Het grondwateronderzoek voor de drinkwatervoorziening van Khulna

Een regionaal geohydrologisch onderzoek ten behoeve van de stad Khulna in het zuidwesten van Bangladesh.

Inleiding

Bangladesh, sedert enige jaren een concentratieland voor Nederlandse ontwikkelingssamenwerking, ligt bijna geheel in het deltagebied van de rivieren de Ganges en de Brahmaputra (afb. 1). Vooral in het vlakke zuiden kan van een actieve delta gesproken worden; meanderende rivieren verleggen regelmatig hun loop en veroorzaken overstromingen. De dorpen en wegen liggen op de iets hogere delen, bestaande uit oeverwallen en stroomruggen van vroegere en recente



DR. W. GEIRNAERT
Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO BV

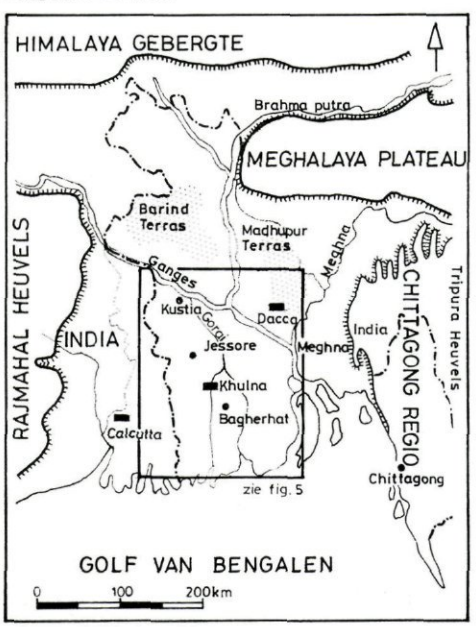


IR. J. S. RUS
Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO BV

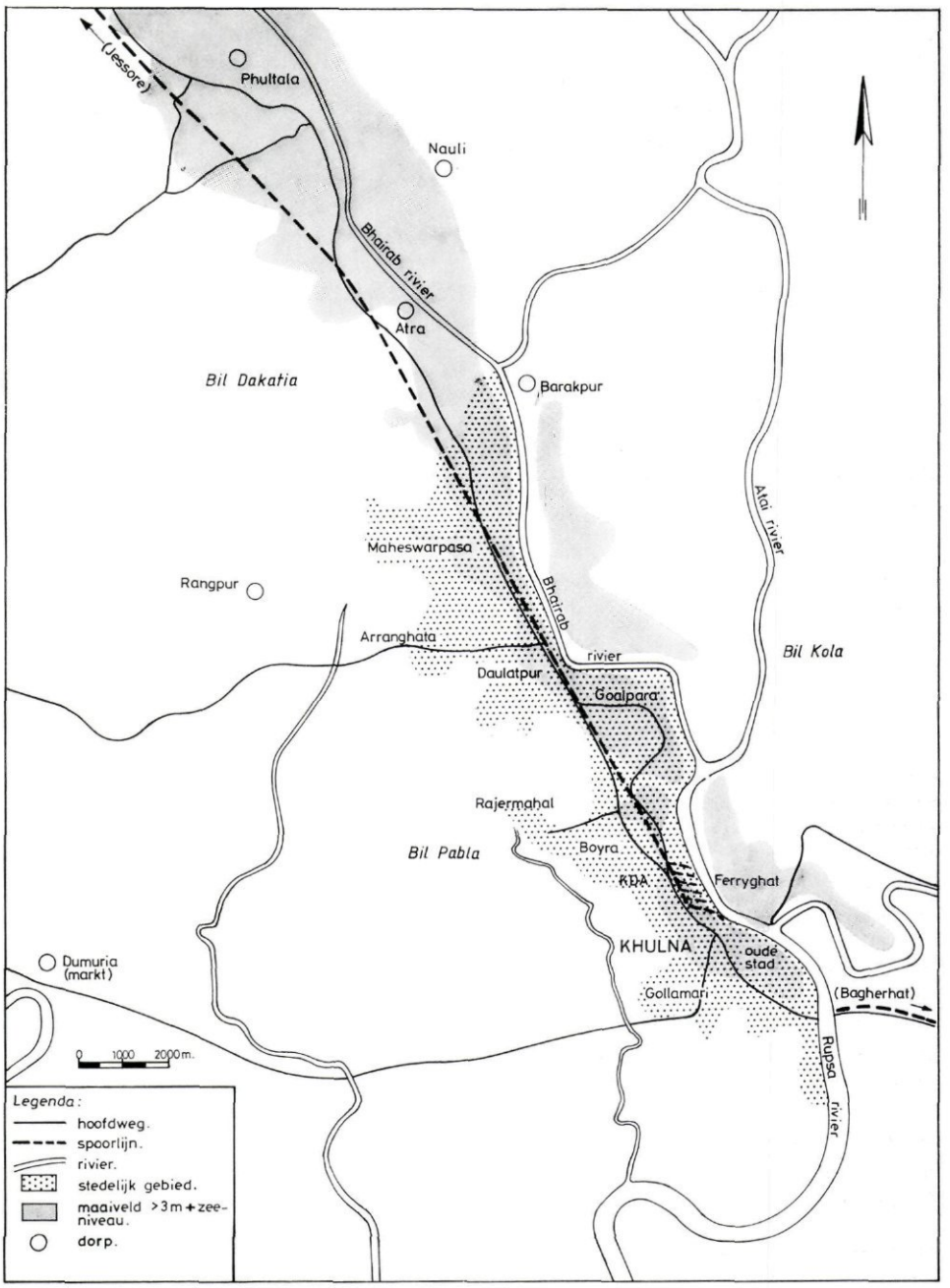
rivierlopen. Khulna ligt op een enige kilometers brede rug langs de Bhairab rivier, waardoor de stad een lintvormig karakter heeft (afb. 2). Langs de kust ligt een ca. 80 km brede moerassige zone met mangroven begroeid, de Sunderbans genaamd. Khulna ligt op de grens van dit mangrove woud en de recente delta, een topografisch iets hoger gelegen vlakte. In tijden van lage rivierafvoeren kan de zee diep het land binnendringen (afb. 3). Deze situatie wordt nog versterkt door de steeds minder wordende afvoer in het droge seizoen door het gebruik van rivierwater ten behoeve van de irrigatie in India en Nepal. Zo is de afvoer van de Ganges merkbaar minder geworden nadat in 1976 de Faracca dam in India gereed kwam. De afvoeren van de grote rivieren zijn voor een groot gedeelte afkomstig uit India en Nepal. Ook heeft het in cultuur brengen van grote gebieden in het stroomgebied van de Ganges en Brahmaputra in India en Nepal een versterkte erosie tot gevolg. Dit uit zich in een hogere winterafvoer en een hogere sedimentlast van de rivieren, waardoor zij sneller buiten de oevers treden.

De regenval in het zuiden van de delta in de omgeving van Khulna bedraagt ca. 1700 mm/jaar. Het regenseizoen loopt van mei tot oktober (afb. 3). De lagere delen staan door het ontbreken van relief dan meestal geheel blank. Deze lage gebieden, 'backswamps' of 'bils' genoemd, worden gebruikt voor de verbouw van rijst.

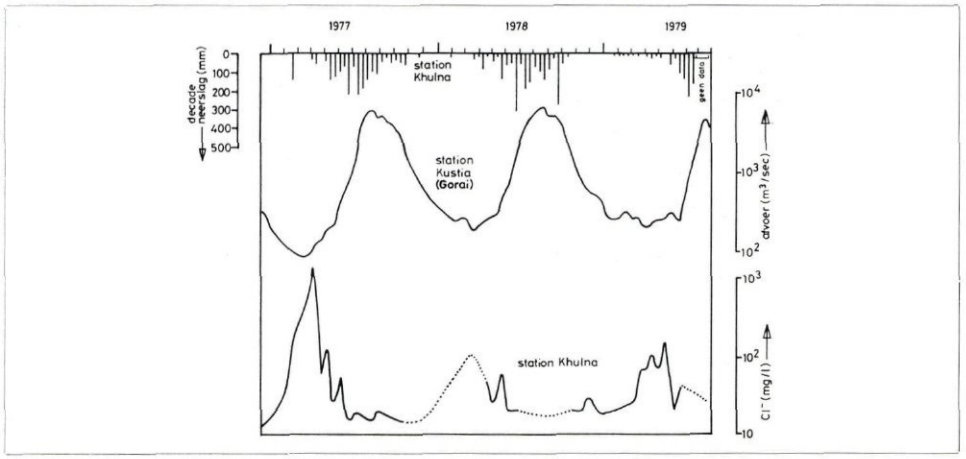
Het drinkwatervoorzieningsproject Khulna, met als doel een voorstudie te maken voor een plan ter verbetering van de drinkwatervoorziening van deze zeer snel groeiende stad, startte in september 1979. De uitvoering lag bij het Ingenieurs en Architectenbureau Haskoning BV



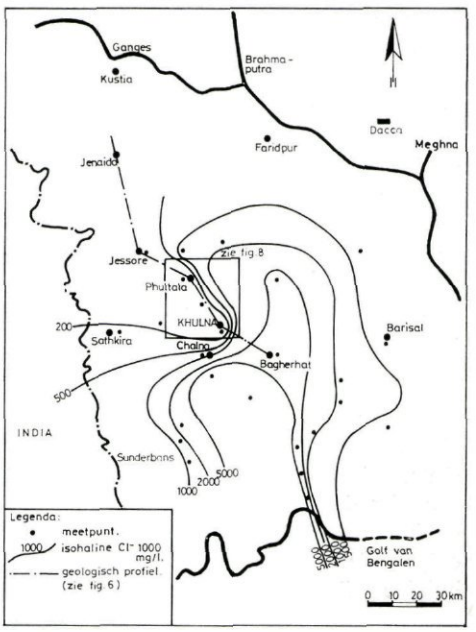
Afb. 1 - Overzichtskaart van Bangladesh en het Bengaalse Bekken.



Afb. 2 - Situatieschets van de stad Khulna en omgeving.



Afb. 3 - Neerslag en chloridegehalte van het rivierwater te Khulna; afvoer van de Gorai rivier te Kustia.



Afb. 5 - Regionale schets van de zoet-zoutverdeling van het diepe grondwater (150 - 350 m).

(projectleiding) en het Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO BV, onder supervisie van het Rijks Instituut voor Drinkwatervoorziening, dat ook de 'terms of reference' opstelde. Binnen dit samenwerkingsverband is een socio-economische en demografische studie uitgevoerd door het Bureau voor Stedebouw F. J. Zandvoort BV, een lekonderzoek door Haskoning en het KIWA (H_2O 5/81) en een studie betreffende organisatie, management, training en tarieven door Imeconsult.

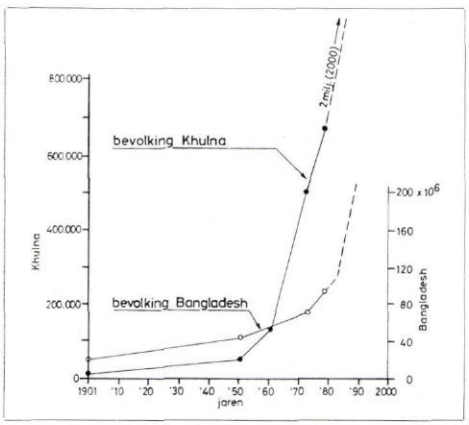
De studie werd opgedragen door het Directoraat Generaal Internationale Samenwerking van het Ministerie van Buitenlandse Zaken. In dit project was IWACO verantwoordelijk voor het 'grondwater' gedeelte. Gezien de onzekerheid met betrekking tot het gebruik van oppervlaktewater in verband met het opdringen van zout water in de rivieren is voornamelijk naar de winning van grondwater gekeken. In het samenwerkingsverband tussen Bangladesh en Nederland was de bijdrage van het 'Department of Public Health Engineering' (D.P.H.E.), dat verantwoordelijk is voor de drinkwatervoorziening, van veel belang.

Met dit artikel wordt beoogd, enkele facetten van het geohydrologisch onderzoek, dat ten grondslag ligt aan de verbetering van de drinkwatervoorziening van Khulna nader toe te lichten. Gezien het ontbreken van basisgegevens is de studie sterk op inventarisatie gericht geweest, hetgeen ook tot uiting komt in dit artikel. Met name wordt ingegaan op de opzet van het onderzoek, dat een regionaal karakter heeft gekregen en waarin gebruik is gemaakt van onder meer boringen, boorgatmetingen, geo-electrisch onderzoek, temperatuurmetingen en grondwatermonsters van een groot aantal handpompen.

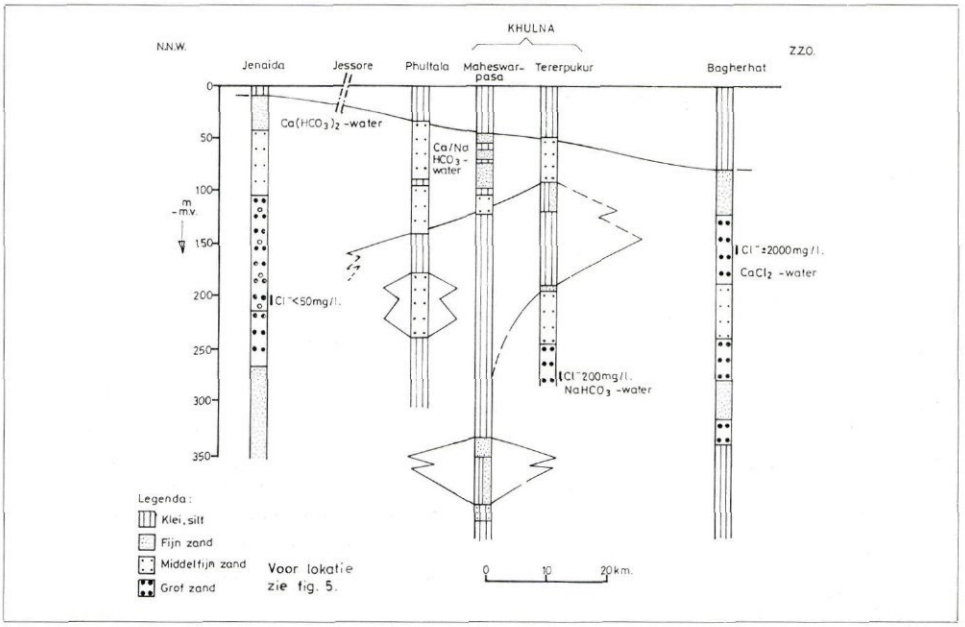
De geologie

De Ganges-Brahmaputradelta vormt een deel van het Bengaalse Bekken, een geo-synclinaal dalingsgebied, dat tot op grote diepte uit onverkitte sedimenten is opgebouwd. Seismische gegevens en olieboringen wijzen op een diepte tot het vaste gesteente van ca. 3000 m. Langs de randen van de delta komen Pleistocene terrassen voor zoals de Barind en de Madhupur (afb. 1). Deze terrassen liggen hoger dan de recente delta, hetgeen op daling van de recente delta wijst. Ook de zich over vele kilometers naar het westen verplaatsende Brahmaputra

Afb. 4 - Bevolkingstoename in Khulna en Bangladesh.



Afb. 6 - Schematisch geologisch profiel NNW-ZZO (Jenaida-Khulna-Bagherhat).

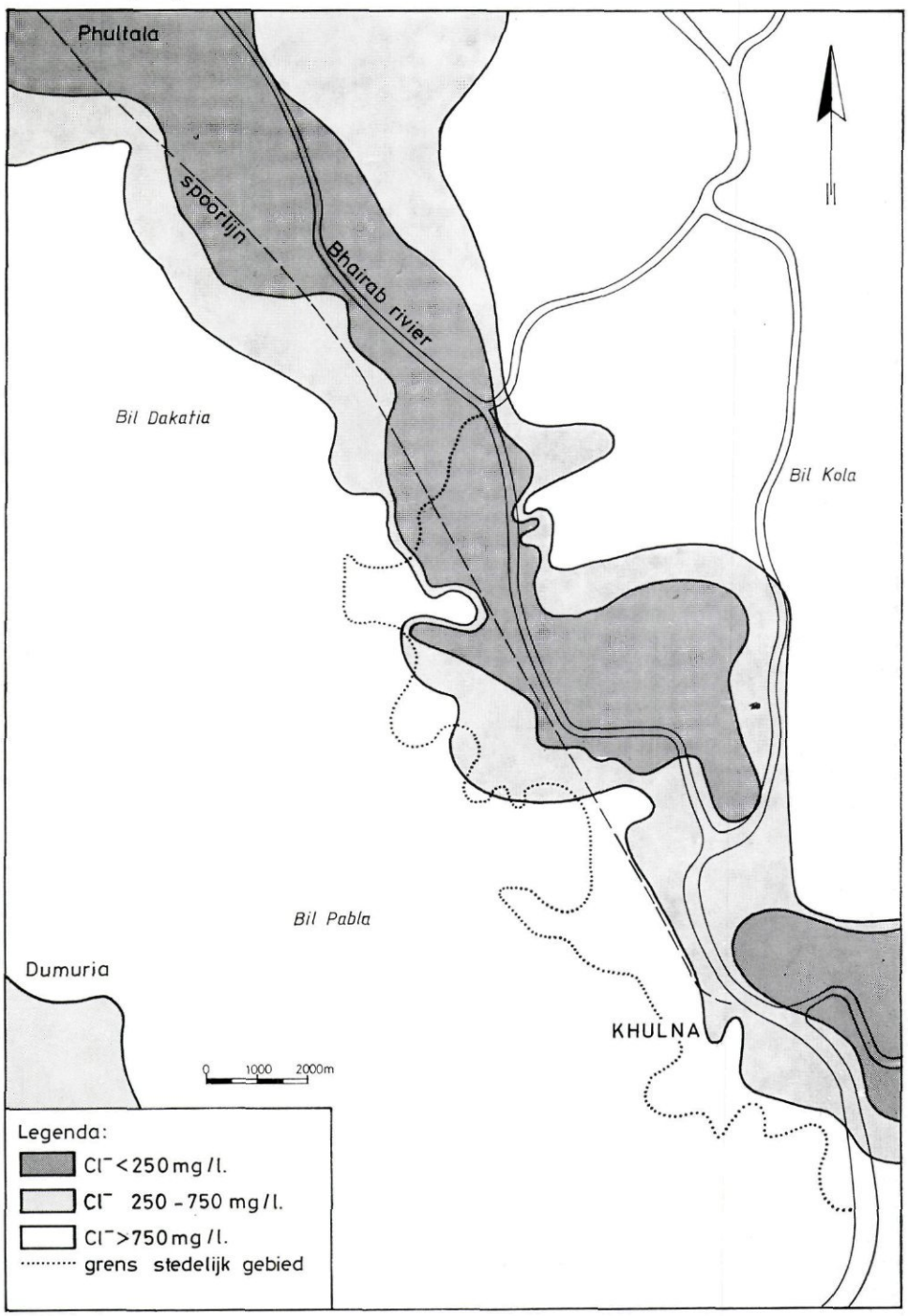


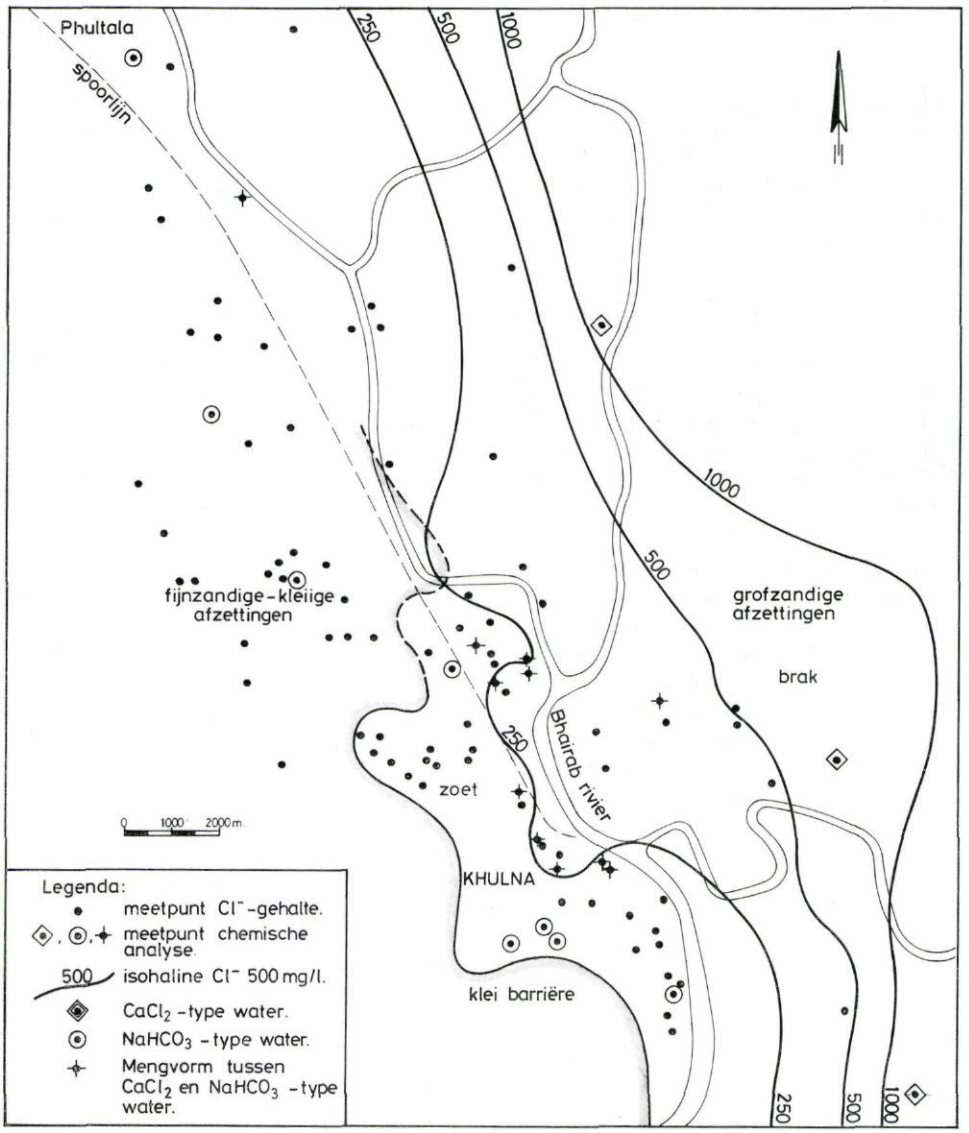
en de sedert enige honderden jaren naar het oosten gaande Ganges wijzen erop, dat de daling nog steeds gaande is. Zowel in de terrassen als in de vlakte zijn er aanwijzingen, dat ook breuktektoniek een rol speelt.
De plaats van de kustlijn in een dergelijk gebied is afhankelijk van de tektonische daling en van de sediment toevoer, terwijl in het Pleistoceen een derde faktor, de relatieve zeespiegelstand tengevolge van de aangroei of het afsmelten van het landijs, van belang is.
De recente sedimenten bestaan voornamelijk uit silt en fijn zand, grijs gekleurd en veel mica bevattend. Het Pleistocene materiaal bestaat uit rood-bruine, sterk geoxideerde silt, klei en fijne zanden.
Gedurende de ijstijden is het zeeniveau enige malen tot ca. 130 m beneden het huidige peil gedaald. De rivieren hebben zich mogelijk tijdens deze lage zeestanden sterk ingesneden, waarbij de delta zich in de richting van de shelf verplaatste.
Zo vonden Depperman en Thiele (1968) in het Barind terras geulen tot diepten van ca. 100 m minus maaiveld. Het is mogelijk dat dit soort geulen, al of niet tektonisch bepaald, ook in het Khulna gebied voorkomen.
Er is in Bangladesh nog geen onderzoek gedaan naar de ouderdom van de sedimenten, waaruit de delta is opgebouwd. In het zuiden worden aan het oppervlak kleilagen gevonden, die in de richting van de kust sterk in dikte toenemen. Waarschijnlijk zijn dit Holocene afzettingen, beïnvloed door de postglaciale zeespiegelrijzing.

De tegenwoordige drinkwatervoorziening van Khulna

Verspreid door de stad liggen 10 productieputten van 150 mm doorsnede met filters op diepten van 150 tot 300 m. Deze putten voeden direct het leidingnet. De debieten variëren van 50 tot 150 m³/h. terwijl slechts een deel van de dag gepompt wordt. Vanwege de grote lekverliezen in het leidingnet, wordt maar een gedeelte van het opgepompte water effectief gebruikt.
Verder zijn in de stad ca. 1000 handpompen in de loop der tijd geplaatst. De meeste van deze handpompen hebben filters op geringe diepte (<100 m), maar zijn onbruikbaar geworden door de slechter wordende waterkwaliteit, met name wat betreft het zoutgehalte.
Een honderdtal van deze zogenaamde 'tube-wells' heeft een filterdiepte van tussen de 150 en de 300 m. De waterkwaliteit van deze putten is beduidend beter.
Totaal wordt er in de stad ca. 25.000 m³/dag onttrokken met een gemiddeld chloridegehalte van 200 mg/l.
Ook buiten de stad zijn op vele plaatsen handpompen aanwezig. Het merendeel van de bevolking gebruikt echter water uit voor dit doel gegraven vijvers, waarin regenwater stagneert, of uit oude verlaten rivierarmen. De kwaliteit daarvan is volstrekt onvoldoende.
De huidige drinkwaterbehoefte is geraamd op ca. 3 maal de huidige productie. De prognoses van de bevolkingsgroei resulteren voor het jaar 2000 in een bevolking van 2 miljoen (afb. 4). Het huidige inwoneraantal is geschat op 665.000 (1979). De behoefte aan drinkwater zal toenemen tot ca. 265.000 m³/dag (97 miljoen m³/jaar) in het jaar 2000.
De taak van IWACO was om in de voorstudie een behoeftedekkingsplan op te stellen, waarin aangegeven moest worden waar en in welke hoeveelheden grondwater onttrokken zou kunnen worden. Belangrijke randvoorwaarden hierin waren de risico's ten aanzien van de aantrekking van brak en zout grondwater,

Afb. 7 - Zoet-zoutverdeling in de bovenste zone van het ondiepe watervoerende pakket (15 - 100 m) in Khulna en omgeving.





Afb. 8 - Zoet-zoutverdeling en waterkwaliteit in het diepe watervoerende pakket (150 - 350 m) in Khulna en omgeving.

het toelaatbare zoutgehalte van het af te leveren water en de transportkosten van het onttrekkingspunt tot de verbruikscentra.

De opzet van het regionale onderzoek

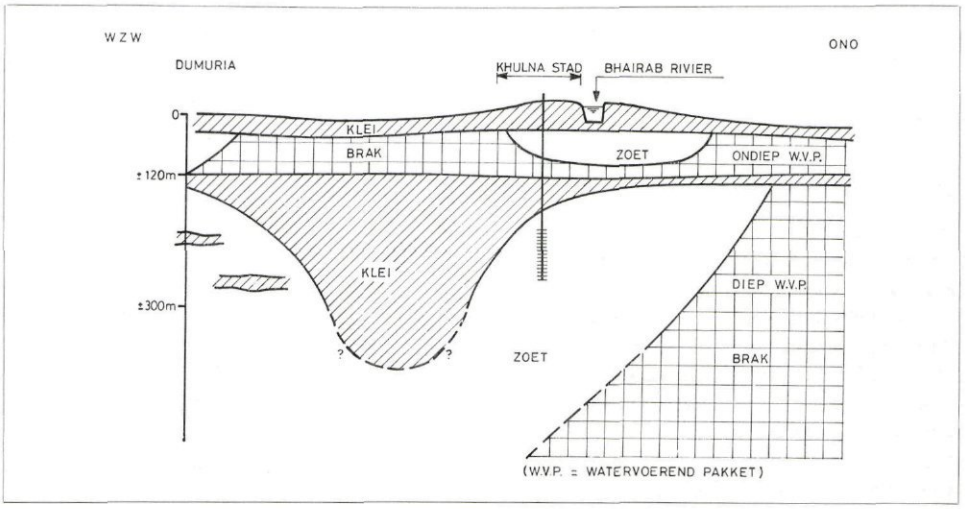
Ten tijde van de voorbereiding voor het 'Khulna Project' waren slechts gegevens van een klein aantal boringen uit de stad zelf bekend. Hieruit bleek reeds, dat de geohydrologische situatie nogal complex was. De chloridegehaltes varieerden van 20 mg/l tot meer dan 1500 mg/l, terwijl er in Khulna sprake was van een diep en een ondiep watervoerend pakket.

Het veldonderzoek werd dan ook gestart met een regionale inventarisatie van bestaande boringen. Hoewel geologische gegevens vaak niet meer te achterhalen waren, was meestal wel de diepte van het filter bekend. Van de putten werden de geleidbaarheid (EC) en de temperatuur gemeten en van het water uit een aantal geselecteerde handpompen werd een volledige chemische analyse gemaakt. In een gebied van 1500 km² werden met inschakeling van D.P.H.E. ca. 100 boringen geïnventariseerd. In deze eerste fase van het onderzoek werd ook gestart met een geo-electrische verkenning. Nadat uit deze metingen een beeld verkregen was van de hydrogeologische situatie, kon in de tweede fase van het project nader onderzoek verricht worden in gebieden, die als gunstig uit de eerste fase naar voren gekomen waren. In deze tweede fase werden 19 boringen gezet en werd het geo-electrische oppervlakte onderzoek verder uitgebreid.

De hydrogeologische opbouw van het gebied

In het noorden van het gebied bij Jessore (afb. 5) komen grove zanden voor tot diepten van tenminste 250 m. Dit is ook de einddiepte van de meeste boringen. Het afdekkende pakket van Holocene kleien is hier dun. De chloridegehaltes zijn over het algemeen zeer laag (<50 mg/l). Naar het zuiden gaande worden de afzettingen fijner en neemt de dikte van het afdekkende pakket toe (afb. 6). In de omgeving van Khulna komen op diepten tussen de 100 en de 200 m kleilagen voor, die het watervoerende pakket in tweeën delen. In het eerste watervoerende pakket bestaat een duidelijk verband tussen het chloridegehalte en de hoogteligging van het terrein. Op de hogere delen, zoals de rug van Khulna, is het eerste pakket bovenin zoet, terwijl in de lager gelegen 'bils' chloridegehaltes van boven de 750 mg/l voorkomen. In afb. 7 is de zoet-zoutverdeling in de bovenste zone van het

Afb. 9 - Schematisch hydrogeologisch dwarsprofiel van de stad Khulna.





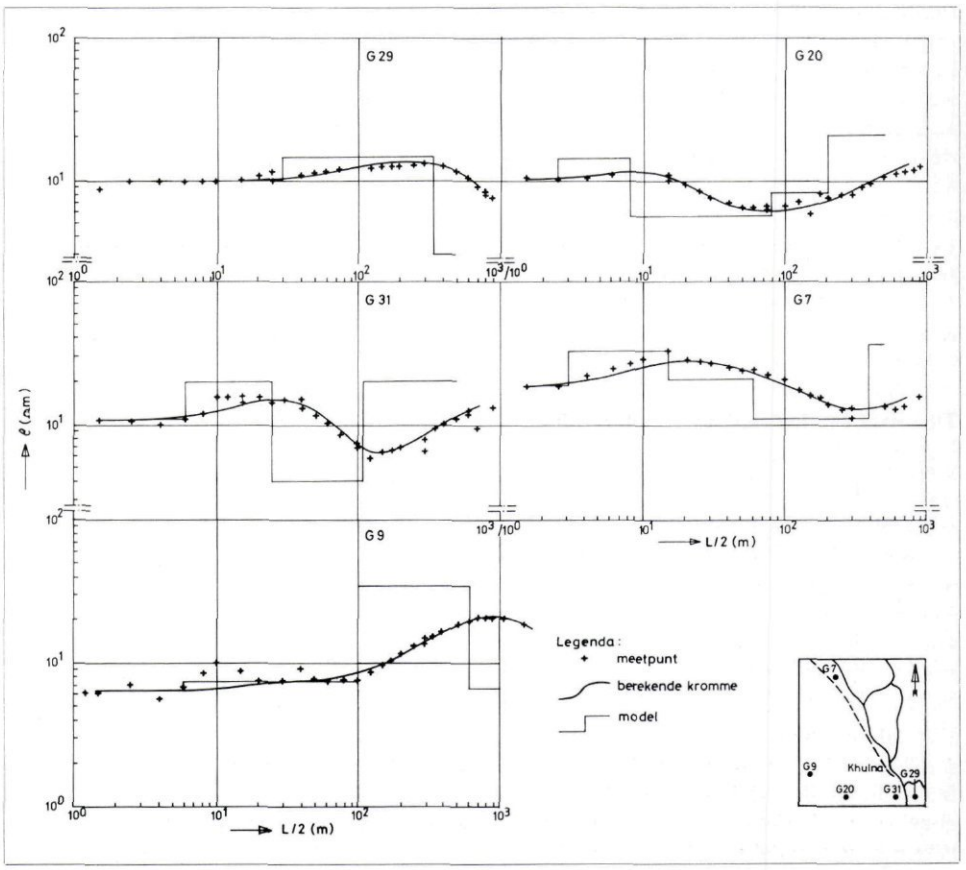
Transport van geo-electrische apparatuur.

ondiepe watervoerende pakket weergegeven.
Aan de basis van dit pakket komen roodbruine zanden voor, die overeenkomst vertonen met de beschrijvingen van de Pleistocene terrassen (afb. 6).
Het diepe watervoerende pakket bevat onder de stad Khulna zoet water (afb. 8). Ten oosten van de stad aan de overkant van de rivier bevat dit pakket brak grondwater. De scheidende kleilagen zijn hier dun of ontbreken.
De toename van het chloridegehalte in het diepe pakket in oostelijke richting blijkt ook uit afb. 5. Hoewel op weinig meetpunten gebaseerd geeft deze kaart toch een samenhangend beeld. Opmerkelijk is, dat in het zoute kustmoeras op enkele plaatsen lage chloridegehaltes werden gemeten.
Ten westen van Khulna zijn dikke kleilagen gevonden. De basis van dit kleipakket ligt dieper dan 300 m en kon met de beschikbare boringen niet aangetoond worden.
In afb. 9 is schematisch de hydrogeologische situatie bij Khulna weergegeven. Uit deze afbeelding blijkt de kritieke ligging van de stad voor de winning van diep grondwater met in het oosten een nabij gelegen zoutfront en in het westen een kleibarrière.

Het geo-electrische onderzoek

In totaal werden in het onderzoeksgebied 35 geo-electrische metingen geplaatst, met een ½ L van gemiddeld 900 m in de Schlumberger opstelling. De gebruikte voeding bestond uit een drie fasen generator met een transformator/gelijkrichter met maximaal 2000 V uitgangsspanning. Het vermogen van deze apparatuur is 2000 W. Voor de meting van het potentiaalverval werd een Fluke digitale multimeter gebruikt in serie met een compensator.
Een groot probleem bij het opzetten van het geo-electrische meetprogramma in dit gebied was de ontoegankelijkheid van het terrein. Ook in het droge seizoen bleken de 'bils' onbereikbaar voor terreinvoertuigen en kon alleen langs de randen gemeten worden.
Volledigheidshalve wordt hieronder kort een toelichting op de geo-electrische methode gegeven. Bij de geo-electrische methode wordt via twee stroomelectroden een stroom de grond ingestuurd, terwijl het potentiaalverval tengevolge van deze stroom gemeten wordt tussen de meetelectroden. De stroomdichtheid van gelijkstroom in de verschillende lagen waaruit de ondergrond is opgebouwd staat in directe relatie tot de specifieke electrische weerstand van deze lagen. Het potentiaalverval, dat aan de oppervlakte gemeten wordt, is ook een directe afspiegeling van de weerstanden in de ondergrond. Door de stroomelectroden steeds verder uit elkaar te plaatsen zal de stroom steeds dieper de grond indringen. Wanneer we nu de gemeten weerstand uitzetten tegen de halve afstand tussen de stroomelectroden ontstaat de veldkromme, die later met behulp van standaardkrommen en met programmeerbare zakrekenmachines geïnterpreteerd kan worden.
Een grote beperking van de geo-electrische methode is de equivalentie, d.w.z. een zand met brak water en een zand met een zeker kleipercentage kunnen dezelfde electrische weerstand opleveren. Vooral dit equivalentieprincipe beperkte de toepasbaarheid van de methode in Bangladesh.
Met de empirisch gevonden formule van Archie kan nu uit de geïnterpreteerde specifieke weerstand de waterstand berekend worden.

Afb. 10 - Geo-electrische oppervlaktemetingen G7, G9, G20, G29 en G31.





Dubbelwerkende pomp voor de circulatie van de boorspoeling.

$\varrho s = F \times \varrho w$

ϱs = specifieke formatieweerstand
F = formatie factor
ϱw = waterweerstand

De weerstand van zoet water met een chloridegehalte kleiner dan 250 mg/l bleek in het onderzoeksgebied ca. 7 Ohmm te zijn. Met een geschatte formatiefactor van 3 komen we op een weerstand van met zoet water verzadigd sediment van > 20 Ohmm. Dit betekent dat bij waarden < 20 Ohmm, of het formatiewater brak of zout is, of dat kleien in de formatie voorkomen.
In afb. 10 zijn een aantal representatieve metingen weergegeven. Meting G29 aan de oostzijde van de rivier geeft lage weerstanden te zien, wijzend op brak water. Meting G31 geeft tot 100 m diepte lage weerstanden overeenkomend met een verzilt eerste pakket, hieronder stijgt de kromme tot een geïnterpreteerde weerstand van 20 Ohmm, d.w.z. een zoet tweede pakket. Ter plaatse van beide metingen bestaan de eerste en tweede watervoerende laag voornamelijk uit zand, en geven de metingen goede informatie over de zoet-zoutverdeling.
Meting G20 geeft ook een weerstand van ca. 20 Ohmm voor het diepe pakket, hier is echter uit boringen in de omgeving bekend dat er dikke pakketten klei en silt voorkomen. Hier laat de geo-electrische methode meerdere interpretaties toe.
Wel kan uit de voor klei en silt hoge weerstanden de conclusie getrokken worden, dat het om in zoet milieu afgezette sedimenten gaat. Meting G9 in het gebied van Dumuria met een ½ L van 1500 m, de langste meting die is uitgevoerd, leverde een hoge weerstand voor het tweede pakket op. In dit gebied zijn geen dikke kleien gevonden, zodat verondersteld wordt, dat het tweede pakket hiet zoet grondwater bevat. Op een geïnterpreteerde diepte van 600 m daalt de curve. Uit deze meting zou de conclusie getrokken kunnen worden dat het tweede pakket een dikte van ca. 500 m heeft. Diepe boringen zijn echter noodzakelijk om equivalentie uit te sluiten.

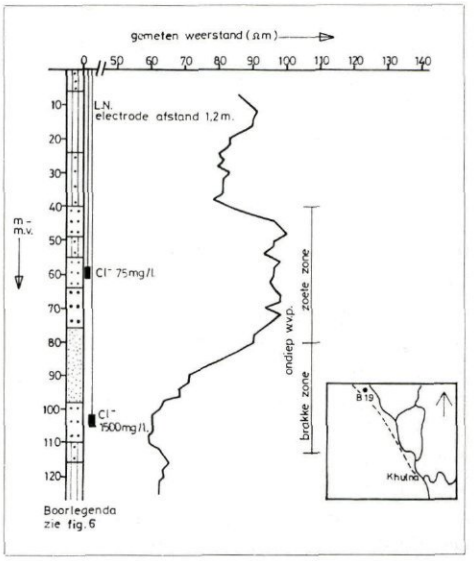
Het boorprogramma

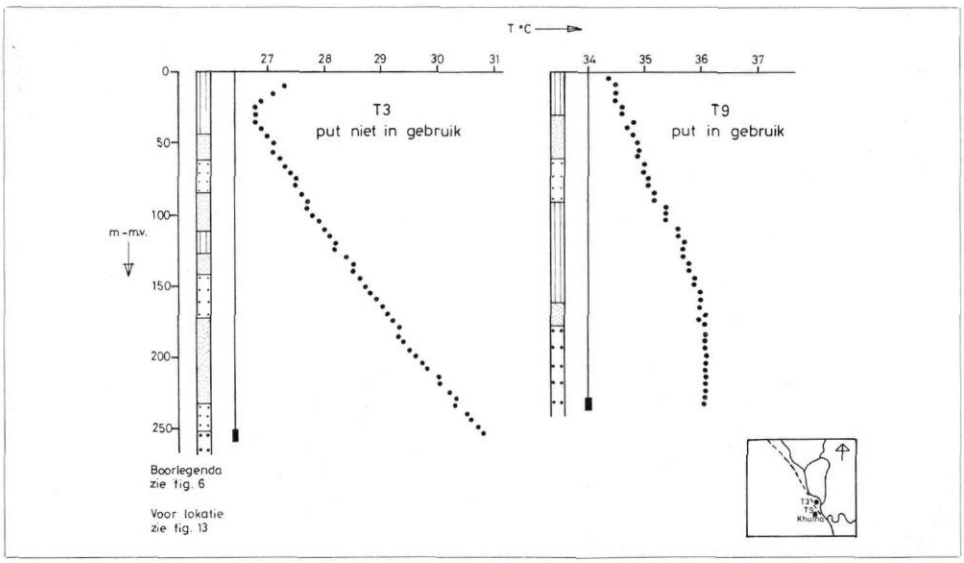
In de tweede fase van het project werden 16 diepe (gem. tot 300 m) en 3 ondiepe boringen door locale aannemers gemaakt. Met een boorstelling ten dele van bamboe gemaakt en gegalvaniseerde ijzeren dikwandige pijp als boorbuis weten deze 'boormeesters' volledig met handkracht een boring tot 350 m diepte in een tijdsbestek van twee weken te maken. De kosten van een dergelijke boring op het principe van roterend spoelboren zijn 2000 tot 3000 gulden. Een nadeel is echter dat per boring slechts één waarnemingsfilter geplaatst kan worden.
Bij de boorspoeling wordt gebruik gemaakt van koemest, waardoor de boorgatwand afgepleisterd wordt. Het gevolg hiervan is wel dat nog vele maanden na het installeren van de handpomp het water bacteriologisch onbetrouwbaar is.
Met een eenvoudige pomp wordt de spoeling rondgepompt en worden grondmonsters uit een bezinkvijver genomen. De monsters bleken van redelijke kwaliteit te zijn. Het kritieke moment bij een dergelijke boring is het trekken van de boorbuis en het plaatsen van een filter. Daar er op dat ogenblik geen overdruk is, bestaat de kans dat het boorgat in elkaar klapt. Er is dan ook geen tijd om met boorgatmeetapparatuur in het gat metingen te verrichten. Om toch wat meer informatie te verkrijgen, met name omtrent de vertikale zoet-zoutverdeling, werden met losse kabels weerstandsmetingen in het boorgat gedaan. Tegelijk met het inlaten van het filter met stijgbuis werden 4 dunne kabels, vastgemaakt aan het filter mee de diepte ingebracht.
De einden van de kabels waren op afstanden van 20, 40 en 120 cm aan elkaar bevestigd. Na de installatie van het filter werden de kabels losgetrokken en werden de weerstanden met een interval van 1 m gemeten.
Als meetinstrument diende de Norma aardingsweerstandmeter, die als stroombron een wisselspanning met hoge frequentie heeft (100 hz). De gemeten weerstandswaarden kwamen echter veel hoger uit, dan uit de geschatte formatiefactor en de waterweerstand verwacht kon worden.
Waarschijnlijk is dit het gevolg van het 'skin' effect, waardoor een te hoog spanningsverval gemeten wordt. Dit blijkt ook uit vergelijking van de Short-Normal (SN) met de Long-Normal (LN). Beide logs vertonen dezelfde detaillering. Kwalitatief zijn de weerstandmetingen echter van groot nut gebleken. In afb. 11 is een weerstandsopname in boring B 19 weergegeven. Uit de log blijkt dat het onderste deel van het eerste watervoerende pakket verzilt is. Geo-electrische meting G7 (afb. 10) ligt in de buurt van deze boring.

Temperatuur onderzoek

Bij de regionale inventarisatie werd steeds de temperatuur van het door de hand-

Afb. 11 - Weerstandslog te Phultala (B19).





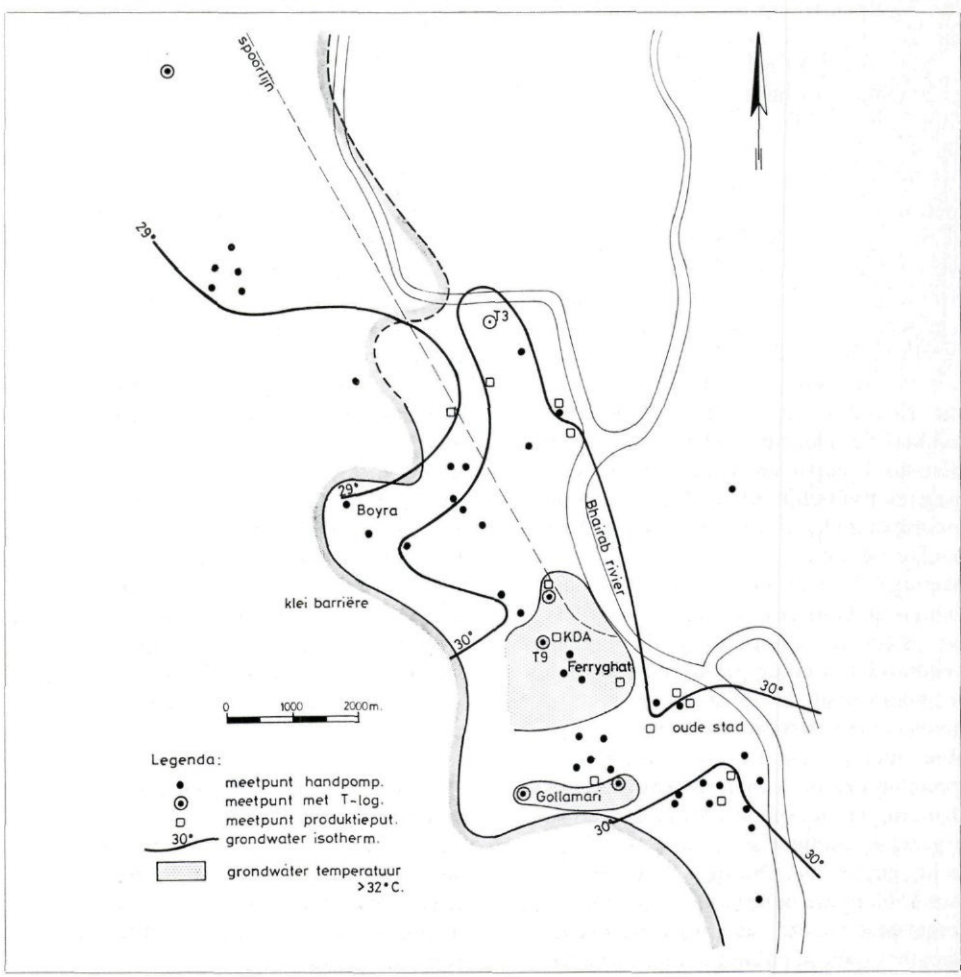
Afb. 12 - Temperatuurmetingen T3 en T9 in Khulna.

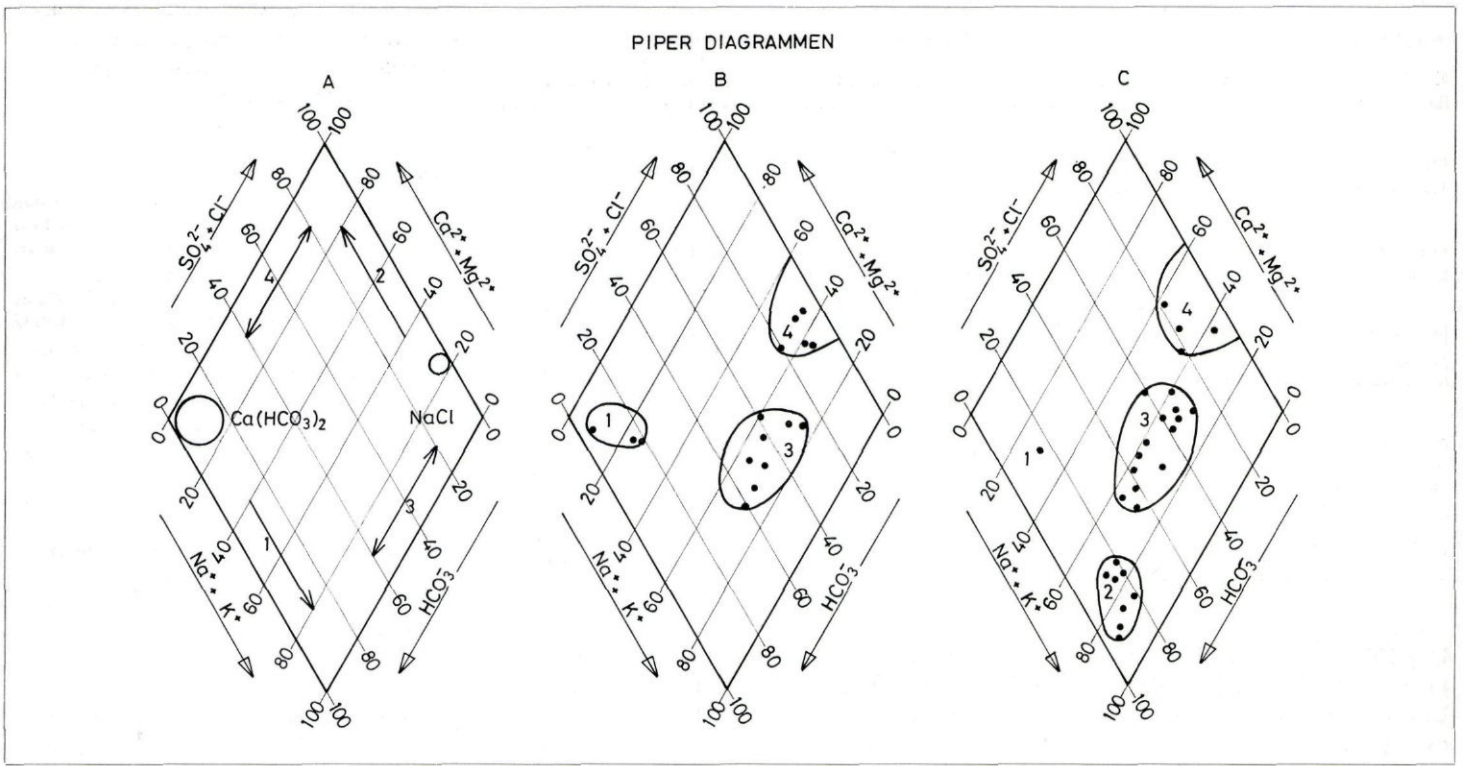
pompen opgepompte water, als routine gemeten. Deze metingen vormen een goede controle op de informatie van de bevolking over de diepte van het pompfilter, d.w.z. of uit het eerste of uit het tweede watervoerende pakket gewonnen werd. Een temperatuurverschil van ca. 3 °C tussen de twee pakketten was normaal. Voor het eerste pakket werden temperaturen van gemiddeld 27 °C en in het diepe pakket van 30 °C gemeten. In de stad werden op enkele pompstations zeer hoge temperaturen van uit het tweede pakket gewonnen water gemeten.
Om meer inzicht in de temperatuurverdeling te krijgen, werd met een weerstands thermometer, bevestigd aan een kabel, het temperatuurverloop met de diepte van een aantal putten gemeten (afb. 12). Een probleem hierbij was, dat de putten continu in gebruik zijn en dat alleen ten behoeve van de meting de handpomp verwijderd werd. De temperatuur van het water in de stijgbuis was dus niet in evenwicht met de temperatuur van de formatie. Dit blijkt vooral uit de knik in de kromme ter hoogte van de bovenkant van het filter (afb. 12, T9). De grondwatertemperatuur ter plaatse van het filter kon evenwel nauwkeurig vastgesteld worden.
In afb. 13 is de temperatuurverdeling in het diepe pakket rond de stad weergegeven. Vooral het gebied K.D.A.-Ferryghat, waarin twee pompstations liggen is afwijkend met temperaturen boven de 34 °C. Deze anomaliën zouden te verklaren zijn door een diepe, naar boven gerichte grondwaterstroming aan te nemen. Pompproef uitkomsten in dit gebied leveren kD-waarden op, die hoog zijn in verhouding tot de dikte en doorlatendheid van de in het algemeen fijnzandige afzettingen waarin zich de putfilters bevinden. Hieruit zou ook geconcludeerd kunnen worden, dat er voeding vanuit de diepte plaatsvindt. De onzekerheid omtrent de diepte van de geohydrologische basis heeft belangrijke konsekwenties voor de juistheid van bovengenoemde veronderstelling. Enerzijds zou bij een diepe ligging van de basis zoet grondwater aangetrokken kunnen worden van onder de kleibarrière in het westen van Khulna, anderzijds is verzilting vanuit diepere lagen van de oostzijde van de stad niet uitgesloten.

Hydrochemie

In totaal werden 43 grondwater- en oppervlaktewatermonsters in het IWACO laboratorium in Rotterdam geanalyseerd. Enerzijds diende de analyse om de geschiktheid voor drinkwaterbereiding van het grondwater te beoordelen, anderzijds om een inzicht in de herkomst van het grondwater te geven.
Voor de presentatie van de resultaten werd het Piperdiagram gekozen, daar het de processen van verzilting en verzoeting duidelijk naar voren laat komen. Het diagram is gebaseerd op de procentuele samenstelling van de anionen en kationen (afb. 14). Wanneer in een aquifer zout water (NaCl-type) vervangen wordt door zoet $Ca(HCO_3)2$-water, treedt kationenuitwisseling op, waarbij het water verrijkt wordt aan Na^+.

Afb. 13 - Temperatuurverdeling van het diepe grondwater (200 - 300 m) in Khulna.





Afb. 14 - Piper diagrammen: Processen van kationen uitwisseling en menging (A), Analyses ondiepe w.v.p. (B), Analyses diepe w.v.p. (C).

We noemen water dat dit proces ondergaan heeft $NaHCO_3$-water. Het omgekeerde treedt op wanneer zout NaCl-water oorspronkelijk zoet water verdringt. Het water wordt nu verrijkt aan Ca^{2+}, dit watertype wordt $CaCl_2$-water genoemd.
Op het piperdiagram van afb. 14A, zijn schematisch de verschillende typen water aangegeven. Pijl 1 geeft de verrijking van Na^+ aan door verzoeting, pijl 2 de verandering van zout water wanneer verzilting optreedt. Tussen de verschillende typen kan ook menging optreden (pijl 3 en 4).

In afb. 14B en 14C zijn de analyses van de ondiepe en diepe aquifer weergegeven. Er zijn een aantal duidelijke velden te onderscheiden: veld 1 $Ca(HCO_3)2$-water, veld 2 $NaHCO_3$-water, veld 3 een mengvorm tussen $NaHCO_3$- en $CaCl_2$-water en veld 4 $CaCl_2$-water. In het eerste watervoerende pakket komen de verschillende typen afhankelijk van lokale infiltratie van zoet of zout water tamelijk willekeurig voor.
In het diepe pakket daarentegen is wel een duidelijk regionaal verband. Het $NaHCO_3$-type komt voor ten westen van Khulna, terwijl in het oosten in een drietal boringen $CaCl_2$-type grondwater aangetoond werd. Hier is ook het chloridegehalte vrij hoog. Type 3 vinden we tussen het $NaHCO_3$- en het $CaCl_2$ gebied in.
In afb. 8 zijn de verschillende watertypen als ook het chloridegehalte in het diepe pakket weergegeven.
Zowel de procentuele samenstelling als het chloridegehalte wijst op menging tussen zout water in het oosten en zoet water in het westen van het gebied.

Conclusies

De met grove zanden opgevulde geulen in het Pleistocene Barind terras en de met klei en silt gevulde geul ten westen van Khulna zijn waarschijnlijk tijdens één van de laatste ijstijden ontstaan. De zeespiegelrijzing die volgde op het glaciaal kan door stuwing de oppervlakte-afvoer vertraagd hebben, waardoor de geulen in het zuiden met fijn materiaal gevuld werden.
De snelle zeespiegelrijzing na het laatste glaciaal heeft overal in de wereld in de lage gebieden mariene transgressies tot gevolg gehad. De aanwezigheid van zout grondwater in het eerste watervoerende pakket in de lage gedeelten van het bestudeerde gebied zou het gevolg kunnen zijn van een recente (Holocene) transgressie.
Het voorkomen van $NaHCO_3$-water wijst erop dat dit zoute water nu vervangen wordt door zoet $Ca(HCO_3)2$-water, dat regionaal gezien vanuit de infiltratiegebieden in het noorden toestroomt.
Ook de hoger gelegen gebieden, zoals de rug van Khulna zijn als infiltratiegebieden op te vatten.

Het onderzoek heeft geresulteerd in een aantal voorlopige locaties voor grondwaterwinning. Deze gebieden zijn (afb. 2):

— Khulna,
diep watervoerend pakket

— Dumuria,
diep watervoerend pakket

— Phultala,
diep en ondiep watervoerend pakket

— Oostzijde van de Bhairab,
ondiep watervoerend pakket

Voor de stad Khulna — waar verhoudingsgewijs over meer geohydrologische informatie beschikt kon worden dan in de overige gebieden — is met behulp van enkele eenvoudige modelberekeningen, gebaseerd op het principe van 'mining' (mijnbouw van zoet grondwater) een globale schatting van de mogelijk te onttrekken hoeveelheden gemaakt. Als criteria golden een periode van 30 jaar en een toelaatbaar chloridegehalte van 250-300 mg/l.
Door de aanname van een 'mining' systeem in een 'confined' watervoerend pakket, waarbij de aanvoer van zoet grondwater uit de infiltratiegebieden wordt verwaarloosd, zijn de berekeningen aan de veilige kant. Daar tegenover staat, dat niet bekend is in hoeverre grondwaterstroming vanuit de diepere ondergrond de situatie gunstig of ongunstig beïnvloedt (temperatuur onderzoek).

Wingebied	m^3/jaar x 10^6	Voordelen	Nadelen	Onzekerheden
Khulna diep w.v.p.	25 - 30	– relatief korte transportleidingen	– diepe putten – gemiddeld hoog zoutgehalte	– opkegeling van verzilt grondwater uit diepere lagen
Dumuria diep w.v.p.	25 - 30	– ligging in een overwegend zoet gebied	– relatief lange transportleidingen – diepe putten	– verbreiding water-voerende lagen
Phultala diep w.v.p.	25 - 30		– relatief lange transportleidingen – diepe putten	– onzekerheden betreffende laterale en verticale zoet-zoutverdeling
Phultala/ Jessore ondiep w.v.p.	5 - 10	– ondiepe putten	– relatief lange transportleidingen – verspreide winning	– opkegeling van verzilt grondwater uit onderste laag van ondiep watervoerend pakket
Oostzijde Bhairab rivier ondiep w.v.p.	5 - 10	– ondiepe putten	– aanleg zinker(s) in de rivier – verspreide winning	– opkegeling van verzilt grondwater uit onderste laag van ondiep watervoerend pakket – continuïteit en weerstand van scheidende kleilagen

Dezelfde soort berekeningen zijn toegepast ter bepaling van de mogelijkheden van grondwaterwinning in de overige gebieden, hetgeen geresulteerd heeft in het bovenstaande overzicht.

Dit overzicht kan gezien worden als een mogelijk behoeftedekkingsplan tot het jaar 2000. In ieder gebied zal echter nader gedetailleerd geohydrologisch onderzoek moeten plaatsvinden om genoemde onttrekkingsmogelijkheden te verifiëren. Daarnaast zal naar andere bronnen gekeken moeten worden om de drinkwatervoorziening na het jaar 2000 veilig te stellen.
De mogelijke winning in de directe omgeving van Khulna heeft voorrang, omdat hiermee hoge investeringen, die transportleidingen vergen, vermeden worden. Deze oplossing houdt echter in, dat water met een hoog chloridegehalte ($\geqslant$ 200 mg/l) gedistribueerd wordt.
Ten westen van de kleibarrière in het gebied Dumuria is de situatie gunstiger. Op een diepte tussen de 150 en 300 m komen, zij het lokaal, grofzandige pakketten voor, afgedekt door kleilagen. Het chloridegehalte bedraagt ca. 50 mg/l, terwijl uit geo-electrische metingen verwacht kan worden, dat de aquifer tot op grote diepte zoet is.
Hoewel slechts weinig boringen in de omgeving van Phultala ten noorden van Khulna bekend zijn, mag verondersteld worden, dat de geohydrologische situatie hier vergelijkbaar is met die in Khulna. Ter plaatse wordt echter een grotere laterale verbreiding van het zoete grondwater in het ondiepe watervoerende pakket aangetroffen.
Wat dit pakket betreft is vanwege het gevaar van opkegeling van zout grondwater (boorgat onderzoek), winning op grote schaal niet mogelijk, maar wel in de vorm van diffuse onttrekkingspunten, wat ook nu gedaan wordt. Dezelfde problematiek geldt voor het gebied ten oosten van de Bhairab rivier.

Slotopmerking

De hydrogeologische situatie in Bangladesh vertoont enige analogieën met de problemen die in Nederland bij de opsporing en winning van grondwater overwonnen moeten worden.
Allereerst is dat de zoet-zout problematiek als ook de voeding en herkomst van het zoete grondwater. Zoals in Nederland een deel van de problematiek opgelost kan worden met een gedetailleerde Kwartair (litho) stratigrafie, zal ook in Bangladesh aandacht aan deze onderzoeksmethode gegeven dienen te worden. Ook het voorkomen en de verbreiding van het brakke grondwater verdient meer aandacht. Een regionale studie naar de zoet-zoutverdeling in relatie tot de Kwartair stratigrafie zou de opsporing van grondwater in de toekomst eenvoudiger maken.
De lokale booraannemers kunnen hierbij een belangrijke rol spelen. Naast de geringe kosten en het grote aantal mensen dat met hoog gekwalificeerd werk belast wordt, is met de lokale boorstellingen het gehele gebied bereikbaar. Wel zal het gebruik van boorspoelingstoeslagen geïntroduceerd moeten worden om het boorgat te stabiliseren wanneer de boorbuizen getrokken worden, zodat boorgatmetingen uitgevoerd kunnen worden.
Voor het litho-stratigrafisch onderzoek dienen echter methoden gevonden te worden, die een meer nauwkeurige monstername garanderen.

Literatuur

1. Bangladesh Geological Society (1979). *Groundwater Resources of Bangladesh.* Seminar held on October 25, 1979. Atomic Energy Centre, Dacca.
2. Bangladesh Water Development Board. *Groundwater Investigation in Bangladesh.* Water Supply Papers of the Groundwater Circle BWDB.
3. Depperman, K. and Thiele, J. (1968). *Geo-electric resistivity survey in East Pakistan.*
4. IWACO BV (1981). *Khulna Water Supply Project.* Volume III. Groundwater resources.
5. Morgan, J. P. and Mc.Intire, W. G. (1959). *Quarternary geology of the Bengal Basin, East Pakistan and India.* Bulletin Geol. Soc. America (70) 1959, 319-342.
6. Rashid, H. E. (1977). *Geography of Bangladesh.* University Press Limited, Bangladesh.

● ● ●

KOMO-Bestuur uitgebreid

Het Bestuur van de Stichting KOMO is uitgebreid met een drietal uit het bedrijfsleven afkomstige leden door het zitting nemen van de heren ing. W. T. van Amstel (Polva Nederland BV te Enkhuizen), ir. W. H. M. van Lange (Beton Son BV te Son) en M. I. Platschorre (Mebin BV te 's-Hertogenbosch).
De heer Van Lange vervult daarmee de vacature die was ontstaan door het aftreden van ir. J. Kamminga (Bonna Vianen).
Het aantal uit het bedrijfsleven afkomstige bestuursleden is hiermee van vier op zes gekomen.
Het ligt in de bedoeling dit aantal dit jaar nog eens met drie uit te breiden, waardoor de belangrijke rol die het bedrijfsleven op het gebied van de kwaliteitsverklaringen voor de bouw speelt, duidelijker in de samenstelling van het Bestuur tot uiting komt.

● ● ●