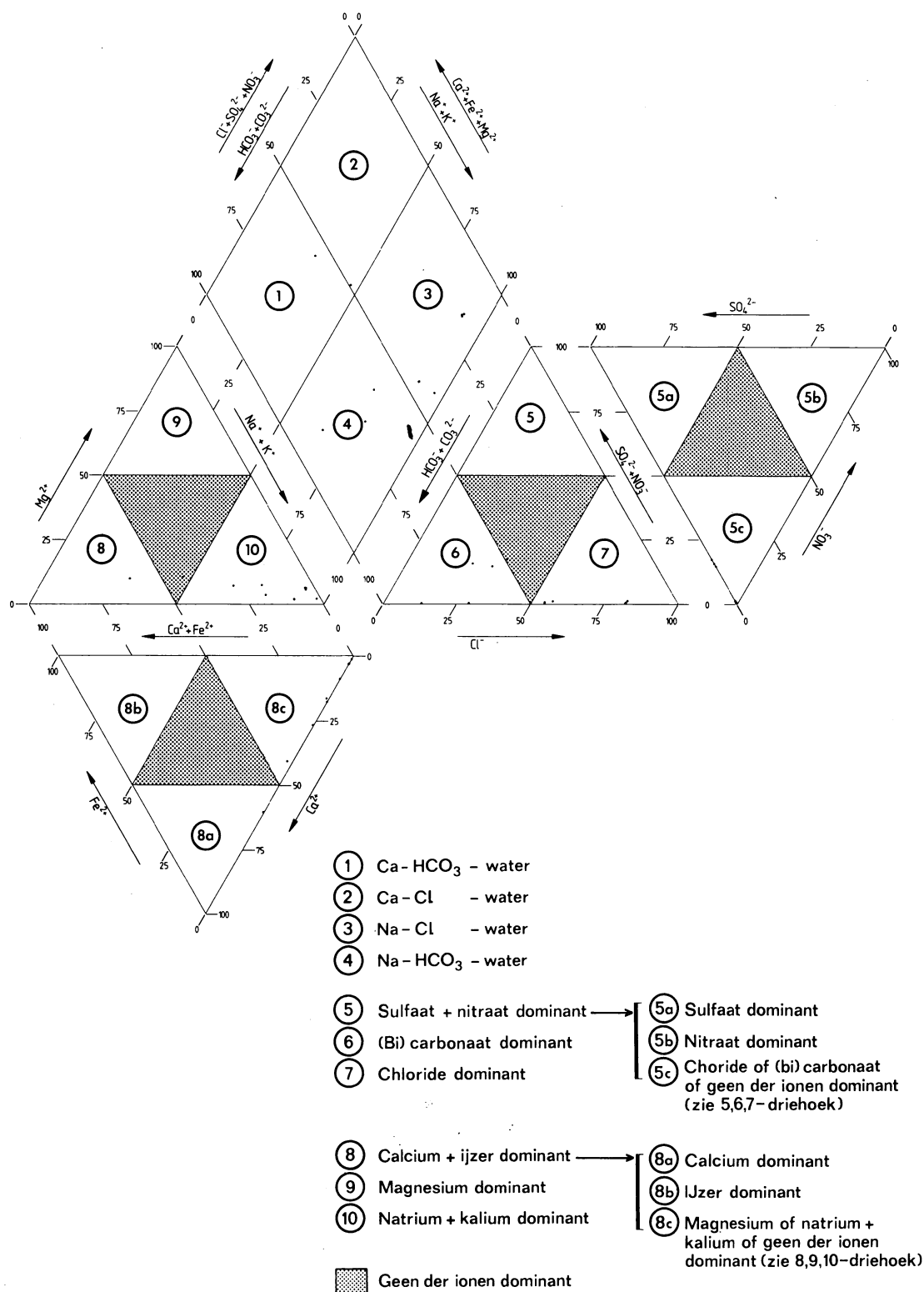
Figuur 21. Piperdiagram voor het eerste watervoerend pakket ($\text{Cl}^- \geq 20$, Hardheid ≥ 1)



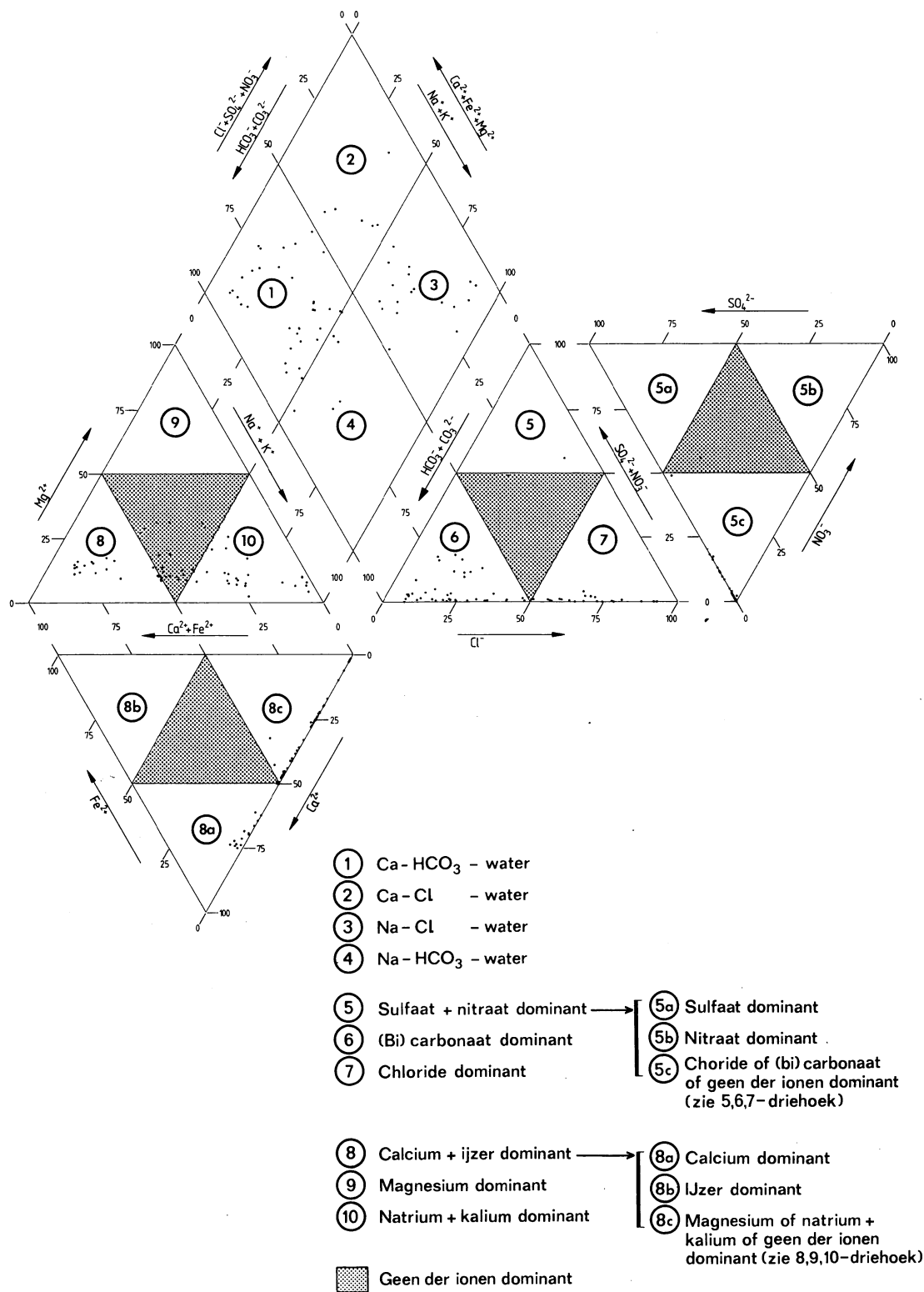
Figuur 22. Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket ($\text{Cl}^- < 20$, Hardheid < 1)



Figuur 23. Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket ($\text{Cl}^- < 20$, Hardheid ≥ 1)

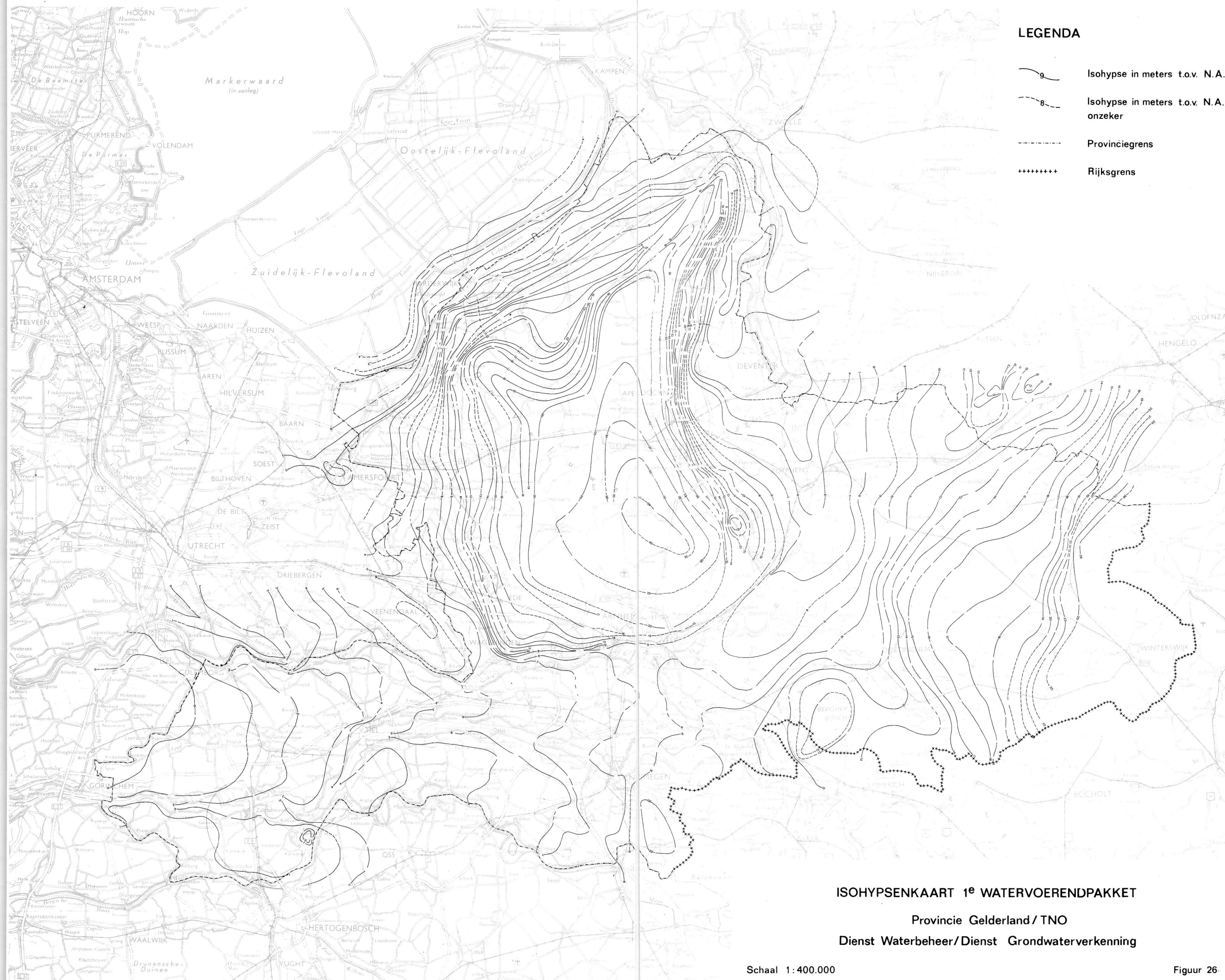


Figuur 24. Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket ($\text{Cl}^- \geq 20$, Hardheid < 1)



Figuur 25. Piperdiagram voor het tweede watervoerend pakket ($\text{Cl}^- \geq 20$, Hardheid ≥ 1)

Figuur 26 en 27



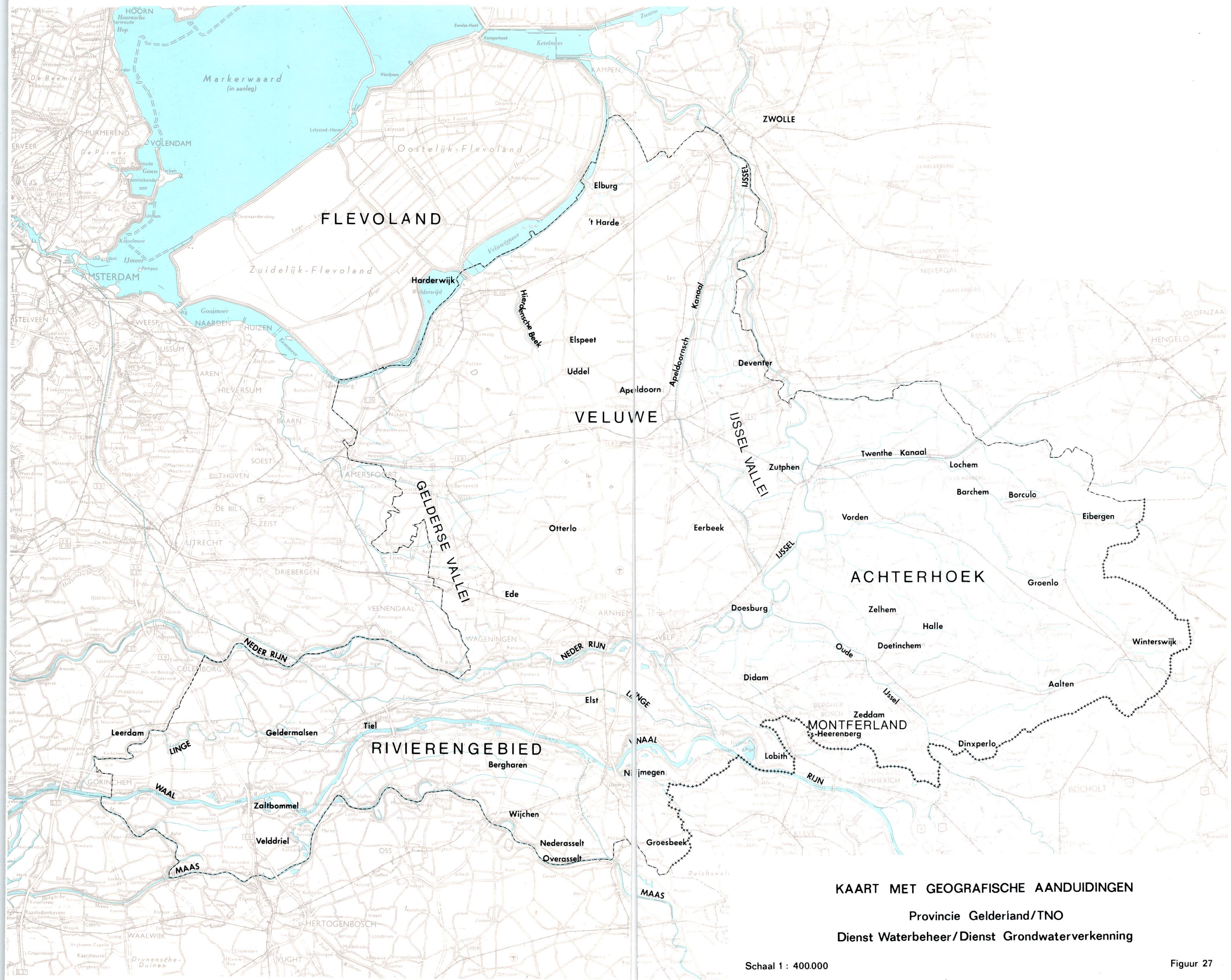
LEGENDA

- Isohypse in meters t.o.v. N.A.P.
- - - Isohypse in meters t.o.v. N.A.P.: onzeker
- - - Provinciegrens
- +++++ Rijksgrens

ISOHYPSENKAART 1e WATERVOERENDPAKKET
Provincie Gelderland/TNO
Dienst Waterbeheer/Dienst Grondwaterverkenning

Schaal 1:400.000

Figuur 26



KAART MET GEOGRAFISCHE AANDUIDINGEN
Provincie Gelderland/TNO
Dienst Waterbeheer/Dienst Grondwaterverkenning

Schaal 1 : 400.000

Figuur 27

