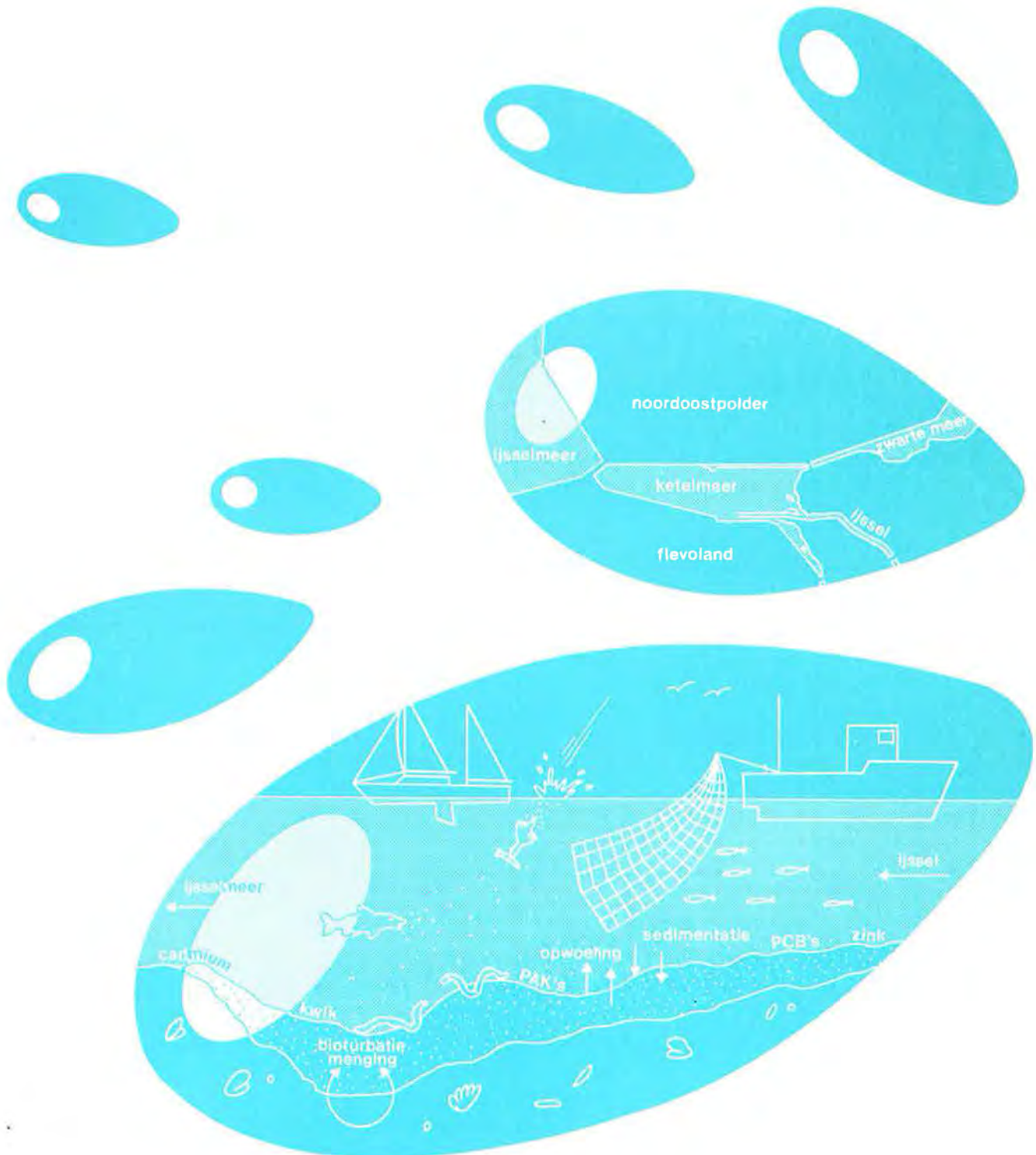


integraal waterbeheer ketelmeer

geohydrologisch modelonderzoek in het ketelmeergebied



integraal waterbeheer ketelmeer

geohydrologisch modelonderzoek in het ketelmeergebied



Commissie voor de
milieu-effectrapportage

BIBLIOTHEEK

Postbus 2345, 3500 GH UTRECHT

Ing. Y. Bruinsma
Rijkswaterstaat
Directie Flevoland
Wetenschappelijke Afdeling
Lelystad, juni 1989.

VOORWOORD.

Deze nota wordt uitgebracht door de projectgroep Ketelmeer.

De projectgroep Ketelmeer is door de directie Zuiderzeewerken van Rijkswaterstaat ingesteld om:

- door onderzoek meer kennis en inzicht te verkrijgen van de verschillende aspecten van het watersysteem Ketelmeer.
 - met behulp van de verkregen inzichten het integraal waterbeheer voor het Ketelmeer beter gestalte te geven.
- In de projectgroep zijn vertegenwoordigers opgenomen van verschillende Rijkswaterstaatsdiensten (zie bijlage 2).

In het Ketelmeer zijn door de IJssel grote hoeveelheden sterk vervuild slib afgezet. Over de mate van vervuiling en de verspreiding daarvan in de tijd is nog weinig bekend.

Met behulp van modelonderzoek is de geohydrologie van het Ketelmeergebied gesimuleerd om na te kunnen gaan in hoeverre er water door de Ketelmeerbodem wegzijgt naar de onderliggende watervoerende pakketten. In een later stadium zal onderzocht worden of met dit infiltrerende water ook verontreinigingen verplaatst worden. Dijkskwel is in dit onderzoek noch niet opgenomen.

Uit de modelberekeningen blijkt dat er inderdaad water door de Ketelmeerbodem infiltreert. Het model geeft aan dat er vanuit de watervoerende pakketten onder het Ketelmeer een langzame stroming optreedt richting de omringende polders.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	
Samenvatting	2
1. Inleiding	3
2. Een korte beschrijving van het modelgebied	4
2.1. Geografie van het Ketelmeergebied	4
2.2. Waterhuishouding van het Ketelmeergebied	4
3. De geohydrologie van het Ketelmeergebied	5
3.1. De slecht doorlatende deklaag	5
3.2. Het eerste watervoerend pakket	5
3.3. De eerste scheidende laag	5
3.4. Het tweede watervoerend pakket	5
3.5. De slecht doorlatende basis	6
4. Modelleren van de huidige situatie	7
4.1. Schematisering van de geohydrologische situatie	7
4.2. De opzet van modellaag 1	7
4.3. De opzet van modellaag 2	8
4.4. De opzet van modellaag 3	9
4.5. Zandgaten, stroomgeulen en vaarten	9
5. Uitkomsten van de modelberekeningen voor de huidige situatie	11
5.1. De stijghoogte	11
5.2. Kwel en wegzijging	11
5.3. Zandgaten, stroomgeulen en vaarten	12
5.4. Stromingspatronen	13
5.5. Combinatie van stromingspatronen met andere berekende gegevens	14
6. Conclusies	16
7. Literatuuropgave	17
8. Lijst van in de tekst opgenomen tabellen	18
9. Lijst van figuren	18

Bijlage I : Figuren bij Geohydrologisch modelonderzoek in het Ketelmeergebied.

Bijlage II: Samenstelling van de projectgroep Ketelmeer.

SAMENVATTING

In het Ketelmeer zijn door de IJssel grote hoeveelheden sterk vervuild slib afgezet. Over de mate van vervuiling en de verspreiding daarvan in de tijd is nog weinig bekend. Met behulp van modelonderzoek is de geohydrologie van het Ketelmeergebied gesimuleerd om na te kunnen gaan in hoeverre er water door de Ketelmeerbodem wegzijgt naar onderliggende watervoerende pakketten. In een later stadium zal onderzocht worden of met dit infiltrerende water ook verontreinigingen verplaatst worden. Dijkswel is niet in dit onderzoek opgenomen.

Uit de berekeningen blijkt dat er door de bodem van het Ketelmeer een hoeveelheid water infiltreert van ongeveer 26200 m³ per dag. Naast de infiltratie door de bodem van het Ketelmeer blijkt er ook water te infiltreren door de insnijdingen in de bodem van het Ketelmeer; het Keteldiep met de uitloop daarvan in het Ketelmeer, het Kattendiep en de recente zandgaten. De infiltratie door deze insnijdingen bedraagt 9000 m³ per dag.

Van de totale hoeveelheid geïnfiltreerd Ketelmeerwater stroomt 12320 m³ per dag richting de Noordoostpolder (35 %) en 22880 m³ per dag richting Oostelijk Flevoland (65 %).

De effectieve snelheid van het grondwater dat van onder het Ketelmeer richting de Noordoostpolder stroomt bedraagt maximaal 7,3 m per jaar bovenin het watervoerend pakket en 14,6 m per jaar dieper in dit pakket.

De effectieve snelheid van het grondwater dat van onder het Ketelmeer richting Oostelijk Flevoland stroomt bedraagt maximaal 11,0 m per jaar bovenin het watervoerend pakket en 20,8 m per jaar dieper in dit pakket.

1. INLEIDING.

Doel van het onderzoek in het Ketelmeergebied is het verzamelen van de benodigde gegevens om te komen tot een verantwoord beleid inzake inrichting en beheer van dit gebied. In het Ketelmeer zijn grote hoeveelheden sterk verontreinigd slib afgezet. Over de ernst de verspreiding van de verontreinigingen in het Ketelmeer is nog weinig bekend. Voor het verkrijgen van een beter inzicht in de verspreiding van verontreinigingen zijn in 1987 een aantal monsters van de waterbodem genomen en geanalyseerd op de aanwezigheid van verontreinigingen. Een volgende stap is nu het voorspellen van de verpreiding in de tijd van de verontreinigingen middels modelonderzoek.

Deel van dit onderzoek is het geohydrologisch modelonderzoek. Het modelonderzoek moet inzicht verschaffen over de mate van infiltratie van Ketelmeerwater en het gedrag van eventueel geïnfiltriseerd water in de onderliggende watervoerende pakketten.

Met het meerlagen eindig differentie grondwaterstromingsmodel MODFLOW zijn simulatie berekeningen uitgevoerd voor het Ketelmeergebied. De berekeningsresultaten zijn verwoord in dit rapport. MODFLOW is niet geschikt voor het simuleren van dijkskwel. In dit rapport is de dijkskwel dan ook niet opgenomen.

2. EEN KORTE BESCHRIJVING VAN HET MODELGEBIED

2.1 Geografie van het Ketelmeergebied

Het gebied waarvoor de modelberekeningen zijn uitgevoerd (verder genoemd Ketelmeergebied) vormt een rechthoek tussen de punten x: 167000, y: 502000 en x: 193000, y: 522000 van het Rijks Driehoeksnet. Dit gebied is weergegeven in figuur 1.

Het open water in het Ketelmeergebied omvat een deel van het IJsselmeer, het Ketelmeer, het Vossemeer, een deel van het Zwarte meer en een deel van de IJssel. Het omringende land bestaat uit de Noordoostpolder ten zuiden van Emmeloord, het Kampereiland, enige kleine polders ten zuidwesten van Kampen en Oostelijk Flevoland ten noorden van Dronten.

2.2 Waterhuishouding van het Ketelmeergebied

Aanvoer van water naar het Ketelmeer vindt voor het overgrote deel plaats via de IJssel en daarmee indirect via de Rijn (88 %) en via het Zwarte meer vanuit de Overijsselse Vecht (10%). De rest is afkomstig van het Vossemeer en het poldergemaal Colijn. Tot slot voegt de neerslag direct water toe aan het Ketelmeer.

Het aangevoerde water wordt grotendeels afgevoerd naar het IJsselmeer. Daarnaast vindt nog een kleine afvoer plaats via verdamping en wegzijging in de ondergrond.

Het waterpeil van IJsselmeer, Ketelmeer, Zwarte meer en Vossemeer is in principe gelijk: zomerpeil NAP -0,20 m, winterpeil NAP -0,40 m. Voornamelijk ten gevolge van op- en afwaaiing treedt niveauverschil en wateruitwisseling op.

Het omringende land bestaat geheel uit polders. De polderpeilen van de verschillende gebieden, zoals deze in de berekeningen zijn gehanteerd, zijn weergegeven in figuur 2.

De diepte van het Ketelmeer varieert van rond 5 meter nabij de Ketelbrug tot rond 1 meter bij het Kampereiland. Voor de modelberekeningen is dit van weinig belang. Plaatselijke verdiepingen zoals zandgaten, vaargeulen en stroomgeulen kunnen wel van belang zijn: De verticale doorlatendheid van de waterbodem kan hier sterk afwijken van de omgeving. Verderop in deze notitie zal aandacht worden besteed aan dit soort plaatsen.

3. DE GEOHYDROLOGIE VAN HET KETELMEERGEBIED

De gegevens in deze paragraaf zijn grotendeels ontleend aan de voortgangsrapporten "Geologische en Geohydrologische Inventarisatie IJsselmeergebied" (RGD 1987, 1988). In dit hoofdstuk zijn ook de laagindelingen aangehouden van bovengenoemde rapporten. Gegevens over de holocene deklaag zijn deels ontleend aan karteringen door de voormalige Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.

3.1. De slecht doorlatende deklaag

De slecht doorlatende deklaag is hoofdzakelijk opgebouwd uit holocene afzettingen. Deze afzettingen variëren plaatselijk sterk in dikte en samenstelling. De hydraulische weerstand varieert sterk met de dikte van de afzettingen.

Langs de noordrand van het modelgebied, vanaf Ens in een boog naar Urk loopt een met slecht doorlatend holocene materiaal opgevulde stroomgeul. De holoceendikte bedraagt hier ongeveer 5 meter. Langs de zuidelijke dijk van de Noordoostpolder loopt een dergelijke geul. Vanaf de Ketelbrug buigt deze af naar het zuidwesten. De holoceendikte loopt in deze geul op van 5 à 6 meter langs de dijk tot 7 meter net ten westen van Swifterbant.

Aan de zuidelijke rand van het modelgebied, iets ten oosten van Dronten neemt de dikte van het holocene dek af tot minder dan 2 meter. Plaatselijk is de dikte van de slecht doorlatende deklaag sterk verminderd door de aanwezigheid van zandduinen in de ondergrond. Dit is onder meer het geval iets ten noorden van de polderdijk bij Schokkerhaven. In figuur 3 zijn de dikten van de holocene deklaag weergegeven.

Onder een gedeelte van het modelgebied komt in de holocene deklaag zeer slecht doorlatend basisveen voor. De verspreiding hiervan is weergegeven in figuur 4.

3.2. Het eerste watervoerend pakket.

Daar waar scheidende lagen ontbreken reikt het eerste watervoerend pakket vanaf de top van het pleistocene zand tot aan de slecht doorlatende basis. Dit is het geval onder het overgrote deel van het modelgebied. De dikte van het eerste watervoerende pakket loopt in dat geval op van ongeveer 200 meter aan de oostgrens van het modelgebied tot 350 meter aan de westgrens. Op plaatsen waar het eerste watervoerend pakket wel van onderen wordt begrensd door een scheidende laag varieert de dikte van 2 tot 12 meter.

3.3. De eerste scheidende laag

Langs zowel de noord- als de zuidgrens van het modelgebied vindt men in de ondergrond een slecht doorlatende afzetting van de Eem-formatie. Een uitloper van deze afzetting loopt onder de Ketelbrug door tot aan Nagele. De slecht doorlatende laag begint op een diepte van rond de 20 meter, terwijl de dikte varieert van 0 tot 4 meter. De ligging van de slecht doorlatende laag is weergegeven in figuur 5.

3.4. Het tweede watervoerend pakket

Een tweede watervoerend pakket bevindt zich per definitie onder een eerste scheidende laag. In het

modelgebied komt deze situatie maar onder een klein gebied voor. De dikte van het tweede watervoerend pakket loopt op van ongeveer 200 meter in het oosten tot ongeveer 330 meter in het westen van het modelgebied.

3.5. De slecht doorlatende basis

De slecht doorlatende basis wordt in het Ketelmeergebied gevormd door slibhoudende fijne pleistocene zanden en slibhoudende fijne pleistocene zanden van de formatie van Maassluis. De diepteligging van de slecht doorlatende basis is slechts globaal bekend. Zij loopt op van NAP - 210 meter bij het Kamperelland tot NAP - 360 meter aan de westgrens van het modelgebied.

4. MODELLERING VAN DE HUIDIGE SITUATIE

Voor de modelberekeningen is gebruik gemaakt van het model MODFLOW. Dit model is in 1984 gepubliceerd door United States Geological Survey, Reston, Virginia. MODFLOW is een drie dimensionaal eindig differentie grondwaterstromingsmodel voor stroming in meerdere lagen. Het model is geschikt voor zowel stationaire als niet stationaire simulaties. De gebruikte versie van het model draait op een normale micro-computer.

De modellering van het Ketelmeergebied is stationair. Er is geen rekening gehouden met de gevolgen van neerslag en verdamping. MODFLOW is niet geschikt voor het modelleren van dijkskwel.

4.1. Schematisering van de geohydrologische situatie

Ten behoeve van het grondwaterstromingsmodel MODFLOW moet de hiervoor beschreven geohydrologische situatie vertaald worden naar rijen, kolommen en lagen. Voor elke op deze manier gevormde cel kan het model berekeningen uitvoeren. De verdeling van het Ketelmeergebied in rijen en kolommen is weergegeven in figuur 6. De breedte van de kolommen varieert van 1000 meter aan de randen van het modelgebied tot 500 meter midden in het Ketelmeer. De breedte van de rijen varieert van 1000 meter aan de randen tot 250 meter midden in het Ketelmeer.

Het rechtstreeks aanhouden van de laagindeling zoals die is omschreven in de paragraaf Geohydrologie van het Ketelmeergebied geeft problemen: In de ondergrond zijn deze lagen niet overal te onderscheiden en op de grenzen van de verspreiding van de eerste scheidende laag zouden grote sprongen in de kD waarde optreden. Voor de modelberekeningen en de bespreking van de resultaten is de volgende laagindeling gebruikt:

- modellaag 1: De holocene deklaag
- modellaag 2: Indien eerste scheidende laag aanwezig: Het gehele eerste watervoerend pakket.
Indien eerste scheidende laag afwezig: Het eerste watervoerend pakket tot op de diepte waar in de omgeving de eerste scheidende laag gevonden wordt, ofwel een diepte rond NAP -20 meter.
- modellaag 3: Indien eerste scheidende laag aanwezig: Het gehele tweede watervoerend pakket tot aan de slecht doorlatende basis.

Indien eerste scheidende laag afwezig: Het eerste watervoerend pakket vanaf de hier-voor beschreven ondergrens van modellaag 2.

Wanneer bedoeld wordt op lagen volgens de bovenstaande definities wordt uitdrukkelijk over modellagen gesproken.

De eerste scheidende laag is in het model verwerkt als een plaatselijk grote verticale weerstand tegen stroming vanuit modellaag 2 naar modellaag 3.

4.2. De opzet van modellaag 1

Modellaag 1, overeenkomend met de holocene deklaag, is gemodelleerd als een laag zonder horizontale waterbeweging. De verticale weerstand naar modellaag 2 is afhankelijk van dikte en opbouw van het holocene pakket. De stijghoogte van alle cellen in laag 1 is constant en gelijk aan polderpeil. Stroming van water vanuit de ondergrond naar modellaag 1 toe (kwel) of stroming van water vanuit modellaag 1 naar de ondergrond (wegzijging) wordt berekend en bijgehouden door het model.

Benodigde invoergegevens voor alle cellen van deze laag zijn:

De grondwaterstand.

De grondwaterstand wordt constant verondersteld en is gelijkgesteld aan polderpeil. Voor het waterpeil in de meren is gerekend met NAP -0,20 m, het zomerpeil. De polderpeilen zijn weergegeven in figuur 2.

De c-waarde.

De c-waarde van modellaag 1 is als volgt berekend: Op basis van nauwkeurige karteringen van de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders is voor alle cellen van het modelgebied de dikte van de holocene deklaag (d) bepaald (zie figuur 3). Uit de dikte is de c-waarde berekend volgens de door de Dienst Grondwater Verkenning - TNO (1987) en de Rijks Geologische Dienst (1988) beschreven methode:

buitendijks:

basisveen afwezig : $c = 1100 * d$

basisveen aanwezig : $c = 22000 + 1100 * d$

binnendijks:

basisveen afwezig : $c = 300 * d$

basisveen aanwezig : $c = 3000 + 150 * d$

De berekende c-waarden zijn weergegeven in figuur 7. Zij komen in grootte goed overeen met door de Rijks Geologische Dienst gepubliceerde waarden.

4.3. De opzet van modellaag 2

Modellaag 2 is gemodelleerd als een goed doorlatend met water verzadigd pakket. De verticale weerstand naar modellaag 3 is gelijk aan de verticale weerstand van de eerste scheidende laag. De stijghoogte van alle cellen van laag 2 die niet aan de rand van het modelgebied liggen is geheel vrij.

Alle cellen aan de rand van modellaag 2 staan in contact met het omliggende gebied. Voor iedere randcel wordt de toestroming of afstroming berekend van of naar een nabijgelegen punt buiten het model met een vaste stijghoogte.

Benodigde invoergegevens voor alle cellen van deze laag zijn:

De aanvangsstijghoogte.

De aanvangsstijghoogte dient slechts voor het berekenen van stijghoogteveranderingen. Voor het modelleren van de huidige situatie zijn stijghoogteveranderingen niet aan de orde. De aanvangsstijghoogte voor het gehele Ketelmeergebied is daarom gemakshalve op NAP 0,00 gesteld.

DekD-waarde.

De kD-waarde van modellaag 2 is berekend met een k waarde van 16,6 m per dag (RGD 1988). De berekende kD-waarden zijn weergegeven in figuur 8.

De weerstand naar de onderliggende laag.

De weerstand voor stroming tussen modellaag 2 en modellaag 3 is gelijk aan de verticale weerstand van de hiervoor genoemde eerste scheidende laag. Daar waar deze laag aanwezig is, is de c-waarde overgenomen

van bestaande kaarten. (RGD 1988). Bij het ontbreken van de eerste scheidende laag is de weerstand verwaarloosbaar klein gekozen. De gebruikte verticale weerstand is weergegeven in figuur 9. De gegevens voor stroming van water tussen randcellen en de omgeving.

Naast elke randcel van modellaag 2 is een punt gelegd met een vaste stijghoogte, overeenkomend met het stijghoogtenpatroon van het omringende gebied. Het doorlaatvermogen voor stroming vanuit het punt met vaste stijghoogte naar de randcel is gelijk gesteld aan de kD -waarde van modellaag 2 ter plaatse van de randcel. Op deze manier wordt zorg gedragen voor het aansluiten van de stijghoogtenpatronen binnen en buiten het modelgebied.

4.4. De opzet van modellaag 3

Modellaag 3 is vrijwel gelijk gemodelleerd als modellaag 2. De stijghoogte van cellen die niet aan de rand van het modelgebied liggen is vrij. De stijghoogte van randcellen is weer gekoppeld aan het stijghoogtenpatroon van de omgeving. Het enige verschil met modellaag 2 is dat modellaag 3 aansluit op de slecht doorlatende basis. Stroming van of naar een onderliggende laag komt dan ook niet voor.

Benodigde invoergegevens voor alle cellen van deze laag zijn:

De aanvangsstijghoogte.

De aanvangsstijghoogte is analoog aan modellaag 2 gemakshalve gesteld op NAP 0,00 m.

De kD -waarde.

De in de berekeningen gebruikte kD -waarde voor modellaag 3 berust op een interpretatie van van gegevens (RGD 1988) over de kD -waarden van het eerste en tweede watervoerend pakket. Lijnen van gelijke kD -waarde van het tweede watervoerend pakket zijn doorgetrokken onder gebieden waar dit pakket ontbreekt door de afwezigheid van een scheidende laag. Bij het doortrekken van deze lijnen is het patroon gevolgd van de lijnen van gelijke kD -waarde van het eerste watervoerend pakket onder gebieden waar dit pakket doorloopt tot aan de ondoorlatende basis. De zo gevonden kD -waarden voor modellaag 3 zijn weergegeven in figuur 10.

De gegevens voor stroming van water tussen randcellen en de omgeving.

De modellering van de aansluiting van modellaag 3 op de omgeving is gelijk van opzet als omschreven voor modellaag 2.

4.5. Zandgaten, stroomgeulen en vaarten

Diepe zandgaten en stroomgeulen in het Ketelmeer kunnen plaatselijk invloed hebben op de infiltratie van oppervlaktewater in het onderliggend pakket. De infiltratie zal afhangen van het stijghoogteverschil, het bodemoppervlak van de insnijding en de weerstand van de bodem.

In de polders lopen enige diepe vaarten die het Pleistoceen aansnijden. Het waterpeil in deze vaarten is veelal lager dan de stijghoogte in het onderliggend pakket. De vaarten zullen in dat geval water onttrekken. De onttrekking is weer afhankelijk van het stijghoogteverschil, het oppervlak van de insnijding en de weerstand van de bodem.

MODFLOW biedt mogelijkheden de invloed van bovengenoemde situaties te simuleren. In figuur 11 is aangegeven in welke cellen in het modelgebied een dergelijke extra onttrekking of infiltratie is opgenomen.

Het oppervlak van de insnijdingen is bepaald aan de hand van grootschalige kaarten. De weerstand van de bodem is minder goed te bepalen. De volgende aannamen zijn gebruikt:

- Zandgaten ouder als 10 jaar zijn zodanig dichtgeslibt dat de c- waarde niet meer afwijkt van de oorspronkelijk weerstand van de waterbodern. Aanwijzingen hiervoor zijn ontleend aan H.J. Winkels, 1988. Dergelijke oude zandgaten zijn dan ook niet in de modellering opgenomen.
- Het toenemen van de weerstand van de bodem van zandgaten verloopt lineair, in tien jaar van nul tot de weerstand van de oorspronkelijke waterbodern. Voor de recente zandgaten in het verlengde van het Keteldiep leidt dit tot een c waarde van 750 dagen.
- De bodern van de IJssel tot aan de splitsing Keteldiep - Kattendiep heeft een weerstand van 100 dagen.
- De bodern van het Keteldiep, waar van 1972 tot 1975 vaargeulverbetering is toegepast, heeft een weerstand van 300 dagen.
- De uitloop van Keteldiep en Kattendiep in het Ketelmeer heeft een weerstand van 600 dagen. Op deze plaatsen is in het verleden zand gezogen.
- De Hoge Vaart en de Lage Vaart in Oostelijk Flevoland hebben een breedte van 35 meter en een weerstand van 20 dagen.
- De Swiftervaart heeft een breedte van 25 meter en een weerstand van 30 dagen.
- De Zwolsevaart in de Noordoostpolder is 35 meter breed en heeft een weerstand van 20 dagen.
- De Urkervaart in de Noordoostpolder is 35 meter breed en heeft een weerstand van 40 dagen.

5. UITKOMSTEN VAN DE MODELBEREKENINGEN VOOR DE HUIDIGE SITUATIE

De modelberekeningen leveren voor alle cellen van het Ketelmeergebied een waarde voor de stijghoogte en een overzicht van de optredende grondwaterstroming door de wanden van de cel. De berekende stijghoogten zijn direct bruikbaar. De berekende grondwaterstroming kan onder meer worden omgezet in gegevens over kwel of wegzijging en een globaal stromingspatroon van het grondwater.

5.1. De stijghoogte

Modellaag 1 is, zoals hiervoor omschreven, gemodelleerd als een laag met voor elke cel een constante grondwaterstand. De door het model berekende stijghoogte blijft onder alle omstandigheden gelijk aan de in figuur 2 opgegeven waarden.

De stijghoogte van modellaag 2 stelt zich vrij in. Op basis van de berekende stijghoogten is een isohypsenkaart getekend. Deze is weergegeven in figuur 12. Globaal neemt de stijghoogte af van NAP -1,0 meter in het zuidoosten van het modelgebied, onder het Kampereiland, tot NAP - 5,0 meter onder het Ketelmeer bij de Ketelbrug. Naar de westrand van het modelgebied neemt de stijghoogte weer toe tot NAP - 4,0 meter. Vanaf het Ketelmeer de polders in neemt de stijghoogte af tot rond polderpeil. Aan de oostgrens van het modelgebied is duidelijk de invloed van de diepe polder De Koekoek te zien.

De stijghoogte van modellaag 3 stelt zich evenals die van modellaag 2 vrij in. De bijbehorende isohypsenkaart is weergegeven in figuur 13. Bij vergelijking van het isohypsenpatroon van modellaag 2 en 3 blijkt dat er weinig verschillen te vinden zijn. Dit is niet verwonderlijk omdat onder het overgrote deel van het modelgebied beide lagen samen het eerste watervoerend pakket (in RGD termen) vormen. Afwijkingen tussen het stijghoogtenpatroon van beide modellen treden enkel daar op waar de eerste scheidende laag van invloed is op het verticale watertransport.

De door het model berekende stijghoogten kunnen worden vergeleken met waargenomen stijghoogten in peilfilters in het betreffende pakket. Dit is gedaan aan de hand van het gemiddelde van de waargenomen stijghoogten over 1987. De stijghoogte en locatie van de peilfilters, in combinatie met het stijghoogtenpatroon van modellaag 3, is weergegeven in figuur 14. Vrijwel alle waargenomen stijghoogten passen met een marge van 15 à 20 cm bij het berekende stijghoogtenpatroon. De vrij forse afwijking van peilfilter 21C106 kan verklaard worden door de plaatsing van dit filter zeer dicht bij de Hoge- en Lage Vaart bij Ketelhaven.

5.2. Kwel en Wegzijging

Van alle cellen van modellaag 1 is bekend hoeveel water het model aan de cel toevoegt of onttrekt om de stijghoogte gelijk te houden aan het opgegeven polderpeil. Deze hoeveelheid water, gedeeld door het oppervlak van de cellen, is gelijk aan de kwel of wegzijging. De op deze manier berekende kwel of wegzijging voor het gehele modelgebied is weergegeven in figuur 15. In deze figuur is geen rekening gehouden met plaatselijk grote waarden voor infiltratie of wegzijging ten gevolge van geulen, putten of vaarten.

In het grootste deel van de Noordoostpolder treedt een lichte kwel op van 0 tot 0,5 mm per dag. Ten westen van de pellscheiding tussen de hoge afdeling (NAP - 5,70) en de lage afdeling (NAP - 4,70) loopt de kwel iets op, terwijl ten oosten hiervan enige infiltratie optreedt. Bij Urk loopt de kwel op tot plaatselijk 2,0 mm per dag, terwijl vlak daarbij in het IJsselmeer infiltratie optreedt tot de zelfde waarde. Dit heeft te maken met een plaatselijk zeer lage weerstand van het holocene dek (zie figuur 7). Iets dergelijks doet zich voor iets zuidelijker

langs de IJsselmeerdijk. Aan de oostzijde van de Noordoostpolder is de kwel vrij hoog onder invloed van de hoge stijghoogte in het onderliggend pakket en de kleinere weerstand van de holocene deklaag.

Op het oude land rond Kampen treedt een forse wegzijging op tot 1,5 mm per dag. Dit is een gevolg van de hoge polderpailen. Onder de diepe polder De Koekoek gaat de wegzijging over in kwel.

In het westelijk deel van Oostelijk Flevoland varieert de kwel van 0 tot 0,5 mm per dag. Naar het oosten toe neemt de kwel toe tot plaatselijk 1,5 mm per dag. Rond Dronten treedt infiltratie op, plaatselijk tot vrij hoge waarden, als gevolg van dunne plekken in het holocene dek.

In het patroon van wegzijging onder IJsselmeer en Ketelmeer is duidelijk de invloed van het basisveen te herkennen. Waar het basisveen aanwezig is (zie figuur 4) is de wegzijging duidelijk kleiner dan elders. Onder het oostelijk deel van het Ketelmeer bedraagt de infiltratie maximaal 1,5 mm per dag. Hier ontbreekt het basisveen, terwijl het holocene dek iets dunner is dan elders.

Uitgeplitst in deelgebieden is het totaal van kwel en wegzijging weergegeven in tabel 1.

Tabel 1. Totale kwel en wegzijging per deelgebied (voorzover dat binnen het modelgebied valt).

deelgebied	Oppervlakte (km ²)	kwel (m ³ /dag)	wegzijging (m ³ /dag)
Noordoostpolder	170	87900	5700
Oostelijk Flevoland	181	73700	4100
Oude land	82	2000	63500
IJsselmeer	35	0	16300
Ketelmeer	38	0	26200
Zwartemeer	9	0	3400
Vossemeer	5	0	2300
totaal modelgebied	520	163600	121500

5.3. Zandgaten, stroomgeulen en vaarten

MODFLOW berekent voor elke cel waarin extra toevoer of onttrekking van water optreedt door stroomgeulen, vaarten of zandgaten de extra waterstromen uit. Het resultaat van deze berekening is, samengevoegd tot enkele grotere eenheden, weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Infiltratie en onttrekking van water door stroomgeulen, zandgaten en vaarten.

NB Een negatieve waarde staat voor onttrekking van water aan het pakket, een positieve waarde voor toevoeging van water aan het pakket.

Hoge vaart	-	2500 m ³ /dag
Lage vaart	-	10400 m ³ /dag
Swiftervaart	-	2900 m ³ /dag
totaal Oostelijk Flevoland	-	15800 m ³ /dag
Urkervaart	-	3600 m ³ /dag
Zwolsevaart	-	5000 m ³ /dag
totaal Noordoostpolder	-	8600 m ³ /dag
Keteldiep	+	4400 m ³ /dag
uitloop Keteldiep	+	2000 m ³ /dag
uitloop Kattendiep	+	2100 m ³ /dag
zandgaten	+	500 m ³ /dag
totaal Ketelmeer	+	9000 m ³ /dag
IJssel	+	16900 m ³ /dag
totaal model infiltratie	+	25900 m ³ /dag
totaal model onttrekking	-	24400 m ³ /dag

De in de modellering opgenomen vaarten vangen een aanzienlijk deel van de kwel op. In de Noordoostpolder 9 % en in Oostelijk Flevoland 18 %.

5.4. Stromingspatronen

Voor elke cel in het Ketelmeergebied wordt berekend hoeveel grondwater er per tijdseenheid door de begren- zende vlakken stroomt. Het debiet gedeeld door de afmetingen van de wand van de cel (= celbreedte x laagdikte) geeft de filtersnelheid voor stroming door de betreffende celwand. Deze bewerking is uitgevoerd voor stroming in het horizontale vlak. Stroming langs de lijn noord - zuid en stroming langs de lijn oost - west, opgeteld als vectoren, geeft als resultante een vector met een richting gelijk aan de stromingsrichting en een lengte proportioneel met de grootte van de filtersnelheid. De filtersnelheid gedeeld door de porositeit van het pakket geeft de effectieve grondwatersnelheid. Cellen aan de rand van het model zijn buiten beschouwing gelaten.

Tussen de cellen van modellaag 1 treedt geen horizontale stroming op. Er is daarom geen stromings patroon te bepalen.

Het stromings patroon voor modellaag 2 is weergegeven in figuur 16. De maximale filtersnelheid op de rand van het Ketelmeer en de Noordoostpolder is ongeveer 6 mm per dag. De maximale filtersnelheid op de rand

tussen Ketelmeer en Oostelijk Flevoland is ongeveer 9 mm per dag. Bij een geschatte porositeit van 0,30 geeft dit een effectieve grondwatersnelheid van 20 mm per dag (7,30 m per jaar) naar de Noordoostpolder en 30 mm per dag (11,0 m per jaar) naar Oostelijk Flevoland.

Het stromings patroon voor modellaag 3 is weergegeven in figuur 17. De maximale filtersnelheid op de rand van het Ketelmeer en de Noordoostpolder is ongeveer 12 mm per dag. De maximale filtersnelheid op de rand tussen Ketelmeer en Oostelijk Flevoland is ongeveer 17 mm per dag. Bij een geschatte porositeit van 0,30 geeft dit een effectieve grondwatersnelheid van 40 mm per dag (14,6 m per jaar) naar de Noordoostpolder en 57 mm per dag (20,8 m per jaar) naar Oostelijk Flevoland.

Het stromingspatroon van de modellen 2 en 3 is in grote lijnen gelijk. Waar deze lagen gescheiden worden door het voorkomen van een eerste scheidende laag loopt het stromingspatroon van modellaag 2 iets anders. Het water stroomt boven deze scheidingslaag af. Het verschil in grootte tussen de filtersnelheid in beide modellen is het gevolg van het verschil in doorlatendheid tussen deze lagen.

In het grondwater stromingspatroon van het modelgebied is duidelijk een scheiding te trekken tussen een noordelijk deel waar de stroming gericht is op het midden van de Noordoostpolder en een zuidelijk deel waar de stroming gericht is op het centrum van Oostelijk Flevoland. Deze scheiding loopt ruwweg vanaf het Kattendiep door het Ketelmeer richting de Ketelbrug. De scheidingslijn is getekend in figuur 17.

Aan de oostgrens van het modelgebied is de invloed van de polder De Koekoek goed te zien: een deel van de stroming is hier oostelijk gericht. Noordelijk van deze diepe polder stroomt grondwater van buiten het modelgebied naar de Noordoostpolder. Aan de westgrens van het modelgebied stroomt grondwater van onder het IJsselmeer richting de beide polders.

In Oostelijk Flevoland is de Lage Vaart in het stromingspatroon terug te vinden. De oostzijde van Oostelijk Flevoland ontvangt grondwater vanuit de richting van het oude land ten zuiden van Kampen. Het oostelijk deel van de Noordoostpolder krijgt water uit de richting van het Zwarte Meer en het Kampereiland.

5.5. Combinatie van het stromingspatroon met andere berekende gegevens

Het vergelijken van de berekende kwel met het stromingspatroon geeft een indruk over de herkomst van het in de polders opkwellende water.

Kwelwater langs de noordelijke rand van Oostelijk Flevoland komt vanuit het Ketelmeer. Kwelwater langs de zuidelijke rand van de Noordoostpolder (ruwweg ten westen van Schokland) eveneens.

Kwelwater aan de westzijde van de polders komt vanuit het IJsselmeer. Een tweetal meer doorlatende plekken in het holocene dek vergroot de optredende grondwaterstroming hier.

Kwel aan de lage zijde van de peilscheidingen tussen de hoge en de lage afdelingen van de polders komt gedeeltelijk van onder de hoge afdelingen.

De sterke kwel aan de oostzijde van de Noordoostpolder komt vanaf het oude land ten oosten van het modelgebied.

Het grootste deel van de infiltratie door de bodem van het Ketelmeer vindt plaats ten zuiden van de scheidingslijn tussen stroming naar het noorden en stroming naar het zuiden. (Vergelijk de figuren 16 en 17 met figuur 15.) Het grootste deel van de 26200 m³ per dag door de bodem infiltrerende Ketelmeerwater zal naar Oostelijk Flevoland afstromen.

De infiltratie van water door de insnijdingen in de Ketelmeerbodem vindt eveneens grotendeels plaats bezuiden de bovengenoemde scheidinglijn. Van de 9000 m³ per dag op deze manier infiltrerend Ketelmeerwater zal het grootste deel richting Oostelijk Flevoland afstromen.

Waterbalansberekeningen voor de gehele ondergrond van het Ketelmeer wijzen uit dat van al het water dat de ondergrond van het Ketelmeergebied instroomt 35 % afstroomt richting de Noordoostpolder en 65 % richting Oostelijk Flevoland. Deze verhouding toegepast op de bovengenoemde hoeveelheden geeft een stroming richting de Noordoostpolder van $0,35 \times 26200 \text{ m}^3$ door de bodem geïnfiltreerd water plus $0,35 \times 9000 \text{ m}^3$ door insnijdingen geïnfiltreerd water is 12320 m³ per dag. Richting Oostelijk Flevoland is de stroming $0,65 \times 26200 \text{ m}^3$ door de bodem geïnfiltreerd water plus $0,65 \times 9000 \text{ m}^3$ door insnijdingen geïnfiltreerd water is 22880 m³ per dag.

De stroming van het geïnfiltreerde ijsselwater is moeilijker te volgen. Een deel verlaat het modelgebied richting polder De Koekoek, een deel stroomt richting Oostelijk Flevoland en een deel stroomt richting de Noordoostpolder. Een ruwe schatting van 40 % voor De Koekoek en 30 % voor zowel Oostelijk Flevoland als de Noordoostpolder geeft een extra stroming van 5100 m³ per dag voor elk van deze twee polders.

6. CONCLUSIES

Uit de modelberekeningen hiervoor beschreven voor het simuleren van de huidige situatie in het Ketelmeergebied kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De gebruikte modellering levert een stijghoogtenpatroon dat goed overeenkomt met in peilfilters waargenomen stijghoogten.
- Door de niet doorsneden bodem van het Ketelmeer infiltreert water en wel ongeveer 26200 m³ per dag. Deze infiltratie vindt voornamelijk plaats aan de zuidzijde van het Ketelmeer (zie figuur 15).
- In de huidige modellering dragen de insnijdingen van het Keteldiep met de uitloop daarvan in het Ketelmeer, het Kattendiep en de recente zandgaten fors bij aan de infiltratie van Ketelmeerwater in het watervoevend pakket. De door deze insnijdingen geïnfiltreerde hoeveelheid is 9000 m³ per dag. Infiltratie door insnijdingen vindt voornamelijk plaats in het zuidelijk deel van het Ketelmeer.
- Van de totale hoeveelheid geïnfiltreerd ketelmeerwater (door bodem en insnijdingen) stroomt 35 %, ofwel 12320 m³ per dag, richting de Noordoostpolder en 65 %, ofwel 22880 m³ per dag, richting Oostelijk Flevoland.
- De maximale filtersnelheid in modellaag 2 op de overgang tussen Ketelmeer en Noordoostpolder is ongeveer 6 mm per dag. De maximale filtersnelheid in modellaag 2 op de rand van het Ketelmeer en Oostelijk Flevoland is ongeveer 9 mm per dag. Met een geschatte porositeit van 0,30 geeft dit een effectieve grondwatersnelheid van 20 mm per dag bij de Noordoostpolder en 30 mm per dag bij Oostelijk Flevoland. Berekend op jaarbasis is dit 7,3 meter richting de Noordoostpolder en 11,0 meter richting Oostelijk Flevoland.
- De maximale filtersnelheid in modellaag 3 op de overgang tussen Ketelmeer en Noordoostpolder is ongeveer 12 mm per dag. De maximale filtersnelheid in modellaag 2 op de rand van het Ketelmeer en Oostelijk Flevoland is ongeveer 17 mm per dag. Met een geschatte porositeit van 0,30 geeft dit een effectieve grondwatersnelheid van 40 mm per dag bij de Noordoostpolder en 57 mm per dag bij Oostelijk Flevoland. Berekend op jaarbasis is dit 14,6 meter richting de Noordoostpolder en 20,8 meter richting Oostelijk Flevoland.
- In de huidige modellering infiltreert 16900 m³ water per dag uit de IJssel. Dit water stroomt naar polder De Koekoek, de Noordoostpolder en Oostelijk Flevoland in een ruw geschatte verhouding van 30-40-40.
- De vaarten in de polders ondervangen in de huidige modellering een fors deel van de kwel: Voor de Noordoostpolder 9 %, voor Oostelijk Flevoland 18 %.

7. LITERATUUROPGAVE

Dienst Grondwater Verkenning - TNO, Delft/Oosterwolde, 1987, Project geo(hydro)logische inventarisatie IJsselmeergebied, Voorstel ter bepaling van de doorlatendheid van watervoerende pakketten en scheidende lagen.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, projectgroep Ketelmeer, Lelystad, oktober 1988, Integraal waterbeheer Ketelmeer, een eerste inventarisatie van de waterbodempkwaliteit van het Ketelmeer.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 1987, Geologische en geohydrologische inventarisatie van het IJsselmeergebied, rapportage van de werkzaamheden in 1987.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 1988, Geologische en geohydrologische inventarisatie van het IJsselmeergebied, rapportage van de werkzaamheden in 1988.

Winkels, H.J., Lelystad, november 1988, Voorlopige rapportage over de bodemgesteldheid en de kwaliteit van de bodem van het Ketelmeer.

8. LIJST VAN IN DE TEKST OPGENOMEN TABELLEN

Tabel 1 Totale kwel en wegzijging per deelgebied.

Tabel 2 Infiltratie en onttrekking van water door stroomgeulen, zandgaten en vaarten.

9. LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 Geografie van het Ketelmeergebied.

Figuur 2 Overzicht van polderpeilen en waterpeilen in het Ketelmeergebied.

Figuur 3 Dikte van de holocene deklaag in het Ketelmeergebied.

Figuur 4 De verspreiding van het basisveen in het Ketelmeergebied.

Figuur 5 Verspreiding van de eerste scheidende laag in het Ketelmeergebied.

Figuur 6 De verdeling van het Ketelmeergebied in rijen en kolommen.

Figuur 7 C-waarden van modellaag 1.

Figuur 8 kD-waarden van modellaag 2.

Figuur 9 C-waarden van de eerste scheidende laag.

Figuur 10 kD-waarden van modellaag 3.

Figuur 11 Cellen waarin extra infiltratie of onttrekking van water mogelijk is uit stroomgeulen, zandgaten of vaarten.

Figuur 12 Stijghoogtenpatroon modellaag 2. Berekend door MODFLOW voor de huidige situatie.

Figuur 13 Stijghoogtenpatroon modellaag 3. Berekend door MODFLOW voor de huidige situatie.

Figuur 14 Combinatie van berekende stijghoogten met gemeten stijghoogten.

Figuur 15 Kwel in wegzijging in het Ketelmeergebied, MODFLOW huidige situatie.

Figuur 16 Het globale stromingspatroon van modellaag 2.

Figuur 17 Het globale stromingspatroon van modellaag 3.

BIJLAGE 1

Figuren bij geohydrologisch modelonderzoek Ketelmeergebied.

BIJLAGE 2

Samenstelling van de projectgroep Ketelmeer.

Ir. E.J.van de Kaa
Ing. J.S. Kramer
Ir. J. Driebergen
Ir. M.J.H.P. Pinkers
Ir. E. Schultz

Rijkswaterstaat, directie Flevoland

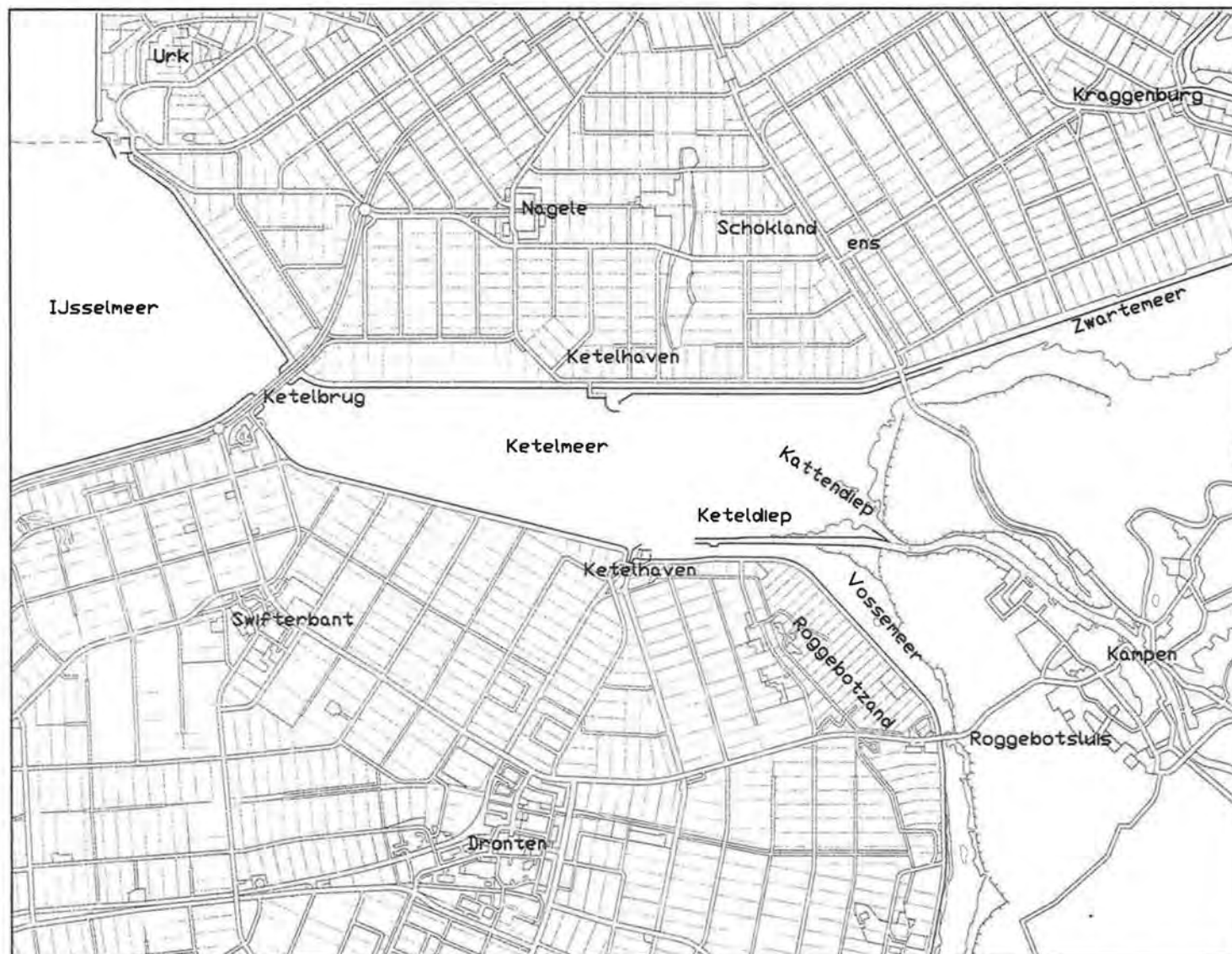
Drs. F.A.M. Claessen
Mevr. Dr.Ir. T.Reitsma
Dr. W.A. Bruggeman
Drs. M.A. van der Gaag

Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/RIZA

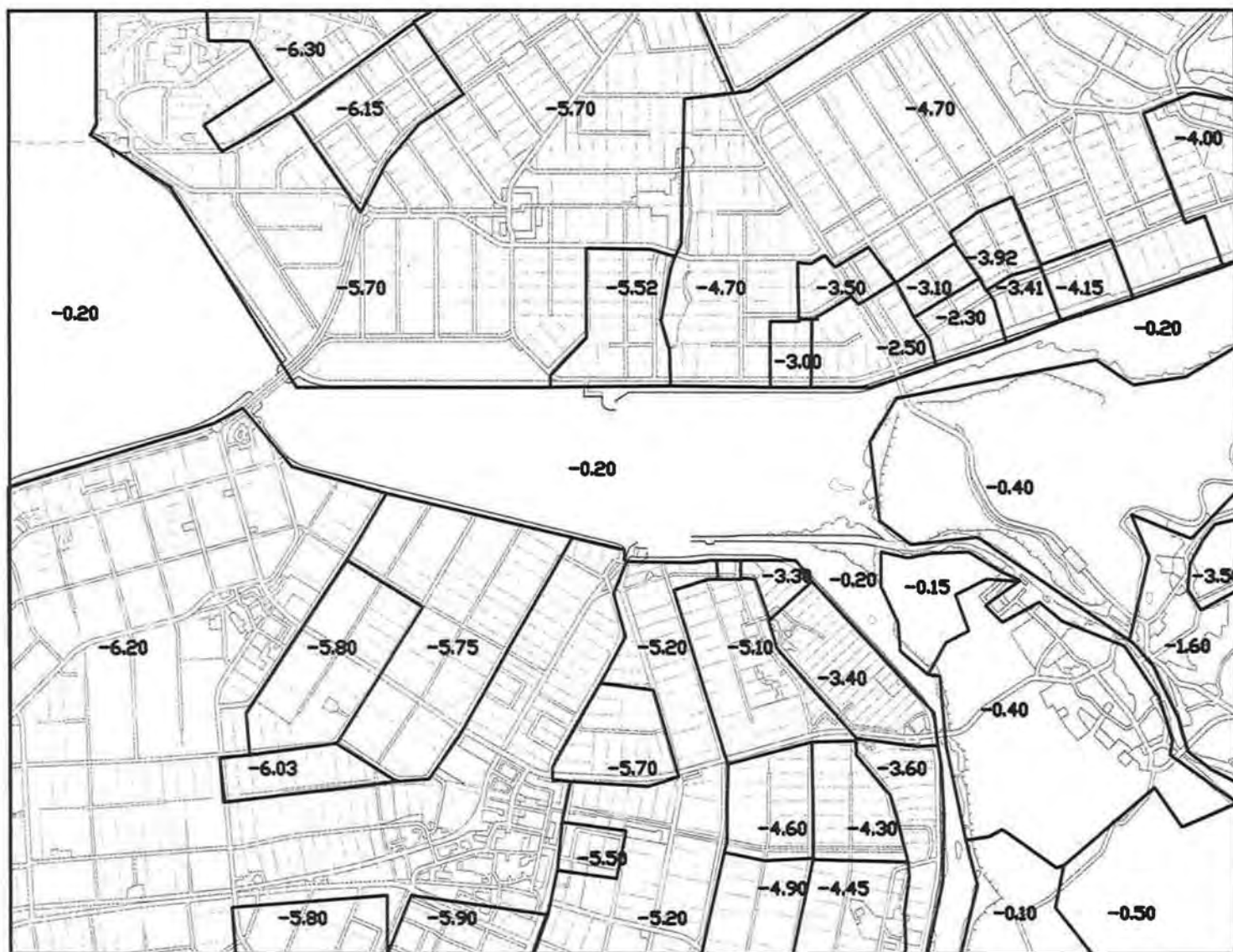
Ir. D. van der Graaf
Ir. S.H. Plantenga
Ir. H.F.J. Peters

Rijkswaterstaat, directie Gelderland
Rijkswaterstaat, Hoofddirectie
Rijkswaterstaat, Bureau Waterbodern

Figuur 1.
Geografie van het Ketelmeergebied.



Figuur 2.
Overzicht van polderpeilen en waterpeilen in het Ketelmeergebied.



Figuur 3.
Dikte van de holocene deklaag in het Ketelmeergebied.
Bron: karteringen door de voormalige Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.



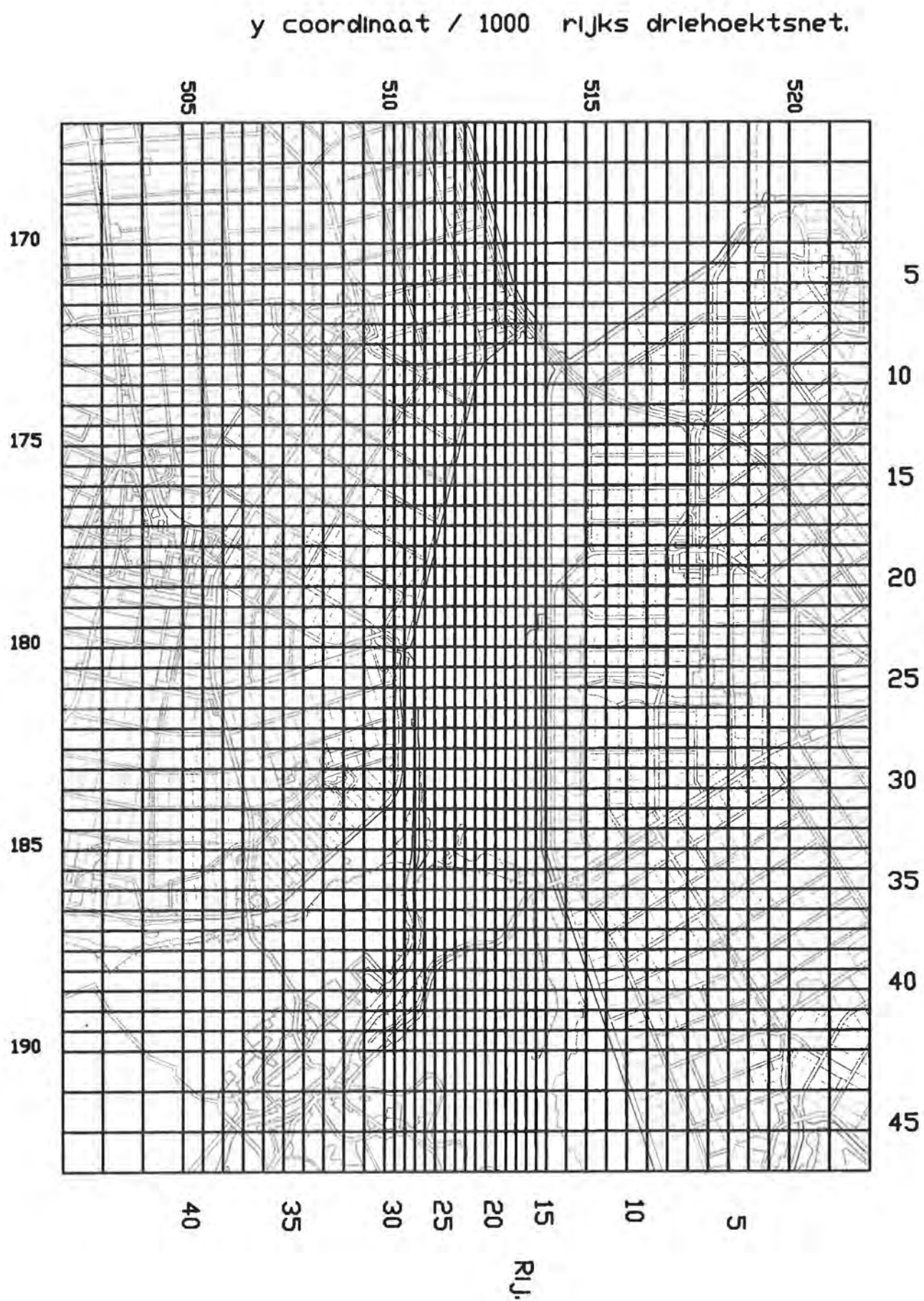
Figuur 4.
De verspreiding van basisveen in het Ketelmeergebied.
Bron: Rijks Geologische Dienst 1988.



Figuur 5
Verspreiding van de eerste scheidende laag in het Ketelmeergebied.
Bron: Rijks Geologische Dienst 1988.

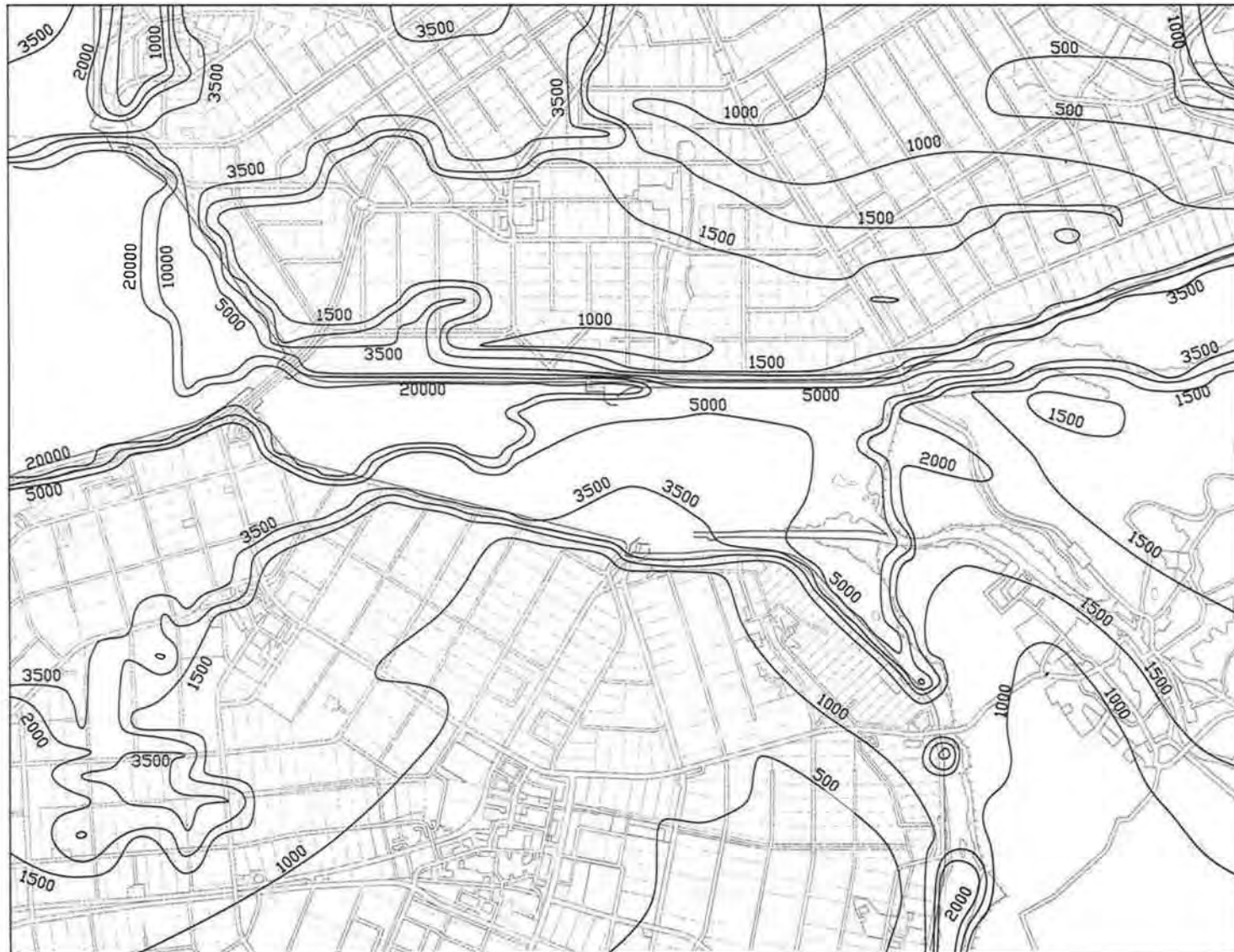


Figuur 6.
De verdeling van het Ketelmeergebied in rijen en kolommen.



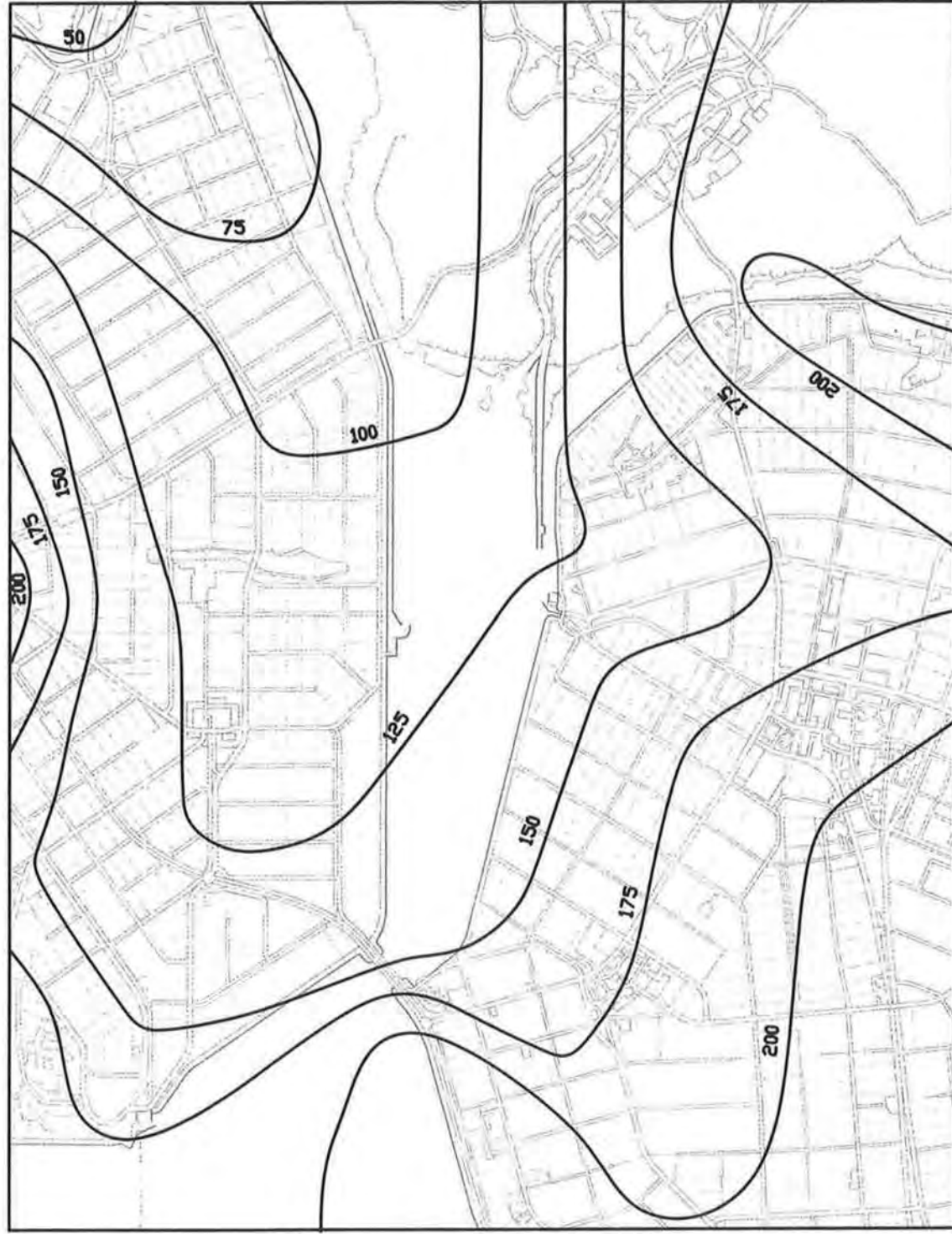
Figuur 7.

c - Waarden modellaag 1 (het holocene dek) berekend volgens de in de tekst beschreven methode.



Figuur 8.

kD modellaag 2. berekend uit de dikte D en $k = 16.6$ Boven een eerste
scheidende laag gelijk aan gegevens RGD 1988. Elders interpolatie. kD in m² per dag



Figuur 9.

c - waarde van de eerste scheidende laag. (= weerstand tegen stroming tussen modellaag 2 en 3. Bron RGD 1988. c in dagen.



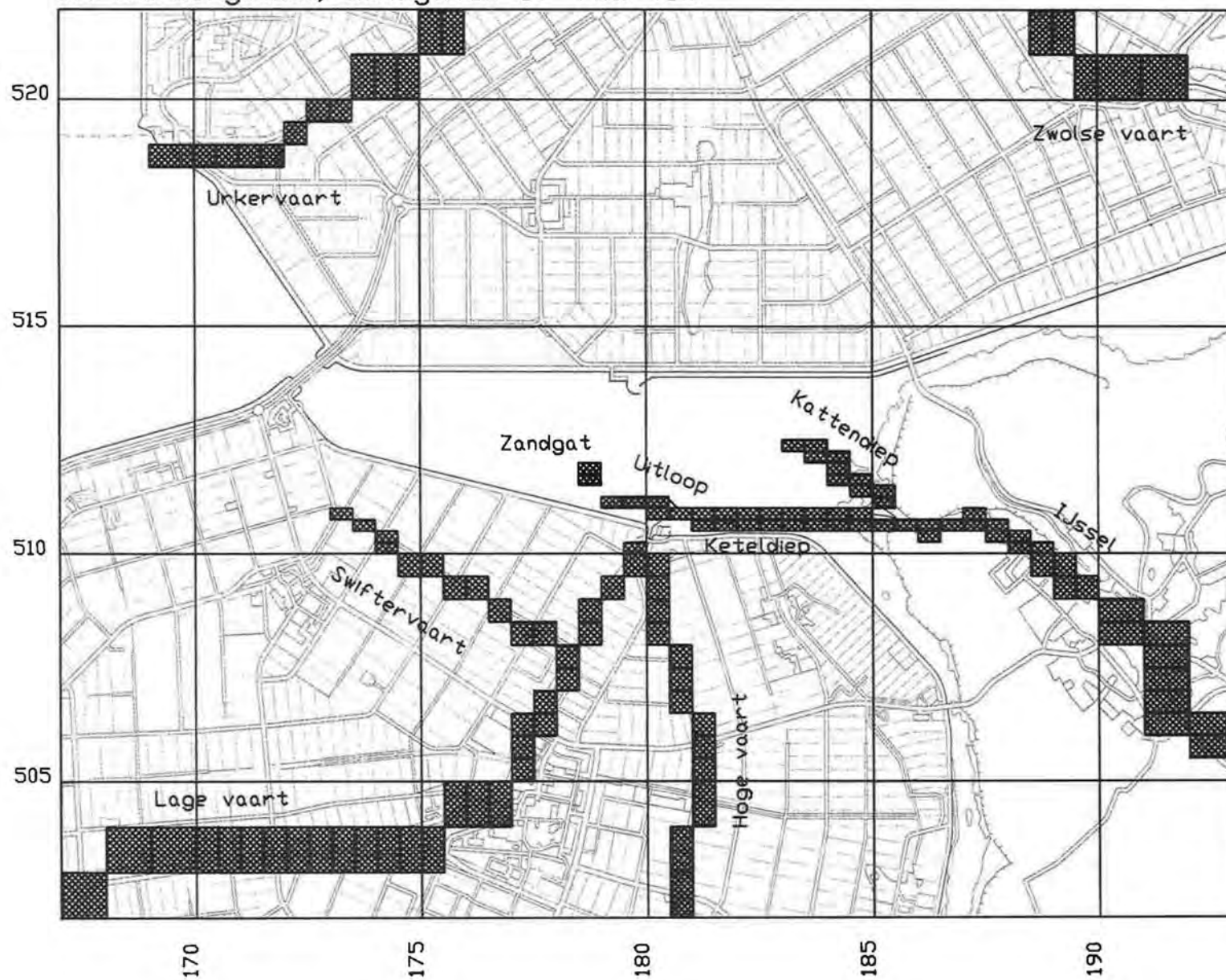
Figuur 10.

kd modellaag 3. Bron: interpretatie van gegevens RGD 1988 over de kd van het eerste en tweede watervoerend pakket. (zie tekst) kd in m² per dag.



Figuur 11.

Cellen waarin extra infiltratie of onttrekking van water mogelijk is uit stroomgeulen, zandgaten of vaarten.

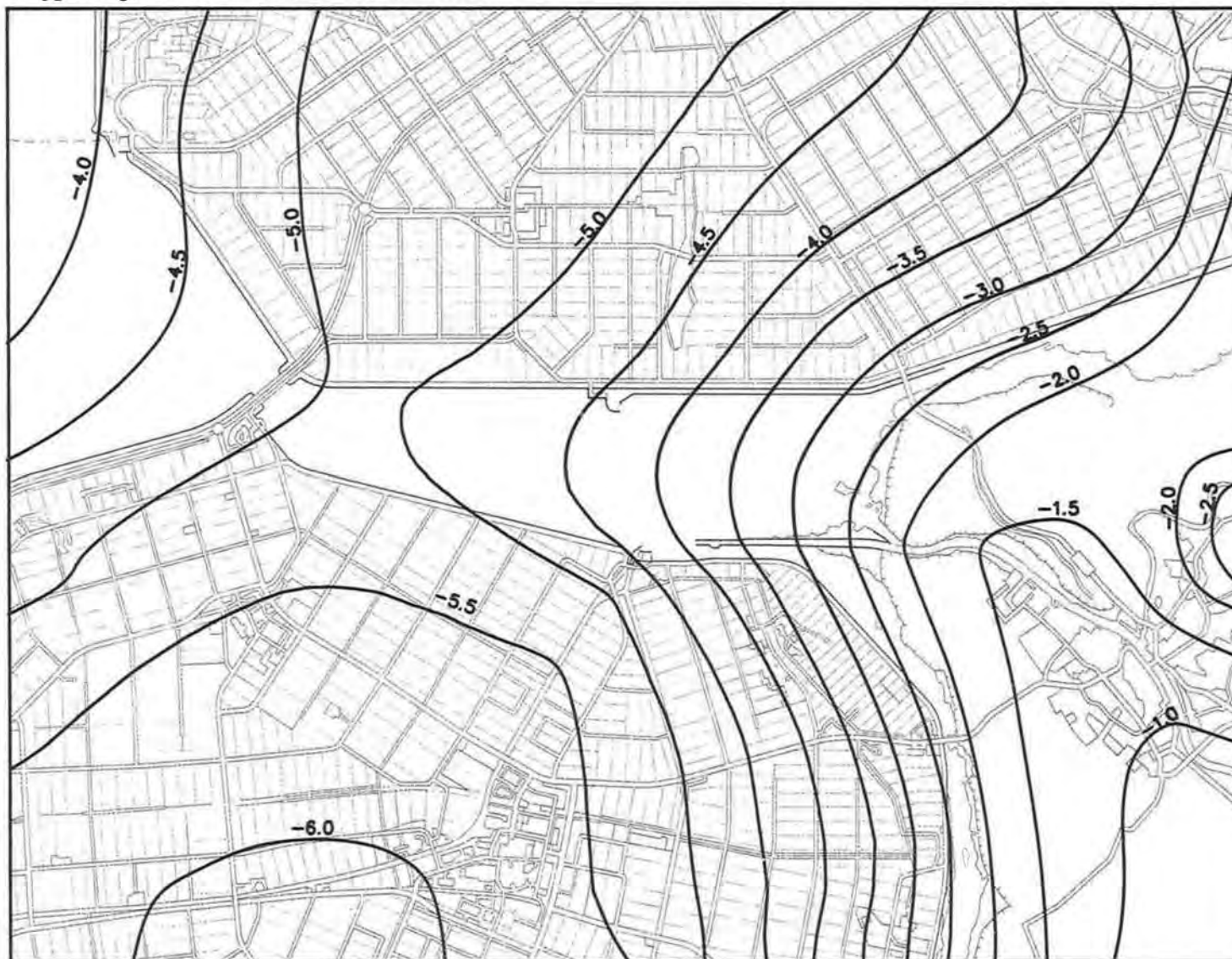


Figuur 12.
Stijghoogtenpatroon modellaag 2. Berekend door MODFLOW voor huidige situatie.
Stijghoogten in meters t.o.v. NAP.



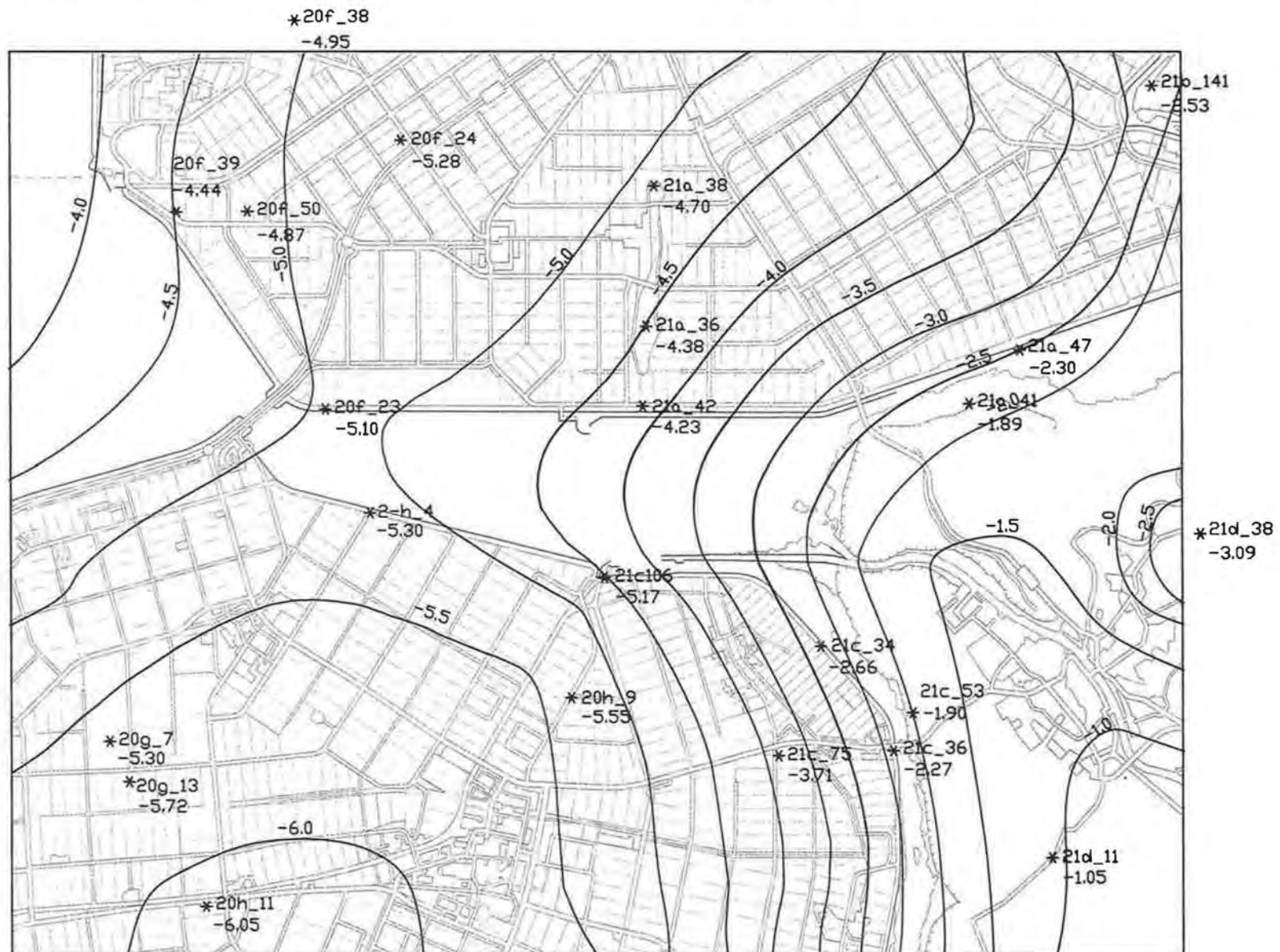
Figuur 13.

Stijghoogtenpatroon modellaag 3. Berekend door MODFLOW voor huidige situatie.
Stijghoogten in meters t.o.v. NAP.



Figuur 14.

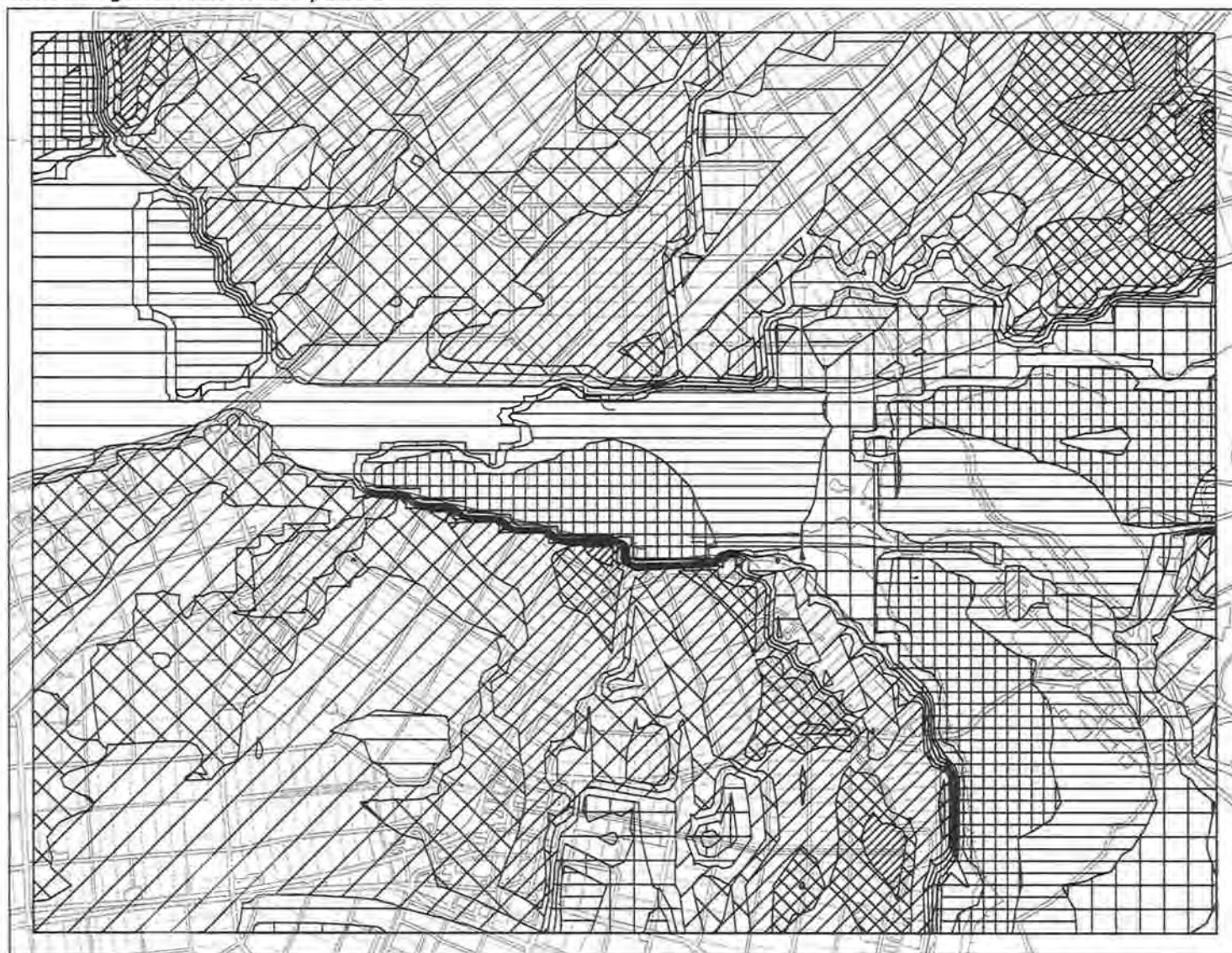
Stijghoogtenpatroon modellaag 3. Berekend door MODFLOW voor huidige situatie.
Stijghoogten in meters t.o.v. NAP. Gemiddelde stijghoogten in filters over 1987.



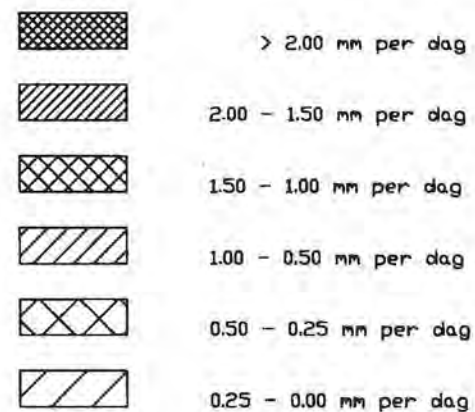
Figuur 15.

Kwel en wegzijging in het Ketelmeergebied, berekend door MODFLOW voor de huidige situatie. Eenheid : mm per dag.

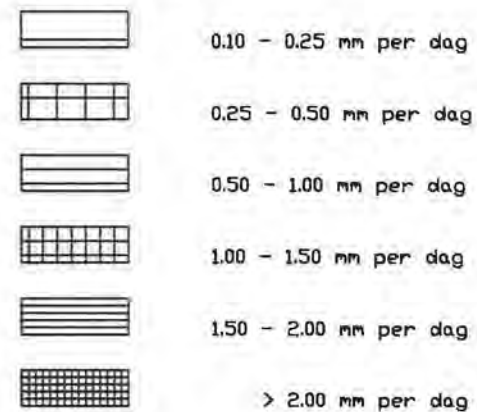
Exclusief geulen, vaarten en putten.



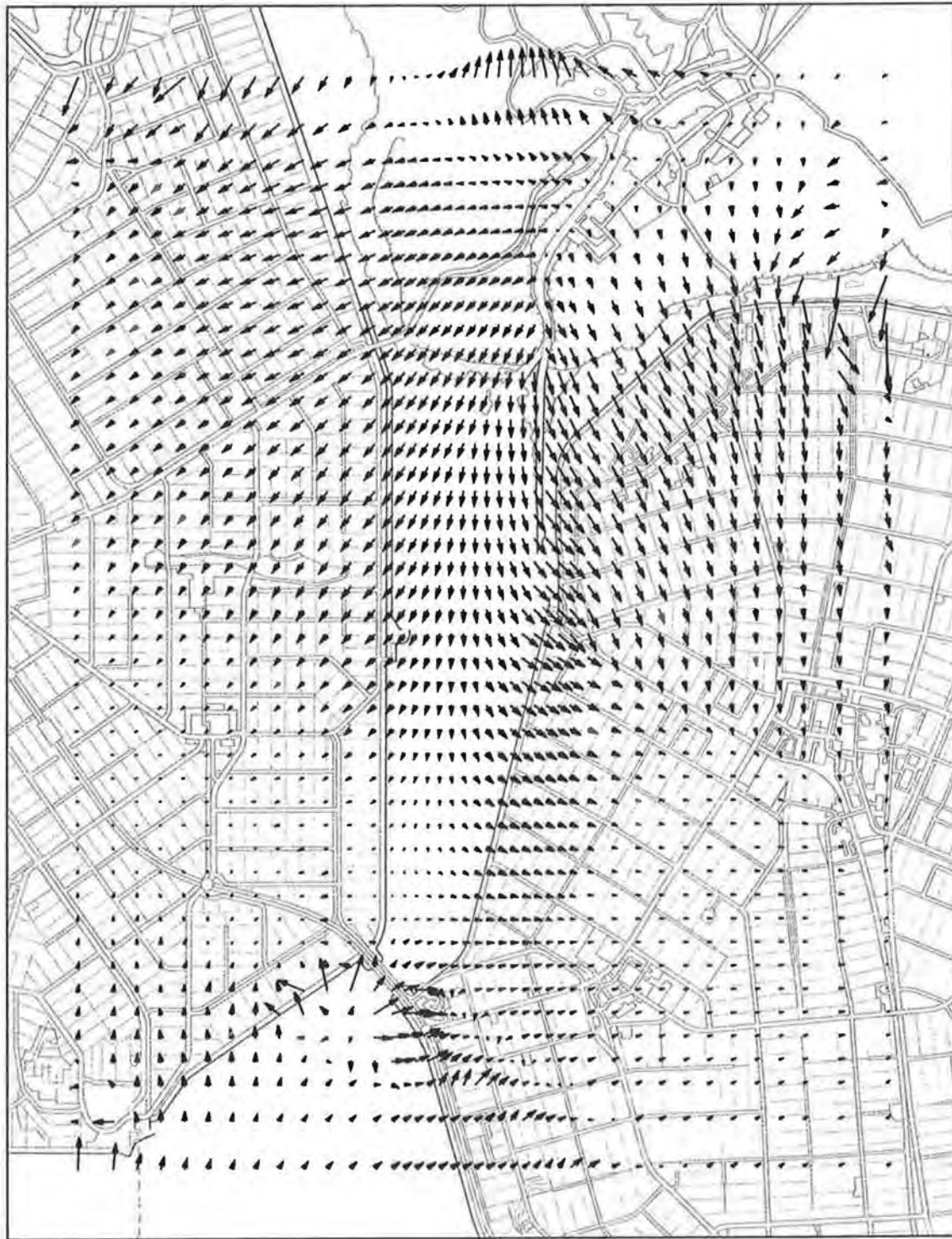
Kwel:



Wegzijging:



Figuur 16.
Het globale stromingspatroon van modellaag 2. MODFLOW huidige situatie.
De maatstreep komt overeen met 0.01 m / dag.



Figuur 17.

Het globale stromingspatroon van modellaag 3. MODFLOW huidige situatie.

De maatstreep komt overeen met 0.01 m / dag.

